



**Simulador de Redes de Distribuição de Energia
Elétrica com Geração Distribuída**

Manual do Usuário

(Versão do programa 4.00)



Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Visão Geral do Programa	1
1.2	Características do Simulight	2
1.3	Tipos de Estudos	3
1.4	Instalação	3
1.5	Informação e Suporte	6
2	Modelos dos Componentes	7
2.1	Modelos de Geradores	7
2.2	Modelos de Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão.....	8
2.3	Modelos de Reguladores de Velocidade	10
2.4	Modelos de Dispositivos de Proteção	10
3	Metodologias de Solução	11
3.1	Fluxo de Potência.....	11
3.1.1	Modelos dos Componentes.....	12
3.2	Solução do Problema de Fluxo de Potência	15
3.2.1	Método de Newton-Raphson	16
3.2.2	Fluxo de Potência pelo Método de Newton-Raphson.....	17
3.3	Simulação da Dinâmica para Estudos de Estabilidade Transitória	18
3.3.1	Modelo do Sistema de Potência	18
3.3.2	Representação da Máquina Síncrona e de seu Sistema de Excitação	19
3.3.3	Representação do Sistema de Transmissão e das Cargas	19
3.3.4	Formulação Geral do Problema	20
3.3.5	Método de Solução Numérica para as EDO's	21
3.3.6	Esquemas de Solução para as Equações do Simulador	21
3.3.7	Esquema geral do Método Alternado Implícito	23
3.3.8	O Esquema Alternado Entrelaçado Implícito.....	25
4	Iniciando o Simulight	26
4.1	Tela de Abertura	26
4.2	Menus do Simulight.....	27
4.2.1	Menus	27
4.2.2	Localizar	29
4.3	Definir Topologia	29
4.4	Importar Dados do PRAO.....	32
4.5	Importar dados do ADEPT	35
4.6	Importar dados do ANAREDE:	37
4.7	Controle de Empresas.....	39
4.8	Salvar um Caso	40
5	Preparação de Dados	41

5.1	Painel Rede Elétrica	41
5.2	Representação das Áreas.....	42
5.3	Representação das Subestações.....	43
5.3.1	Pontos (Barramentos/Nós)	43
5.3.2	Dispositivos Shunts	45
5.3.3	Dispositivos Séries	48
5.3.4	Dispositivos Lógicos	51
5.3.5	Medidores.....	53
5.3.6	Proteção.....	56
5.3.7	Linhas de Conexão	59
5.4	Dispositivos Definidos pelo Usuário	61
5.4.1	Introdução	61
5.4.2	Meta – linguagem XML.....	61
5.4.3	Formato de Entrada de Dados de um Novo Modelo.....	62
5.4.4	Início de Definição	63
5.4.5	Parâmetro	63
5.4.6	Ponto de Entrada / Saída	64
5.4.7	Medição de Tensão.....	64
5.4.8	Blocos Elementares.....	65
5.4.9	Exemplo da implementação de um modelo.....	67
6	Utilização do Programa	69
6.1	Fluxo de Potência.....	69
6.2	Controle de Eventos.....	71
6.3	Simulação Completa	75
6.4	Relatórios.....	78
6.4.1	Esforços Torcionais na GD	79
6.5	Curto-Circuito	81
6.5.1	Uso da Ferramenta	82
6.5.2	Configuração e Execução	83
6.5.3	Relatórios de Resultados	85
6.6	Ilhas Elétricas	89
6.7	Alteração Automática de Carga	89
6.8	Sistema Equivalente.....	91
6.8.1	Formulação do Equivalente de Rede	91
6.8.2	Equivalente Estático e Dinâmico Simplificado.....	92
6.8.3	Conectividade das Barras no Sistema Retido	93
6.8.4	Interface Gráfica da Ferramenta de Equivalente de Rede	93
6.8.5	Exemplo - Sistema Equivalente.....	95
7	Exemplos	101
7.1	Exemplo 01: Sistema 9 barras.....	101
7.1.1	Dados Fluxo de Potência.....	101
7.1.2	Definindo uma topologia no Simulight.....	103

7.1.3	Executando Fluxo de Potência.....	108
7.2	Exemplo 02: Resposta dinâmica (Sistema 9 barras)	110
7.2.1	Preparação do Caso Base.....	110
7.2.2	Inserção de Medidores e Dispositivos Lógicos	112
7.2.3	Inserção dos Eventos	116
7.2.4	Análise da Resposta Dinâmica	118
8	Sistemas Trifásicos	124
8.1	Modelagem Trifásica	124
8.1.1	Considerações sobre a Modelagem Trifásica	124
8.1.2	Descrição Funcional do SEE	124
8.1.3	Equações Funcionais.....	125
8.1.4	Simulação Dinâmica Trifásicas.....	128
8.1.5	Modelo de Gerador trifásico dinâmico:.....	137
8.1.6	Modelo Dinâmico para a Máquina de Indução Trifásica	139
8.1.7	Forma Geral de Dispositivos Shunt.....	139
8.1.8	Forma Geral de Dispositivos Série	140
8.2	Interface de Rede Trifásica x Monofásica Equivalente	140
9	Simprot	144
9.1	Introdução	144
9.2	Especificação Funcional dos Módulos	144
9.3	Modelagem Computacional dos Relés de Proteção	145
9.3.1	Relé Base.....	146
9.3.2	Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)	147
9.3.3	Relé de Sobrecorrente Temporizado (51)	148
9.3.4	Relé de Sobrecorrente Temporizado com Restrição de Tensão (51V).....	149
9.3.5	Relé de Sobrecorrente de Terra (51G).....	150
9.3.6	Relé de Sobretensão (59).....	151
9.3.7	Relé de Subtensão (27)	151
9.3.8	Relé de Sobretensão de Terra (59G).....	152
9.3.9	Relé de Sobrecorrente de Sequência Negativa (46)	152
9.3.10	Relé de Sobretensão de Sequência Negativa (47)	153
9.3.11	Relé de Imagem Térmica (49).....	154
9.3.12	Relé Reversão de Potência (32)	155
9.3.13	Relés de Subfrequência (81u) e Sobre frequência (81o)	155
9.3.14	Relé de Sobre-Excitação Volts por Hertz (24).....	156
9.3.15	Relé de Distância (21)	156
9.3.16	Relé de Perda de Excitação (40)	157
9.3.17	Relé de Verificação de Sincronismo (25)	158
9.3.18	Função Direcional (67).....	159
9.4	Desenvolvimento da Interface Simprot.....	160
9.4.1	Utilização da ferramenta	161
9.4.2	Acesso à tela principal	161

9.4.3	Diagrama e Gráfico de Característica da Proteção	163
9.4.4	Simulação e Resultados	166
9.5	Exemplos.....	170
9.5.1	Sistema Máquina x Barra Infinita	170
9.5.2	Sistema Equivalente – Light Energia.....	175
10	Referências Bibliográficas	185
11	ANEXOS	187
A.	Modelos dos Dispositivos	187
B.	Blocos em XML do Simulight	189
C.	Modelos Dinâmicos [2] [7].....	197
D.	Edição de dados no Simulight.....	200
E.	Edição de Medidores no Simulight	212
F.	Edição da Proteção no Simulight	221

1 Introdução

1.1 Visão Geral do Programa

O programa Simulight é um software para avaliação do desempenho dinâmico de sistemas de energia elétrica de grande porte, compreendendo os segmentos de geração, transmissão, subtransmissão e distribuição, com a presença de geração distribuída conectada aos segmentos de subtransmissão ou distribuição. O programa é particularmente adequado ao estudo da resposta dos sistemas a grandes perturbações (curtos-circuitos, desligamentos de linhas de transmissão, etc.), com vistas a testar a manutenção do sincronismo após esse tipo de distúrbio, em estudos conhecidos com *Estabilidade Transitória* [1]. O Simulight engloba, também, um módulo de análise em regime permanente (fluxo de potência), o qual pode ser utilizado de forma independente, ou para gerar condições iniciais para o módulo de avaliação do desempenho dinâmico. O Simulight foi desenvolvido utilizando a técnica de Modelagem Orientada a Objetos e codificado em linguagem C++, em um ambiente integrado dos modelos e aplicativos, com interface amigável no padrão Windows.

A origem da ferramenta Simulight em 2001 foi motivada pela crise de energia que assolava o país à época. O crescente número de pedidos de acessos de Produtores Independentes de Energia (PIE) ao sistema Light em 2001, ultrapassava a capacidade da empresa de analisar, em tempo hábil, os requisitos técnicos das análises estáticas e dinâmicas necessárias. A penetração da Geração Distribuída (GD) nas redes de subtransmissão e distribuição vêm crescendo desde então. Acontece que os sistemas de distribuição não foram concebidos para que suas redes tivessem elementos ativos (geradores), o que muda significativamente seu *modus operandi*. Da mesma forma, as ferramentas computacionais hoje existentes não estão totalmente adequadas aos necessários estudos de caráter estático e dinâmico.

O crescente número de PIEs interessados na venda de energia ao mercado atacadista, bem como de Autoprodutores e Cogeneradores interessados em gerar a própria energia, requerem uma análise mais elaborada dos efeitos dinâmicos que estes geradores causam à rede elétrica. Neste cenário, a possibilidade de produtores independentes operarem com paralelismo permanente ou simultâneo, com a rede de distribuição/subtransmissão, principalmente sob situação de contingências, é uma realidade que deve ser considerada nos estudos dinâmicos. Esse modo de operação, apesar de não ser usual, pode diminuir o número de consumidores que ficarão desligados durante uma situação de defeito, contribuindo para aumentar o nível de satisfação dos clientes bem como melhorar os índices de desempenho da rede elétrica. O desenvolvimento do programa Simulight iniciou-se como um projeto P&D ANEEL no ciclo 2001/2002 [2] e continuou a ser aperfeiçoado também como um projeto P&D no ciclo 2005/2006 [3] e 2009/2010 [4].

A modelagem trifásica do SEE faz uso de grafo monofásico equivalente, que é orientada para modelagem por dispositivos funcionais. Isto permite que a escolha entre modelagem trifásica ou monofásica equivalente seja feita em tempo de execução, utilizando um mesmo conjunto de aplicativos para análise dinâmica. Isto faz que o Simulight possa

executar elementos monofásicos e trifásicos ao mesmo tempo num mesmo sistema (isto é uma modelagem híbrida monofásica/trifásica - Monotri). [5]

1.2 Características do Simulight

No programa Simulight um considerável esforço de desenvolvimento foi investido no sentido de oferecer ao usuário uma ferramenta de fácil manipulação em que toda estrutura topológica da rede elétrica fosse acessada de forma simples e direta, sendo todo o gerenciamento dos dados e ferramentas feito diretamente na interface gráfica, sem a utilização de programas ou módulos adicionais.

O Simulight tem uma interface (bastante amigável) com o sistema corporativo da Light (SGD), possibilitando, por exemplo, que parâmetros elétricos de alimentadores que estejam no SGD possam ser transferidos, via arquivo PRAO, para a base de dados do Simulight. Dessa forma, a montagem de casos que envolvam simultaneamente as redes de transmissão, subtransmissão e distribuição, é feita em muito menos tempo e livre de erros de digitação.

Outra característica importante e eficaz do Simulight é a integração dos programas de fluxo de potência (análise estática) e estabilidade transitória (análise dinâmica) numa mesma interface gráfica com acesso a um único banco de dados. Essa característica também é responsável pelo ganho de produtividade de seus usuários e pela melhoria na qualidade de resultados obtidos.

O Simulight é capaz de simular diversas ilhas elétricas que surjam ou desapareçam ao longo de uma simulação no tempo, devido à atuação da proteção. Essa característica além de ser fundamental nos estudos de GD, é inovadora entre os programas de simulação hoje existentes comercialmente. A modelagem dos relés de proteção é feita no Simulight.

A proteção pode ser representada no modo Monitoração, modo Alarme ou no modo Ativo. Como o próprio nome sugere, no modo Monitoração e Alarme os relés apenas observam o sistema e criam um *log* de saída dos eventos. Já no modo Ativo, os relés atuam abrindo e fechando disjuntores. Os seguintes relés se encontram modelados no Simulight: 21, 24, 25, 27, 32, 40, 46, 47, 49, 50, 51, 51G, 51V, 59, 59G, 67 e 810/U.

Entre outra característica do Simulight, tem-se a ferramenta de formação de equivalente de rede. A construção de um sistema elétrico equivalente envolve a escolha de um conjunto de barras e dispositivos que serão retidos no sistema a ser estudado, e do conjunto de barras e dispositivos que serão equivalentados e removidos.

1.3 Tipos de Estudos

O programa Simulight pode ser utilizado para a realização dos seguintes estudos:

- Fluxo de potência;
- Estabilidade transitória;
- Rejeição de carga;
- Esforço torcional nos geradores;
- Ilhamento de áreas do sistema;
- Geração distribuída;
- Ajuste da proteção;
- Microredes;
- Fontes não convencionais;
- Análises de redes desbalanceadas;
- Etc.

1.4 Instalação

O computador deve atender requisitos mínimos para a instalação do Simulight. Os passos da instalação são indicados a seguir.

Passo 1: Requisitos Mínimos

Deve-se verificar que os seguintes requerimentos sejam cumpridos:

- Possuir privilégios administrativos (Windows Vista, 7, 8, 8.1 e 10);
- 20 MB disponível para armazenamento em disco;
- 1 GB ou mais de memória RAM;
- Processadores da linha AMD Athlon ou superior, ou da linha Intel Core Duo ou superior.

Se foi obtido o instalador do Simulight, prossiga pelo passo 2. Caso tenham sido obtidos os componentes separadamente, prossiga pelo passo 4.

Passo 2: Iniciando a Instalação

Executar o instalador **SimulightSetup** contido em mídia removível ou versão acadêmica obtida por *download* da página do Simulight. Ao executá-lo, o assistente de instalação solicitará um idioma e em seguida a tela da Figura 1.1.

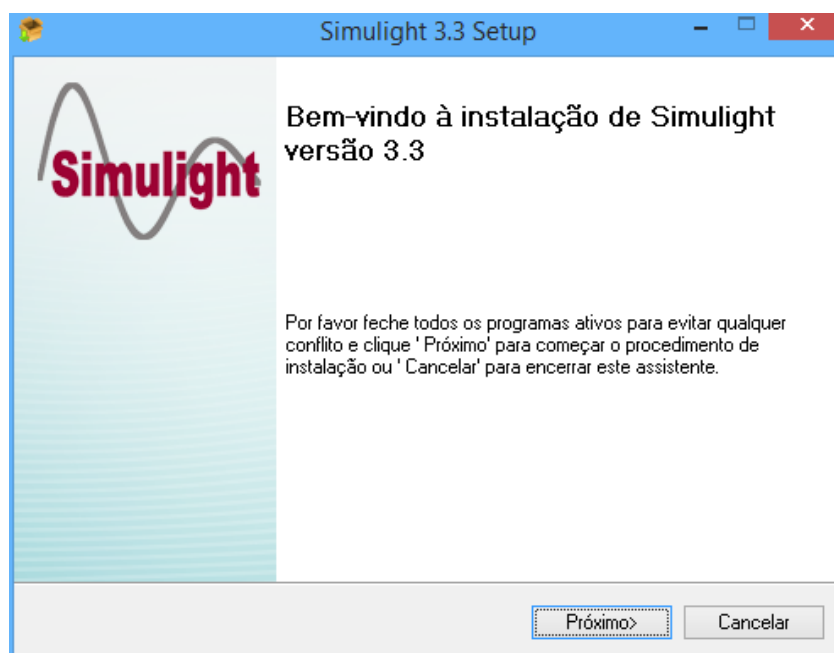


Figura 1.1 Iniciando o Assistente de Instalação.

Clicando em próximo será solicitado se a instalação deve ser para todos os usuários do computador ou apenas para o usuário atual.

Passo 3: Escolhendo diretório de Instalação

Nessa altura, o assistente solicita ao usuário um diretório de instalação. Múltiplas instalações do Simulight são possíveis se especificadas em diretórios diferentes. Por padrão, o Simulight é instalado na pasta Arquivos de Programas (*Program Files* em inglês), na unidade de instalação do Windows.

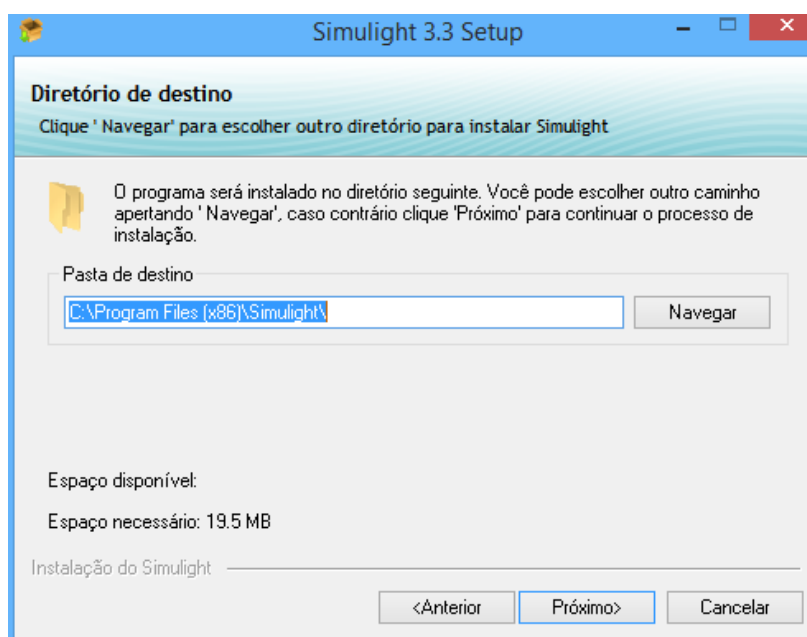


Figura 1.1 Iniciando o Assistente de Instalação.

Em seguida o Simulight será instalado. Atalhos serão criados na área de trabalho e no menu iniciar e um desinstalador estará disponível na pasta de instalação do Simulight. Ao término da instalação (Figura 1.2) o usuário pode iniciar o Simulight automaticamente.

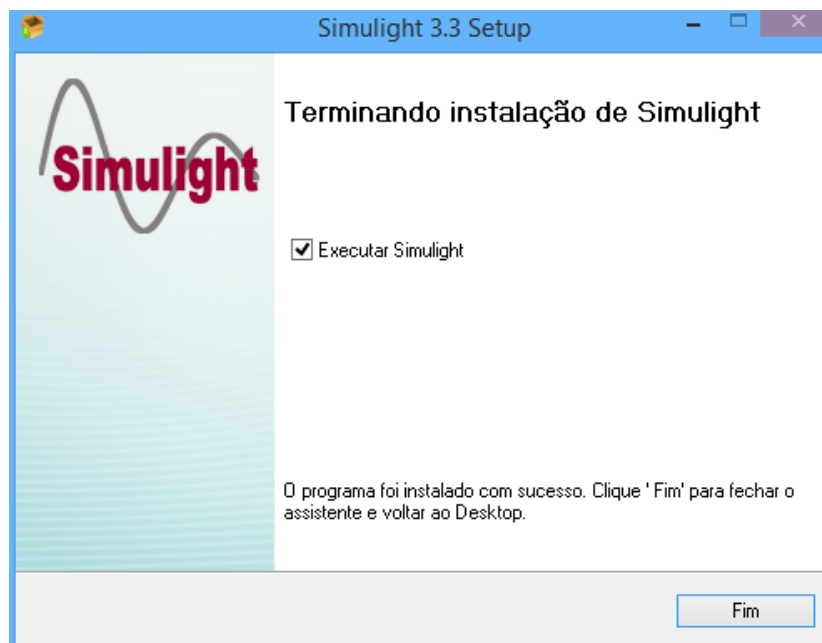


Figura 1.2 Finalizando a instalação.

Passo 4: Iniciando o Simulight pela primeira vez (sem utilizar instalador)

Se o Simulight não tiver sido instalado com a utilização do instalador **SimulightSetup**, na sua primeira execução serão solicitados os caminhos de bibliotecas básicas para o seu funcionamento, conforme mostra a Figura 1.3. As bibliotecas necessárias possuem extensão XML e são LIBMODELS, LIBGRAPHS e LIBCABLES respectivamente.

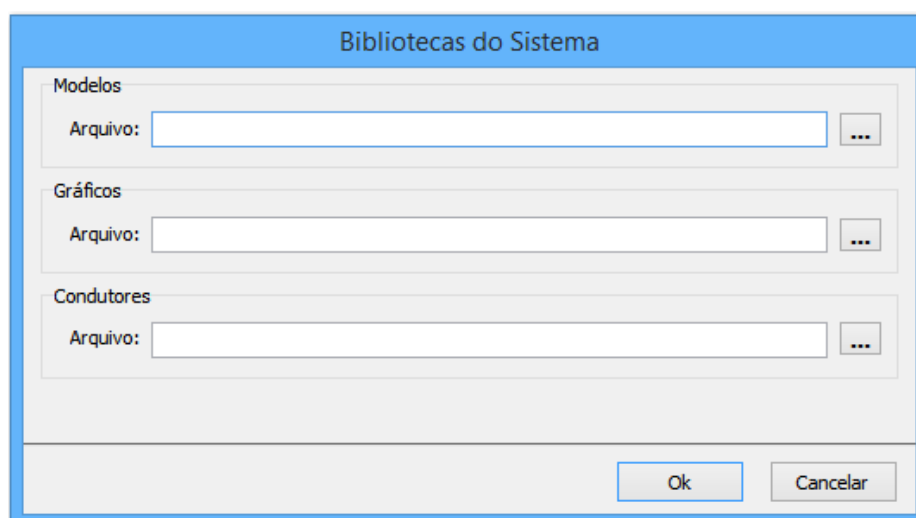


Figura 1.3 Tela de carregamento de bibliotecas básicas para o funcionamento do Simulight.

Se essas bibliotecas já estiverem contidas na pasta LIBS no mesmo diretório do executável do Simulight, essa tela será omitida e o Simulight iniciará normalmente.

Essa tela pode ser acessada novamente através do menu Ferramentas → Substituir Bibliotecas de Modelos.

Conteúdo da Instalação

Uma instalação normal do Simulight incluirá os elementos indicados na Tabela 1.1 abaixo.

Tabela 1.1. Pasta de Instalação

Pasta de Instalação – Arquivos e subpastas	
Simulight3.3.exe	Arquivo executável do programa. Um atalho para este arquivo é criado na área de trabalho pelo Assistente de Instalação.
LIBS	Pasta que contém três arquivos fundamentais para o funcionamento do programa: “LIBCABLES.xml”, “LIBGRAPHS.xml” e “LIBMODELS.xml”.
Manual	Pasta que contém o Manual de Usuário em PDF.
Exemplos	Pasta que contém arquivos de exemplos no formato FDX.

Para a edição de arquivos no formato XML como as bibliotecas básicas e arquivos FDX em forma de texto, recomenda-se o uso do editor de texto Notepad++.

1.5 Informação e Suporte

Informações relacionadas ao programa Simulight, tais como possibilidades de novos desenvolvimentos ou suporte em sua utilização, podem ser obtidas através dos contatos a seguir:

Prof. Glauco Nery Taranto
Programa de Engenharia Elétrica
COPPE/UFRJ
Caixa Postal 68504
Rio de Janeiro RJ CEP: 21941-972
Tel.: 21- 3938-8615
E-mail: tarang@coep.ufrj.br

Eng. Carlos Eduardo Vizeu Pontes
Light Serviços de Eletricidade S.A.
Av. Marechal Floriano, 168
Caixa Postal 0571
Rio de Janeiro RJ CEP: 20080-002
Tel.: 21-2211-7804
E-mail: carloseduardo.vizeu@light.com.br

2 Modelos dos Componentes

As seções seguintes deste capítulo apresentam uma breve introdução aos modelos de componentes do sistema elétrico existentes no programa Simulight. O assunto é vasto e tratado extensivamente em livros, artigos e notas de aula [[6] , [7]]. O objetivo do capítulo é situar o usuário do programa no contexto da modelagem de componentes e informar onde o mesmo poderá obter maiores informações sobre o assunto, caso julgue necessário.

2.1 Modelos de Geradores

As máquinas síncronas (geradores ou motores) podem ser representados por três modelos:

- Modelo clássico, constituído por uma fonte de tensão constante atrás da reatância transitória de eixo direto;
- Modelo para geradores de polos salientes;
- Modelo para geradores com rotor liso.

Os dois últimos modelos podem incorporar o efeito da saturação.

O programa permite, também, a representação de geradores por uma barra infinita para representar a conexão da rede em estudo a um sistema com grande capacidade de geração.

A Figura 2.1 representa a equação mecânica da máquina síncrona. Nessa figura, os símbolos têm o seguinte significado:

T_m : torque mecânico;

T_e : torque elétrico;

δ : ângulo do rotor;

ω : velocidade angular do rotor;

K_d, K_s : constantes de amortecimento e sincronismo;

H : constante de inércia.

A Figura 2.2 apresenta uma representação da relação dos enlaces de fluxo dos enrolamentos da máquina segundo o eixo direto para o caso de gerador com rotor liso. A representação para o eixo em quadratura é bastante similar. Nessa figura, os símbolos têm o seguinte significado:

L'_d : indutância transitória do eixo d;

L''_d : indutância subtransitória do eixo d;

L_l : indutância de dispersão de armadura;

E_{fd} : tensão de campo;

E'_q : constante proporcional de tensão;

I_d : corrente no eixo d.

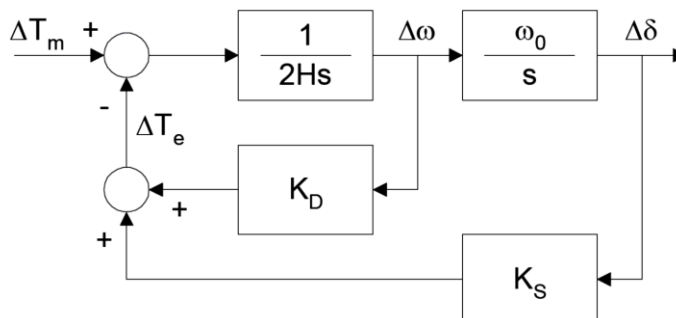


Figura 2.1 Representação do modelo mecânico das máquinas síncronas.

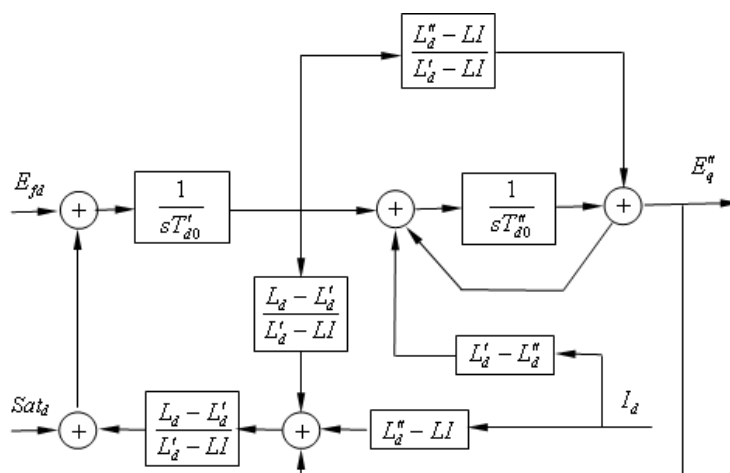


Figura 2.2 Representação do modelo de eixo direto das máquinas síncronas.

2.2 Modelos de Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão

A função básica de um sistema de excitação é prover corrente contínua para o enrolamento de campo da máquina síncrona. Além disso, o sistema de excitação desempenha funções de controle e proteção essenciais para o desempenho satisfatório de um sistema de potência, através do controle da tensão aplicada ao enrolamento de campo e, portanto, da própria corrente de campo. As funções de controle incluem o controle da tensão terminal e da geração de potência reativa, além de funções próprias para o aumento da estabilidade do sistema. As funções de proteção estão relacionadas aos limites de capacidade da máquina síncrona e do próprio sistema de excitação, que não podem ser excedidos. Uma representação esquemática do sistema de excitação é mostrada na Figura 2.3, na qual destacam-se a excitatriz e o regulador de tensão.

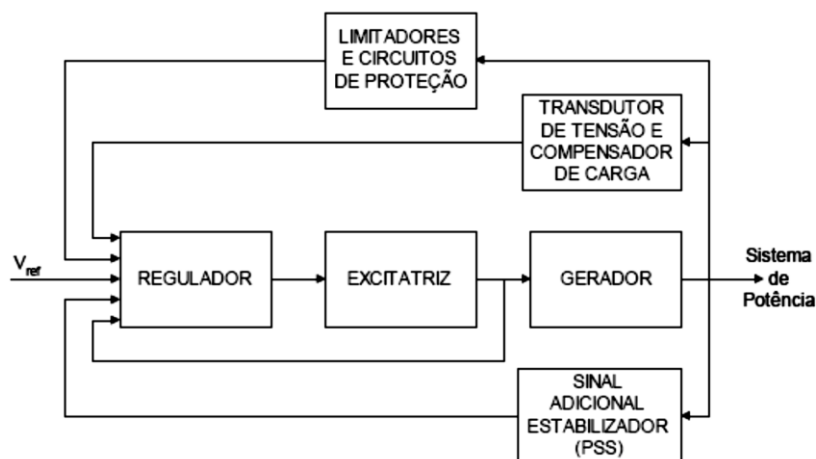


Figura 2.3 Diagrama de blocos das funções básicas de um sistema de excitação

A excitatriz é o equipamento responsável por prover a potência (CC) necessária para alimentar o enrolamento de campo do gerador. O regulador processa e amplifica sinais de controle para a forma e os níveis necessários para o controle da excitatriz. Deve incluir a regulação e as funções de estabilização do sistema de excitação. Na Figura 2.4, é mostrado o diagrama de blocos de um regulador de tensão de primeira ordem, no qual as grandezas mostradas têm o seguinte significado:

K : ganho do regulador;

T : constante de tempo do regulador;

V_t : tensão terminal do gerador;

V_{ref} : valor da tensão de referência (1pu para valores nominais);

L_{mn} : limites mínimo da tensão de campo;

L_{mx} : limite máximo da tensão de campo;

E_{fd} : tensão de excitação.

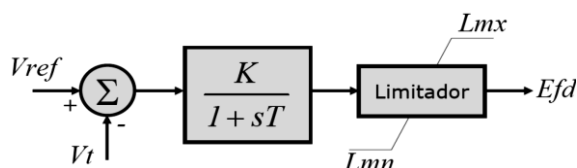


Figura 2.4 Diagrama de blocos de um regulador de tensão de primeira ordem.

Modelos mais elaborados de reguladores de tensão podem ser encontrados nas referências [[6], [7], [8]].

2.3 Modelos de Reguladores de Velocidade

O controle carga-frequência em um sistema de potência é subdividido em regulação primária e regulação secundária. A regulação primária tem como objetivo manter os desvios de frequência em valores mínimos sem perda da estabilidade. Para isso, os reguladores de velocidade são os sistemas de controle utilizados nesta tarefa. A regulação automática de velocidade atua no sentido de elevar ou reduzir a potência da unidade geradora, quando a frequência se afasta da frequência nominal (60 Hz no caso brasileiro). A regulação secundária do controle carga-frequência pode ser considerada como uma regulação quase-estática se comparada à regulação primária. A regulação secundária é usualmente conhecida como Controle Automático da Geração (CAG). As constantes de tempo podem chegar, por exemplo, a algumas ordens de magnitude maiores que as constantes de tempo do problema de oscilações eletromecânicas. A regulação secundária tem como objetivo corrigir os erros de frequência, porventura deixados pela regulação primária, quando um novo ponto de equilíbrio é atingido após uma perturbação no sistema. A regulação secundária pode ter também como objetivo a manutenção do intercâmbio entre áreas de controle em valores contratuais.

A Figura 2.5 mostra um regulador de velocidade com o sinal de referência produzido pelo CAG, no qual as grandezas mostradas têm o seguinte significado:

f : frequência;

f_{ref} : frequência nominal;

f_{cag} : sinal de referência do CAG;

R : característica de *queda de velocidade* ou *estatismo*;

T_G : constante de tempo;

P_{mec} : potência mecânica do gerador.

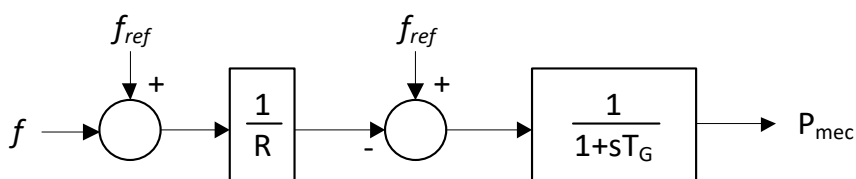


Figura 2.5 Regulador de velocidade com regulação secundária.

2.4 Modelos de Dispositivos de Proteção

A implementação dos dispositivos de proteção no programa Simulight teve início no ano de 2002, durante um projeto de P&D desenvolvido pela COPPE/UFRJ para a Light, e prosseguiu por duas edições posteriores de projetos de pesquisa para a mesma empresa. Os modelos computacionais dos relés de proteção estão descritos na seção 9.3.

3 Metodologias de Solução

Este capítulo apresenta uma introdução aos métodos numéricos para solução dos problemas de fluxo de potência e simulação da dinâmica eletromecânica utilizados no programa Simulight. O assunto é vasto e tratado extensivamente em livros, artigos e notas de aula [[6] -[9] , [10] , [11]]. O objetivo do capítulo é fornecer ao usuário do programa as informações básicas necessárias a um entendimento adequado do desempenho do mesmo.

3.1 Fluxo de Potência

O cálculo de fluxo de potência em um sistema elétrico consiste na determinação do estado operativo da rede, representado pelas tensões nodais em módulo e ângulo de fase, da distribuição dos fluxos nos ramos e de algumas outras grandezas de interesse, para uma dada condição de carga e geração. A modelagem do sistema é estática, ou seja, considera-se apenas a situação de regime permanente.

A rede elétrica será considerada como sendo constituída por elementos trifásicos equilibrados (linhas de transmissão, transformadores, etc.), assim como serão também consideradas equilibradas as cargas e geração. Consequentemente, a análise é realizada utilizando-se uma representação monofásica baseada na rede de sequência positiva.

A cada barra k da rede são associadas quatro variáveis, sendo duas dadas e duas incógnitas:

V_k : magnitude da tensão nodal;

θ_k : ângulo de fase da tensão nodal, em relação à tensão de uma das barras da rede tomada como referência;

P_k : geração ativa líquida injetada na barra (geração menos carga);

Q_k : geração reativa líquida injetada na barra (geração menos carga).

Baseado na escolha de quais variáveis são consideradas como dados ou incógnitas, três tipos de barras podem ser definidas:

Barra de Carga ou barra PQ: P_k e Q_k são dados e V_k e θ_k devem ser calculadas;

Barra de Tensão Controlada ou Barra PV : P_k e V_k são dados e Q_k e θ_k devem ser calculadas;

Barra Flutuante, Slack ou Swing: V_k e θ_k são dados e P_k e Q_k devem ser calculadas; o ângulo de fase dessa barra é utilizado como referência angular do sistema e, geralmente, assumido igual a zero.

Em cada barra da rede, o balanço de potência é nulo, como uma consequência da aplicação da 1ª Lei de Kirchhoff. Esta situação é ilustrada na Figura 3.1 e produz o seguinte sistema de $2n$ equações, onde n é o número de barras da rede:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.2)$$

onde:

$k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras da rede;

Ω_k : conjunto de barras vizinhas à barra k ;

V_k, V_m : magnitudes das tensões nas barras terminais do ramo $k-m$;

θ_k, θ_m : ângulo de fase das tensões nas barras terminais do ramo $k-m$;

P_{km} : fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;

Q_{km} : fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;

Q_k^{sh} : componente da injeção da potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra k .

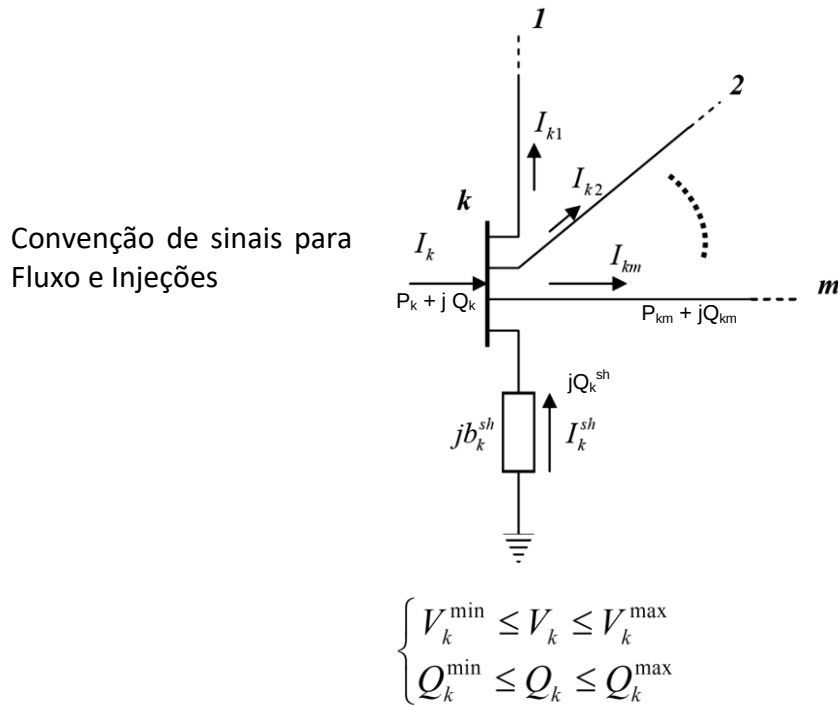


Figura 3.1 Convenção de sinais e restrições operativas das variáveis nodais.

3.1.1 Modelos dos Componentes

As linhas de transmissão são incluídas na formulação do fluxo de potência de acordo com o modelo mostrada na Figura 3.2.

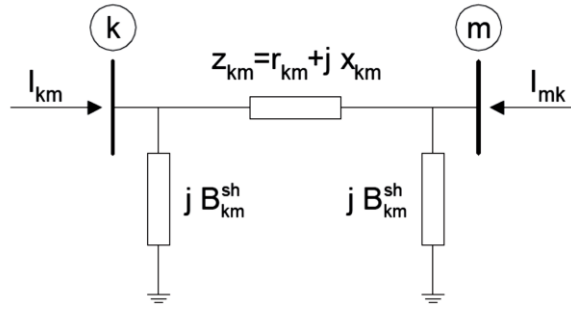


Figura 3.2 Modelo de linha de transmissão.

Para o modelo apresentado na Figura 3.2, as seguintes relações são válidas:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} - j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3.3)$$

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2}$$

e, também,

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh}E_k \quad I_{mk} = y_{km}(E_m - E_k) + jb_{km}^{sh}E_m \quad (3.4)$$

A expressão do fluxo de potência na linha é:

$$S_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_k^* I_{km} = y_{km} V_k e^{-j\theta_k} (V_k e^{-j\theta_k} - V_m e^{-j\theta_m}) + jb_{km}^{sh} V_k^2 \quad (3.5)$$

de onde se obtêm as expressões do fluxos de potência ativa e reativa em ambos os terminais da linha

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km}$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad (3.6)$$

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km}$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km}$$

e as respectivas perdas ativas e reativas

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) = g_{km} |E_k - E_m|^2$$

$$Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) =$$

$$-b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} |E_k - E_m|^2 \quad (3.7)$$

Os transformadores em fase são modelados de acordo com o mostrado na Figura 3.3

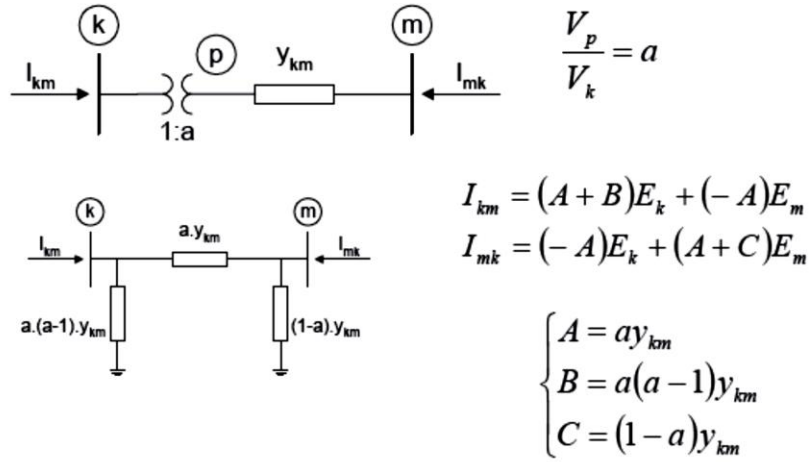


Figura 3.3 Modelo de transformadores em fase.

No modelo da Figura 3.3, de acordo com valor assumido pelo parâmetro a , podemos ter as seguintes situações:

- $a = 1$: as admitâncias B e C são nulas e o circuito equivalente reduz-se à admitância série y_{km} ;
- $a < 1$: B terá sinal contrário a y_{km} e, portanto, será do tipo capacitivo, enquanto C será do tipo indutivo: isto implicará em uma tendência a aumentar V_k e reduzir V_m ;
- $a > 1$: B será indutivo (mesmo sinal de y_{km}), enquanto C será do tipo capacitivo: haverá uma tendência a diminuir V_k e aumentar V_m ;

Os fluxos de potência ativa e reativa no transformados são dados por:

$$\begin{aligned} P_{km} &= (aV_k)^2 g_{km} - (aV_k)V_m g_{km} \cos \theta_{km} - (aV_k)V_m b_{km} \sin \theta_{km} \\ Q_{km} &= -(aV_k)^2 b_{km} + (aV_k)V_m b_{km} \cos \theta_{km} - (aV_k)V_m g_{km} \sin \theta_{km} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Os transformadores defasadores são modelados de acordo com o mostrado na Figura 3.4.

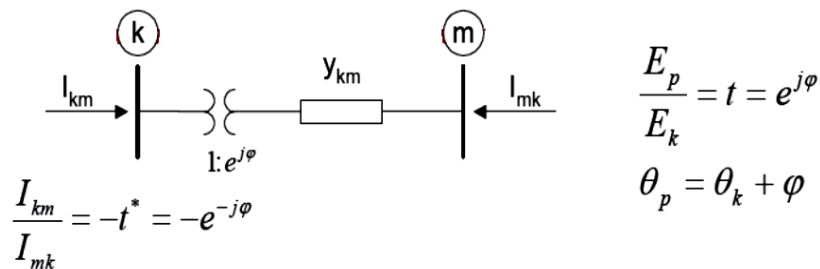


Figura 3.4 Modelo de transformadores em defasador.

As correntes e potência injetadas no transformador são dadas por:

$$\begin{aligned} I_{km} &= t^* y_{km} (E_k - E_p) = (y_{km}) E_k + (-t^* y_{km}) E_m \\ I_{mk} &= y_{km} (E_m - E_p) = (-t y_{km}) E_k + (y_{km}) E_m \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} P_{km} &= V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi) \\ Q_{km} &= -V_k^2 b_{km} + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi) - V_k V_m g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi) \end{aligned} \quad (3.10)$$

As expressões para os fluxos de potência ativa e reativa em um ramo genérico da rede podem ser sintetizadas nas expressões gerais abaixo:

$$\begin{aligned} P_{km} &= (aV_k)^2 g_{km} - (aV_k) V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi) - (aV_k) V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi) \\ Q_{km} &= -(aV_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (aV_k) V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi) - (aV_k) V_m g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi) \end{aligned} \quad (3.11)$$

No caso de linhas de transmissão $a = 1$ e $\varphi = 0$; para transformadores em fase, $b_{km}^{sh} = 0$ e $\varphi = 0$; para os transformadores defasadores puros, $b_{km}^{sh} = 0$ e $a = 1$.

3.2 Solução do Problema de Fluxo de Potência

Para a solução do problema de fluxo de potência, o conjunto de $2n$ equações definidas em (3.1) e (3.2) é dividido em dois subconjuntos: o primeiro é resolvido pelo método de Newton-Raphson, para a obtenção dos módulos e ângulos de fase das tensões não especificadas, e os resultados obtidos são substituídos no segundo para o cálculo das demais variáveis do problema. Finalmente os fluxos de potência são calculados utilizando as expressões mostradas na seção anterior.

O sistema de equações que deverá ser resolvido pelo método de Newton-Raphson é o seguinte:

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= P_k^{esp} - P_k^{calc} = P_k^{esp} - V_k \sum V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \\ &\text{para todas as barras PQ e PV} \\ \Delta Q_k &= Q_k^{esp} - Q_k^{calc} = Q_k^{esp} - V_k \sum V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \\ &\text{para todas as barras PQ} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Onde:

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \sum V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.2.1 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson resolve um sistema de equações não-lineares através de um processo de linearizações sucessivas. Esse processo é ilustrado graficamente na Figura 3.5.

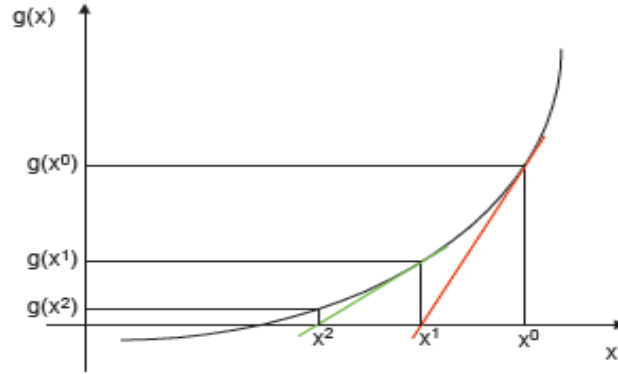


Figura 3.5 Ilustração do método de Newton-Raphson para o caso de uma variável.

No caso multivariável, o método de Newton-Raphson segue o mesmo princípio ilustrado na Figura 3.5. Seja o sistema de equações não-lineares.

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{g}(\cdot): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \quad (3.14)$$

O algoritmo para solução do sistema dado em (3.14) é o seguinte:

1. Fazer $h = 0$ e escolher uma solução inicial $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(h)} = \mathbf{x}^{(0)}$.
2. Calcular $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(h)})$.
3. Testar convergência: se $|\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(h)})| \leq \epsilon$, o processo convergiu para solução $\mathbf{x}^{(h)}$, caso contrário, ir para 4.
4. Calcular matriz jacobiana $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(h)})$
5. Determinar nova solução $\mathbf{x}^{(h+1)}$:

$$\mathbf{x}^{(h+1)} = \mathbf{x}^{(h)} + \Delta \mathbf{x}^{(h)}$$

sendo

$$\Delta \mathbf{x}^{(h)} = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(h)})]^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(h)})$$

6. Fazer $h = h + 1$ e voltar para o passo 2.

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \frac{\partial g_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.2.2 Fluxo de Potência pelo Método de Newton-Raphson

A solução do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson consiste na aplicação do algoritmo apresentado na seção anterior ao sistema de equações definido em (3.12). Esta aplicação é resumida no algoritmo a seguir.

1. Fazer $h = 0$ e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV ($\theta = \theta^{(0)}$), e as magnitudes das tensões das abrras PQ ($\mathbf{v} = \mathbf{v}^{(0)}$)
2. Calcular $P_k(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)})$ para as barras PQ e PV, e $Q_k(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)})$ para as barras PQ, e determinar os resíduos $\Delta P_k^{(h)}$ e $\Delta Q_k^{(h)}$.
3. Testar convergência: $\max \{|\Delta P_k^{(h)}|\} \leq \epsilon_p$ e $\max \{|\Delta Q_k^{(h)}|\} \leq \epsilon_q$, o processo iterativo convergiu para a solução $(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)})$; caso contrário, continuar no passo 4.
4. Calcular a matriz jacobiana

$$\mathbf{J}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) & \mathbf{N}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) \\ \mathbf{M}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) & \mathbf{L}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) \end{bmatrix}$$

5. Determinar a nova solução $(\theta^{(h+1)}, \mathbf{v}^{(h+1)})$:

$$\theta^{(h+1)} = \theta^{(h)} + \Delta \theta^{(h)}$$

$$\mathbf{v}^{(h+1)} = \mathbf{v}^{(h)} + \Delta \mathbf{v}^{(h)}$$

sendo $\Delta \theta^{(h)}$ e $\Delta \mathbf{v}^{(h)}$ determinados resolvendo-se o sistema linear

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{p}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) \\ \Delta \mathbf{q}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) & \mathbf{N}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) \\ \mathbf{M}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) & \mathbf{L}(\theta^{(h)}, \mathbf{v}^{(h)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(h)} \\ \Delta \mathbf{v}^{(h)} \end{bmatrix}$$

6. Fazer $h = h + 1$ e voltar para o passo 2.

Os elementos da matriz jacobiana $\mathbf{J}(\theta, \mathbf{v})$ do algoritmo acima são calculados pelas expressões:

$$\begin{cases} H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k G_{kk} + \sum V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = -V_k B_{kk} + \sum V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{cases}$$

3.3 Simulação da Dinâmica para Estudos de Estabilidade Transitória

Este capítulo introduz os fundamentos dos métodos de simulação da dinâmica eletromecânica para estudos de estabilidade transitória nos sistemas elétricos. Uma abordagem detalhada do assunto pode ser encontrada nas referências [[6]],[8] [10]].

3.3.1 Modelo do Sistema de Potência

A análise da estabilidade transitória de sistemas de potência envolve a solução da resposta dinâmica não-linear para uma grande perturbação no sistema, como por exemplo, um curto-circuito no sistema de transmissão seguido do isolamento do elemento em curto pela proteção. A Figura 3.6 mostra a estrutura geral do modelo do sistema de potência usado na análise da estabilidade transitória. Nesta estrutura, grandes discontinuidades devidas, principalmente a faltas e chaveamentos, adicionadas a pequenas discontinuidades devidas, por exemplo, a limites nas variáveis, estão presentes no modelo do sistema. Outras informações relevantes, além das relacionadas com a estabilidade, são as tensões das barras, os fluxos nas linhas e o desempenho do sistema de proteção.

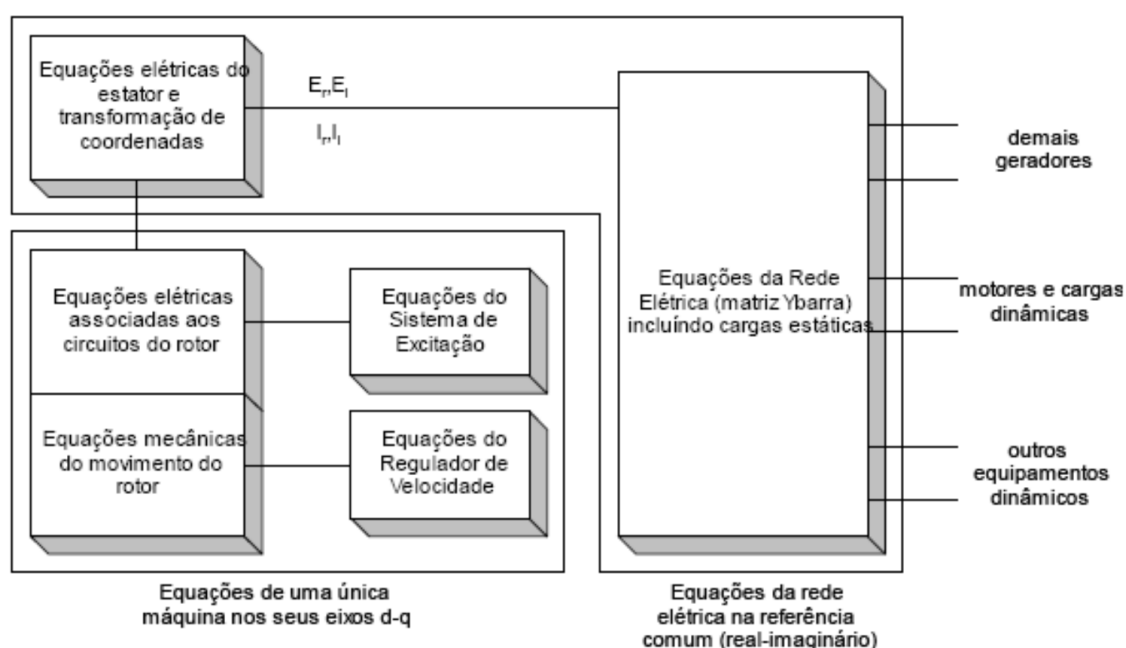


Figura 3.6 Estrutura completa do modelo para análise de estabilidade transitória.

Conforme mostrado na Figura 3.6, a representação global do sistema de potência inclui modelos para os seguintes componentes:

- Geradores síncronos e seus sistemas de excitação e motriz;
- Rede de transmissão incluindo as cargas estáticas;
- Cargas de motores síncronos e de indução;
- Outros equipamentos, como por exemplo, os sistemas HVDC e FACTS.

O modelo usado na representação de cada componente deve ser apropriado para a análise da estabilidade transitória, e as equações do sistema devem ser organizadas de

forma apropriada para os métodos numéricos. A escolha de quais elementos devem ser representados em um ou outro tipo de estudo varia de acordo com o nível de detalhamento que se deseja do sistema elétrico. Entretanto, é consenso que os estudos de estabilidade transitória devem representar pelo menos os efeitos subtransitório e transitório das máquinas síncronas, o sistema de excitação e o sistema de regulação de velocidade dos geradores hidráulicos. O modelo completo do sistema consiste num grande sistema de equações diferenciais ordinárias junto com um grande sistema de equações algébricas esparsas.

3.3.2 Representação da Máquina Síncrona e de seu Sistema de Excitação

O modelo da máquina síncrona nos estudos de estabilidade transitória é representado por equações diferenciais derivadas do modelo de Park (eixos d-q). A ordem deste modelo depende do grau de complexidade na representação dos efeitos transitórios e subtransitórios que ocorrem nos circuitos do rotor da máquina síncrona. A dinâmica do estator é, em geral, desprezada nos estudos de estabilidade transitória, transformando assim, suas equações diferenciais em equações algébricas. Completando o modelo da máquina síncrona, tem-se a equação diferencial que modela o movimento do rotor (equação de oscilação). Os modelos de sistemas de excitação, como o descrito no capítulo anterior deste manual, são representados por ganhos, constantes de tempo, limitadores, blocos de saturação e sinais estabilizantes.

3.3.3 Representação do Sistema de Transmissão e das Cargas

O sistema de transmissão, assim como o estator da máquina síncrona, é representado por um modelo algébrico, isto é, o transitório da rede comparado com transitório eletromecânico é muito mais rápido. Este fato nos leva a desprezar a dinâmica da rede. Nas análises em condições equilibradas, basta representarmos o circuito trifásico pelo equivalente monofásico. Em condições desequilibradas, a análise é feita levando em conta os componentes simétricos.

A forma mais conveniente de se representar a rede, é em termos da matriz admitância nodal. As cargas dinâmicas são representadas da mesma forma que os motores síncronos e de indução. As cargas estáticas são representadas como parte das equações da rede. As cargas com características de impedância constante são as mais simples de serem tratadas, sendo incluídas na matriz admitância nodal. Cargas não-lineares são modeladas como funções exponenciais ou polinomiais da magnitude da tensão e da frequência. Desta forma, a carga estática não-linear é tratada como uma injeção de corrente apropriada na equação da rede. O valor da corrente injetada no nó é

$$I_L = \frac{P_L - jQ_L}{V_L^*} \quad (3.17)$$

onde V_L^* é o conjugado da tensão na barra de carga, e P_L e Q_L são as frações das cargas ativa e reativa, que variam como funções não lineares de V_L e do desvio da frequência. Por convenção, Q_L é positivo para cargas indutivas.

A representação geral da rede e da carga consiste numa equação matricial de admitância nodal esparsa da forma

$$I = YV \quad (3.18)$$

cujas estrutura é similar àquela da matriz usada nos estudos de fluxo de potência.

A matriz admitância nodal Y é simétrica, exceto pelas assimetrias introduzidas pelos transformadores defasadores. Dentro do domínio do tempo das simulações de estabilidade transitória, os *taps* dos transformadores e as defasagens angulares não mudam. Então, os elementos da matriz são constantes, a menos das mudanças na configuração da rede.

Os efeitos dos geradores, cargas estáticas não lineares, cargas dinâmicas, assim como outros elementos como HVDC e FACTS são refletidos como condições de fronteira representadas em relações adicionais entre V e I nos respectivos nós. Em contraste à análise dos estudos de fluxo de potência, o controle de fluxo em linhas de transmissão, limites na geração de potência reativa e balanço das perdas pela barra de referência, não precisam ser consideradas nos estudos de estabilidade transitória. Para simular uma falta no sistema, basta mudar, de forma apropriada, o valor da admitância própria da barra com o defeito.

3.3.4 Formulação Geral do Problema

Genericamente o comportamento dinâmico do sistema de potência pode ser descrito por um conjunto de Equações Diferenciais Ordinárias não-lineares (EDOs) e por um conjunto de Equações Algébricas não-lineares (EAs). Este conjunto de equações pode ser escrito na seguinte forma:

$$\dot{x} = f(x, z) \quad (3.19)$$

$$0 = g(x, z) \quad (3.20)$$

Onde

f : função não-linear que define as equações diferenciais ordinárias;

g : função não-linear que define as equações algébricas;

x : vetor das variáveis de estado;

z : vetor das variáveis algébricas.

O conjunto de equações (3.19) é constituído pelas equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico dos elementos do SEE, tais como máquinas síncronas, reguladores de tensão e velocidade, turbinas, caldeiras, dispositivos FACTS, etc. O conjunto de equações algébricas (3.20) representa as equações que definem o comportamento da rede elétrica e parcelas dos elementos dinâmicos que podem ser formuladas algebricamente.

Para a resolução do conjunto de equações diferenciais apresentado acima, usualmente, transformam-se as equações diferenciais em equações algébricas a diferenças, através da aplicação de algum método de integração numérica, e então resolve-se o conjunto de equações (3.19), passo a passo, ao longo do tempo.

3.3.5 Método de Solução Numérica para as EDO's

Os métodos para solução numérica de EDO's são classificados em explícitos e implícitos. Os métodos explícitos foram durante muito tempo bastante utilizados em programas de simulação da dinâmica de SEE devido, principalmente às suas características quanto à facilidade de implementação e desempenho computacional. De fato, atualmente muitos programas comerciais ainda utilizam esta categoria de métodos de integração. Entretanto, a baixa estabilidade numérica apresentada pelos métodos explícitos, sobretudo quando passos de integração relativamente elevados são utilizados, contribuiu para que esta classe de métodos fosse lentamente abandonada nos estudos de simulação de sistemas elétricos. Entre os métodos explícitos mais conhecidos estão o método de Euler e os métodos de Runge-Kutta [6] .

Os métodos implícitos de integração numérica apresentam melhores características quanto à estabilidade numérica do que os métodos explícitos, sem adicionar grande esforço computacional ao programa. Esta classe de métodos tem se destacado nas aplicações de simulação de sistemas de potência, sendo hoje em dia amplamente utilizados tanto em programas comerciais quanto acadêmicos. Os métodos implícitos tendem a manter suas características de estabilidade numérica mesmo com passos de integração relativamente elevados. Esta característica é particularmente atrativa para simulações de longa duração, onde a elevação do passo de integração contribui para aumentar o desempenho computacional da simulação.

O Método Trapezoidal Implícito (ou Regra Trapezoidal Implícita) tem sido utilizado na maioria dos programas comerciais desenvolvidos recentemente. As características de desempenho computacional, precisão e principalmente estabilidade numérica, fizeram deste método um dos mais utilizados no desenvolvimento de programas para a simulação da dinâmica de sistemas de potência.

No simulador desenvolvido neste projeto, a Regra Trapezoidal Implícita é utilizada na solução numérica das EDO's.

3.3.6 Esquemas de Solução para as Equações do Simulador

Os esquemas que tradicionalmente são utilizados para a resolução do sistema formado pelas equações (3.19) e (3.20) podem ser classificados de acordo com o método de solução numérica das equações diferenciais, e de acordo com a estratégia de solução dos dois conjuntos de equações. O método de integração define esquemas explícitos e esquemas implícitos, enquanto que a estratégia de solução do conjunto de equações define os esquemas básicos: alternado e simultâneo. Combinações dos esquemas de solução básica com os métodos de integração utilizados definem quatro esquemas de solução possíveis: esquema alternado implícito e explícito, e esquema simultâneo implícito e explícito.

Atualmente é consenso a utilização dos métodos implícitos para a solução numérica das equações diferenciais do sistema elétrico. Entretanto a definição entre o esquema simultâneo ou o esquema alternado para programas de simulação de sistemas elétricos depende dos requisitos impostos e de particularidades do simulador, não sendo ainda plenamente aceita a superioridade de um dos esquemas sobre o outro. A seguir são apresentados os dois esquemas básicos de solução.

(1) Esquema Alternado

O esquema alternado de solução consiste em resolver separadamente e alternadamente o conjunto de equações algébricas a diferenças e o conjunto de equações originalmente algébricas do sistema elétrico. Para facilitar o entendimento deste esquema e suas variantes, as equações (3.19) e (3.20) podem ser reescritas na seguinte forma:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (3.21)$$

$$I(E, V) = Y \cdot V \quad (3.22)$$

$$u = h(E, V) \quad (3.23)$$

Onde:

x : é o vetor das variáveis de estado do SEE associadas às equações diferenciais;

A : é uma matriz quadrada, esparsa e geralmente bloco diagonal;

B : é uma matriz retangular, esparsa e formada por blocos;

u : é um vetor de variáveis algébricas que aparecem nas equações diferenciais;

I : é o vetor das injeções de corrente nos nós do SEE;

Y : é a matriz de admitâncias nodais do SEE na forma complexa;

V : é o vetor das tensões nodais do SEE;

E : é um subvetor de x constituído das variáveis de estado necessárias ao cálculo das injeções de corrente I ;

h : é um vetor de funções não lineares que descrevem as variáveis u .

O esquema alternado consiste em transformar o conjunto de equações diferenciais (3.21) em um conjunto de equações algébricas a diferenças e, então, resolvê-las alternadamente e iterativamente com as equações algébricas da rede elétrica (3.22) até que algum critério de convergência seja satisfeito. Este processo se repete para cada instante de tempo simulado. As variáveis de interface u dependem do vetor de tensões V e de um subvetor E das variáveis de estado x . Por esta razão, devem ser atualizadas a cada iteração do processo evitando assim erros de interface. O desempenho computacional do esquema alternado tende a ser superior ao do esquema simultâneo.

(2) Esquema Simultâneo

No esquema simultâneo as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas a diferenças e então resolvidas simultaneamente com as equações originalmente algébricas compondo um sistema único de equações. Geralmente utiliza-se o método de Newton-Raphson para solucionar este sistema de equações. A transformação do conjunto de equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas a diferenças, através de algum método de integração numérica, resulta no conjunto de equações algébricas não lineares abaixo:

$$F(x, V^e) = 0 \quad (3.24)$$

$$G(x, V^e) = 0 \quad (3.25)$$

Onde:

F : é um vetor de funções algébricas a diferenças não-lineares, resultante da discretização das equações diferenciais por algum método de integração numérica;

x : é o vetor das variáveis de estado associadas às equações diferenciais;

V^e : é o vetor das tensões nodais da rede elétrica na forma expandida (não complexa);

G : é um vetor de funções algébricas não-lineares que representa as equações da rede elétrica e parcelas dos elementos dinâmicos que podem ser formuladas algebricamente.

As equações algébricas não-lineares (3.24) e (3.25) podem ser reescritas na seguinte forma compacta:

$$H(x, V^e) = 0 \quad (3.26)$$

Onde $H = [F, G]^t$.

Este sistema de equações é comumente resolvido através da aplicação do método de Newton-Raphson. O esquema simultâneo possui uma formalização matemática mais rigorosa que o esquema alternado, motivo pelo qual recentemente vem sendo bastante utilizado em programas para simulação de sistemas elétricos.

A estrutura altamente esparsa da matriz Jacobiana do sistema deve ser explorada para uma eficiente implementação computacional do esquema simultâneo. Entretanto, este esquema possui um desempenho computacional inferior em relação ao alternado. Isto ocorre em função da dimensão do sistema de equações a resolver e da necessidade de atualização e fatoração da matriz Jacobiana em todas as iterações, o que não acontece com o método alternado. A fim de minimizar o esforço computacional na atualização e fatoração da matriz Jacobiana, alguns trabalhos [12] propõem a utilização da mesma matriz para várias iterações ou mesmo vários passos de integração dando origem aos chamados métodos de Newton desonesto.

3.3.7 Esquema geral do Método Alternado Implícito

O esquema geral do método alternado implícito pode ser resumido no algoritmo a seguir, onde t representa o passo atual da simulação, T é o número total de passos da simulação, k é o contador de iterações do processo de solução de um passo, l é o contador de iterações do processo de solução das equações da rede elétrica, ε_0 é a tolerância para convergência do processo de solução de um passo e ε_1 é a tolerância para convergência do processo de solução das equações da rede elétrica.

Algoritmo do Método Alternado Implícito

Inicialização (Condições iniciais do Fluxo de Potência)

Para $t = 1, 2, \dots, T$

Faça $k = 0$

Calcule $u_{(t)}^, x_{(t)}^*$ (por extrapolação)*

Calcule $x_{(t)}^o = F[x_{(t)}^, u_{(t)}^*, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$*

Enquanto $\|\Delta x\|_2^2 > \varepsilon_o$, faça

faça $l = 0$

Enquanto $\|\Delta V\|_2^2 > \varepsilon_1$, faça

Calcule $V_{(t)}^{l+1} = [Y]^{-1} \cdot I(E_{(t)}, V_{(t)}^l)$ (calcule Y^{-1} por fatoração LU)

Calcule $\Delta V = V_{(t)}^{l+1} - V_{(t)}^l$

Faça $l = l + 1$

Fim Enquanto

Calcule $u_{(t)}^k = h(E_{(t)}, V_{(t)}^l)$

Calcule $x_{(t)}^{k+1} = F[x_{(t)}^k, u_{(t)}^k, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$

Calcule $\Delta x = x_{(t)}^{k+1} - x_{(t)}^k$

Faça $k = k + 1$

Fim Enquanto

Fim Para

Algumas peculiaridades do esquema alternado implícito são apresentadas abaixo:

- A matriz admitância nodal (Y) somente é alterada por ocorrência de alterações na configuração da rede elétrica (chaveamento de linhas de transmissão, curtos-circuitos, etc). Assim, a matriz Y pode ser atualizada e refatorada apenas nestas ocasiões, permanecendo inalterada por todo o resto da simulação. Esta característica proporciona bom desempenho computacional ao esquema alternado. Salienta-se que no esquema simultâneo a matriz Jacobiana deve ser atualizada e refatorada para cada iteração do processo, acarretando maior esforço computacional;
- A resolução do conjunto de equações diferenciais do sistema elétrico torna-se iterativa devido à utilização de um método de integração implícito (Trapezoidal Implícito). Entretanto manipulações algébricas nas equações a diferenças permitem que uma forma explícita seja encontrada, evitando o processo iterativo e aumentando o desempenho computacional do processo;
- Na primeira iteração do esquema alternado é comum calcular a estimativa inicial das variáveis de estado (x) utilizando valores extrapolados para as variáveis de interface (u). Em iterações subsequentes as variáveis de interface são devidamente calculadas pelas funções que as definem. Esta prática visa obter uma melhor estimativa inicial das variáveis de estado, diminuindo o número de iterações requeridas para a convergência e, conseqüentemente, aumentando o desempenho computacional do esquema;

- Vários critérios podem ser adotados para determinar a convergência do processo, sendo mais utilizados aqueles baseados na norma do vetor de erros das variáveis de estado (Δx) entre duas iterações consecutivas. Alternativamente utiliza-se o vetor de erros das tensões nas barras. No algoritmo apresentado é utilizada a norma 2 ao quadrado do vetor de erros das variáveis de estado.

3.3.8 O Esquema Alternado Entrelaçado Implícito

As equações que definem a rede elétrica são não-lineares e devem ser resolvidas iterativamente para cada iteração do esquema alternado implícito, como demonstra claramente o algoritmo apresentado anteriormente. Uma variação do esquema alternado implícito consiste na relaxação da convergência das equações da rede elétrica. Esta metodologia é chamada Esquema Alternado Entrelaçado Implícito e realiza apenas uma iteração nas equações da rede elétrica para cada iteração do esquema alternado. O teste de convergência é realizado nas variáveis de estado não comprometendo a precisão do resultado final.

Esta variação do esquema alternado normalmente apresenta desempenho computacional superior ao esquema básico. O algoritmo do esquema alternado entrelaçado implícito é descrito abaixo:

Algoritmo do Método Alternado Entrelaçado Implícito

Inicialização (Condições iniciais do Fluxo de Potência)

Para $t = 1, 2, \dots, T$

Faça $k = 0$

Calcule $u_{(t)}^, x_{(t)}^*$ (por extrapolação)*

Calcule $x_{(t)}^o = F[x_{(t)}^, u_{(t)}^*, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$*

Enquanto $\|\Delta x\|_2^2 > \varepsilon_o$, faça

Calcule $V_{(t)} = [Y]^{-1} \cdot I(E_{(t)}, V_{(t)})$ (calcule Y^{-1} por fatoração LU)

Calcule $u_{(t)}^k = h(E_{(t)}, V_{(t)})$

Calcule $x_{(t)}^{k+1} = F[x_{(t)}^k, u_{(t)}^k, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$

Calcule $\Delta x = x_{(t)}^{k+1} - x_{(t)}^k$

Faça $k = k + 1$

Fim Enquanto

Fim Para

4 Iniciando o Simulight

4.1 Tela de Abertura

Se o programa Simulight estiver corretamente instalado (Capítulo 1.3), a execução do mesmo abrirá a Tela de Abertura, tal e como mostrado na Figura 4.1.

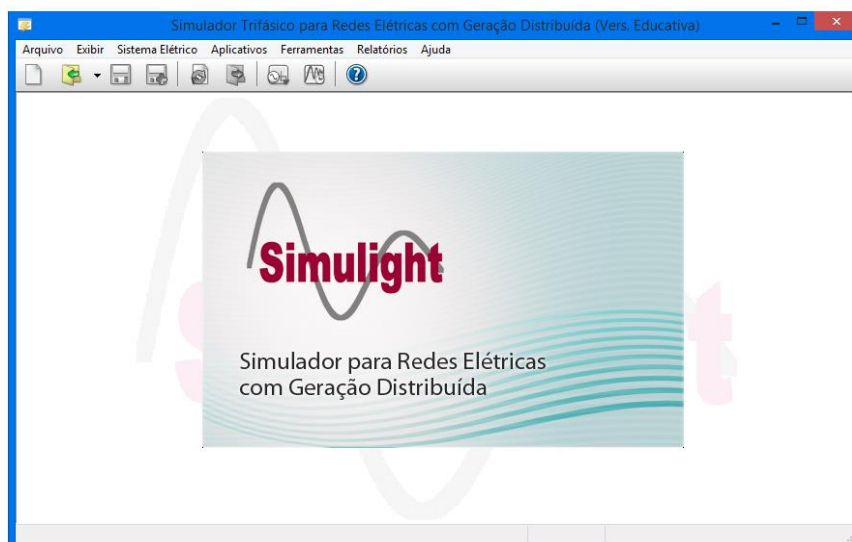


Figura 4.1 Tela de Abertura.

A partir desse ponto, o usuário inicialmente terá que:

- i. Definir uma topologia;
Com a topologia definida, o usuário poderá a qualquer momento:
- ii. Importar uma topologia já existente do PRAO;
- iii. Inserir e / ou alterar as Empresas cadastradas;
- iv. Inserir e / ou alterar qualquer parâmetro referente à topologia;
- v. Inserir e / ou alterar qualquer parâmetro referente aos aplicativos oferecidos;
- vi. Executar algum tipo dos aplicativos oferecidos;
- vii. Gravar o caso em um arquivo de dados para futura manipulação.

Neste Capítulo detalha-se a manipulação dos dados, referentes à topologia, correspondentes às opções i, ii, iii e vi, dentre as recentemente listadas. Estas opções são executadas utilizando completamente o menu “Arquivos” e parcialmente o menu “Sistema Elétrico”. As opções remanescentes são detalhadas nos seguintes Capítulos.

4.2 Menus do Simulight

O programa Simulight mostra sete menus, assim como ícones que ajudarão na edição/execução de casos ao usuário. Figura 4.2

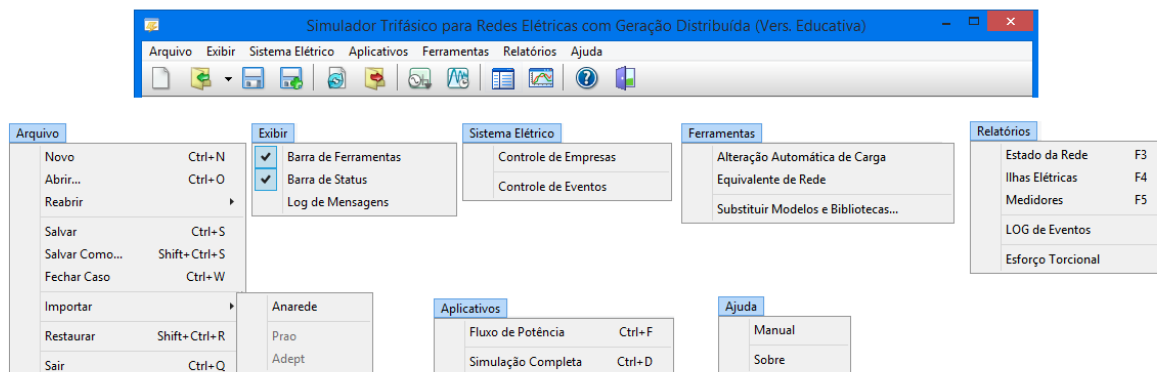


Figura 4.2 Menus e ícones do Simulight.

4.2.1 Menus

- **Menu Arquivo:**
 - Novo: Criar uma nova topologia.
 - Abrir: Abre um caso existente em formato *.FDX.
 - Reabrir: Mostra uma lista dos últimos arquivos abertos.
 - Salvar: Salva uma topologia criada ou já aberta anteriormente.
 - Salvar Como: Salva uma topologia criada ou já existente. Ao ser utilizado em uma topologia existente, pode-se alterar o nome e local de armazenamento, mantendo a topologia anterior.
 - Fechar Caso: Fecha o caso em estudo.
 - Importar: Importa arquivos com formato *.PWF, formato PRAO (*.ASC) e formato ADEPT (*.DAT).
 - Restaurar: Reabre o caso atual, a partir da última configuração salva.
 - Sair: Fecha o programa.
- **Menu Exibir:**
 - Barra de Ferramentas: Habilita/desabilita a visualização da Barra de Ferramentas.
 - Barra de Status: Habilita/desabilita a visualização da Barra de Status.
 - Log de Mensagens: Habilita/desabilita a visualização do Log de Mensagens.
- **Menu Sistema Elétrico:**
 - Controle de Empresas: Para adicionar nome de empresas que o sistema ou topologia vão ter. Ver seção 4.7.
 - Controle de Eventos: Para adicionar eventos de simulação dinâmica, como a abertura de disjuntores, curto circuito, modifica parâmetro etc. Ver seção 6.2.

- **Menu Aplicativos:**
 - Fluxo de Potência: Para executar o fluxo de potência do sistema/topologia criada ou aberta. Ver seção 6.1.
 - Simulação Completa: Para executar a simulação dinâmica, respostas das grandezas elétricas versus o tempo. Ver seção 6.3.
- **Menu Ferramentas:**
 - Alteração Automática de Carga: Permite a alteração do cenário de carga/geração da topologia. Aceita variações tanto percentualmente quanto em valores absolutos de potência ativa e reativa. Ver seção 6.7.
 - Equivalente de Redes: Permite a criação de equivalentes de redes elétricas complexas, com a retenção de barras selecionadas e inclusão das injeções equivalentes das barras eliminadas. Ver seção 6.8.
 - Substituir Modelos e Bibliotecas: Para alterar as bibliotecas de modelos, gráficos e condutores utilizadas pelo Simulight. Ver seção 1.4.
- **Menu Relatórios:**
 - Estado da Rede: Mostra o estado (barras e linhas) do sistema ou topologia por ilhas elétricas, empresas, subestações e áreas. Ver seção 6.4.
 - Ilhas Elétricas: Mostra no sistema ou topologia, o número de dispositivos existentes por ilhas elétricas tanto ativas como inativas. Ver seção 6.6.
 - Medidores: Mostra os medidores existentes no sistema ou topologia, curvas dos medidores depois da simulação dinâmica.
 - LOG de Eventos: Mostra o LOG de eventos que foram realizados durante a simulação dinâmica.
 - Esforço Torcional: Mostra as curvas do esforço torcional dos geradores com seus limites máximos e mínimos permitidos. Ver seção 6.4.
- **Menu Ajuda:**
 - Manual: Abre o manual do programa, para auxílio ao usuário.
 - Sobre: Abre uma janela de informações sobre a versão do Simulight.
- **Ícones:** O Simulight possui uma barra de ferramentas com funções de manipulação de arquivo e acesso rápido a relatórios e a ferramentas.



Abrir um novo caso.



Abrir um caso já existente ou recentemente aberto pelo menu suspenso.



Salvar o caso atual.

	Salvar como outro arquivo.
	Restaurar para o último caso salvo.
	Fechar o caso atual.
	Executar o fluxo de potência.
	Executar a simulação dinâmica.
	Abrir relatório de rede com resultados do fluxo de potência.
	Abrir gráfico de medidores com resultados da simulação dinâmica.
	Abrir o Manual do Simulight.
	Sair do Simulight.

4.2.2 Localizar

O Simulight conta com a opção de procura por nome de elemento, a qual pode ser usada à partir da tela principal do Simulight, tal como mostra a Figura 4.3. A tela permite filtrar por tipo de container (Áreas e Subestações), tipo de dispositivo (de proteção, de medição e os demais, série e shunt) e barramentos (por número ou pelo nome identificador).

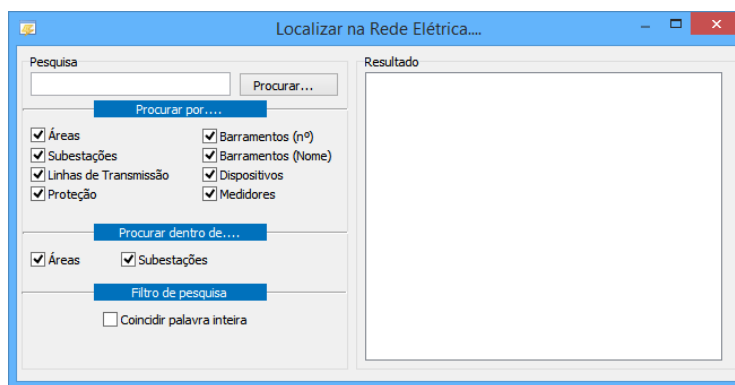


Figura 4.3 Tela Localizar do Simulight.

4.3 Definir Topologia

Existem duas formas de definir uma topologia:

- Iniciando ou criando um novo caso;
- Abrindo ou carregando um caso já existente desde um arquivo de dados.

A partir do menu **Arquivo** → **Novo** o usuário poderá começar a criação de uma nova topologia, tal e como mostrado na Figura 4.4. Nesta Figura observa-se que este menu cria uma **Área Base**. A partir desta Área Base, o usuário construirá a topologia, adicionando e

editando os dispositivos desejados. No Capítulo 5 serão apresentadas as informações necessárias para a construção da topologia do sistema.

O campo “log” da Figura 4.4 serve para informar se algum modelo dinâmico não inicializou corretamente. Este campo é muito útil para usuários avançados, que gerem novos modelos de reguladores, estabilizadores e etc.

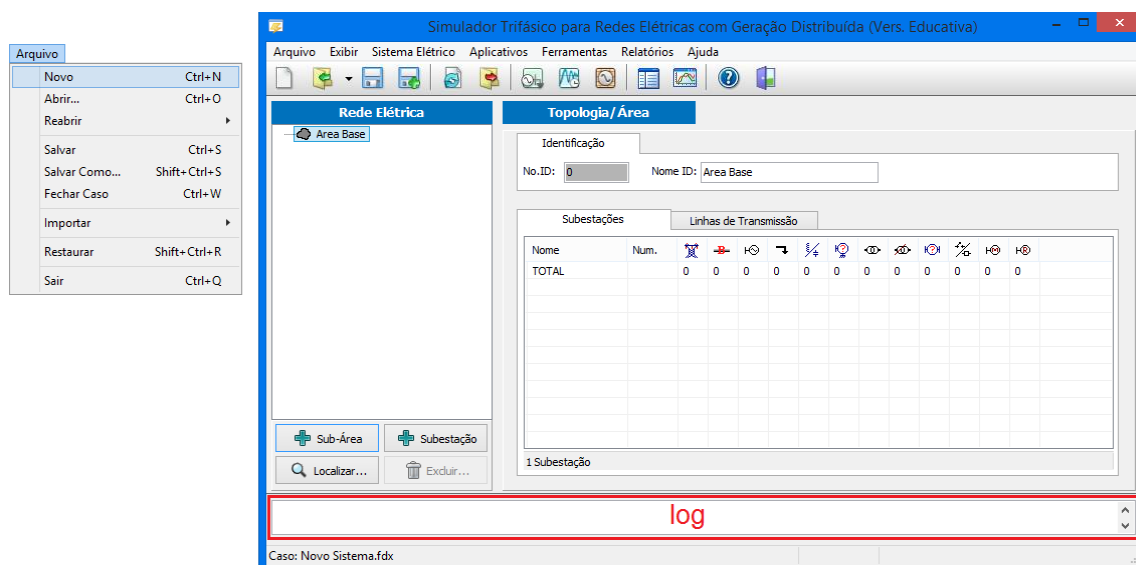


Figura 4.4 Arquivo / Novo.

A partir do menu **Arquivo** → **Abrir** o usuário irá carregar um estudo previamente gravado, tal e como mostrado na Figura 4.5. Toda a descrição topológica da rede contida no arquivo será automaticamente exibida na interface principal.

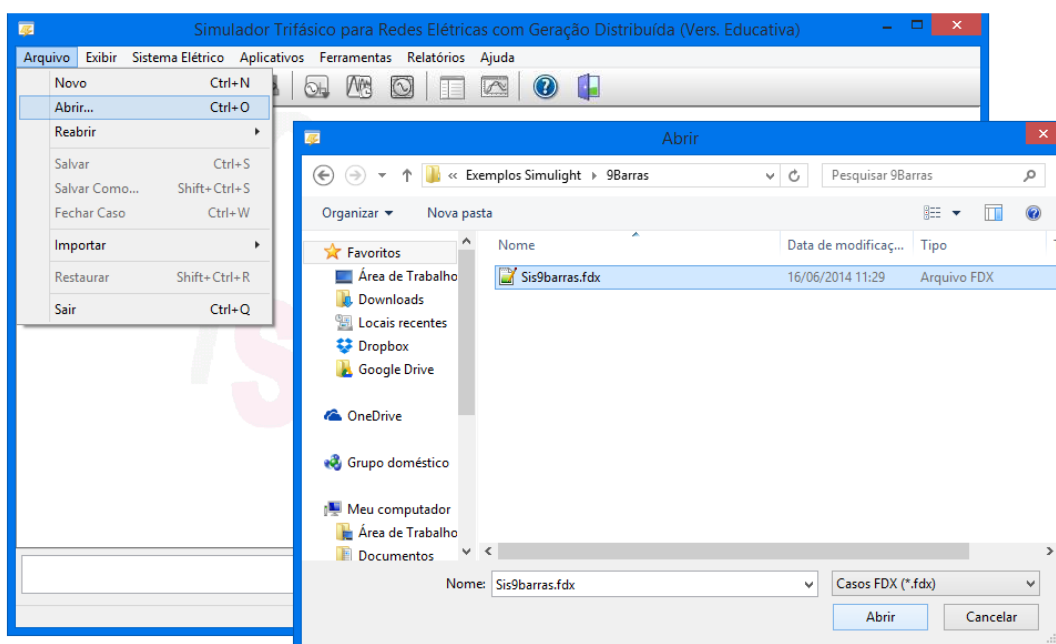


Figura 4.5 Arquivos / Abrir.

O arquivo texto aberto representa um sistema elétrico com duas áreas, 3 empresas e 5 subestações, tal e como mostrado na Figura 4.6. No Capítulo 7.1 (Exemplo 01: Sistema 9 Barras) será mostrado o passo a passo da criação do mencionado arquivo.

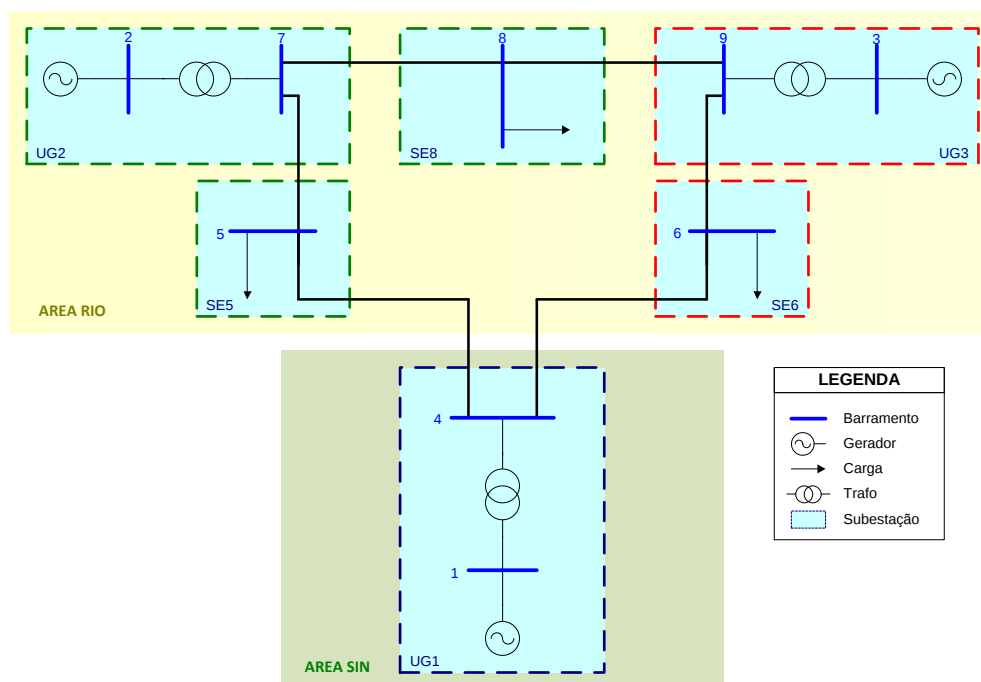
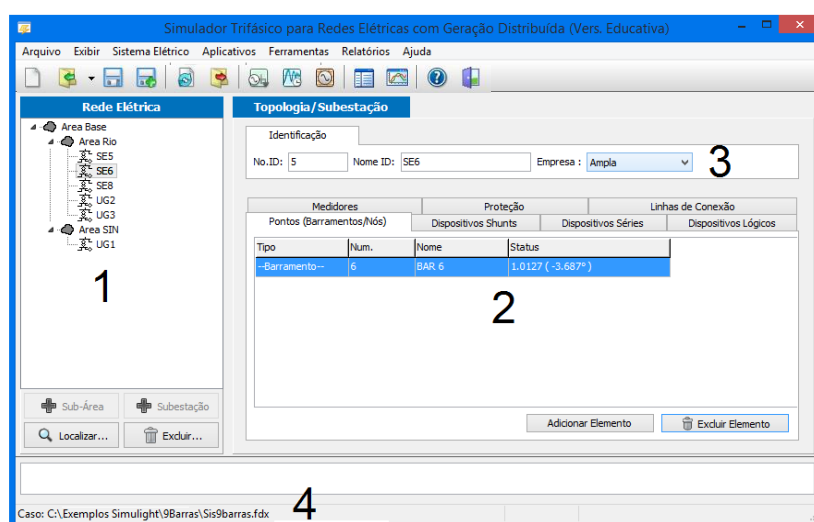


Figura 4.6 Topologia do Sistema 9 Barras.

Na Figura 4.7 observa-se o caso carregado na interface principal com sua descrição respectiva. No Capítulo 5 serão apresentados os detalhes para a adição, edição e/ou eliminação dos dispositivos que compõem a topologia do sistema.



- 1.- Identificação das áreas e subestações do sistema elétrico (configuração hierárquica).
- 2.- Elementos da subestação escolhida de (1).
- 3.- Empresa que a subestação escolhida pertence.
- 4.- O nome do arquivo

Figura 4.7 Caso carregado de um arquivo texto.

4.4 Importar Dados do PRAO

A partir do menu **Arquivo** → **Importar PRAO** o usuário poderá importar dados topológicos da base de dados PRAO, tal e como mostrado na Figura 4.8. Nesta Figura observa-se a tela principal de importação. Nesta tela distinguem-se três painéis principais. (1) Sistema Elétrico: mostra, no lado esquerdo, uma listagem das subestações de transmissão existentes; enquanto no lado direito, uma listagem das barras da subestação escolhida no lado esquerdo. (2) Alimentadores PRAO: permite visualizar a topologia contida em qualquer arquivo exportado pelo aplicativo Light – PRAO. (3) LOG: mostra os detalhes das manipulações efetuadas utilizando a tela de importação.

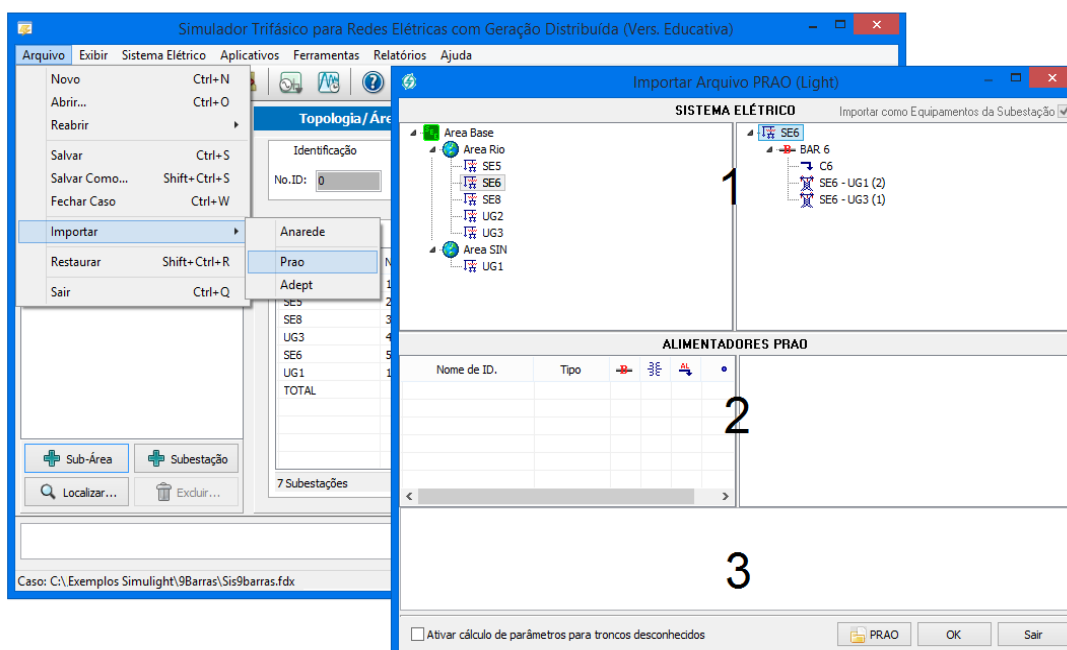


Figura 4.8 Arquivos / Importar PRAO.

Clicando no botão “PRAO” o usuário poderá escolher o “arquivo Prao” (exportado pelo aplicativo Light – PRAO) cuja topologia deseje visualizar, tal e como mostrado na Figura 4.9.

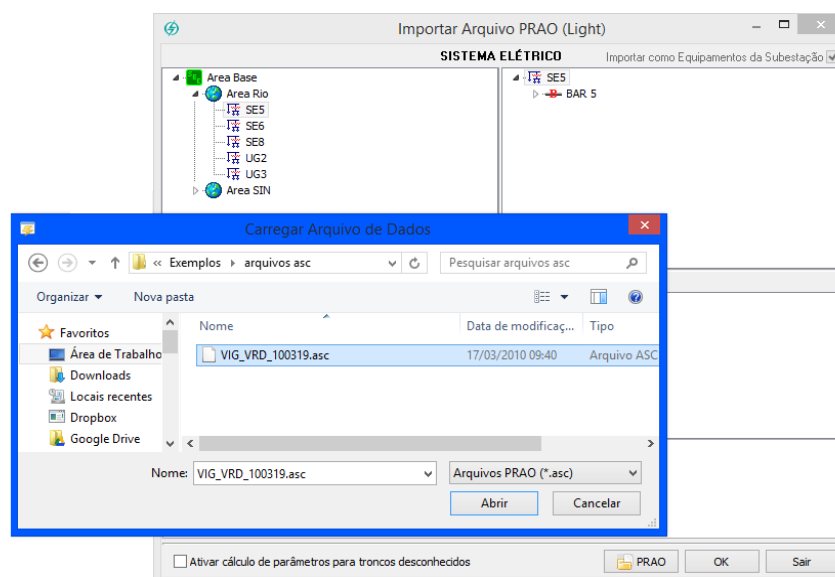


Figura 4.9 Arquivos / Importar PRAO / Botão PRAO.

Uma vez selecionado um “arquivo PRAO”, a topologia do mesmo é carregado no painel “Alimentadores PRAO”, tal e como mostrado na Figura 4.10. Neste painel observa-se que o arquivo possui um alimentador (Barramento de Alta) contendo 3 redes de distribuição que possuem no total 8 nós. No painel “LOG” observa-se um detalhe do processamento dos códigos lidos no “arquivo PRAO”.

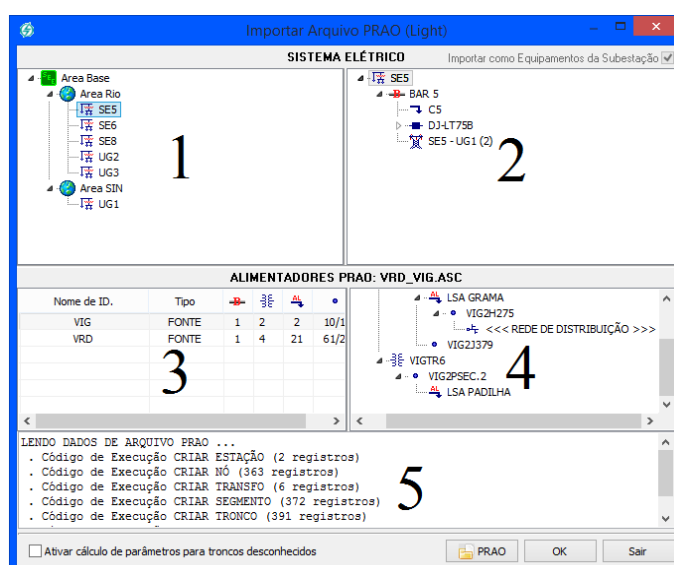


Figura 4.10 Arquivo Prao carregado.

- 1.- Lista de SE onde o alimentador do PRAO pode ser inseridos.
- 2.- Lista de Barramentos da SE selecionada de 1, onde será inserida o alimentador.
- 3.- Lista dos Alimentadores e dispositivos importados.
- 4.- Representação gráfica dos alimentadores

Parâmetros de Controle:

Durante o processo da importação, o Simulight verifica se os valores carregados estão dentro dos valores padronizados, Tabela 4.1, caso o valor esteja fora dos limites, o Simulight assumira o valor do limite superado ou atingido¹. Em caso que o comprimento dos

¹ Caso o usuário deseje realizar algum tipo de modificação, devera fazê-lo na interfase do Simulight.

segmentos/troncos do PRAO esteja com valores menores que três metros, o Simulight colocará um dispositivo lógico (DISP_LOG - seccionador).

Tabela 4.1. Parâmetros de controle utilizados na monitoração dos dados do SGD

Parâmetro de Controle	Limites	
	Mínimo	Máximo
Reatância de transformador	4%	40%
Resistência de sequência positiva	0,02 Ω /km	2,00 Ω /km
Reatância de sequência positiva	0,08 Ω /km	0,60 Ω /km
Resistência de sequência zero	0,10 Ω /km	4,00 Ω /km
Reatância de sequência zero	0,01 Ω /km	2,50 Ω /km
Capacidade	100 A	1200 A

Exemplo de Carregamento do PRAO:

Da na Figura 4.10, uma vez carregado um “arquivo Prao” o usuário poderá escolher os alimentadores (ou redes de distribuição) a serem importadas para o caso carregado na interface principal. Para isto, é preciso escolher um alimentador (4 da Figura 4.10), clicar nele, e sem soltar o mouse, arrastá-lo até um barramento existente no caso carregado (2 da Figura 4.10). O resultado deste processo é mostrado na Figura 4.11. Nesta Figura observa-se que o alimentador “Barramento de Alta” foi importado para o barramento “BARM 05”. Neste processo o importador² criou automaticamente o disjuntor “DJ-PRAO” para conectar dito alimentador no mencionado barramento.

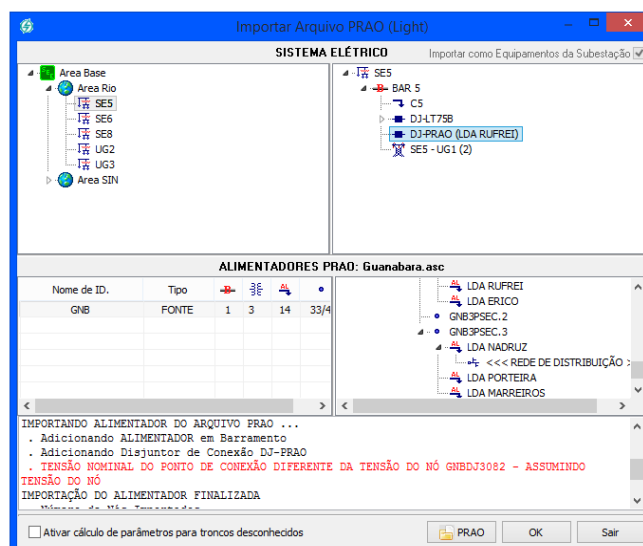


Figura 4.11 Importando dados PRAO para a Interface principal.

² Caso o usuário erre na escolha do alimentador, ele vai ter que realizar todo o procedimento novamente

No painel “LOG” (5 da Figura 4.10), observa-se um detalhe das alterações efetuadas pelo importador. Para sair do importador basta clicar no botão [Sair]. Os novos dispositivos, resultado da importação, poderão ser visualizados e/ou editados a traves da interface principal³.

Exemplo do LOG:

LOG na importação do PRAO para o arquivo principal (*.fdx).

```

LENDO DADOS DE ARQUIVO PRAO ...
. Código de Execução CRIAR ESTAÇÃO (1 registros)
. Código de Execução CRIAR NÓ (8 registros)
. Código de Execução CRIAR SEGMENTO (7 registros)
. Código de Execução CRIAR TRONCO (7 registros)
. Código de Execução CRIAR CARGA (1 registros)
IMPORTANDO ALIMENTADOR DO ARQUIVO PRAO ...
. Adicionando ALIMENTADOR em Barramento
. Adicionando Disjuntor de Conexão DJ-PRAO
. TENSÃO NOMINAL DO PONTO DE CONEXÃO DIFERENTE DA TENSÃO DO NÓ C - ASSUMINDO TENSÃO DO NÓ
. CONDUTOR COM RESISTENCIA MENOR QUE 0.020 OHMS/KM NO SEGMENTO S3 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR COM CORRENTE MAXIMA MAIOR QUE 1200 A NO SEGMENTO S3 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR NÃO IDENTIFICADO NA BASE DE DADOS PARA O SEGMENTO S3 - ASSUMINDO DADOS DECLARADOS
. CONDUTOR COM RESISTENCIA MENOR QUE 0.020 OHMS/KM NO SEGMENTO S4 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR COM CORRENTE MAXIMA MAIOR QUE 1200 A NO SEGMENTO S4 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR NÃO IDENTIFICADO NA BASE DE DADOS PARA O SEGMENTO S4 - ASSUMINDO DADOS DECLARADOS
. CONDUTOR COM RESISTENCIA MENOR QUE 0.020 OHMS/KM NO SEGMENTO S6 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR COM CORRENTE MAXIMA MAIOR QUE 1200 A NO SEGMENTO S6 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR NÃO IDENTIFICADO NA BASE DE DADOS PARA O SEGMENTO S6 - ASSUMINDO DADOS DECLARADOS
. CONDUTOR COM RESISTENCIA MENOR QUE 0.020 OHMS/KM NO SEGMENTO S7 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR COM CORRENTE MAXIMA MAIOR QUE 1200 A NO SEGMENTO S7 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR NÃO IDENTIFICADO NA BASE DE DADOS PARA O SEGMENTO S7 - ASSUMINDO DADOS DECLARADOS
. CONDUTOR COM RESISTENCIA MENOR QUE 0.020 OHMS/KM NO SEGMENTO S5 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR COM CORRENTE MAXIMA MAIOR QUE 1200 A NO SEGMENTO S5 - ASSUMINDO VALOR MINIMO
. CONDUTOR NÃO IDENTIFICADO NA BASE DE DADOS PARA O SEGMENTO S5 - ASSUMINDO DADOS DECLARADOS
IMPORTAÇÃO DO ALIMENTADOR FINALIZADA
. Número de Nós Importados (5 registros)
. Número de Cargas/Capacitores/Geradores Importados (1 registros)
. Número de Chaves e Ramais Importados (5 registros)
  
```

Exemplo de reatâncias fora dos limites:

Reatância no PRAO = 0,05 Ω /km, o Simulight assumira: 0,08 Ω /km

Resistência no PRAO = 2,3 Ω /km o Simulight assumira: 2,00 Ω /km

4.5 Importar dados do ADEPT

A partir do menu **Arquivo → Importar ADEPT** o usuário poderá importar dados topológicos da base de dados ADEPT, conforme mostrado na Figura 4.12. O procedimento é semelhante à importação de dados PRAO. A Figura 4.12 apresenta a janela de importação de dados ADEPT, nesta tela podemos visualizar três painéis principais distintos, semelhante à Figura 4.8. (1) Sistema Elétrico: mostra, no lado esquerdo, uma listagem das subestações de transmissão existentes; enquanto no lado direito, uma listagem das barras da subestação

³ O Simulight somente importa dados estáticos, para simulação no tempo as cargas terão modelo ZCTE (impedância constante).

escolhida no lado esquerdo. (2) Alimentadores ADEPT: permite visualizar a topologia contida em qualquer arquivo exportado pelo aplicativo ADEPT. (3) LOG: mostra os detalhes das manipulações efetuadas utilizando a tela de importação.

Clicando no botão “ADEPT” o usuário pode escolher o “arquivo ADEPT (*.dat)” que será exportado pelo aplicativo, cuja topologia deseja-se visualizar, conforme ilustrado na Figura 4.13.

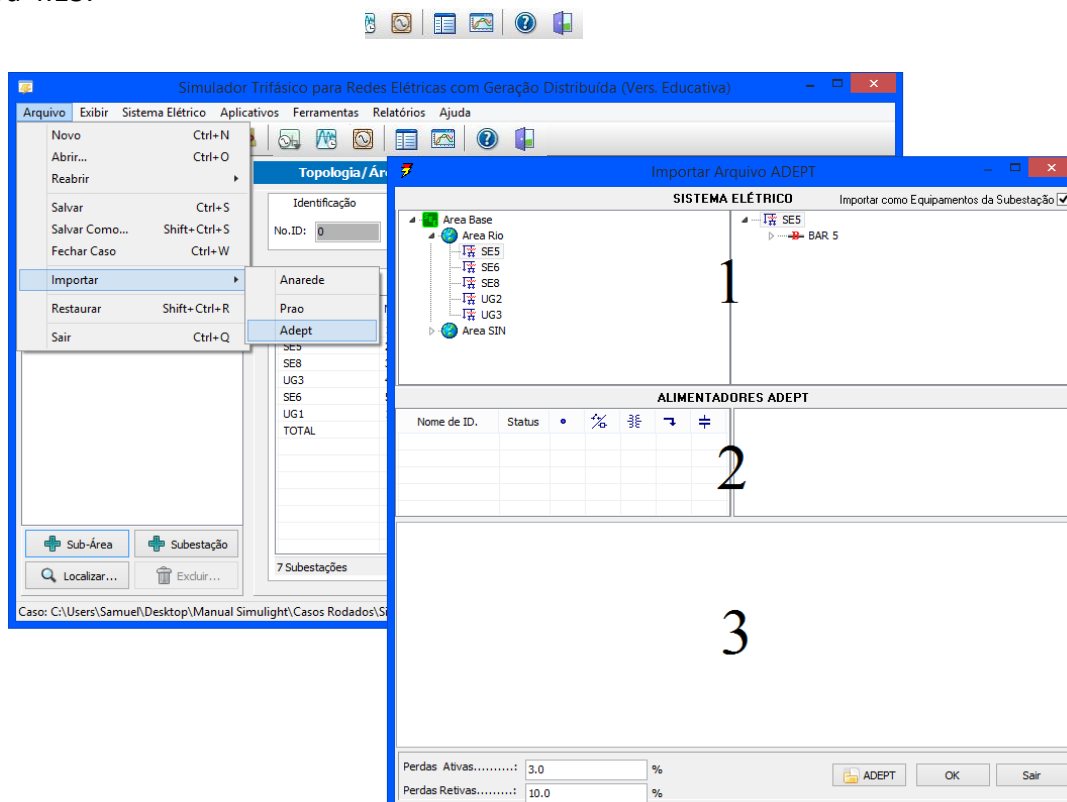


Figura 4.12 Arquivos / Importar ADEPT.

Exemplo de Carregamento do Adept

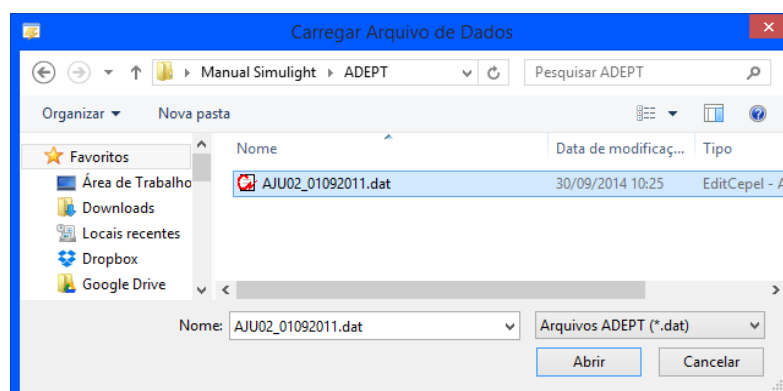


Figura 4.13 Arquivos / Importar ADEPT / Botão ADEPT.

A janela de carregamento de uma base topológica ADEPT está exemplificada na Figura 4.14. Nota-se a similaridade com a janela de carregamento PRAO, ilustrada na Figura 4.11, apresentando a mesma configuração.

O carregamento de um alimentador em um barramento existente no caso base, também é semelhante, basta selecioná-lo e arrastá-lo até o ponto onde se deseja inserir o alimentador. É observado na Figura 4.14 que o aplicativo trata de criar automaticamente um dispositivo lógico, no caso em exemplo denominado “DJ-ADEPT” para a inserção do alimentador no barramento escolhido.

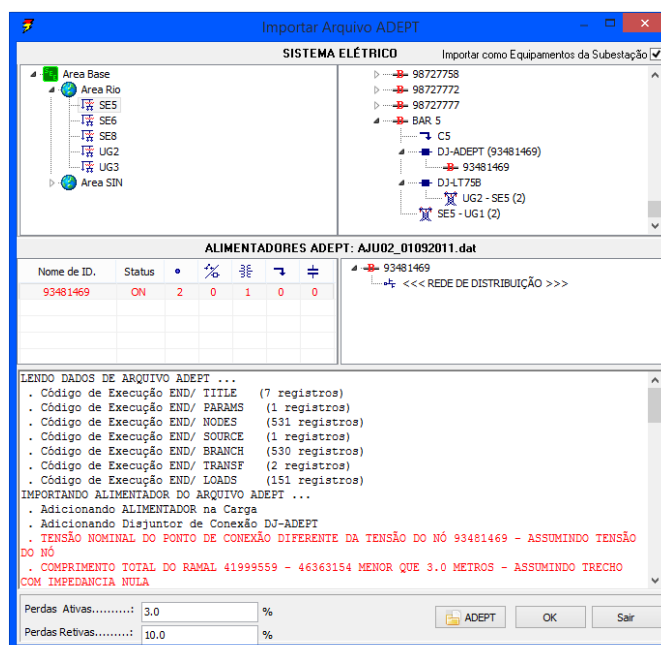


Figura 4.14 Importando dados ADEPT para a Interface principal.

4.6 Importar dados do ANAREDE:

Os dados do sistema são atualizados pelo ONS para diferentes horizontes, como novas obras, novas topologias de carga, manutenção programada de equipamentos etc. Para ter os dados do SIN atualizados no formato do Simulight, ter-se-á que utilizar a ferramenta de importação do Simulight na sequência mostrada na Figura 4.15.



Figura 4.15 Sequência da importação do Simulight.

No Programa Simulight, o usuário poderá importar dados topológicos da base de dados de ANAREDE, para logo serem guardados no formato XML (*.fdx) que o Simulight utiliza, tal e como mostrado na Figura 4.16. Nesta Figura observa-se a tela principal de importação na deve-se clicar no botão [Arquivo] para depois selecionar o arquivo *.PWF.

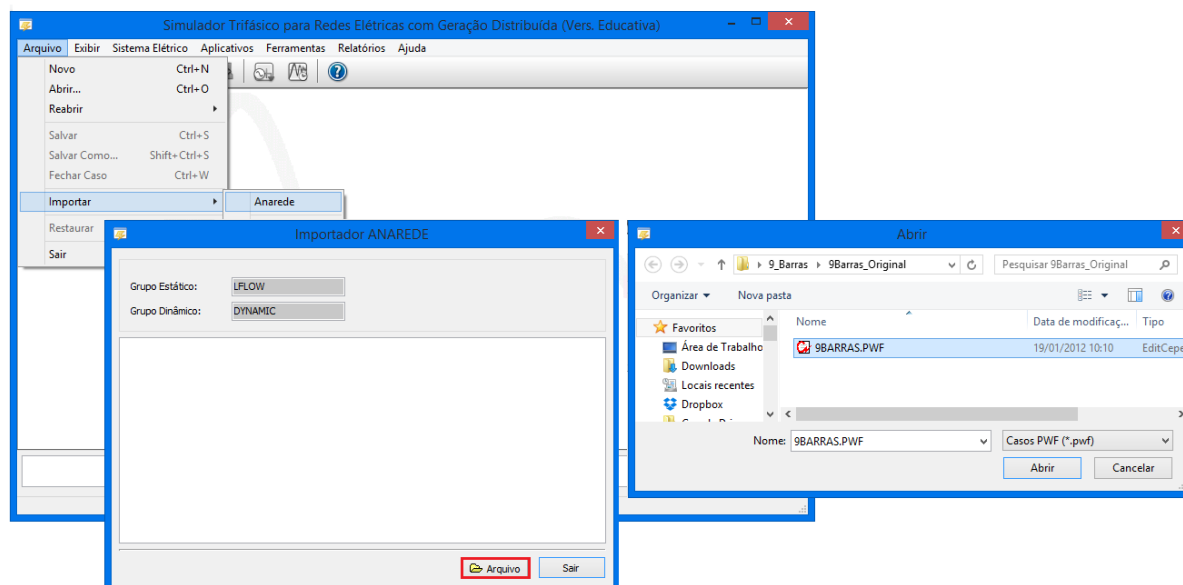


Figura 4.16 Importação de arquivos ANAREDE.

Ao mandar a abrir o arquivo, automaticamente é gerado um LOG sob o carregamento do arquivo PWF, onde se indica os CART carregados do ANAREDE, tal como mostra a Figura 4.17.

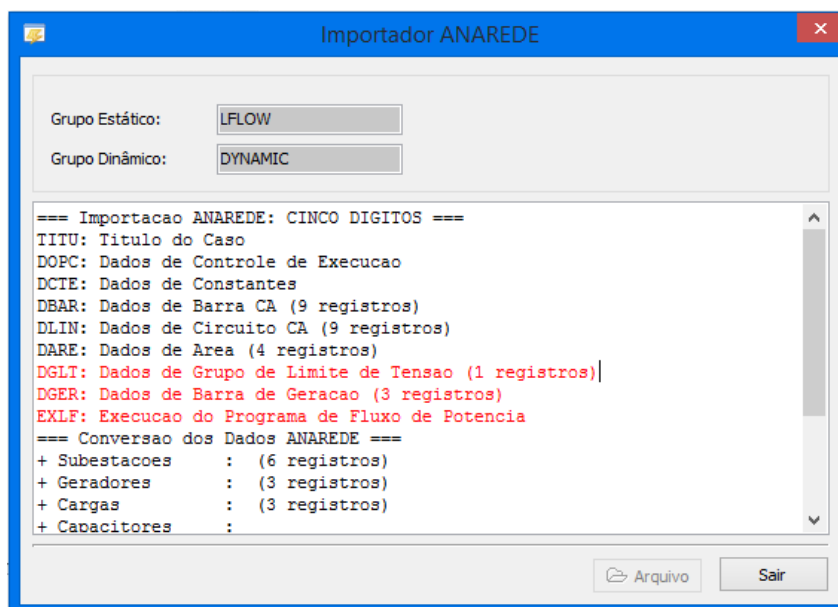


Figura 4.17 Carregamento do Arquivo *.PWF.

OBSERVAÇÕES:

- Mudança dos arquivos PWF: Uma das principais dificuldades da Importação de ANAREDE é devido à “constante” mudança dos arquivos *.PWF, como por exemplo: alteração ou adesão de novos CART.

Estas variações internas dos arquivos *.PWF gerariam algumas dificuldades em futuras importações, criando assim arquivos *.FDX incompletos ou não equivalente ao *.PWF. Uma forma de evitar isto é observar o LOG gerado durante a importação (Figura 4.17) e verificar se todos os CARTs existentes no arquivo *.PWF foram carregados.

- ELO de corrente continua: O Simulight ainda não conta com o modelo do ELO de corrente continua, por tal se recomenda realizar um equivalente em injeção de potência (“Remoção de Elo/Polo⁴” do ANAREDE).

4.7 Controle de Empresas

A partir do menu **Sistema Elétrico** → **Controle de Empresas** o usuário poderá inserir, editar ou excluir empresas, além de visualizar uma listagem dos mesmos, tal e como mostrado na Figura 4.18.

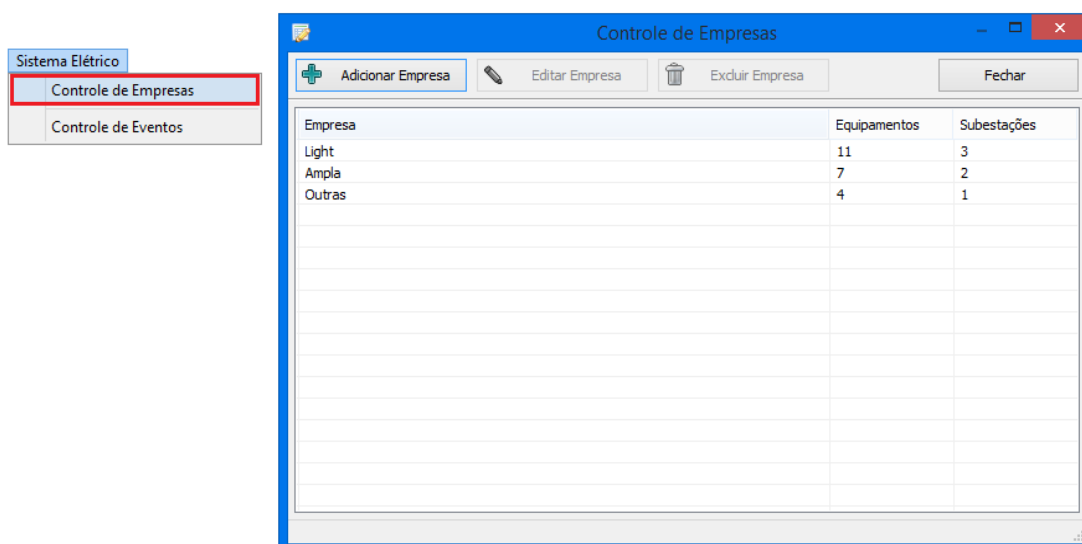


Figura 4.18 Sistema Elétrico / Controle de Empresas.

Nesta tela o usuário pode ordenar a listagem, seja por nome da empresa, número de equipamentos ou número de subestações, além disso, podem-se visualizar as informações mais relevantes correspondentes às empresas, conforme a descrição a seguir:

Controle de Empresas - Lista Principal	
Empresa	Nome da Empresa.
Num. Equipamentos	Quantidade de Equipamentos.
Num. Subestações	Quantidade de Subestações.

⁴ Dados/RedeCC/[Remoção de Elo/Polo] → Criar Injeções de Potência Equivalentes (PCTE)

Fazendo dois cliques numa das empresas listadas, o usuário acessa a uma janela para visualizar e/ou editar as informações básicas da mesma, tal e como mostrado na Figura 4.19. Nesta Figura observa-se um detalhe dos diversos equipamentos pertencentes à empresa, agrupados por tipo (Pontos, Shunts, Séries, Lógicos, Medidores, Proteção e Linhas de Conexão).

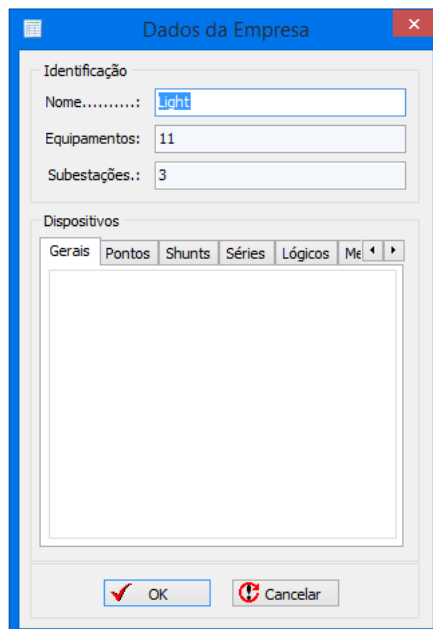


Figura 4.19 Sistema Elétrico / Controle de Empresas / Botão Editar.

4.8 Salvar um Caso

A partir do menu **Arquivo** → **Salvar Como...** o usuário poderá salvar o caso de estudo com um nome diferente ao arquivo inicialmente carregado, como mostrado na Figura 4.20. Caso o usuário deseje salvar com o mesmo nome do arquivo inicialmente carregado, basta clicar no menu **Arquivo** → **Salvar**.

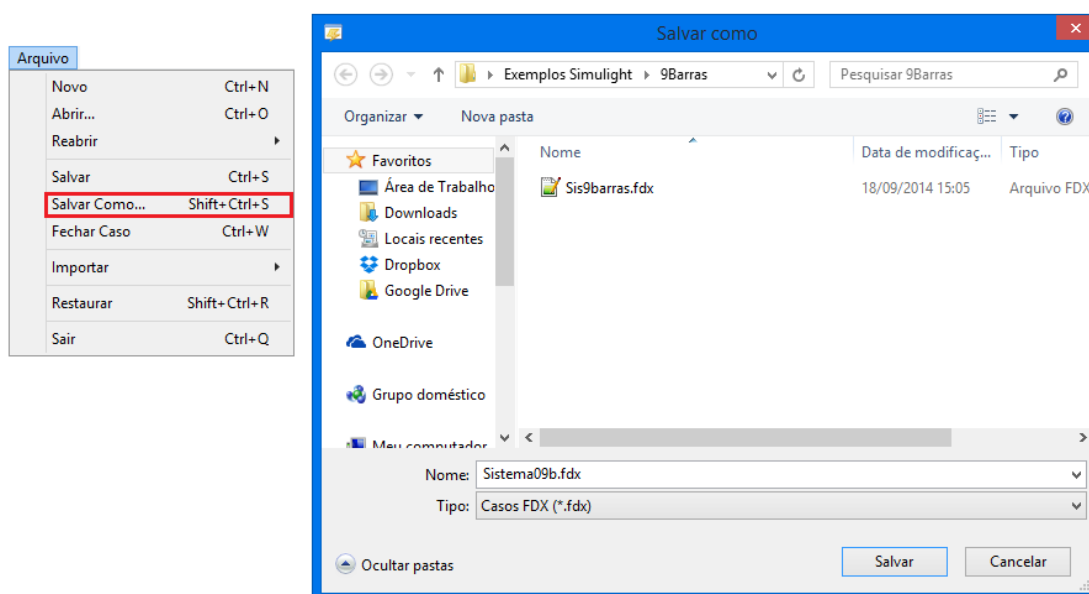


Figura 4.20 Arquivo / Salvar Como

5 Preparação de Dados

5.1 Painel Rede Elétrica

A inserção, edição ou eliminação de todos os dispositivos ou equipamentos que conformam a topologia do sistema inicia-se no “Painel Rede Elétrica”. Este painel encontra-se à esquerda da interface principal, tal e como mostrado na Figura 5.1. Neste painel o usuário pode observar as identificações das áreas e subestações do sistema elétrico, obedecendo à configuração hierárquica entre os elementos.

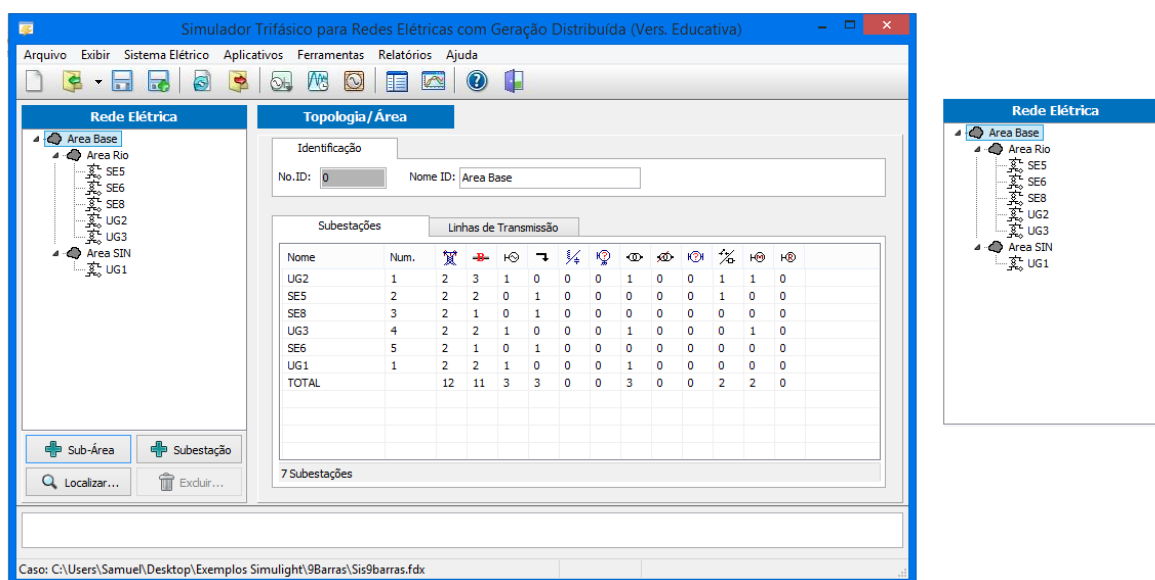


Figura 5.1 Painel Rede Elétrica.

As áreas pertencentes ao sistema, assim como as subestações pertencentes a uma determinada área podem ser inseridas, acessadas ou eliminadas utilizando os botões da parte inferior do painel Rede Elétrica, de acordo com:

 Subárea	Inserir uma Subárea dentro da Área selecionada.
 Subestação	Inserir uma Subestação dentro da Área selecionada.
 Localizar...	Localiza algum dispositivo presente na topologia
 Excluir...	Exclui o elemento selecionado da topologia.

Com estes botões o usuário é livre de fazer uma ordenação ou separação do sistema seja esta por área e/ou empresa, um exemplo disto é mostrada no lado direito da Figura 5.1.

O acesso a uma área ou subestação é realizado clicando no elemento correspondente no painel à esquerda, sendo seus respectivos dados mostrados no painel à direita.

5.2 Representação das Áreas

Na Figura 5.2 observa-se, no painel à direita, o primeiro módulo de edição do programa (Módulo das Áreas) descrevem a topologia da área selecionada.

Na parte superior deste módulo, podemos observar a Identificação da Área, onde o [No. ID] é o identificador interno e o número 0 (da figura) significa que foi a primeira área criada, ou seja, a área base criada pelo Simulight, o algarismo 1 neste campo, indicaria a primeira área criada pelo usuário. [Nome ID] é o nome da área criada pelo usuário e passível de edição.

Na parte inferior se observam duas abas (Subestações / Linhas de Transmissão). Na aba [Subestações] mostra-se uma lista das subestações que pertencem à dita área, assim como algumas informações básicas, como o número de dispositivos instalados em cada subestação.

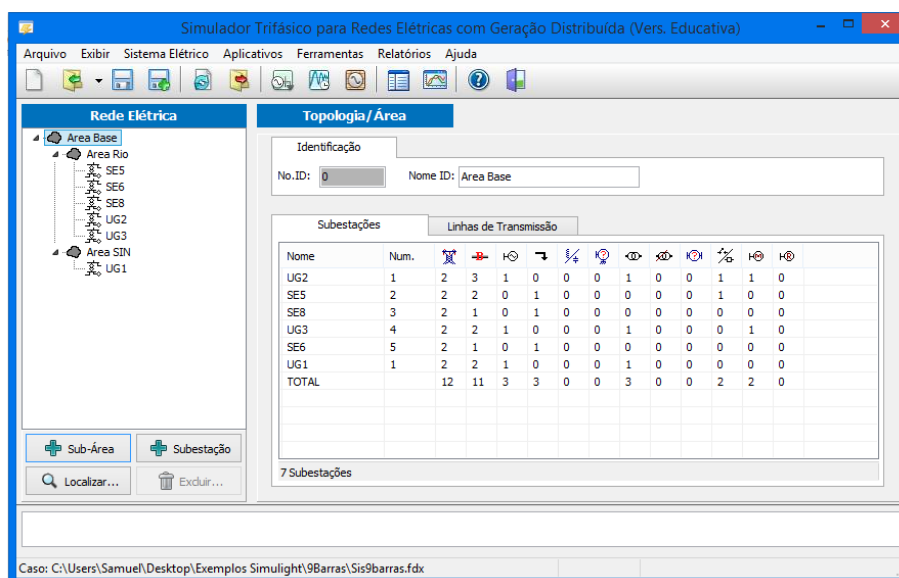


Figura 5.2 Área/Subestações.

Na aba [Linhas de Transmissão] mostram-se algumas informações básicas das linhas instaladas na área, tal como é mostrada na Figura 5.3.

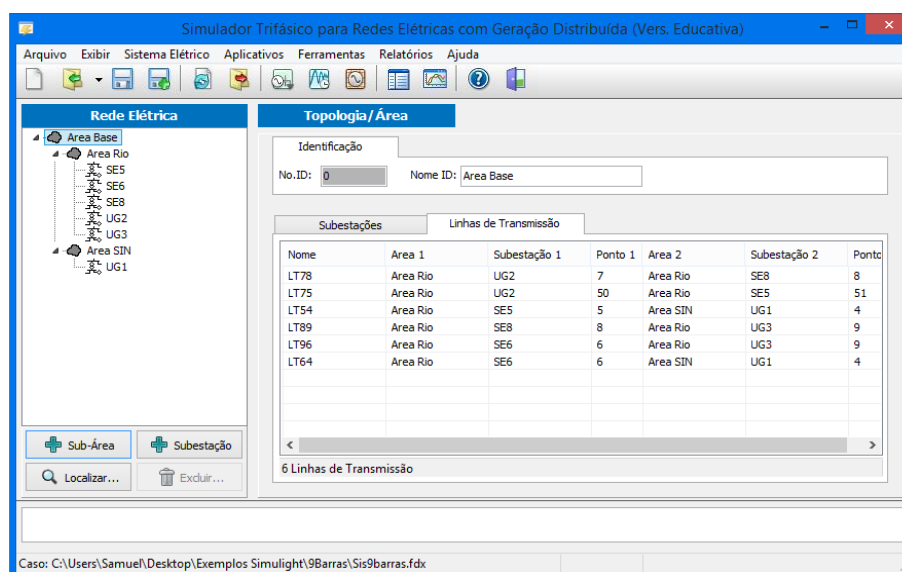


Figura 5.3 Área/ Linhas de Transmissão.

5.3 Representação das Subestações

Na Figura 5.4 observa-se, no painel à direita, o segundo módulo de edição do programa (Módulo das Subestações). Neste módulo observa-se a representação dos elementos pertencentes à subestação, feita dividindo-se as classes de informação em abas distintas para facilidade de manipulação dos dados. As abas consideradas são: Pontos (Barramentos/Nós), Dispositivos Shunts, Dispositivos Séries, Dispositivos Lógicos, Medidores, Proteção e Linhas de Conexão.

5.3.1 Pontos (Barramentos/Nós)

Na Figura 5.4 observa-se também a aba [Pontos (Barramentos/Nós)] selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir um ponto na topologia da subestação; além de visualizar uma lista dos mesmos. Os pontos podem ser do tipo: *barramento* ou *nó*. Fazendo um clique direito com o mouse na lista de pontos, aparecerá um menu *popup* que permite ao usuário filtrar a informação mostrada, assim como localizar informação relevante.

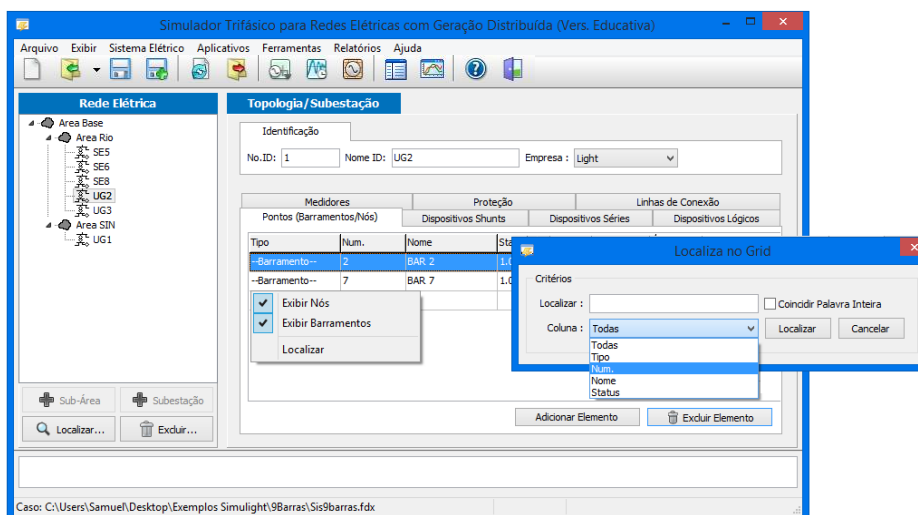


Figura 5.4 Subestação / Aba Pontos.

Para adicionar um barramento basta clicar no botão “Adicionar Elemento” e escolher um tipo. Para editar a informação de um barramento basta fazer dois cliques num dos barramentos listados. Na Figura 5.5 observa-se a tela utilizada para a adição ou edição dos dados de um barramento. Para eliminar um barramento basta clicar no botão “Excluir Elemento” e confirmar a exclusão.

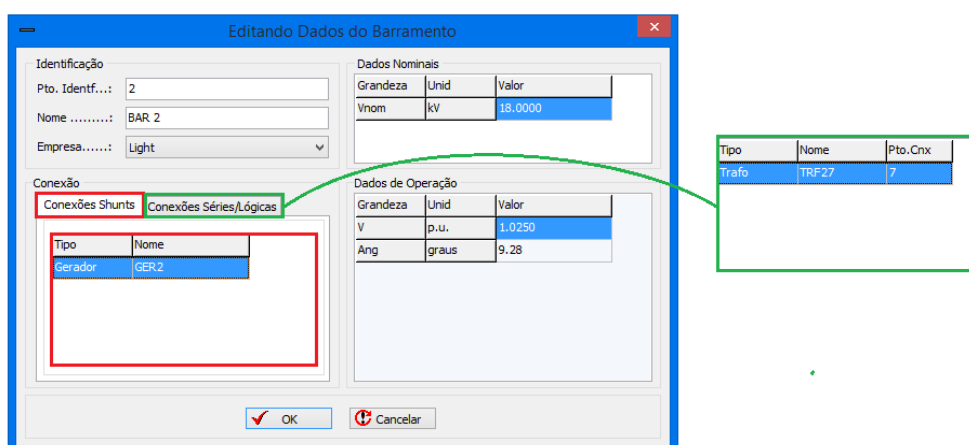


Figura 5.5 Subestação / Aba Pontos / Edição do Barramento.

Sistema trifásico:

Para criar um barramento basta selecionar no “Painel Rede Elétrica” uma subestação (neste caso SE-01), logo selecionar a aba Pontos (Barramentos/Nós), e finalmente clicar no botão “Adicionar Elemento”, tal e como mostrado na Figura 5.6. Nesta figura se observa as tensões de fase em módulo e ângulo (defasagem de ângulo 120°).

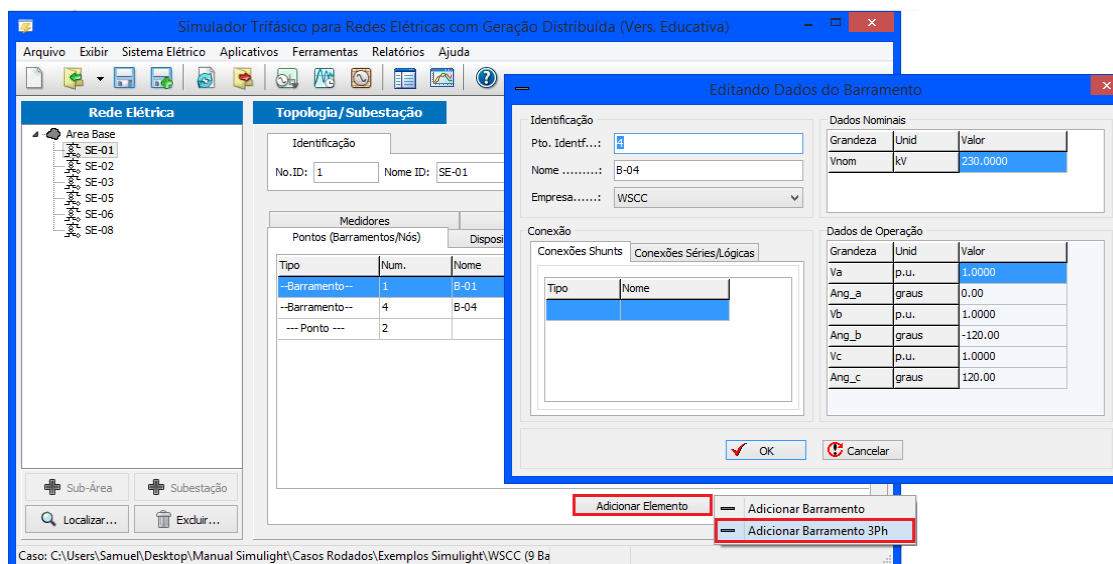


Figura 5.6 Sistema Elétrico / Adicionar Barramento.

5.3.2 Dispositivos Shunts

Na Figura 5.7 observa-se a aba “Dispositivos Shunts” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir um dispositivo shunt na topologia da subestação; além de visualizar uma lista dos mesmos. Os dispositivos podem ser do tipo: *gerador*, *carga*, *capacitor*, *reator* ou *shunt genérico*.

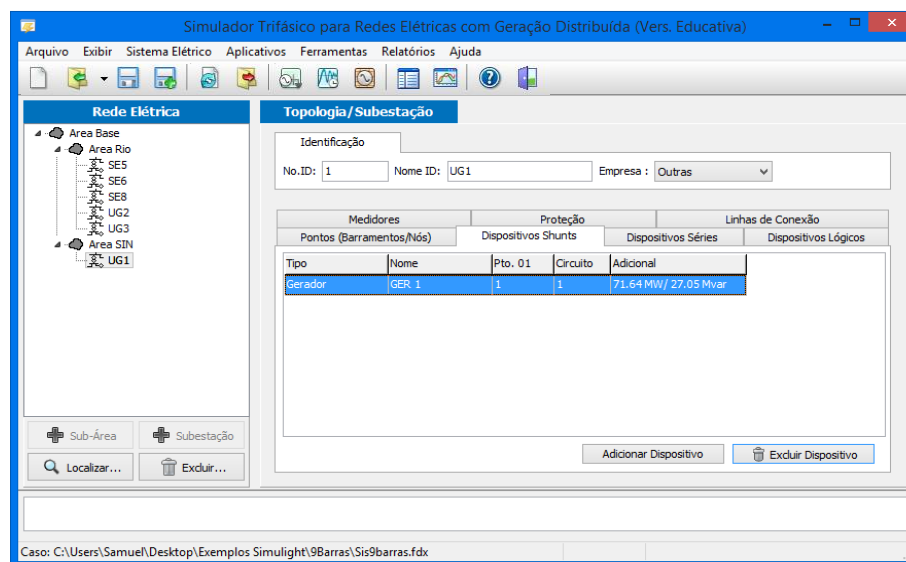


Figura 5.7 Subestação / Aba Dispositivos Shunts.

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de dispositivos shunts, aparecerá um menu, tal e como mostrado na Figura 5.8. Este menu permite ao usuário filtrar a informação mostrada, localizar informação relevante, assim como inserir um disjuntor no dispositivo, inserir medidor de sinal e inserir proteção.

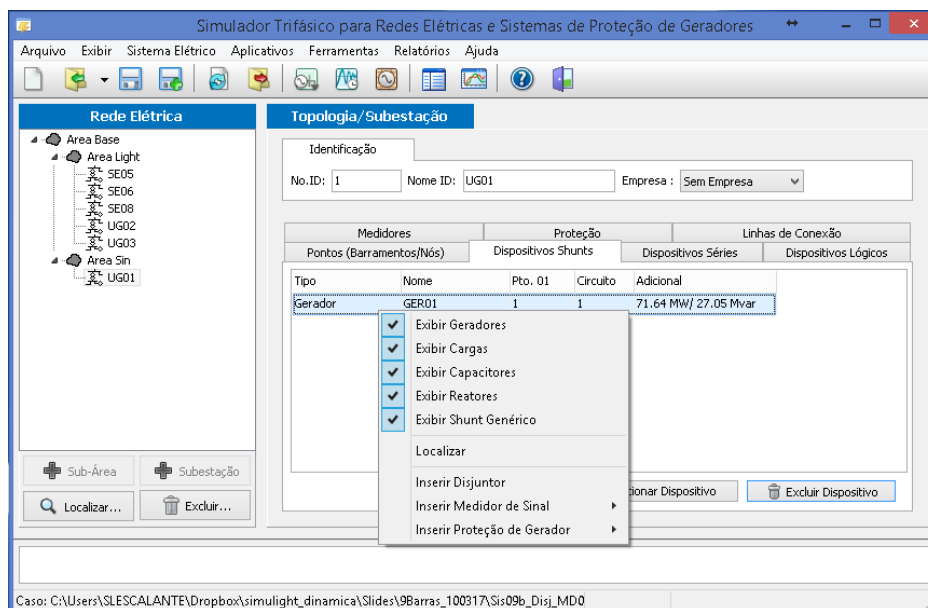


Figura 5.8 Subestação / Aba Dispositivos Shunts / Menu.

Para adicionar um dispositivo basta clicar no botão “Adicionar Dispositivo” e escolher um tipo. Para editar a informação de um dispositivo basta fazer dois cliques num dos dispositivos listados. Para eliminar um dispositivo basta clicar no botão “Excluir Dispositivo” e confirmar a exclusão.

Na Figura 5.9 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de um dispositivo shunt. A janela mostrada é padrão para todos os dispositivos shunts. Na Figura 5.9 observa-se também um exemplo da edição dos dados de um gerador. Nesta janela, pode-se observar três grandes grupos de dados: Identificação, Conexão e Dados Elétricos. Os dados de identificação são os que individualizam um dispositivo. Os dados de conexão são os correspondentes a localização do gerador na topologia da subestação. Os dados elétricos são os correspondentes aos utilizados pelos aplicativos (fluxo de potência, simulação completa).

Na Figura 5.9 se detalha também, as abas correspondentes ao grupo denominado “Dados Elétricos”. Na Figura 5.9 (a) observa-se a aba Gerais selecionada. Nesta aba são mostradas algumas informações comuns a todos os modelos. Na Figura 5.9 (b) observa-se a aba Fluxo selecionada. Nesta aba o usuário pode selecionar, entre os modelos disponíveis, o modelo do gerador correspondente ao aplicativo fluxo de potência. Os parâmetros do modelo selecionado são editados no grid (conjunto de células). Na Figura 5.9 (c) observa-se a aba Simulação selecionada. Nesta aba o usuário pode definir separadamente modelos de Máquina Síncrona, Regulador de Tensão, Regulador de Velocidade e Estabilizador de Potência.

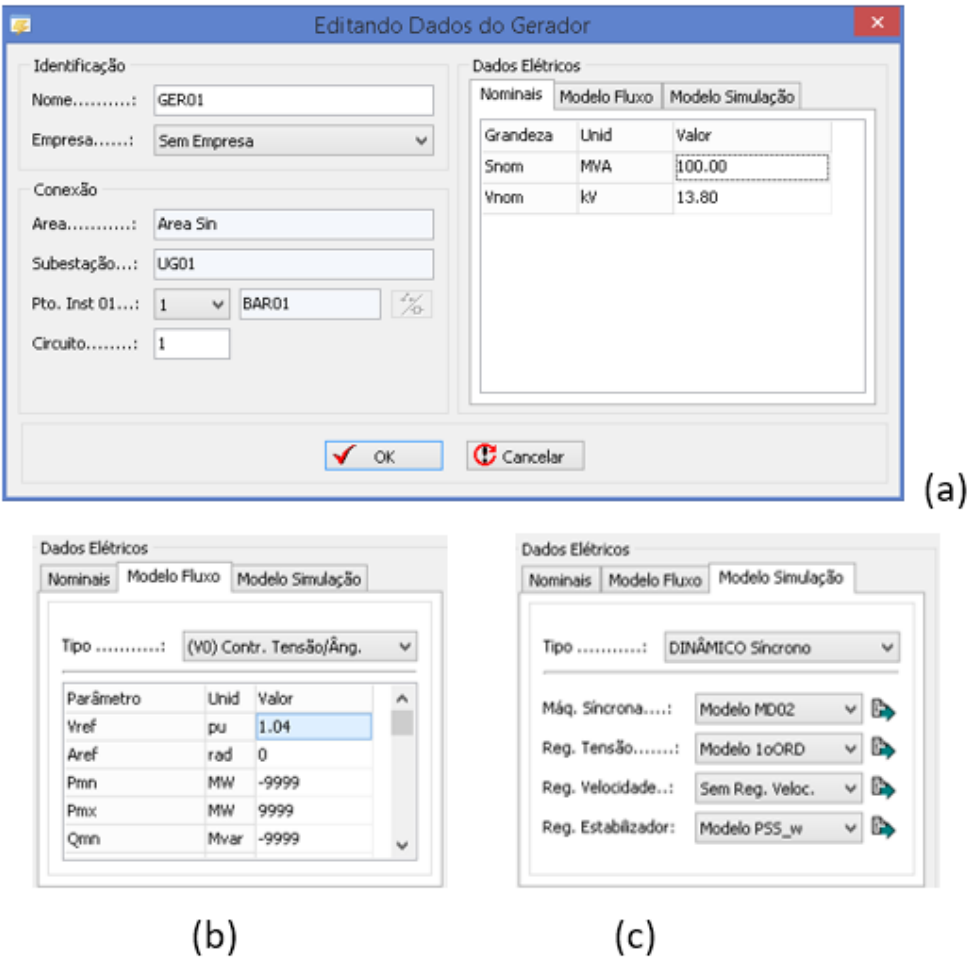


Figura 5.9 Subestação / Aba Dispositivos Shunts / Edição do Gerador.

Se um dispositivo shunt compartilha o mesmo modelo (e parâmetros) para o fluxo de potência e simulação completa, só a aba Fluxo é mostrada na janela de edição respectiva. Alguns dos modelos disponíveis pelo simulador, para os shunts, são os da Tabela 5.1.

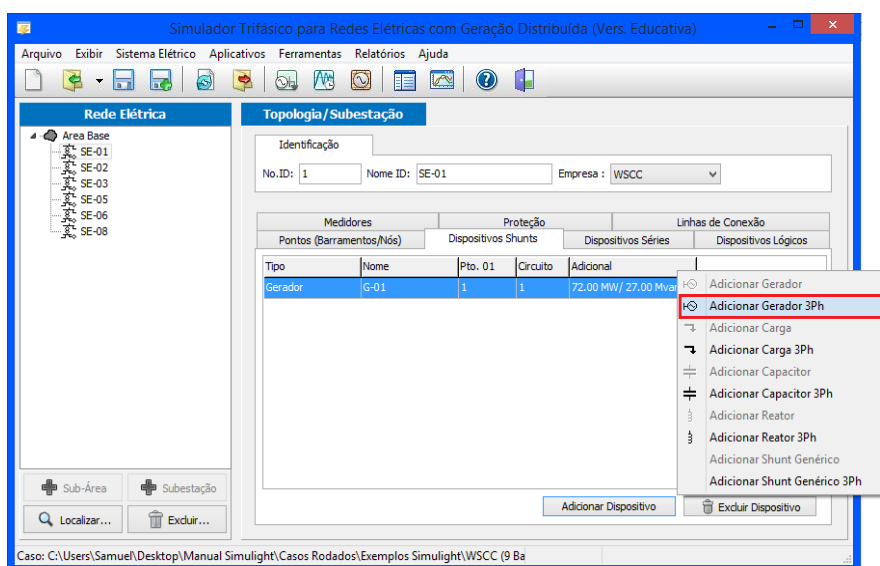
Tabela 5.1. Modelos estáticos de shunts

Shunt	Modelos Fluxo	Modelos Simulação
Gerador	PQ Sem Controle	Dinâmico síncrono
	PV Contr. de Tensão	Fotovoltaico
	V0 Contr. Tensão/Âng.	Z constante
Carga	P constante	Motor Síncrono
	Z constante	Z constante
	ZIP	ZIP
Motor	Motor de Indução	Motor de Indução
Capacitor	Z constante	Z constante
Reator	Z constante	Z constante

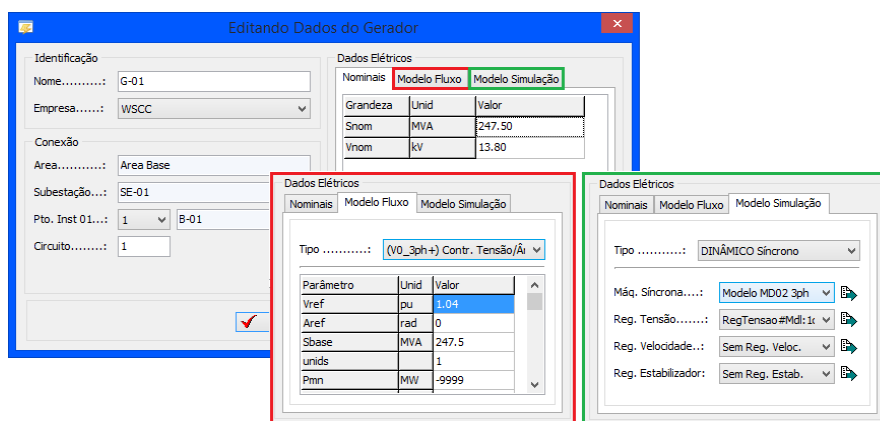
Sistema trifásico:

Para criar um gerador basta selecionar no “Painel Rede Elétrica” uma subestação (neste caso SE-01), logo selecionar a aba “Dispositivos Shunts”, e finalmente clicar no botão “Adicionar Elemento”, tal e como mostrado na Figura 5.10. Clicando no botão “OK” na janela do gerador, o mesmo será inserido na subestação. Nesta figura também se observa as abas Modelo Fluxo e Modelo de Simulação.

Na lista dos modelos de maquinas vemos que aparece “3ph” já que são modelos de maquinas trifásicas.



(a)



(b)

Figura 5.10 Sistema Elétrico / Adicionar Gerador.

5.3.3 Dispositivos Séries

Na Figura 5.11 observa-se a aba “Dispositivos Séries” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir um dispositivo série na topologia da subestação; além de visualizar uma lista dos mesmos. Os dispositivos podem ser do tipo: *transformador*, *LTC*, *ramal* ou *série genérico*.

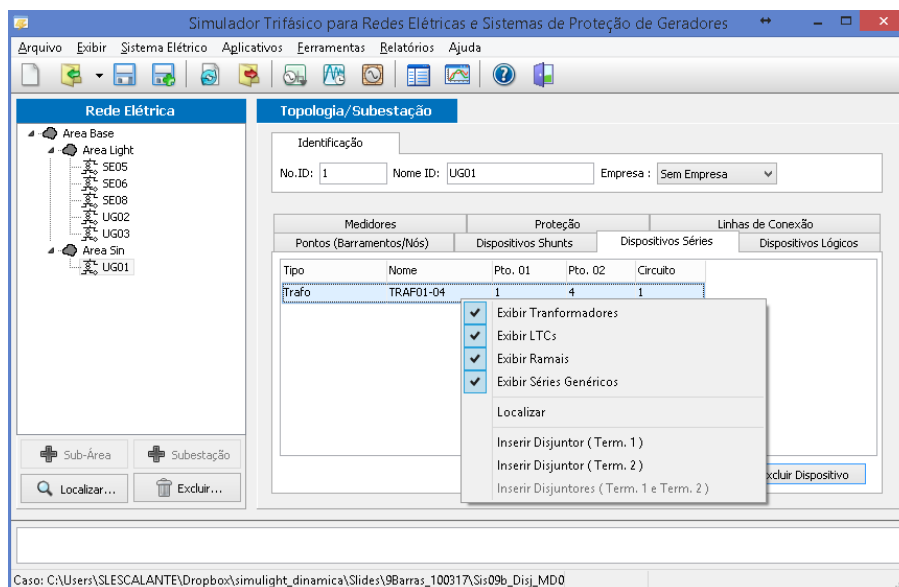


Figura 5.11 Subestação / Aba Dispositivos Séries.

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de dispositivos shunts, aparecerá um menu, tal e como mostrado na Figura 5.12. Este menu permite ao usuário filtrar a informação mostrada, localizar informação relevante, assim como inserir um disjuntor num dos terminais do dispositivo. Para adicionar um dispositivo basta clicar no botão “Adicionar Dispositivo” e escolher um tipo.

Para editar a informação de um dispositivo basta fazer dois cliques num dos dispositivos listados. Para eliminar um dispositivo basta clicar no botão “Excluir Dispositivo” e confirmar a exclusão.

Também é possível adicionar disjuntor de forma automática em um dos terminais dos dispositivos séries.

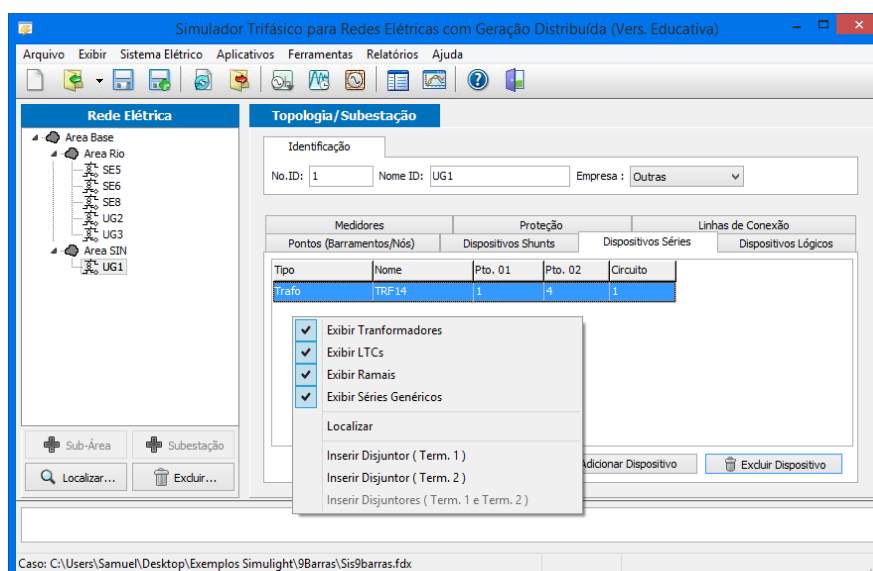


Figura 5.12 Subestação / Aba Dispositivos Séries / Menu.

Na Figura 5.13 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de um dispositivo série. A janela mostrada é padrão para todos os dispositivos séries. Na Figura 5.11 observa-se também um exemplo da edição dos dados de um transformador.

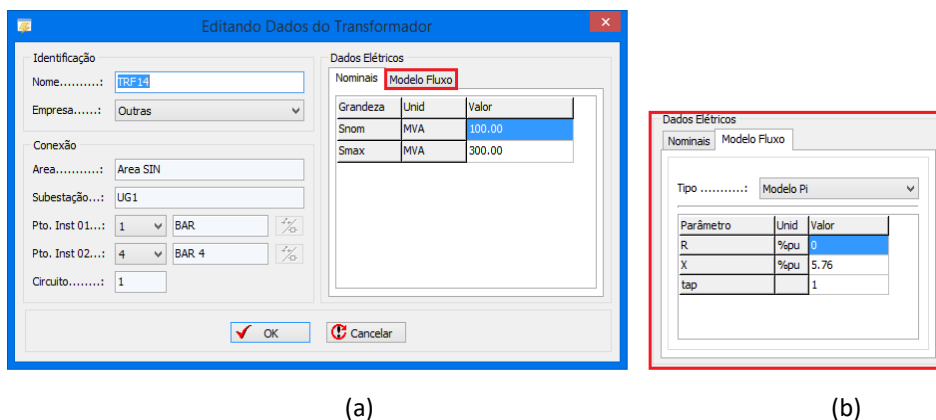


Figura 5.13 Subestação / Aba Dispositivos Séries / Edição do Transformador.

Sistema trifásico:

A criação dos demais elementos (um transformador e duas linhas de transmissão) é apresentada na Figura 5.14a Figura 5.16.

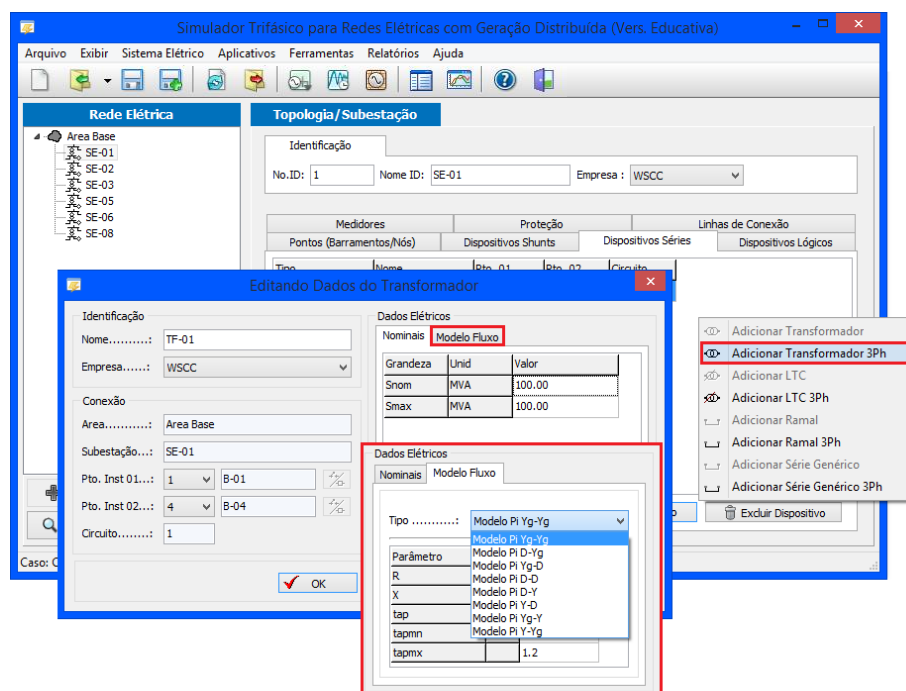


Figura 5.14 Sistema Elétrico / Adicionar Transformador.

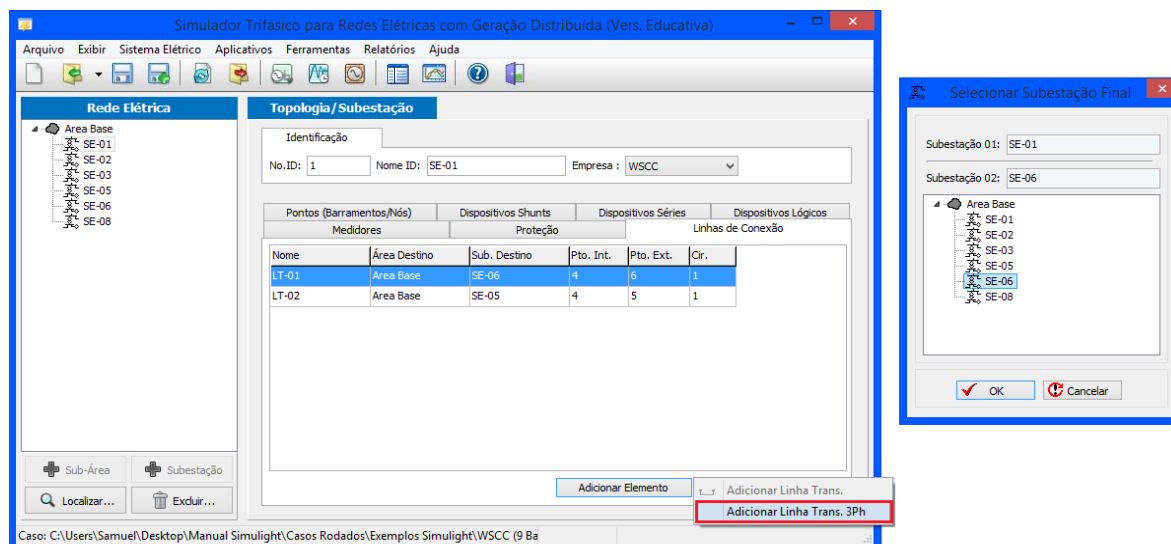


Figura 5.15 Sistema Elétrico / Adicionar Linha de Conexão.

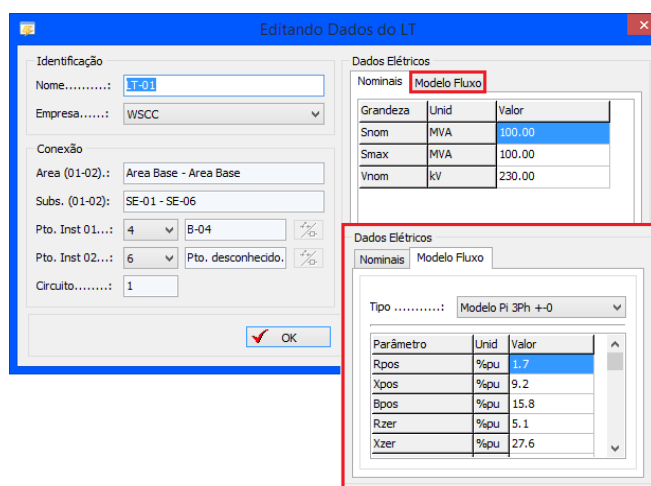


Figura 5.16 Sistema Elétrico / Adicionar Transformador.

5.3.4 Dispositivos Lógicos

Na Figura 5.17 observa-se a aba “Dispositivos Lógicos” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir um dispositivo lógico na topologia da subestação; além de visualizar uma lista dos mesmos. Os dispositivos podem ser do tipo: *disjuntor* ou *seccionador*.

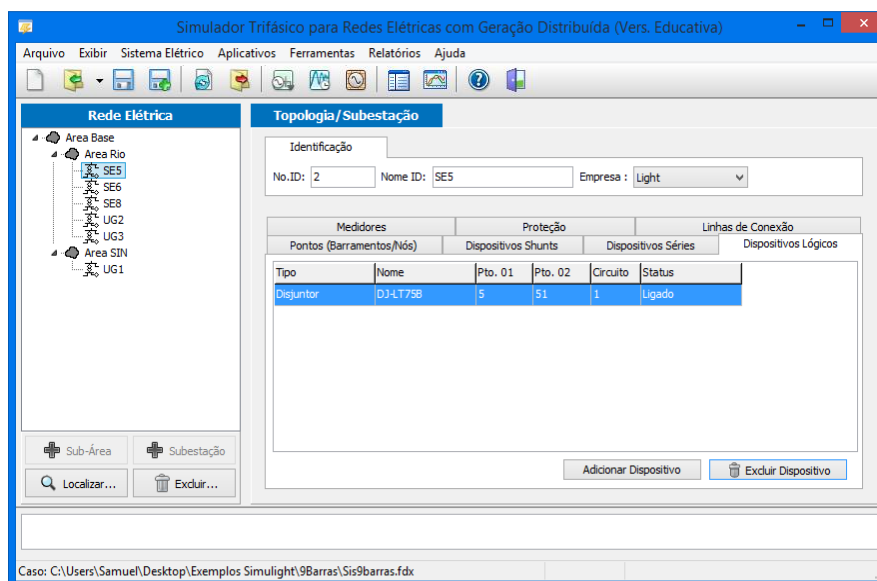


Figura 5.17 Subestação / Aba Dispositivos Lógicos.

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de dispositivos lógicos, aparecerá um menu, tal e como mostrado na Figura 5.18. Este menu permite ao usuário filtrar a informação mostrada, localizar informação relevante, assim como mudar o estado lógico do dispositivo. Para adicionar um dispositivo basta clicar no botão “Adicionar Dispositivo” e escolher um tipo. Para editar a informação de um dispositivo basta fazer dois cliques num dos dispositivos listados. Para eliminar um dispositivo basta clicar no botão “Excluir Dispositivo” e confirmar a exclusão.

Também, o usuário tem a possibilidade de abrir ou fechar (mudança de estatus) do disjuntor.

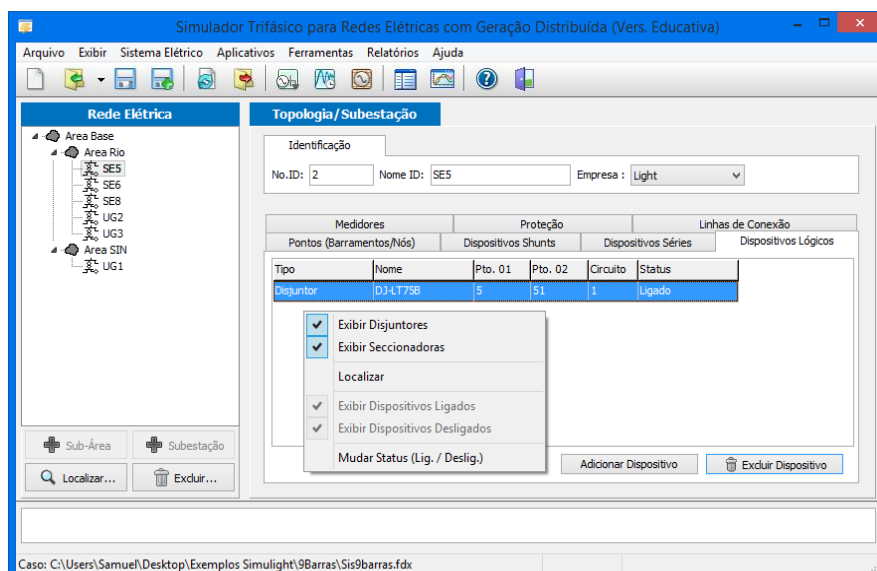


Figura 5.18 Subestação / Dispositivos Lógicos / Menu.

Na Figura 5.19 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de um dispositivo lógico. A janela mostrada é padrão para todos os dispositivos lógicos. Na Figura 5.19 observa-se também um exemplo da edição dos dados de um disjuntor.

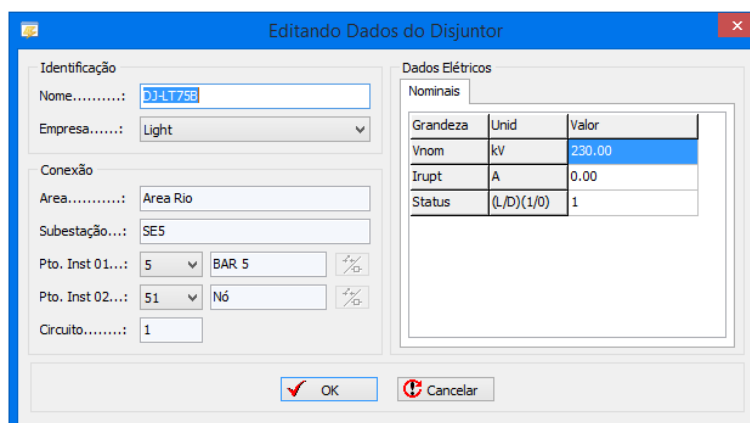


Figura 5.19 Subestação / Edição Dispositivos Lógicos.

Dispositivos Lógicos trifásico:

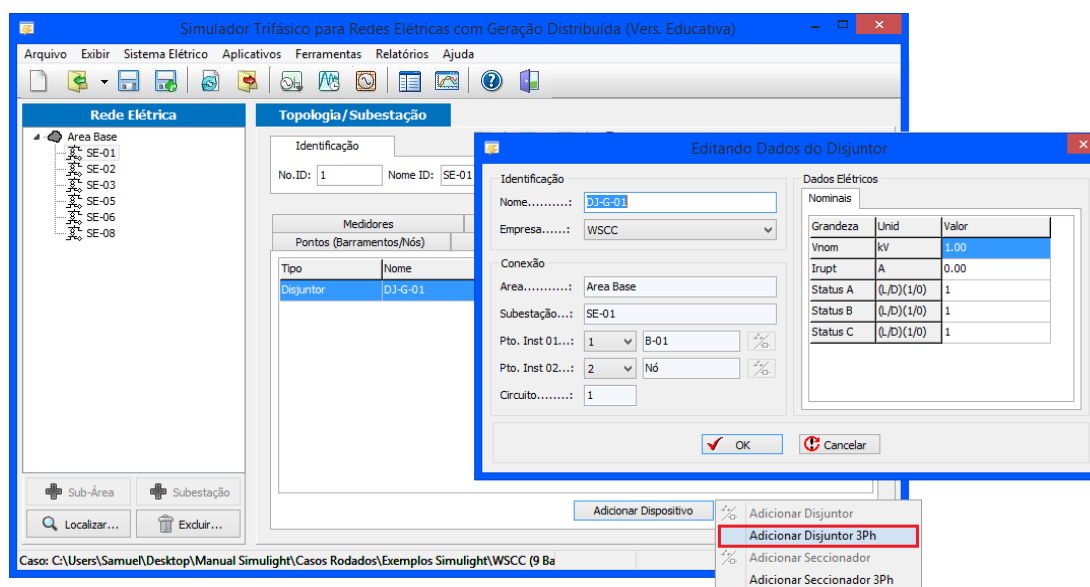


Figura 5.20 Dispositivos /Adicionar Dispositivo /

5.3.5 Medidores

Na Figura 5.21 observa-se a *Aba* “Medidores” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir um medidor na subestação; além de visualizar uma lista dos mesmos. Os medidores podem ser do tipo: *VOLT* (tensão), *FREQ* (frequência), *MVA* (potência aparente), *MW* (potência ativa), *MVAR* (potência reativa), *AMPR* (corrente), *STAT* (Medidor Estático, ainda em desenvolvimento) ou *senal* (sinal interno de algum modelo de um dispositivo).

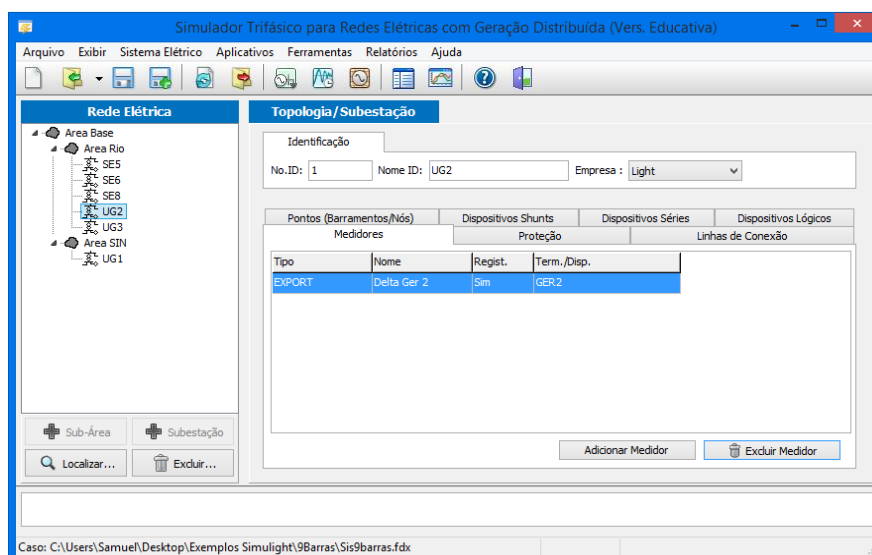


Figura 5.21 Subestação / Aba Medidores

Fazendo um clique direito com o mouse na lista dos medidores, aparecerá um menu, tal e como mostrado na Figura 5.22. Este menu permite ao usuário filtrar a informação mostrada. Para adicionar um medidor basta clicar no botão “Adicionar Medidor” e escolher um tipo. Para editar a informação de um medidor basta fazer dois cliques num dos medidores listados. Para eliminar um medidor basta clicar no botão “Excluir Medidor” e confirmar a exclusão.

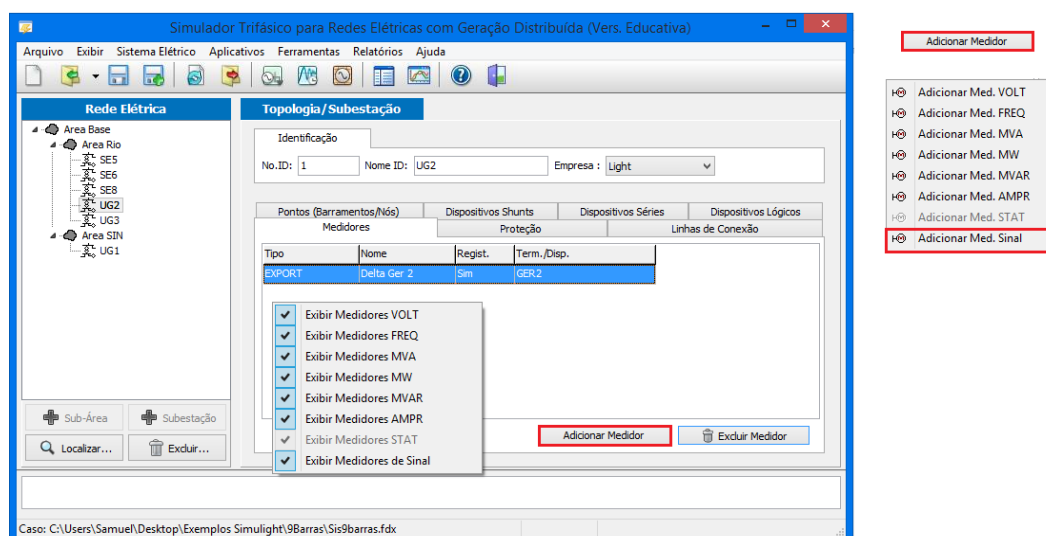


Figura 5.22 Subestação / Aba Medidores / Menu.

Na Figura 5.23 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de um medidor, no exemplo da figura mostra a escolha da medida “delt” que é a medida de sinal interna (variáveis internas do *LIBMODELS* ou de arquivo de dados *.fdx), neste caso o ângulo delta do gerador 2. A janela mostrada é padrão para todos os medidores. Na Figura 5.23 observa-se também um exemplo da edição dos dados de um medidor de sinal, neste caso o nome do medidor da medida correspondente: “DELTA: GERD02”.

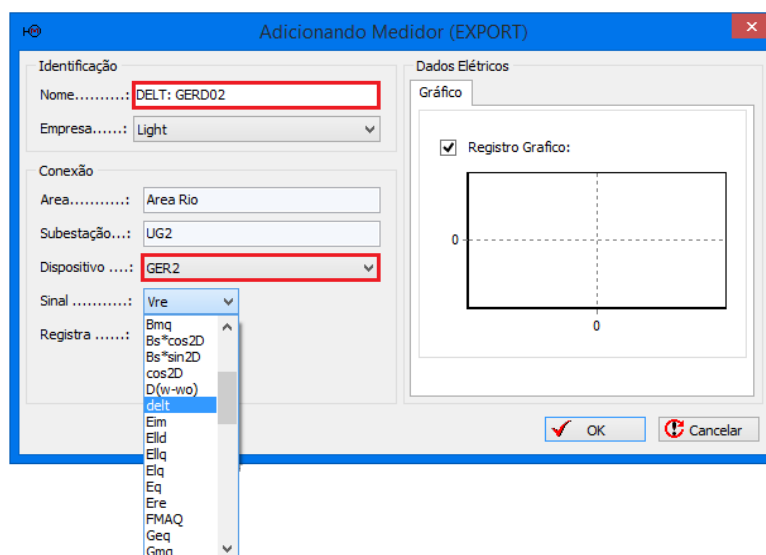


Figura 5.23 Subestação / Aba Medidores / Edição do medidor de sinal

Medidor de Tensão trifásico:

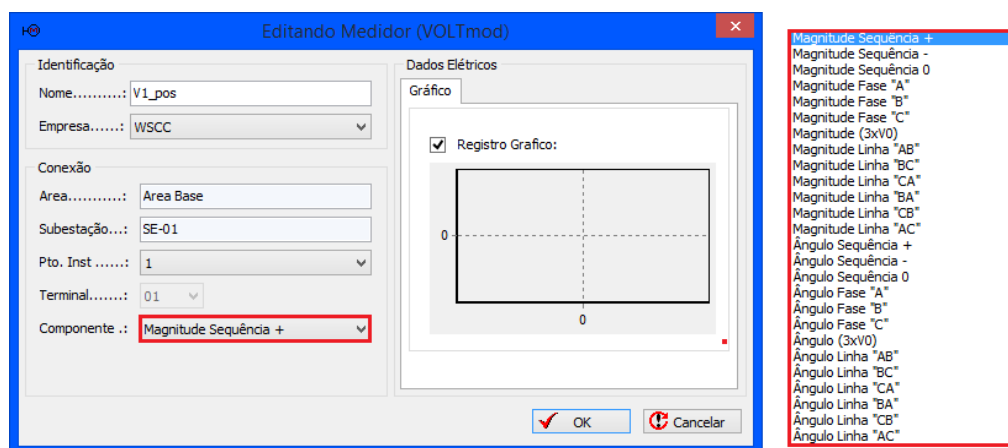


Figura 5.24 Medidores /Adicionar Medidores / Voltmod

Medidor de Corrente trifásico:

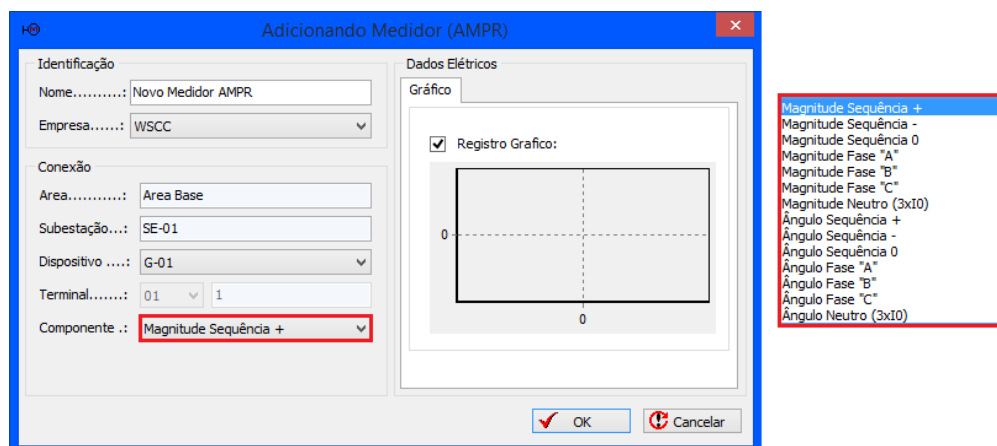


Figura 5.25 Medidores /Adicionar Medidores / Voltmod

5.3.6 Proteção

Na Figura 5.26 observa-se a aba “Proteção” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir um relé na subestação; além de visualizar uma lista dos mesmos. Essa lista informa função e nome, se há um disjuntor associado, o tipo de medida observada pelo relé e a ação que o mesmo executa.

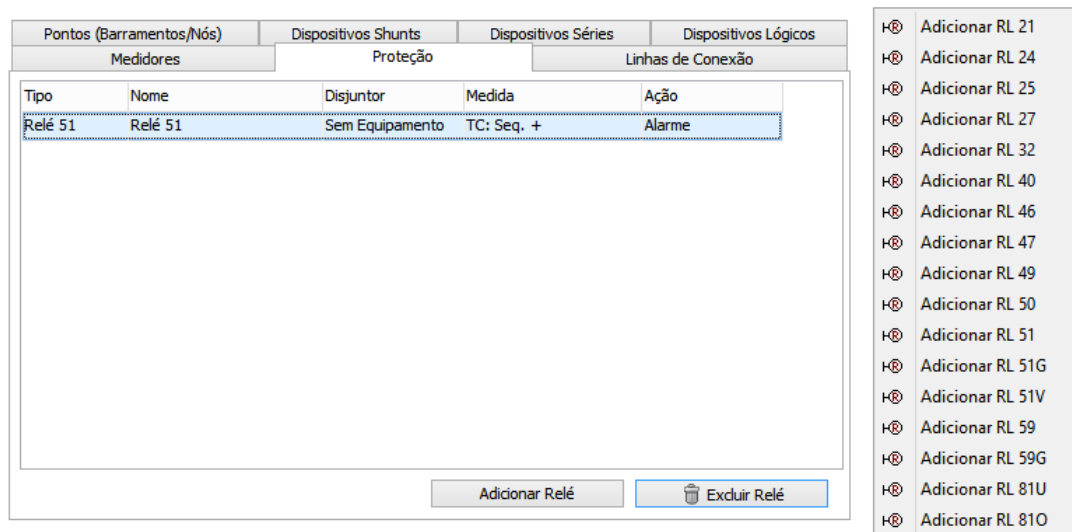


Figura 5.26 Subestação / Aba Proteção

Os relés de proteção disponíveis para a instalação no Simulight são listados na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2. Lista de relés

21	Distância	50	Sobrecorrente instantânea
24	Volts/Hz	51	Sobrecorrente temporizada
25	Sincronismo	51G	Sobrecorrente temporizada de neutro
27	Subtensão temporizado	51V	Sobrecorrente com Restrição de Tensão
32	Reversão de potência	59	Sobretensão temporizado
40	Perda de excitação	59G	Sobretensão temporizado de neutro
46	Sobrecorrente de sequência negativa	81O	Sobrefrequência
47	Sobretensão de sequência negativa	81U	Subfrequência
49	Sobrecorrente de imagem térmica		

Para adicionar um relé basta clicar no botão “Adicionar Relé” e escolher um tipo. Para editar a informação de um relé, basta fazer dois cliques num dos relés listados. Para eliminar um relé basta clicar no botão “Excluir Relé” e confirmar a exclusão. Fazendo um clique direito com o mouse na lista dos relés, aparecerá um menu que permite filtrar pelo tipo de relé exibido.

Com o duplo clique sobre um relé na lista ou utilizando o menu “Adicionar Relé”, a tela de edição de relés da Figura 5.27 é exibida. Nessa tela é possível alterar o modo de

atuação do relé (operação, alarme ou monitoração), seu ponto de conexão e o disjuntor que ele comandará (opcional no modo alarme).

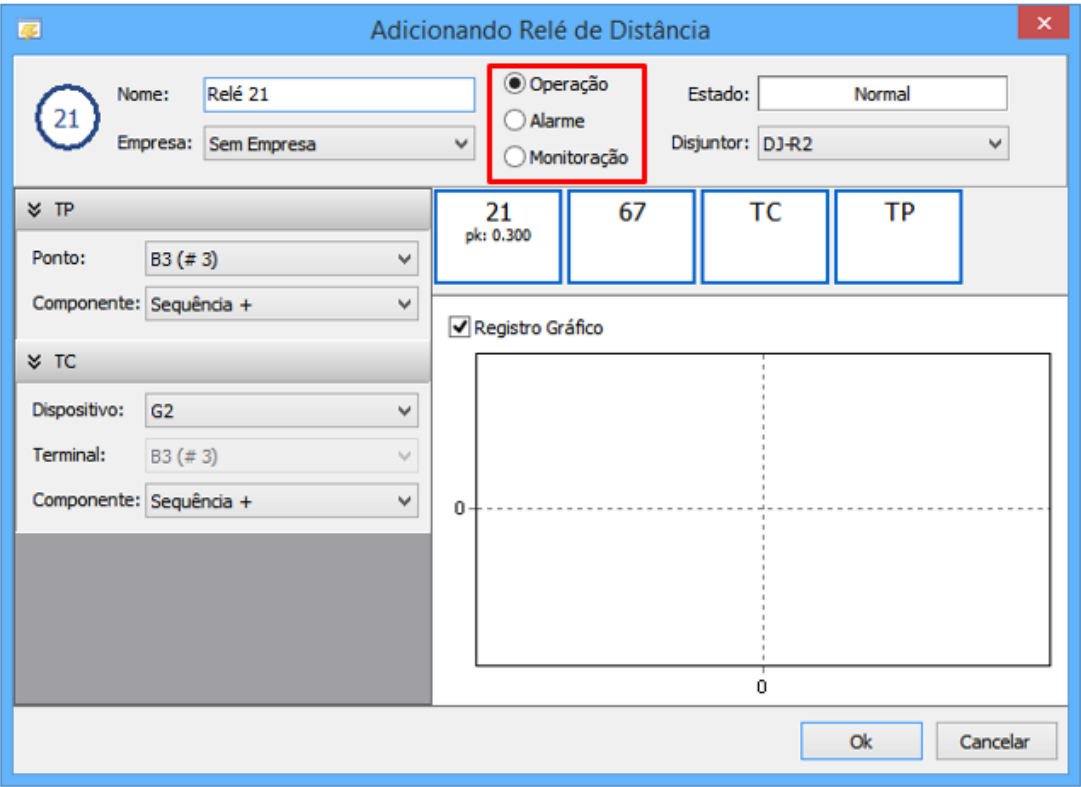


Figura 5.27 Subestação / Aba Proteção / Edição de relé.

O modo de um relé dita a sua ação quando sensibilizado e ativado. Relés no modo *operação* irão agir abrindo o disjuntor associado enquanto aqueles que estiverem no modo *alerta* apenas emitirão uma mensagem no *log* de simulação. A Tabela 5.3 resume as diferenças.

Tabela 5.3. Ação dos relés

	Disjuntor associado	Trip	Alerta na interface
Operação	<i>Obrigatório</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>
Alarme	<i>Opcional</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>
Monitoração	<i>Obrigatório</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>

No canto esquerdo da Figura 5.27 o usuário tem acesso aos dados do ponto de conexão do relé. Essa parte da tela é variável de acordo com a função do relé em edição. Na mesma figura, o relé tipo 21 exige um TP e um TC associado a um mesmo dispositivo. Funções como a 27 e 59 exigem apenas um barramento ou nó de conexão para o seu TP. Outras como 51G e 59G são instaladas no neutro de geradores apenas. A Tabela 5.4 relaciona blocos de conexão com os relés que os utilizam.

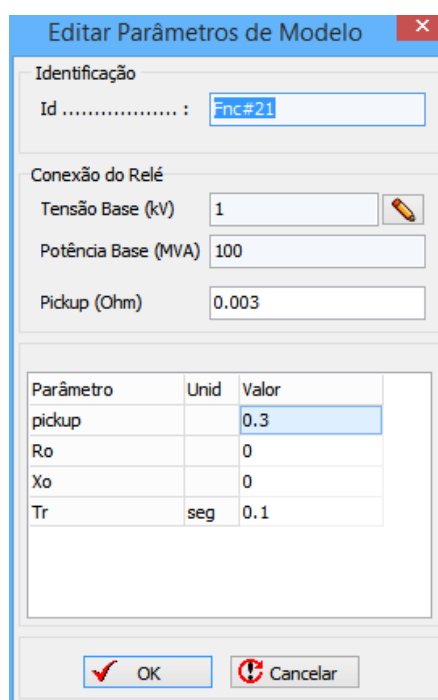
Tabela 5.4. Tipo de conexão dos relés

Bloco de Conexão	Relés
TP	21, 24, 25, 27, 40, 47, 59, 59G

TC	21, 40, 46, 49, 50, 51, 51G
FR (Frequência)	24, 81o, 81u
PQ (Potência)	32

No centro da tela, uma faixa horizontal com blocos mostra os modelos do relé. Cada bloco representa um componente, como TP ou TC, ou função. Quando função, se houver parâmetro de *pick-up* o mesmo é exibido abaixo do identificador da função. Com um clique uma nova tela permite a edição de parâmetros da função, como ilustra a Figura 5.28.

Na tela da Figura 5.28 o usuário pode editar parâmetros específicos do relé. Os parâmetros *pickup* e *Tr* são comuns a vários relés e representam o valor limite da grandeza medida e o tempo de atuação do relé. Para o *pickup* a tela fornece um campo especial que faz a conversão de unidades para *pu* automaticamente, conforme as bases indicadas.



A janela 'Editar Parâmetros de Modelo' possui os seguintes campos e tabelas:

Identificação

Id : fnc#21

Conexão do Relé

Tensão Base (kV) : 1

Potência Base (MVA) : 100

Pickup (Ohm) : 0.003

Tabela de Parâmetros:

Parâmetro	Unid	Valor
pickup		0.3
Ro		0
Xo		0
Tr	seg	0.1

Botões: OK, Cancelar

Figura 5.28 Subestação / Aba Proteção / Edição de relé / Edição de Parâmetro de Modelo.

O botão ao lado do campo *Tensão Base (kV)* abrirá a janela do barramento onde o relé está instalado para o usuário alterar a tensão base. O valor utilizado é o do campo “*Vnom*”. O único relé que não utiliza valor de *pick-up* em *pu* é de reversão de potência (32), cujo *pick-up* é em MW. A potência base utilizada, por padrão, é a adotada em todo o sistema de 100 MVA. A exceção é no relé 51G que carrega a tensão base do gerador (parâmetro *Sbase × unids* no modelo de máquina síncrona).

Após a rodar a simulação dinâmica (ver Simulação Completa 6.3), essa tela exibirá um gráfico contendo a medida vista pelo relé e outras linhas auxiliares, conforme a Figura 5.29 (a). A medida é desenhada em azul enquanto o valor de *pick-up* (se disponível) na linha horizontal vermelha. O instante em que o relé foi sensibilizado é indicado com a reta vertical amarela enquanto que o instante em que ele operou é indicado com uma reta vermelha, conforme a Figura 5.29 (b).

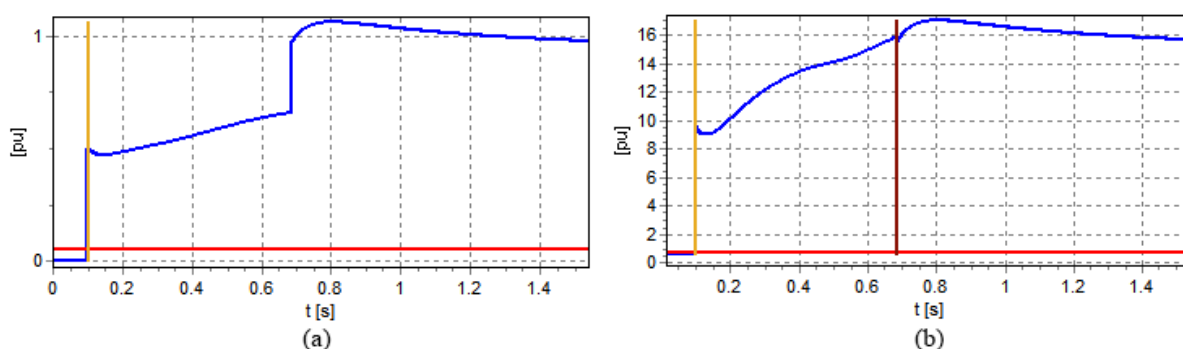


Figura 5.29 Curva medida pelo relé e linhas auxiliares.

As informações de instantes de sensibilização e atuação está atrelada ao relatório de eventos da simulação dinâmica (ver Simulação Completa 6.3). Portanto, a exclusão do relatório após a simulação leva a perda dessa informação.

5.3.7 Linhas de Conexão

Na Figura 5.30 observa-se a aba “Linhas de Conexão” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir às linhas de transmissão que conectam a subestação a outra subestação externa; além de visualizar uma lista das mesmas.

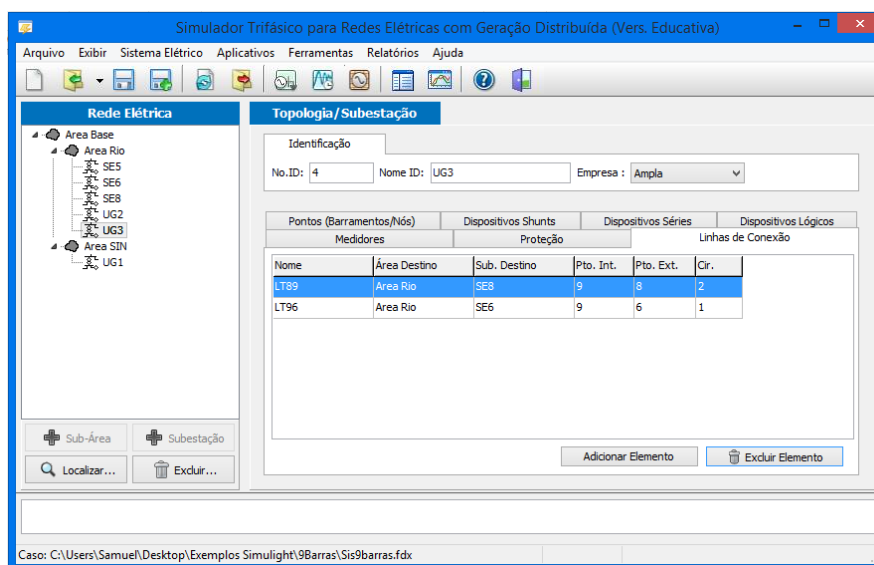


Figura 5.30 Subestação / Aba Linhas de Conexão

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de linhas de conexão, aparecerá um menu, tal e como mostrado na Figura 5.31. Este menu permite ao usuário inserir um disjuntor num dos terminais da linha. Para adicionar uma linha basta clicar no botão “Adicionar Elemento”. Para editar a informação de uma linha basta fazer dois cliques numa das linhas listadas. Para eliminar uma linha basta clicar no botão “Excluir Elemento” e confirmar a exclusão.

Também é possível inserir um disjuntor no terminal da linha de transmissão.

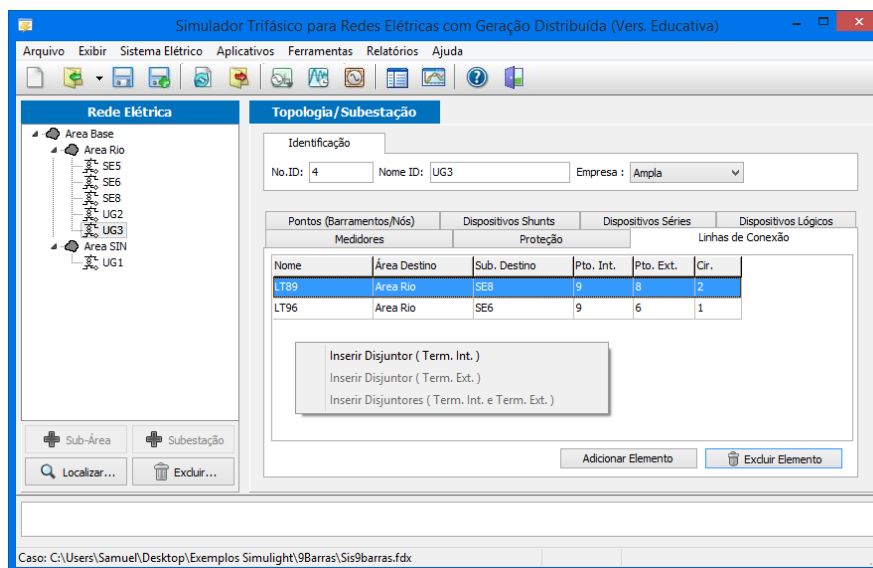


Figura 5.31 Subestação / Linhas de Conexão menu.

Na Figura 5.32 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de uma linha de conexão. Na Figura 5.32 observa-se também um exemplo da edição dos dados de uma linha de transmissão.

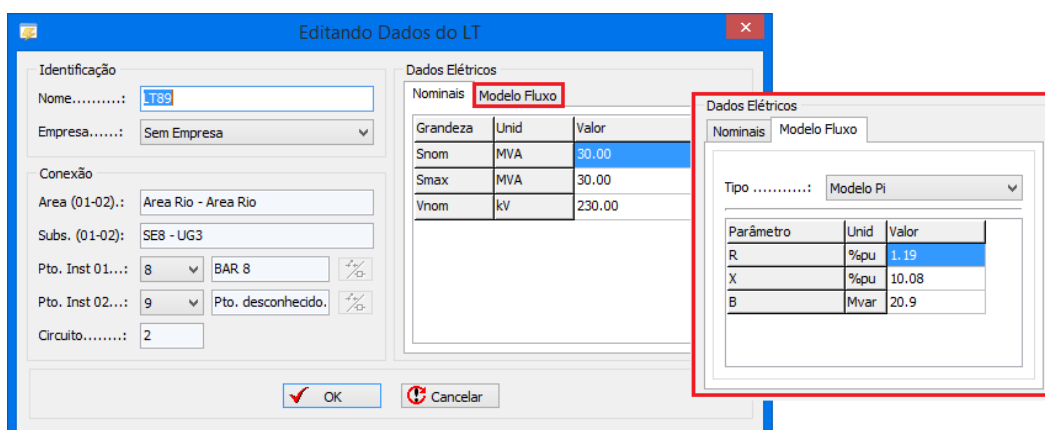


Figura 5.32 Subestação / Edição das Linhas de Conexão

5.4 Dispositivos Definidos pelo Usuário

5.4.1 Introdução

O Simulight oferece uma ampla lista de modelos para os diferentes dispositivos suportados e recentemente comentados (nos itens anteriores) no presente capítulo. Um modelo representa mediante equações algébricas e/ou diferenças o comportamento aproximado que tem o respectivo dispositivo numa situação específica da rede ou ante a presença de determinados fenômenos físicos. Por motivos de performance, a maioria dos modelos disponibilizados na interface, foram implementados conjuntamente com os outros módulos do programa utilizando a linguagem de programação C++. Devido ao grande número de modelos existentes na literatura e ante a contínua aparição de novos modelos, o Simulight também permite trabalhar com (novos) modelos definidos pelo usuário. Uma biblioteca de estes (novos) modelos está contida no arquivo chamado "LIBMODELS.xml". Este arquivo foi criado pelo Assistente de Instalação (Capítulo 1.4 → Passo 3) encontrando-se disponível para edição.

Na biblioteca de modelos do simulador, novos modelos de equipamentos podem ser implementados de acordo com a necessidade do usuário. A montagem de um modelo (seja de um gerador distribuído, de um regulador de tensão, de um estabilizador de tensão, etc.) é feita através da montagem do diagrama de blocos correspondente. Para isto utiliza-se um conjunto de blocos elementares disponibilizados no Simulight. Estes blocos terão suas funcionalidades explicadas no decorrer deste manual. O mencionado diagrama de blocos pode ser criado, editado e / ou armazenado num arquivo alfanumérico escrito no formato XML. Este processo, pode ser efetuado utilizando qualquer editor de texto, mas recomenda-se a utilização de um editor XML. No CD de instalação, disponibiliza-se um aplicativo para edição de arquivos com formato XML (Capítulo 1.4 → Passo 4).

O objetivo desta seção é descrever a metodologia utilizada para inserção de novos modelos na biblioteca de modelos do Simulight (arquivo LIBMODELS.xml).

5.4.2 Meta – linguagem XML

Mesmo não sendo objetivo de este manual fornecer um tutorial da metalinguagem XML, é bom apontar algumas características desta metalinguagem. Para facilitar a compreensão será apresentado um exemplo para mostrar a representação de uma área utilizando XML. A área escolhida é a "Área Base" mostrada na Figura 4.6.

Para representar um elemento é necessário definir anteriormente o respectivo tipo de elemento. O tipo de elemento cumpre a função de molde. Isto significa que qualquer elemento possui a mesma estrutura que a que foi inicialmente definida para o seu respectivo tipo. Um elemento pode ser qualquer entidade física ou conceitual (área, subestação, modelo de gerador para fluxo de potência, etc.). Definir um tipo significa descrever quais atributos que esse tipo possui. Os atributos podem ser de tipo básico (texto, alfanumérico, etc.) ou algum tipo de elemento. Isto último permite estabelecer uma hierarquia entre os tipos de elementos. O XML utiliza etiquetas (marcas, com tipo, que delimitam uma região) para informar o início de uma descrição, o tipo que esta sendo descrito, as propriedades do tipo, assim como a finalização da descrição.

No nosso exemplo o elemento "Área Base" pertence ao tipo de elemento "área". Este tipo utiliza as etiquetas "<AREA>" e "</AREA>" para definir o início e o fim da descrição. Entre as propriedades do tipo de elemento "área" temos: id da área (alfanumérico), o nome

(texto), a descrição da área (texto), área contida (tipo de elemento) e subestação contida (tipo de elemento). A utilização do programa XMLPad para descrever o elemento “Área Base” pode ser visualizado na Figura 5.33.

Na Figura 5.25, no lado direito, observa-se que a “Área Base” possui: id (“0”), nome (“Área Base”), descrição (“”), uma subárea (“Área SIN”) e outra subárea (“Área Rio”). A subárea “Área Rio” pertence ao tipo “área”, pelo tanto na sua descrição temos: id (“2”), nome (“Área Rio”), descrição (“”), e as subestações que se encontram dentro dela. Cabe ressaltar que os dados foram preenchidos seguindo o observado na Figura 4.6.

Na Figura 5.33, no lado esquerdo, observa-se a hierarquia que o programa XMLPad vai gerando na medida que o texto vai sendo preenchido no lado direito. Cabe ressaltar que esta hierarquia é similar à apresentada na Figura 4.7 pelo programa Simulight no seu painel “Rede Elétrica”.

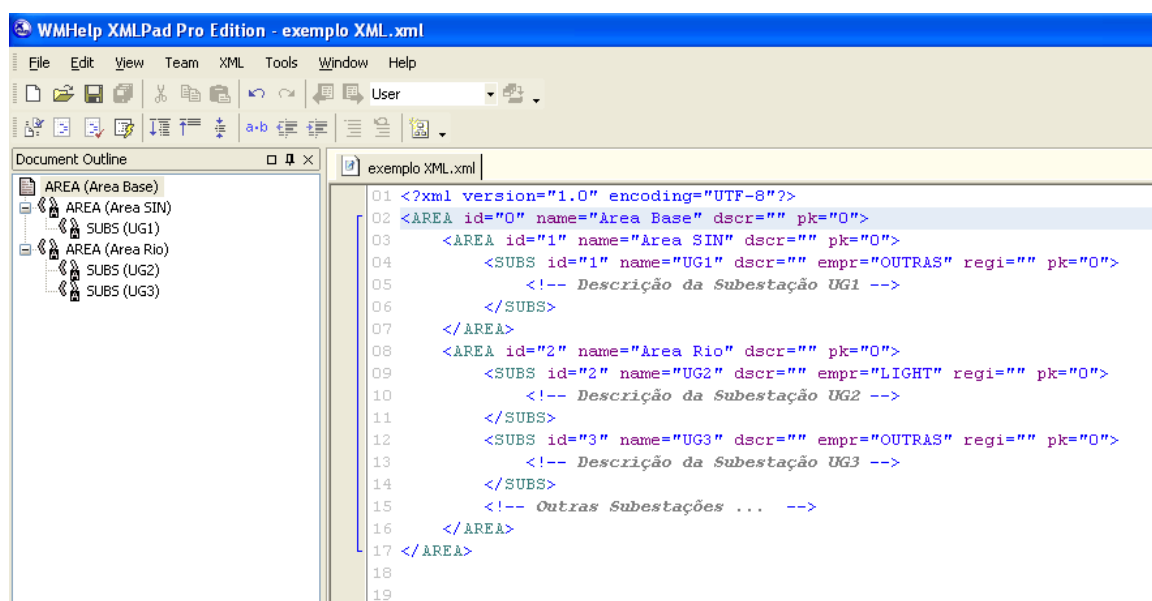


Figura 5.33 Exemplo XML.

5.4.3 Formato de Entrada de Dados de um Novo Modelo

O arquivo “LIBMODELS.xml” é um arquivo texto em formato XML, que contém uma biblioteca de modelos já desenvolvidos para o Simulight. Nesse arquivo encontram-se os modelos de máquinas, controladores, transformadores, gerador eólico, etc. A inclusão de um novo modelo pelo usuário deve ser feita no mencionado arquivo, seguindo a estrutura descrita na presente seção.

Na Figura 5.34 observa-se a descrição do tipo de elemento “modelo”. Nesta Figura pode-se observar que as etiquetas que delimitam a descrição são “<MODEL>” e “</MODEL>” respectivamente. Entre os atributos temos: parâmetros, pontos de input/output, etc. Estes atributos são descritos no decorrer deste capítulo.

```
<MODEL id="xxx" source="xxx" group="xxx" default="S">
  <!-- PARAMETROS -->
  <!-- PONTOS DE I/O -->
  <!-- OUTPUT (INTERFACE C/OS DEVICES) -->
  <!-- INPUT (INTERFACE C/A REDE ELETRICA) -->
  <!-- BLOCOS MATEMATICOS -->
  <!-- BLOCOS DE CONVERSAO DE COORDENADAS -->
  <!-- BLOCOS DE OPERACOES COM NUMEROS COMPLEXOS -->
  <!-- BLOCOS DINAMICOS -->
  <!-- BLOCOS NAO-LINEARIZAVEIS -->
  <!-- BLOCOS LOGICOS -->
  <!-- BLOCOS TEMPORIZADOS -->
  <!-- BLOCOS DISCRETOS -->
  <!-- BLOCOS DE COMUNICACAO -->
  <!-- INICIALIZACAO -->
  <!-- MODELO -->
</MODEL>
```

Figura 5.34 Novo Modelo – Formato de Entrada.

Para facilitar a compreensão, na medida em que vão sendo descritos os diversos atributos do tipo de elemento “modelo”, utilizamos o modelo do regulador de tensão representado pelo diagrama de blocos mostrado na Figura 5.35, para exemplificar a descrição dos ditos atributos.

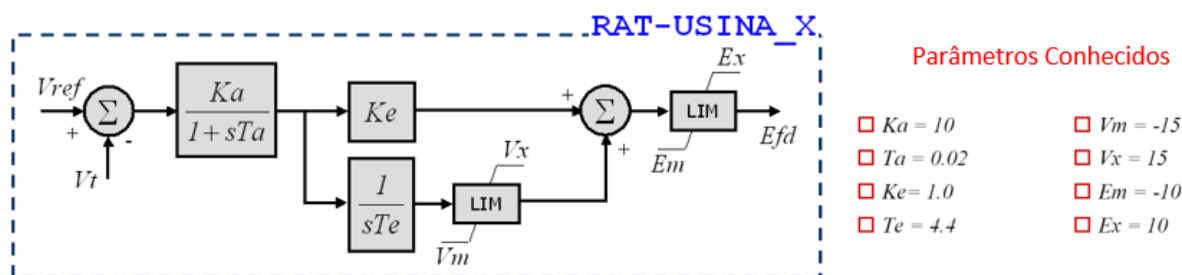


Figura 5.35 Regulador de Tensão - Diagrama de blocos e Parâmetros.

Na Figura 5.35 observa-se que o modelo tem dois parâmetros de entrada (V_{ref} e V_t), um parâmetro de saída (E_{fd}), e vários blocos que representam a relação entre ditos parâmetros. Cada bloco possui seus próprios parâmetros (K_a , T_a , K_e , T_e , V_x , V_m , E_x e E_m).

5.4.4 Início de Definição

No exemplo, o início da definição do modelo segue o mostrado na Figura 5.36.

```
<MODEL id="RAT-USINA_X" source="USERS">
```

Figura 5.36 Novo Modelo – Início de Definição.

5.4.5 Parâmetro

Este atributo é utilizado para definir um parâmetro do modelo e seu valor. Estes parâmetros são definidos no início porque o valor deles vai ser utilizado por algum bloco. Os parâmetros que o próprio bloco define, não devem ser definidos nesta parte do arquivo. Na Figura 5.28, na parte superior, pode-se observar o formato que deve ser seguido, tanto para

os parâmetros propriamente ditos (etiqueta PARM), quanto para os parâmetros constantes (etiqueta CONS). Na Figura 5.37, na parte inferior, pode-se observar um exemplo da utilização deste atributo.

```

<!-- PARAMETROS -->
<PARM id="xxx" type="xxx" value="0.0" class="xxx" print="S"/>
<CONS id="xxx" out="xxx" value="xxx"/>

<PARM id="Ka" type="PARAMETER" value="10.0" class="*" print="S"/>

```

Figura 5.37 Novo Modelo – Parâmetros.

5.4.6 Ponto de Entrada / Saída

Este atributo é utilizado para permitir a conexão entre os modelos e entre um modelo e a rede elétrica. Na Figura 5.38, na parte superior, podem-se observar os formatos respectivos; na parte inferior, pode-se observar um exemplo da utilização deste atributo.

```

<!-- PONTOS DE I/O -->
<INPT id="xxx"/>
<OUTP id="xxx"/>
<!-- OUTPUT (INTERFACE C/OS DEVICES) -->
<OSHT id="xxx" itype="xxx" otype="xxx">
  <SHT INJre="xxx" INJim="xxx" G="xxx" B="xxx"/>
</OSHT>
<OSER id="xxx" itype="xxx" otype="xxx">
  <SER G="xxx" B="xxx"/>
  <SHT1 INJre="xxx" INJim="xxx" G="xxx" B="xxx"/>
  <SHT2 INJre="xxx" INJim="xxx" G="xxx" B="xxx"/>
</OSER>
<OLOG id="xxx" inpt="xxx"/>
<OREL id="xxx" trip="xxx" close="xxx" tempz="xxx"/>
<!-- INPUT (INTERFACE C/A REDE ELETRICA) -->
<TENS id="xxx" type="xxx" term="1" out1="xxx" out2="xxx"/>
<CORR id="xxx" term="1" out1="xxx" out2="xxx"/>
<POTE id="xxx" term="1" out1="xxx" out2="xxx"/>
<EXTR id="xxx" out="xxx" key="xxx">
  <DEVC name="xxx" chn="xxx"/>
</EXTR>

<OUTP id="Efd/>

```

Figura 5.38 Novo Modelo – Entrada/Saída.

5.4.7 Medição de Tensão

Este atributo é utilizado para capturar o valor de tensão no nó de conexão do dispositivo associado ao modelo.

```

<TENS id="VOLT" type="POLAR" term="1" out1="Vt" out2="Vang"/>

ou

<TENS id="" type="RETANGULAR" term="1" out1="Vreal" out2="Vimag"/>

```

(a) Monofásico: Polar e Retangular.

```

<TENS id="" type="POLAR" term="1" mdl="3" out1="Va" out2="Teta" out3="Vb"
out4="Tetb" out5="Vc" out6="Tetc"/>

ou

<TENS id="" type="RETANG" term="1" mdl="3" out1="Va_re" out2="Va_im"
out3="Vb_re" out4="Vb_im" out5="Vc_re" out6="Vc_im"/>

```

(b) Trifásico: Polar e Retangular.

Figura 5.39 Novo Modelo – Medição de Tensão.

5.4.8 Blocos Elementares

Entres os blocos elementares temos os blocos matemáticos, blocos dinâmicos e blocos não linearizáveis. Estes atributos são utilizados para representar a relação matemática entre suas variáveis (ou parâmetros) de entrada e saída. Na Figura 5.40 e podem-se observar os formatos respectivos dos blocos. Na Figura 5.42 podem-se observar exemplos da utilização destes blocos (Ver Anexo A).

```

<!-- BLOCOS MATEMATICOS -->
<GANH id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO" K="xxx"/>
<SOMD id="xxx" out="xxx" stt="NO">
  <ADD sgn1="+">xxx</ADD>
</SOMD>
<MULT id="xxx" out="xxx" stt="NO">
  <ADD>xxx</ADD>
</MULT>
<DIVS id="xxx" num="xxx" den="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<NEGV id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<ABSL id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<MOD id="xxx" in1="xxx" in2="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<MOD2 id="xxx" in1="xxx" in2="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<INVS id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<SQRT id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<SQRT id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<SENO id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<COSS id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<TANG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<ASEN id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<ACOS id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<ATAN id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<ATAN2 id="xxx" num="xxx" den="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<EXPN id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<POW id="xxx" bas="xxx" exp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<LOGT id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO"/>
<SIGM id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="NO" T="xxx"/>

```

Figura 5.40 Novo Modelo – Blocos Elementares 1.

```

<!-- BLOCOS DINAMICOS -->
<INTG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx"/>
<DERV id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx"/>
<LAG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx" P="xxx" T="xxx"/>
<WSHT id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx" P="xxx" T="xxx"/>
<LDLG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" P1="xxx" T1="xxx" P2="xxx" T2="xxx"/>
<BLC2 id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx" A="xxx" B="xxx" C="xxx"/>
<!-- BLOCOS NAO-LINEARIZAVEIS -->
<PTOS id="xxx" inp="xxx" out="xxx">
  <ADD u="0.0" y="0.0"/>
</PTOS>
<LIMT id="xxx" inp="xxx" out="xxx" lmax="xxx" lmin="xxx">
  <LMIN>xxx</LMIN>
  <LMAX>xxx</LMAX>
</LIMT>
<DEAD id="xxx" inp="xxx" out="xxx" umax="xxx" umin="xxx">
  <UMIN>xxx</UMIN>
  <UMAX>xxx</UMAX>
</DEAD>
<SLCT id="xxx" slct="xxx" sgn1="xxx" sgn2="xxx" out="xxx"/>
<MAXM id="xxx" out="xxx">
  <ADD>xxx</ADD>
</MAXM>
<MINM id="xxx" out="xxx">
  <ADD>xxx</ADD>
</MINM>

```

Figura 5.41 Novo Modelo – Blocos Elementares 2.

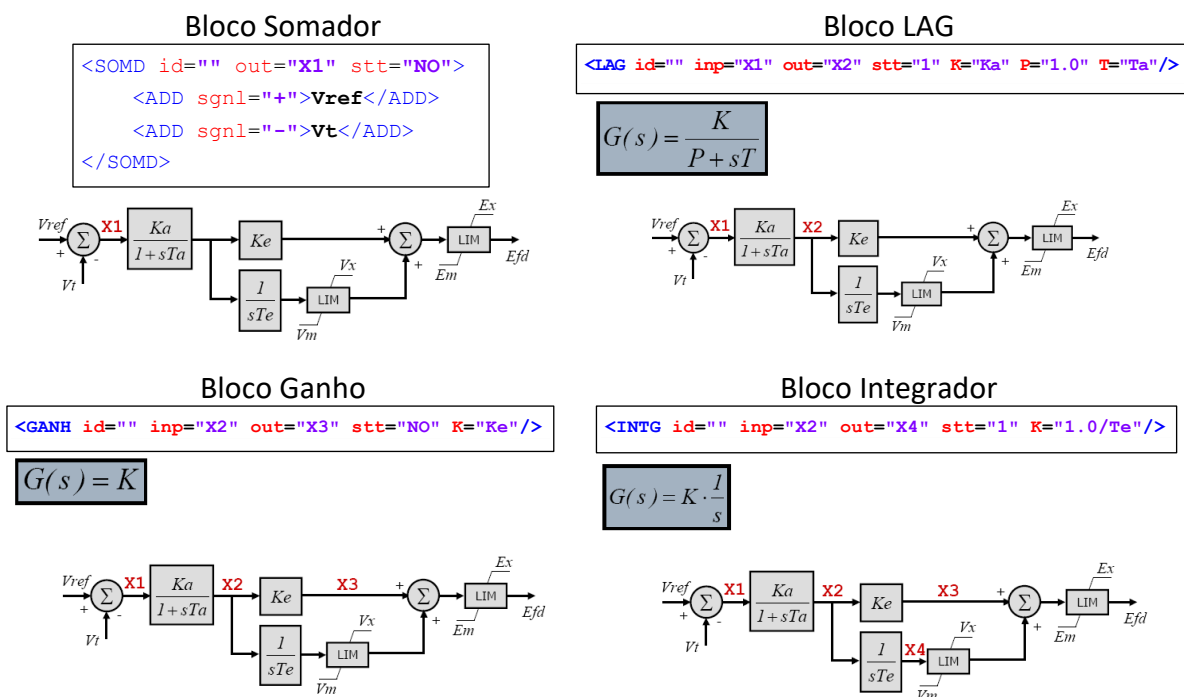


Figura 5.42 Novo Modelo – Exemplo dos blocos elementares.

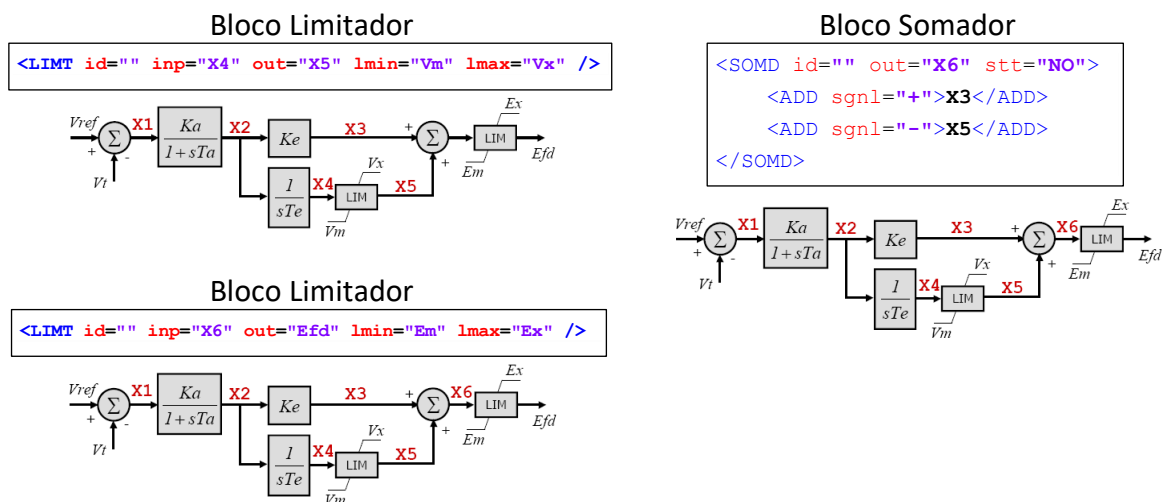


Figura 5.43 Novo Modelo – Exemplo dos blocos elementares.

5.4.9 Exemplo da implementação de um modelo

De acordo com o detalhado nas seções anteriores, o modelo inicialmente apresentado na Figura 5.33, possui a seguinte estrutura:

```
<MODEL id="RAT-USINA_X" source="USERS">
  <PARM id="Ka" type="PARAMETER" value="10.00" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Ta" type="PARAMETER" value="0.020" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Ke" type="PARAMETER" value="1.000" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Te" type="PARAMETER" value="4.400" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Vm" type="PARAMETER" value="-15.0" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Vx" type="PARAMETER" value="10.00" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Em" type="PARAMETER" value="10.00" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Ex" type="PARAMETER" value="10.00" unids="" print="S"/>
  <PARM id="Vref" type="REFERENCE" value="10.00" unids="" print="S"/>
  <OUTP id="Efd"/>
  <TENS id="" type="POLAR" term="1" out1="Vt" out2="Vang"/>
  <SOMD id="" out="X1" stt="NO">
    <ADD sgnl="+>Vref</ADD>
    <ADD sgnl="->Vt</ADD>
  </SOMD>
  <LAG id="" inp="X1" out="X2" stt="1" K="Ka" P="1.0" T="Ta"/>
  <GANH id="" inp="X2" out="X3" stt="NO" K="Ke"/>
  <INTG id="" inp="X3" out="X4" stt="1" K="1.0/Te"/>
  <LIMT id="" inp="X4" out="X5" lmin="Vm" lmax="Vx" />
  <SOMD id="" out="X6" stt="NO">
    <ADD sgnl="+>X3</ADD>
    <ADD sgnl="->X5</ADD>
  </SOMD>
  <LIMT id="" inp="X6" out="Efd" lmin="Em" lmax="Ex" />
</MODEL>
```

Figura 5.44 Modelo do RAT-USINA_X (Figura 5.33).

A Tabela 5.5, mostra-se as variáveis que devem ser evitadas ao momento de adicionar novos modelos dinâmicos via arquivo *.XML:

Tabela 5.5. Nomes de variáveis reservadas nos modelos do Simulight

Efd	W	Vuel	Vscl	Vmod	Ire	Vb	close
Ifd	Eq	Voel	Vdroop	Vang	Iim	Vc	Cmmd
Pe	Id	Voel1	VLAm	Vmod2	Vr	trip	Block
Pm	Ilr	Voel2	Imod	Vang2	Vs	ctrl	SLIP
Qe	Vpss	Vfelim	Iang	Vt	It	Start	G
VOLT	I1repu	ID	ELLD	CORRre	ICER	TMEC	QTOT
VCTRL	I1impu	IQ	ELLQ	CORRim	QCER	PACE	DELAY
PGER	I2repu	EQ	@Ere	@Eld	TENS	TACE	CST
QGER	I2impu	IFD	Ere	@Elq	DELT	CORR	CAG
QLMT	TAP	ELD	@Eim	#CORRre	PELE	POTE	TTRIP
QCRG	WMEC	ELQ	Eim	#CORRim	QELE	FREQ	MODL

6 Utilização do Programa

O simulador possui três aplicativos integrados: fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade eletromecânica. Nos três aplicativos pode-se considerar modelagem trifásica. O Simulight também possui uma série de ferramentas auxiliares, como por exemplo, uma ferramenta para modificação da condição carga / geração no sistema, uma ferramenta para análise do esforço torcional em geradores e uma ferramenta para obtenção de equivalentes de redes. Os aplicativos podem ser acessados a partir do menu principal / Aplicativos, e as ferramentas através do menu principal / Ferramentas.

6.1 Fluxo de Potência

A partir do menu **Aplicativos → Fluxo de Potência** o usuário poderá ter acesso ao respectivo aplicativo. Na Figura 6.1 observa-se a tela correspondente ao aplicativo Fluxo de Potência. É importante ressaltar a possibilidade de estudar ilhas elétricas ativas de maneira integrada e/ou independente por parte do aplicativo. Entende-se por ilha elétrica ativa, as ilhas que possuam no mínimo um gerador.

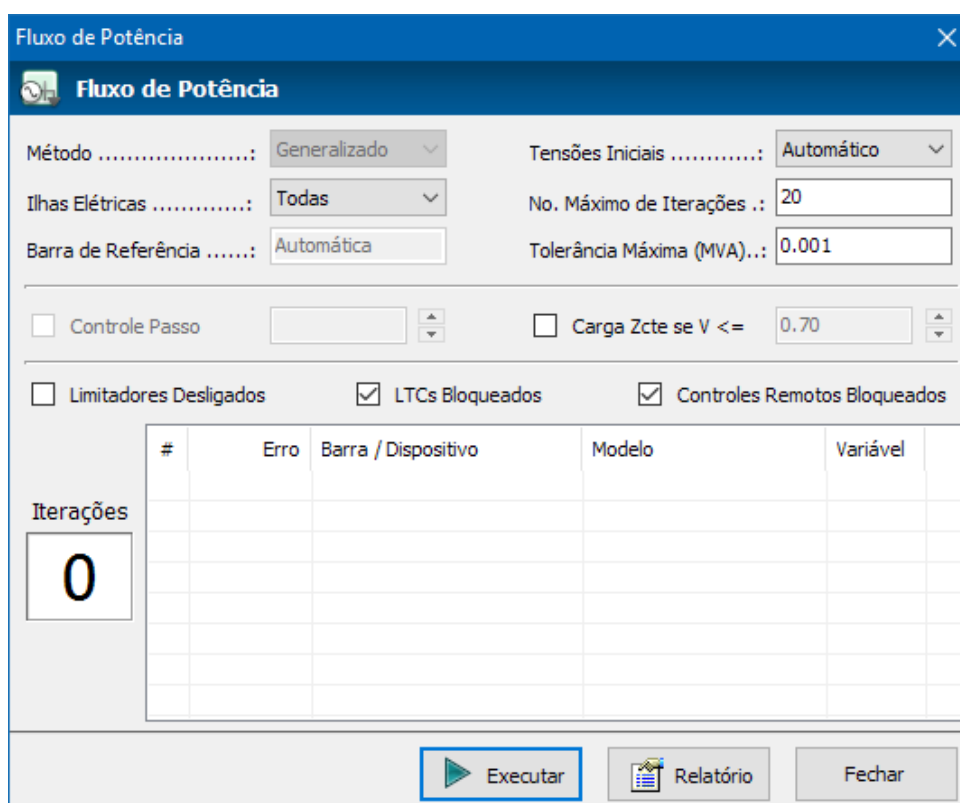


Figura 6.1 Aplicativo / Fluxo de Potência

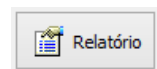
A Aba controles mostra algumas opções como bloquear os LTCs, e bloquear os controles remotos.

Os botões deste aplicativo possuem as seguintes funcionalidades:

Fluxo de Potência – Botões



Executa o Fluxo de Potência.



Exibe Relatório sobre o Fluxo de Potência.

As opções e parâmetros deste aplicativo possuem a seguinte descrição:

Fluxo de Potência – Opções/Parâmetros

Ilhas Elétricas	Permite escolher a Ilha elétrica ativa que vai ser analisada. O usuário tem a possibilidade de escolher todas as ilhas em forma simultânea.
Barra de Referência	Mostra a Barra de referência da Ilha elétrica selecionada.
Tensões Iniciais	Permite escolher o Ponto de operação inicial para o processo iterativo do Fluxo de Potência. As opções são as tensões do caso base, inicialização <i>flat start</i> ou o resultado de uma iteração do Método Desacoplado Rápido.
Controles Automáticos	Permite bloquear ou liberar a ação dos controles automáticos nos dispositivos.
Tolerância Máxima	Permite a digitação da tolerância aceitável para determinar convergência.
No. máximo de iterações	Permite a digitação do número máximo de iterações para finalizar o processo iterativo.

Na Figura 6.2 observa-se um relatório de saída correspondente ao fluxo de potência. Este relatório permite a filtragem de dados por Ilha elétrica ativa, assim como por área e subestações. O número de registros indicado no canto inferior esquerdo indica que para “Dados de Barra” este é o número de barras, e para “Dados de Linha” é o número de linhas (Figura 6.3).

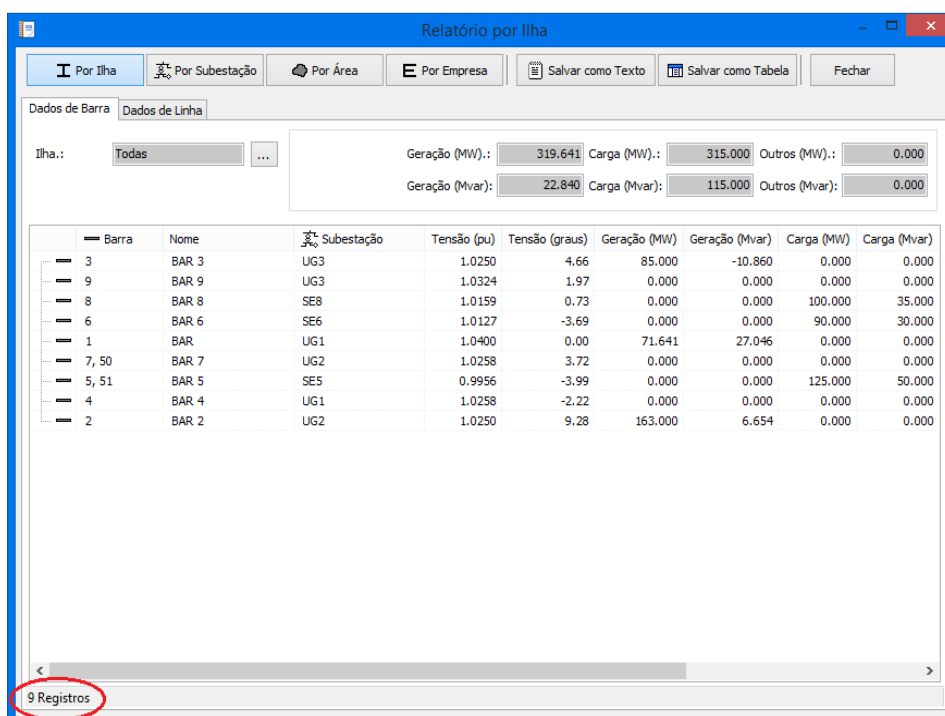


Figura 6.2 Aplicativo / Fluxo de Potência /Relatório - Dados de Barras.

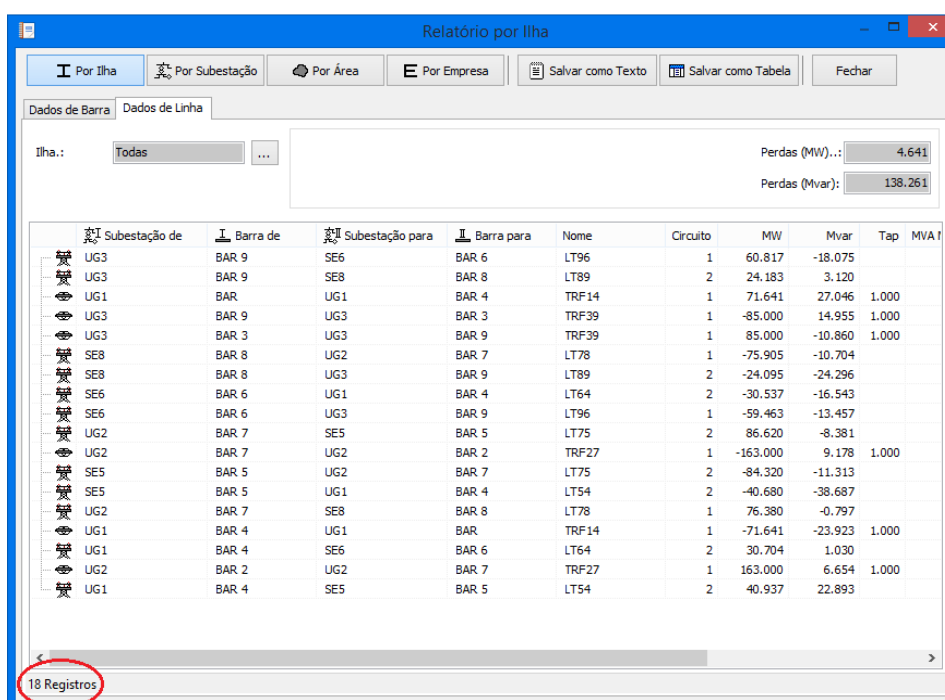


Figura 6.3 Aplicativo / Fluxo de Potência /Relatório - Dados de Linhas.

6.2 Controle de Eventos

A partir do menu **Sistema Elétrico → Controle de Eventos** o usuário poderá ter acesso a tela de acesso ao Controle de Eventos. Nesta tela, mostrada na Figura 6.4, o usuário pode adicionar, editar ou excluir um evento; além de visualizar uma lista dos mesmos. Os

eventos disponibilizados pelo simulador são: *aplicação e remoção de curto-circuito em uma barra, abertura e fechamento de disjuntor, modificar parâmetro, degrau em parâmetro e curva em parâmetro*.

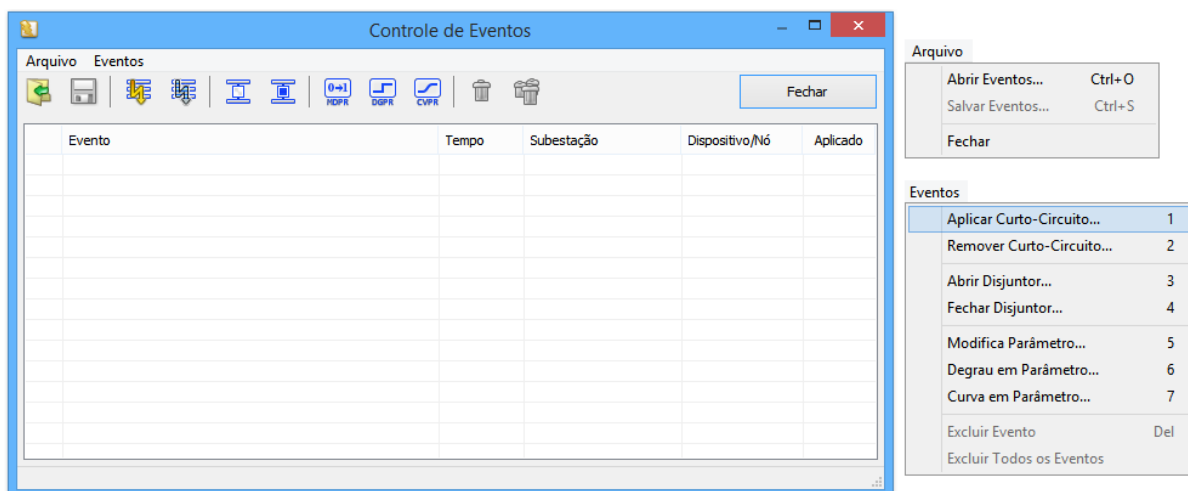


Figura 6.4 Sistema Elétrico / Controle de Eventos

Esses eventos são descritos na Tabela 6.1, que também descreve outros botões da barra de ferramentas.

Tabela 6.1. Ações da barra de ferramentas de eventos

Controle de Eventos – Barra de Ferramentas	
	Importa eventos de um arquivo em formato XML e extensão .fex para a lista de eventos. Não apaga eventos já adicionados pelo usuário.
	Salva os eventos da lista de eventos num arquivo em formato XML e extensão .fex.
	Aplicar curto-circuito em barra (CVPR). Selecione um barramento ou nó e aplique um curto-circuito no instante escolhido. Configure a natureza do curto-circuito (trifásico, bifásico, etc) e impedâncias de curto-circuito.
	Remove um curto-circuito aplicado anteriormente no instante especificado. A tentativa de remover um curto-circuito inexistente pode levar a inconsistências na simulação.
	Abrir um disjuntor no instante selecionado. Se utilizada a modelagem trifásica, permite escolher quais fases abrir. Não tem efeito se o disjuntor já estiver aberto.
	Fecha um disjuntor no instante selecionado. Se utilizada a modelagem trifásica, permite escolher quais fases fechar. Não tem efeito se o disjuntor já estiver fechado.
	Modifica parâmetro de equipamento no instante especificado. O valor especificado é absoluto, nas unidades do parâmetro original. Não há efeito sobre parâmetros utilizados apenas durante a inicialização da simulação (exemplo: parâmetros de potência de modelos Z constante).



Aplica um degrau num parâmetro de um ou mais dispositivos no instante selecionado. O valor especificado é relativo ao original. Por exemplo, ao aplicar degrau de 25% o valor será igual a 125% do valor original.



Aplica uma curva em parâmetro de um ou mais dispositivos. Os pontos da curva são definidos pelo usuário, podendo ser importados de arquivo texto simples. Os valores de tempo são em segundo e dos parâmetros relativos. Por exemplo, uma rampa de 0 à 100% do valor original do parâmetro em 5s seria especificado pelos pontos (0, 0) e (5, 1.0).

Nesta tela o usuário pode visualizar as informações mais relevantes correspondentes aos eventos, conforme descrição a seguir:

Controle de Eventos - Lista Principal	
Evento	Evento programado.
Tempo	Tempo de ocorrência do evento.
Subestação	Subestação de ocorrência.
Dispositivo/Nó	Dispositivo ou nó de ocorrência do evento.
Aplicado	Indica se o evento já aconteceu ou não.

Com um ou mais eventos na lista, o usuário terá a opção de removê-los todos de uma vez ou o evento selecionado, um por vez utilizando o botão na barra de ferramentas ou tecla Delete.

Alguns eventos permitem a adição rápida de evento *complementar* com o clique direito. É o caso do evento “aplicar curto-circuito”, na Figura 6.5, que tem como evento complementar a remoção do curto-circuito. Por padrão, o evento complementar é aplicado 50 milissegundos depois do original. Outros eventos com essa opção são abrir e fechar disjuntor.

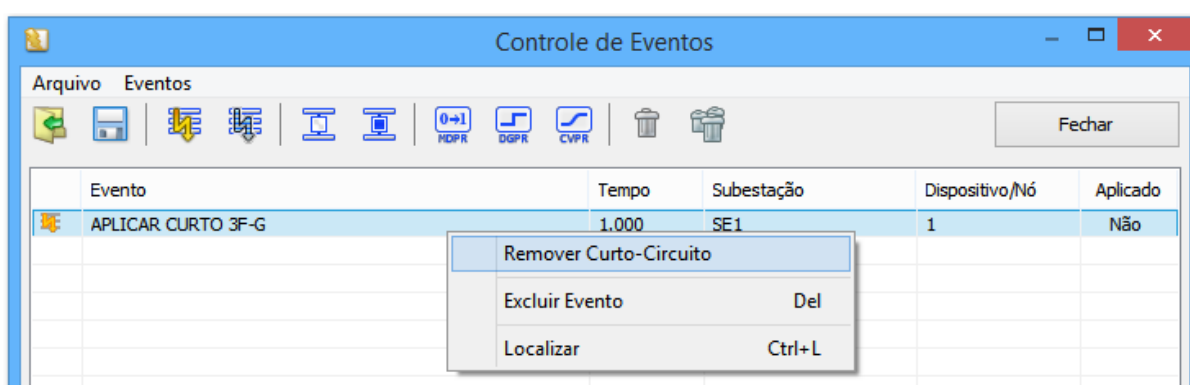


Figura 6.5 Sistema Elétrico / Controle de Eventos / Clique direito sobre evento

Fazendo dois cliques num dos eventos listados, o usuário acessa uma janela para visualizar e/ou editar as informações básicas do mesmo. A janela mostrada é padrão para todos os eventos disponíveis. Na Figura 6.6 observa-se um exemplo da edição do evento aplicação de curto-circuito numa barra.

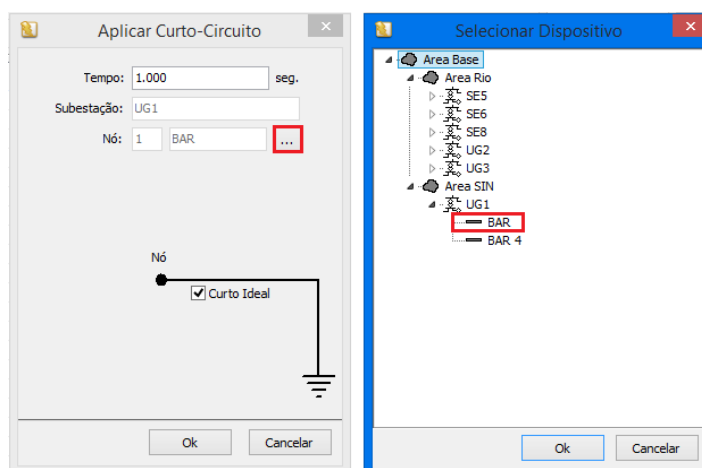


Figura 6.6 Sistema Elétrico / Controle de Eventos / Editando Evento

Caso o sistema seja trifásico, o evento de curto circuito terá a configuração mostrada na Figura 6.8.

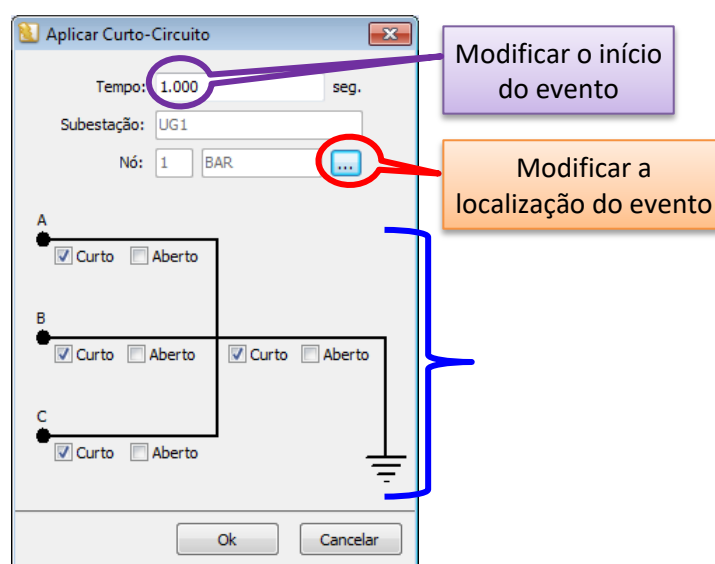


Figura 6.7 Curto-circuito trifásico/ Editando Evento.

Partindo do evento de curto-circuito trifásico a terra (Figura 6.8) pode-se ter varias configurações, como ter um curto-circuito monofásico a terra, curto bifásico a terra, curto bifásico e trifásico, tal como mostra a da Figura 6.8.

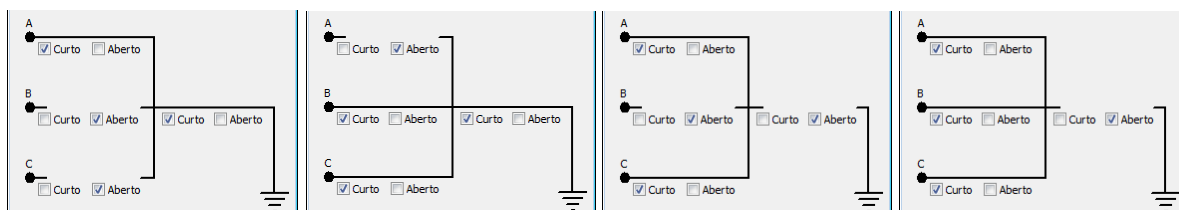


Figura 6.8 Configurações de curto-circuito./ Editando Evento.

6.3 Simulação Completa

A partir do menu **Aplicativos** → **Simulação Completa** o usuário poderá ter acesso ao respectivo aplicativo. Na Figura 6.9 observa-se a tela correspondente ao aplicativo Simulação Completa. A Aba controles mostra alguns controles de fluxo de potência, assim como a tensão limite, para a qual os modelos dinâmicos dos dispositivos do sistema serão representados pelo modelo de impedância constante.

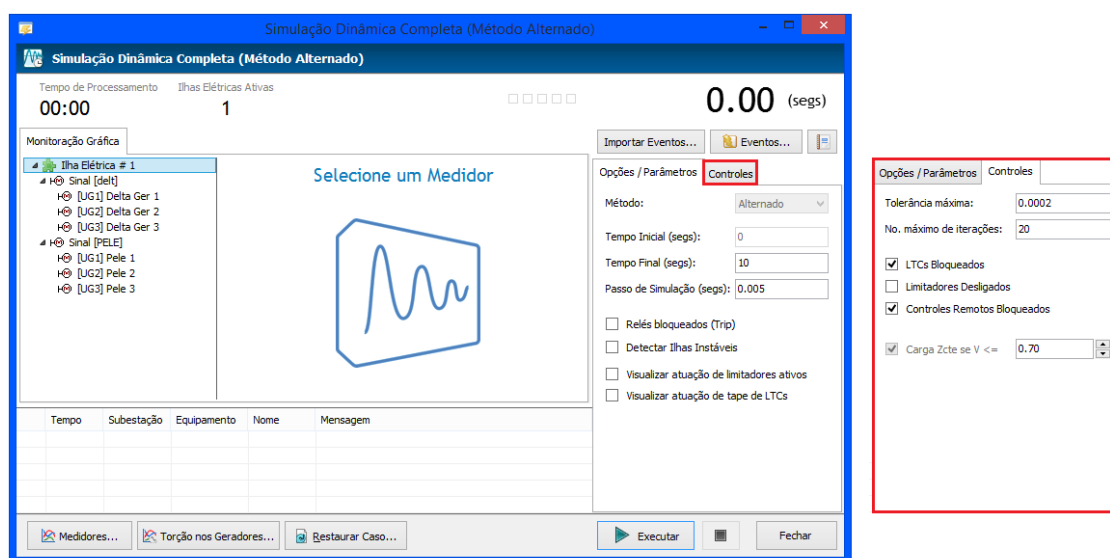
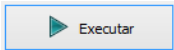
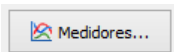
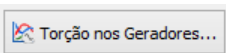
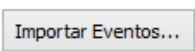
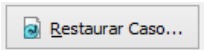


Figura 6.9 Aplicativo / Simulação Completa

Os botões deste aplicativo possuem as seguintes funcionalidades:

Simulador Completo – Botões	
	Executa a Simulação Completa.
	Interrompe a Simulação no ponto atual.
	Acessa a tela de Controle de Eventos.
	Exibe os Resultados da Simulação.
	Exibe o LOG (ocorrências) da Simulação.
	Exibe os limites torcionais das máquinas. (Necessário medidor de sinal <i>PELE</i> e dado de cadastro <i>Snom</i>)
	Importa um arquivo com histórico de eventos (*.fex)
	Restaura o caso a partir da última configuração salva

A janela de simulação dinâmica completa também possui uma interface de monitoração gráfica, possibilitando que os sinais de saída dos medidores do sistema, possam ser acompanhados durante a simulação completa.

As opções e parâmetros deste aplicativo possuem a seguinte descrição:

Simulador Completo – Opções / Parâmetros	
Ilhas Elétricas Ativas	Mostra o número de Ilhas elétricas ativas existentes. Este número pode variar durante a simulação.
Tolerância Máxima	Permite a digitação da tolerância aceitável para determinar convergência.
No. Máx. de iterações	Permite a digitação do número máximo de iterações para finalizar o processo iterativo.
Tempo Inicial	Mostra o tempo inicial da simulação.
Tempo Final	Permite a digitação do tempo final da simulação.
Passo de Simulação	Permite a digitação do passo utilizado pelo integrador na simulação.

Na Figura 6.10 observa-se a tela que exibe os resultados da Simulação. O painel à esquerda da tela apresenta as identificações dos medidores existentes no sistema, os quais estão agrupados por Tipo e Ilha ao qual pertencem. Quando um medidor é arrastado ao painel à direita, seus respectivos registros são visualizados no dito painel (para visualizar medidores de diferentes tipos é necessário abrir mais de uma tela de Relatório de Gráficos).

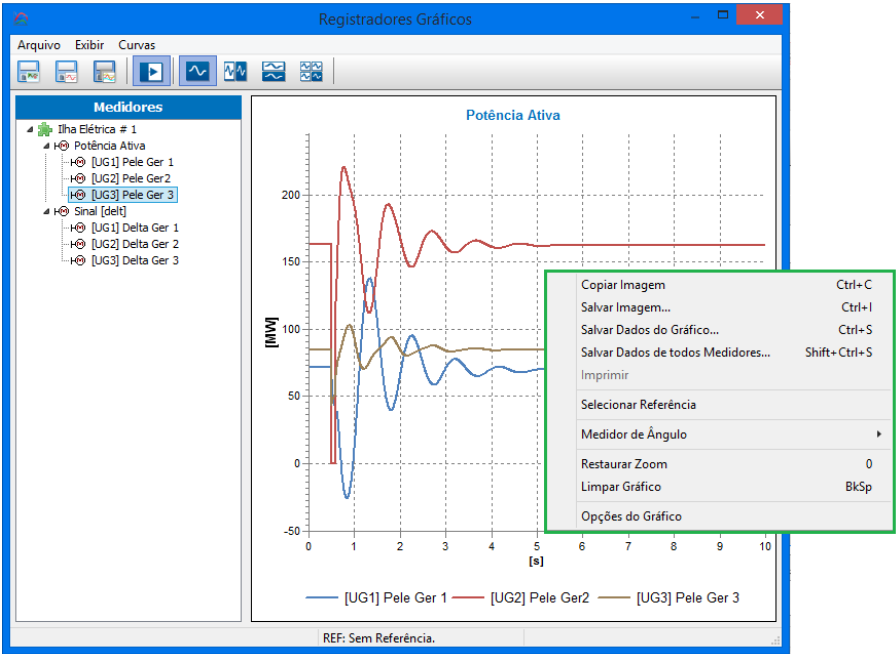


Figura 6.10 Aplicativo / Simulação Completa / Registradores Gráficos.

As curvas mostradas podem ser editadas utilizando o botão direito do mouse no respectivo painel (quadro verde). Duas das opções disponíveis para dita edição são mostradas na Figura 6.11. A tela mostrada na Figura 6.11 (a) permite a edição da descrição e

fonte dos diversos títulos, da escala dos eixos, das cores e largura das curvas, da posição da legenda, entre outros. A tela mostrada na Figura 6.11 (b) permite a eleição de uma curva que sirva como referência para a visualização das outras.

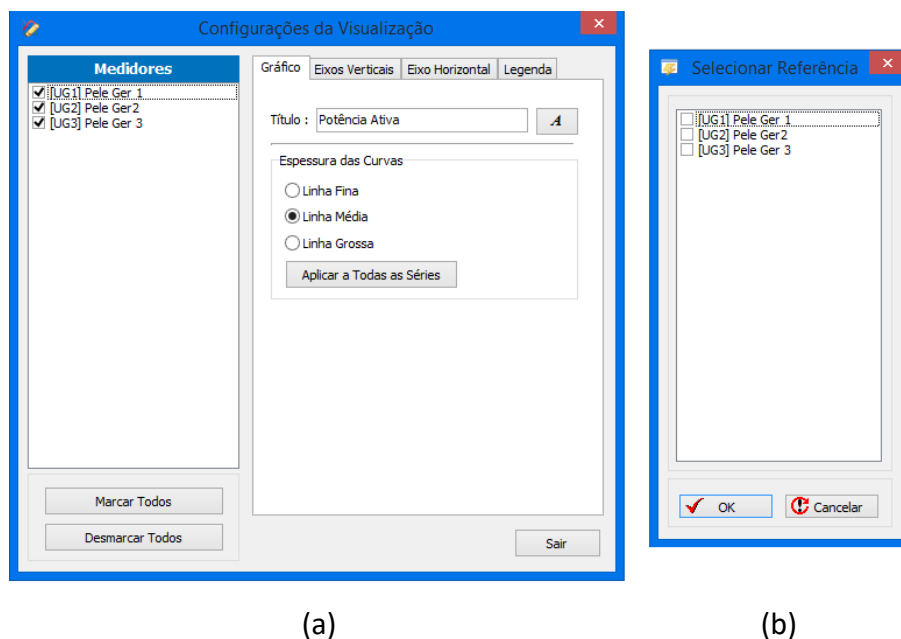


Figura 6.11 Aplicativo / Simulação Completa / Edição dos Registradores Gráficos.

Na Figura 6.12 observa-se a tela que exibe o LOG correspondente à Simulação Completa.

[illegible]

Figura 6.12 Aplicativo/LOG da Simulação Completa

6.4 Relatórios

O simulador possui vários relatórios que auxiliam o usuário na análise do sistema de potência em estudo. Entre os relatórios disponíveis no aplicativo temos, tal como é mostrada na Figura 6.13.

- Estado da Rede;
- Ilhas Elétricas;
- LOG de Eventos;
- Medidores;
- Esforço Torcional.

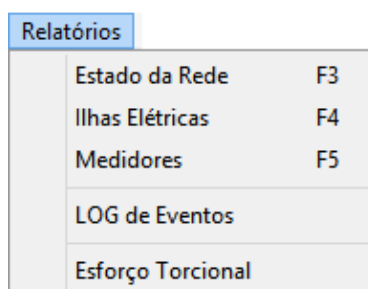


Figura 6.13 Relatórios

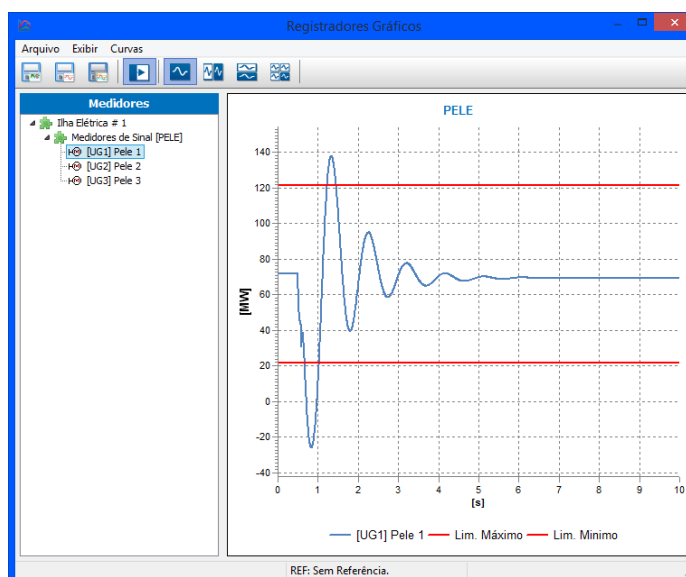


Figura 6.14 Relatório Esforço Torcional

A tela correspondente ao relatório do “Estado da Rede” mostra o ponto de operação atual do sistema. Esta tela já foi apresentada e comentada anteriormente nas Figuras 6.2 e 6.3. A tela correspondente ao relatório de “Ilhas Elétricas” é detalhada no item 6.1. A tela correspondente ao “Relatório de Eventos” mostra os eventos ocorridos no sistema (seja por especificação do usuário na tela Controle de Eventos ou pela ação automática de algum dispositivo). Esta tela já foi apresentada e comentada anteriormente na Figura 6.9. A tela correspondente ao relatório de “Medidores” mostra as curvas registradas nos medidores. Esta tela já foi apresentada e comentada anteriormente nas Figuras 6.7 e 6.8. A tela

referente ao relatório de “Esforço Torcional” está representada na Figura 6.14. Para a reprodução dos esforços torcionais dos geradores é necessária à inserção de medidores de potência elétrica (Pele) e a informação da capacidade nominal em cada gerador.

6.4.1 Esforços Torcionais na GD

O critério adotado para os esforços Torcionais no Simulight é baseado na diferença de potência ativa gerada imediatamente antes e após o chaveamento (ΔP) que é dada por:

$$\Delta P = P_e(t = 0^-) - P_e(t = 0^+) < 0,5 \text{ pu}$$

onde:

$P_e(t = 0^-)$ é a potência ativa gerada imediatamente antes do chaveamento;

$P_e(t = 0^+)$ é a potência ativa gerada imediatamente após o chaveamento, e;

0,5 p.u. é calculado com base na potência nominal aparente do gerador.

Esse critério foi proposto por um Working Group do IEEE [13] de forma empírica para salvar o eixo dos sistemas gerador-turbina, devido a chaveamentos na rede elétrica⁵. O critério proposto é polêmico porque ele foi apresentado sem muito rigor técnico e mais pela experiência dos membros do Working Group que incluíam representantes de fabricantes de sistema gerador-turbina.

Independente ou não da polêmica, esse critério ainda é adotado até hoje, conforme é em [14]. Até mesmo o ONS o adota, por exemplo, na questão de fechamento de anel durante a recomposição do sistema [15].

No Simulight:

Para aplicar o critério de esforço torcional no Simulight, é necessário conhecer a potência aparente da máquina, tal como é indicada na equação anterior, este valor de potência aparente ou “S nominal” pode ser inserida no Simulight na ABA [Gerais] dos dados elétricos do gerador, tal como é mostrada na Figura 6.15.

⁵ Chaveamentos, programados ou não, na rede elétrica induzem torques transitórios no eixo do sistema gerador-turbina que podem danificar ou notadamente comprometer a vida útil desse equipamento.

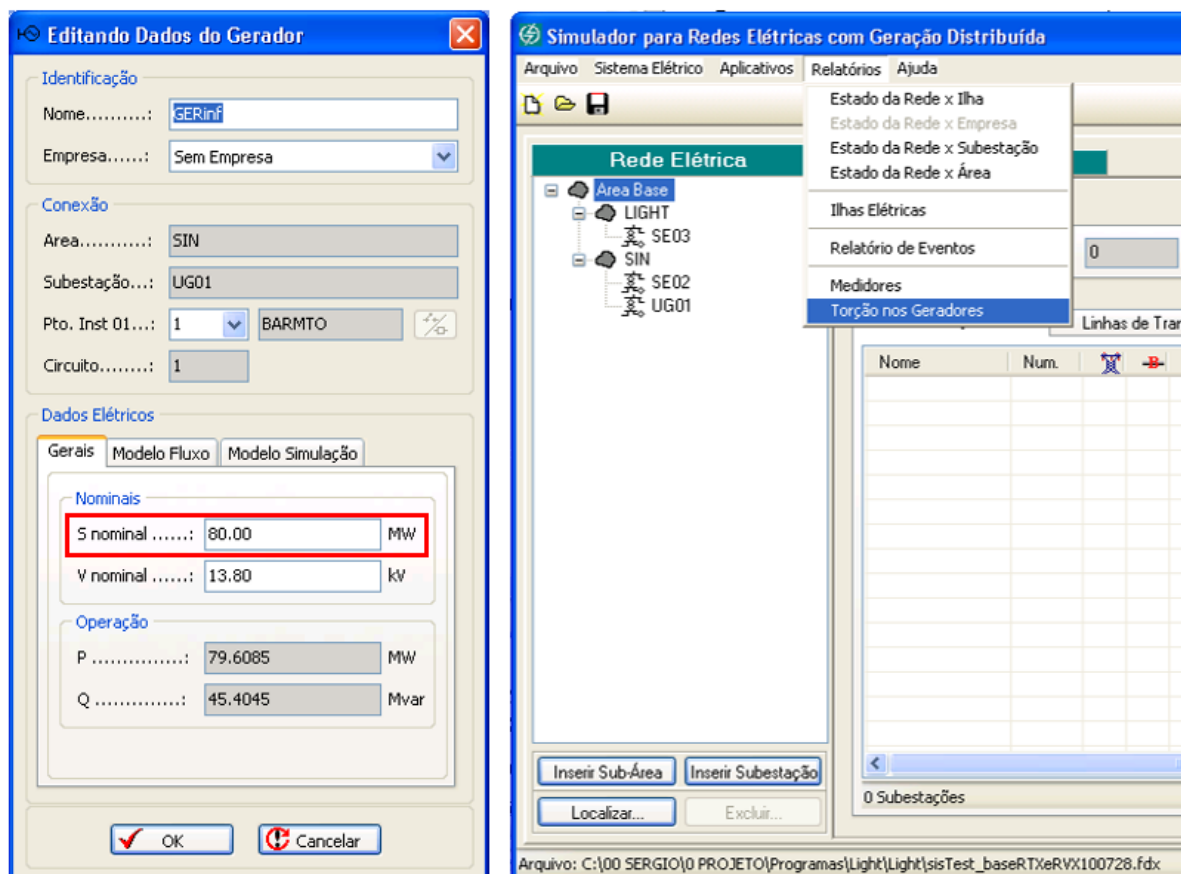


Figura 6.15 Esforço torcionais da Maq.

Exemplo:

Seja o sistema mostrado ($S_{G2}=14\text{MW}$) na Figura 6.16 onde um evento é abrir DJ3 em $t=1\text{s}$ (formação de Ilhas), e outro é aplicar CC na barra 4 em $t=5\text{s}$ e libera o CC após 1000ms.

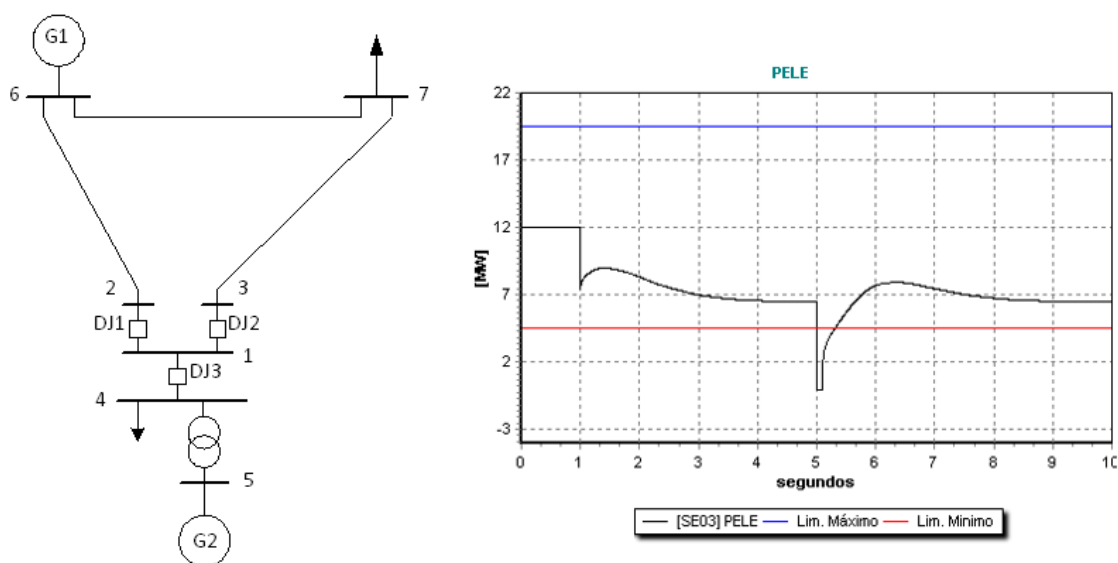


Figura 6.16 Sistema exemplo e Esforço torcionais do G2

Observando a Figura 6.16, pode-se dizer que o gerador G2, em $t=5s$, sofre um esforço torcional que supera seu limite inferior permitido, mas na verdade este não atinge dito limite.

Explicação: Lembre que o critério de esforço torcional fala da potência ativa gerada imediatamente antes e imediatamente após o chaveamento.

Primeiro evento ou chaveamento em $t=1s$ (formação de duas ilhas), o gerador G2 entrega 12 MW e os limites são $12 \pm 0,5 \times 14$ MW (superior = 19MW e inferior = 5MW) e a variação da potência gerada (ΔP) em $t=1^-$ e em $t=1^+$ é 4.9 MW ($4.9 \text{ MW} < 7 \text{ MW} = 0,5 \times 14 \text{ MW}$) então o gerador esta dentro dos limites permitidos.

Segundo evento (ou “chaveamento”) em $t=5s$ (aplicação do CC), o gerador esta entregando uma potencia de 6.8MW e os novos limites de esforço torcional são 6.8 ± 7 MW (superior = 13.8 MW e inferior = -0.2 MW) tal como mostra a Figura 6.17, e a variação da potência (ΔP) em $t=5^-$ e em $t=5^+$ é 6.5 MW ($6.5 \text{ MW} < 7 \text{ MW}$), logo vemos que o gerador não atinge seu limite inferior.

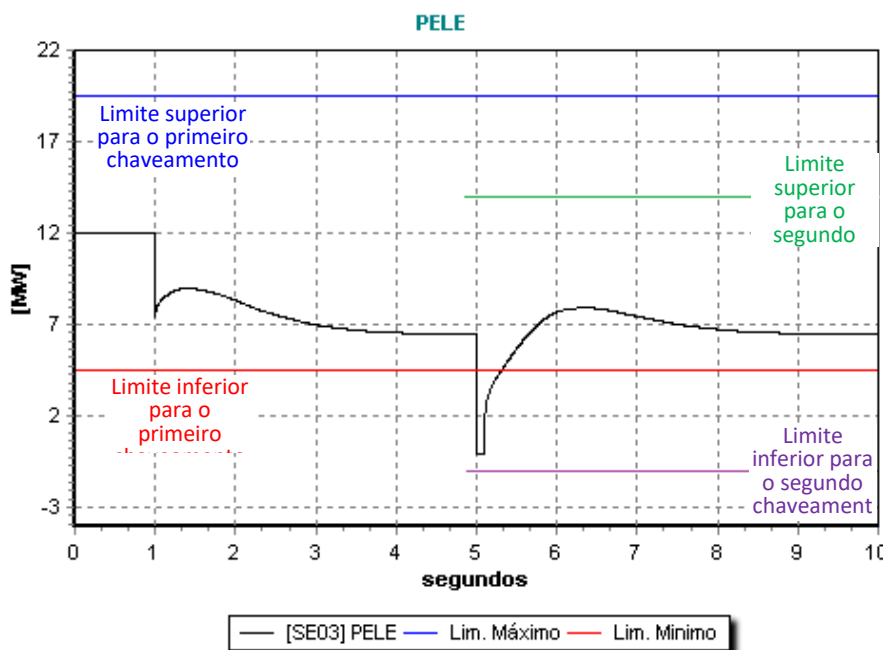


Figura 6.17 Esforço torcionais do G2.

6.5 Curto-Circuito

Os dados são retirados dos modelos dinâmicos dos dispositivos da rede, quando disponível (caso dos geradores), e dos estáticos (linhas de transmissão, transformadores, ramais, etc) quando não disponíveis. Apenas elementos *shunt* como cargas e geradores são considerados. Para transformadores, em particular, os parâmetros R e X são lidos diretamente. Em sistemas com modelagem trifásica (sem modelagem híbrida), os dados de sequência negativa e zero são determinados a partir desses parâmetros. O tipo de ligação do transformador é determinado a partir do nome do modelo do transformador, por isso é recomendado utilizar modelos disponíveis na biblioteca de modelos ou *built-in* quando o transformador tiver tipo de ligação diferente de estrela aterrado nos dois terminais.

Em sistemas com a modelagem trifásica, a presença de transformadores com ligação Delta-Estrela (Δ -Y) leva à introdução de defasagens nos ângulos da rede. As defasagens são desfeitas para o cálculo do curto-circuito e reintroduzidas nos resultados. A Figura 6.18 mostra um sistema elétrico fictício que contém um transformador com ligação Y- Δ . O sistema passa a ser dividido em duas regiões de referência angular, a primeira no terminal Y do transformador e a segunda no seu terminal Δ . A região que contiver uma barra $V\theta$ será considerada a referência angular sendo, nesse caso, a do terminal Y. As tensões e correntes de sequência positiva da região no terminal Δ serão defasadas em $+30^\circ$ enquanto as de sequência negativa em -30° . Sistemas com mais de um transformador com ligação Δ -Y passarão pelo mesmo processo podem ser divididos em duas ou mais regiões de referência angular. Quando utilizadas tensões pré-falta de 1pu, não haverá a necessidade de remover as defasagens, mas elas serão introduzidas no resultado.

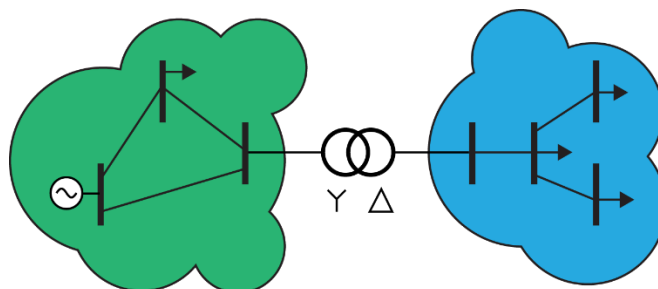


Figura 6.18 Regiões de referência angular definidas pela presença de um transformador com ligação Y- Δ .

Ilhas elétricas inativas (sem geradores) são ignoradas pelo aplicativo, que não terão exibidas as suas barras e circuitos nos relatórios de resultados.

6.5.1 Uso da Ferramenta

A ferramenta do aplicativo de curto-circuito pode ser acessada na tela principal do Simulight através do menu “Aplicativos” e a opção “Curto-Circuito”. Um caso (arquivo de extensão “.fdx”) precisa ter sido carregado para que a ferramenta esteja disponível. Será aberta a tela da Figura 6.19, carregados os modelos dinâmicos dos dispositivos e inicializado o aplicativo antes que seja possível interagir com a tela.

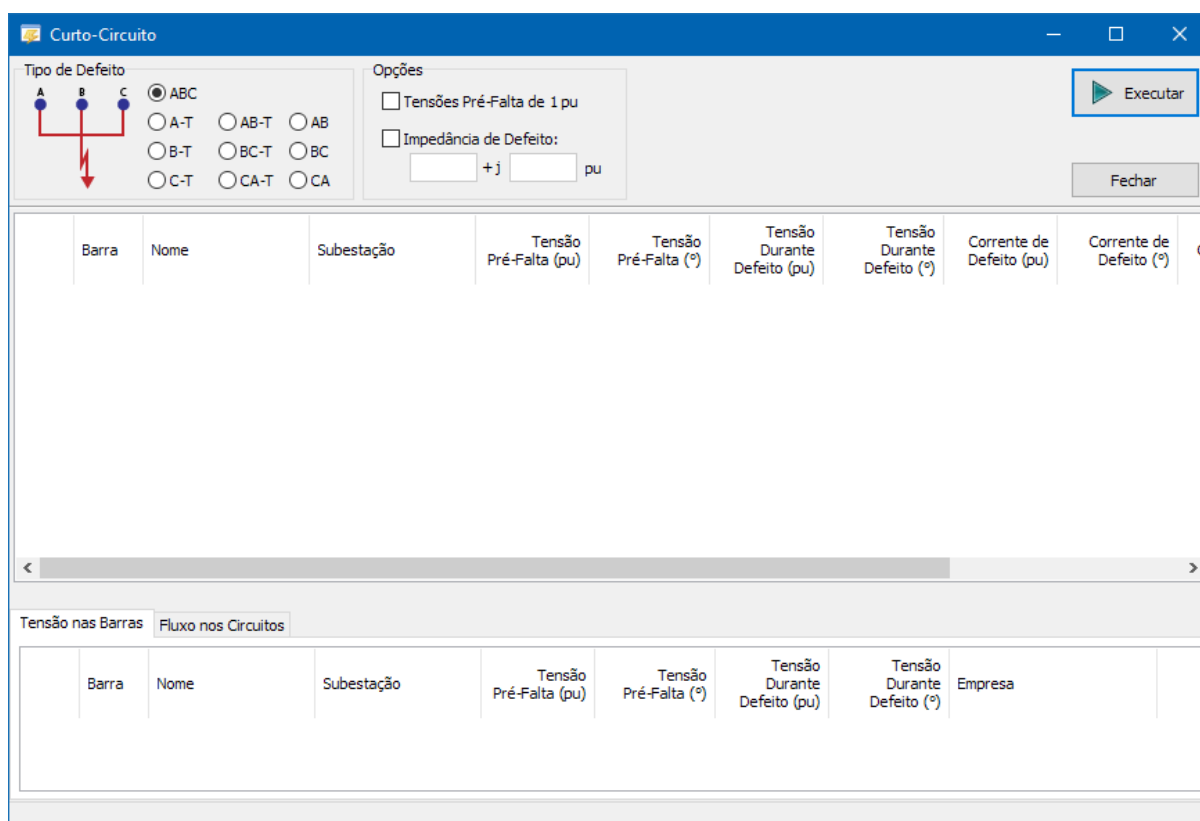


Figura 6.19 Tela inicial do aplicativo de curto-circuito. Na parte superior estão as opções de configuração do curto-circuito e o botão para executar o aplicativo. Abaixo, o relatório de defeito nas barras do sistema e, na parte inferior, relatórios de tensão nas barras e fluxo nos circuitos para um defeito específico.

6.5.2 Configuração e Execução

As opções do cálculo de curto-circuito são:

- **Tipo de Defeito**

Uma das opções da Figura 6.20 pode ser escolhida: Trifásico (ABC), fase-terra (A-T, B-T, C-T), bifásico-terra (AB-T, BC-T, CA-T), bifásico (AB, BC, CA). Se o sistema conter barras com modelagem de sequência positiva (modelagem híbrida ou de sequência positiva pura), apenas a opção de defeito trifásico (ABC) poderá ser selecionada.

- **Utilizar tensões pré-falta de 1pu**

Marcando essa opção, no respectivo campo da Figura 6.21, serão utilizadas tensões de módulo 1 pu e ângulo zero nos cálculos de curto-circuito. Se desmarcada, serão utilizadas tensões armazenadas no estado da rede, originadas do cálculo manual do Fluxo de Potência ou do carregamento do caso.

- **Impedância de defeito**

Permite a configuração de uma impedância de defeito entre o nó de encontro das fases e a terra (defeitos ABC, fase-terra, bifásico-terra) ou entre as fases (defeitos bifásicos), como indicado pela impedância Z_f na Figura 6.22. A impedância configurada deve ser em pu na base de 100 MVA.

Escolhido o tipo de defeito e configuradas as suas opções, ao clicar em “Executar”, serão calculados curtos-circuitos para cada barra do sistema. O primeiro relatório da Figura 6.23 resume as informações do curto-circuito em cada uma das barras, apresentando a tensão durante o defeito, a corrente de defeito e a potência de curto-circuito. Se uma linha

desse relatório for selecionada, os relatórios da parte inferior da tela (Tensão nas barras, fluxo nos circuitos) serão preenchidos com seus respectivos dados para aquele defeito selecionado. Na Figura 6.23 a linha relativa à aplicação do curto-circuito na Barra 2 foi selecionada, e no relatório inferior são exibidas as tensões durante o defeito em toda a rede para esse defeito em particular.

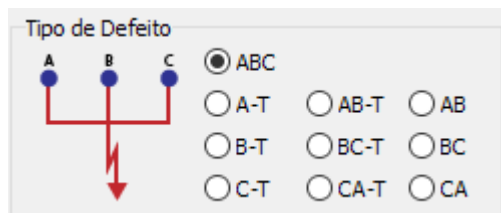


Figura 6.20 Opção do tipo de defeito para aplicar em todas as barras. Para sistemas com modelagem de sequência positiva ou híbrida é permitido apenas aplicar o defeito trifásico (ABC).

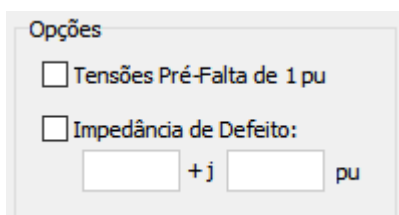


Figura 6.21 Opções para o cálculo do curto-circuito. Utilizar tensões pré-falta planas e definir uma impedância de defeito Z_f .

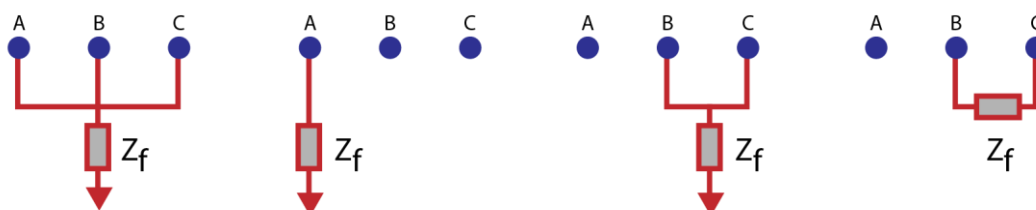


Figura 6.22 Localização da impedância de defeito (Z_f) nos diferentes tipos de curto-circuito.

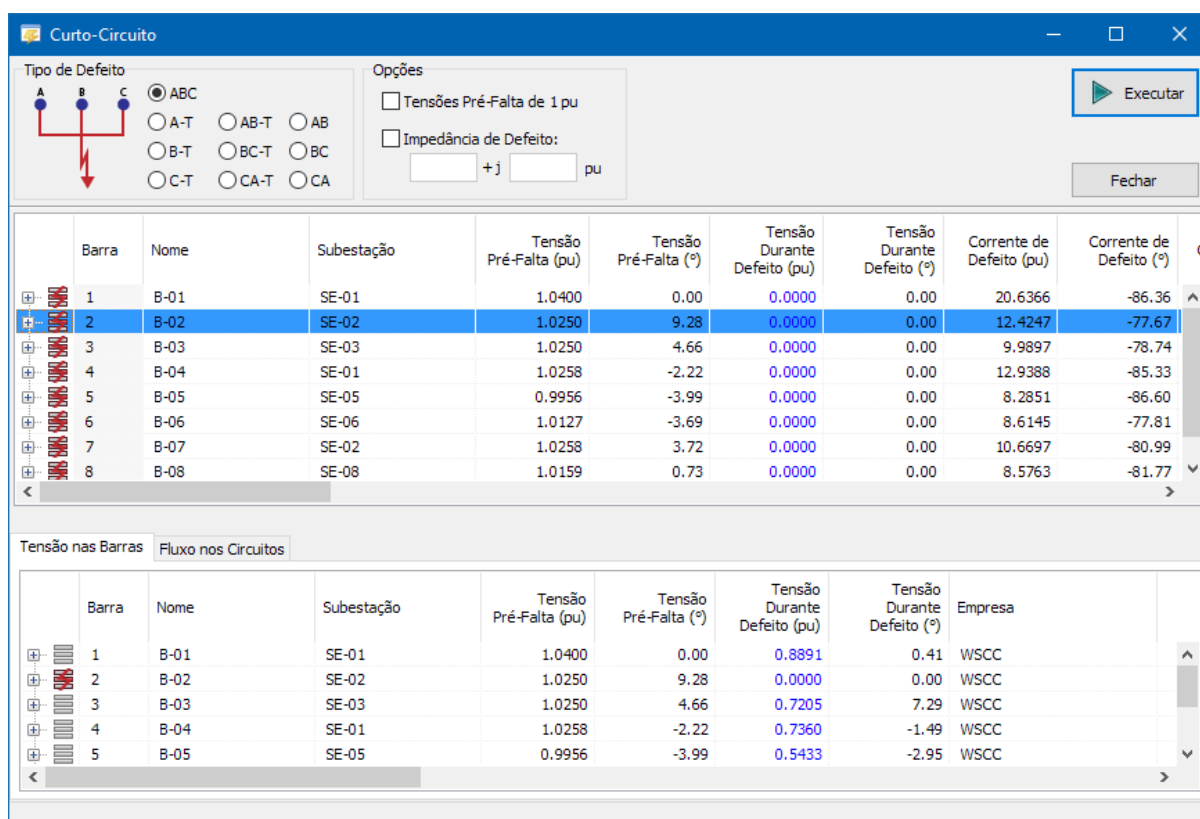


Figura 6.23 Tela do aplicativo de curto-circuito com os relatórios preenchidos após a sua execução. O relatório superior exibe dados para a aplicação do defeito selecionado em cada barra do sistema, enquanto os relatórios disponíveis na parte inferior da tela exibem informações para a aplicação de defeito em uma barra em particular (selecionada no relatório superior)

6.5.3 Relatórios de Resultados

O relatório de barras contém as seguintes informações:

- **Tipo de Barra**
Figura que indica se é uma barra monofásica (sequência positiva) ou trifásica (Figura 6.24).
- **Número da Barra**
Número identificador da barra
- **Nome da Barra**
- **Subestação**
- **Tensão Pré-Falta (módulo/ângulo)**
Tensão carregada do Fluxo de Potência ou do último estado do caso.
- **Tensão Durante o Defeito/Pós-Falta (módulo/ângulo)**
Tensão durante a aplicação de defeito nessa barra.
- **Corrente de Defeito (módulo/ângulo)**
Corrente total de defeito na barra.
- **Potência de Curto-Circuito**
Potência de curto-circuito, calculada como o módulo de (6.1), onde $\dot{V}_p^0$ é a tensão pré-falta da fase p e $\dot{I}_p^{cc}$ é a corrente de curto-circuito na fase p .
- **Empresa**

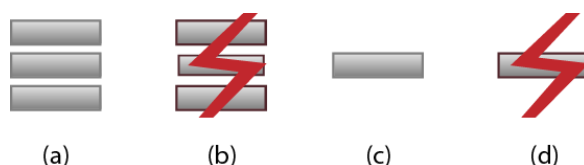


Figura 6.24 Indicação do tipo de barra no relatório. (a) barra trifásica, (b) barra trifásica onde foi aplicado defeito, (c) barra de sequência positiva, (d) barra de sequência positiva onde foi aplicado defeito

$$S_{cc} = |\dot{V}_a^0 i_a^{cc} + \dot{V}_b^0 i_b^{cc} + \dot{V}_c^0 i_c^{cc}| \quad (6.1)$$

O relatório de tensão nas barras contém as seguintes informações:

- **Tipo de Barra**
Figura que indica se é uma barra monofásica (sequência positiva) ou trifásica, e se um defeito foi aplicado nela (Figura 6.24).
- **Número da Barra**
Número identificador da barra
- **Nome da Barra**
- **Subestação**
- **Tensão Pré-Falta (módulo/ângulo)**
Tensão carregada do Fluxo de Potência ou do último estado do caso.
- **Tensão Durante o Defeito/Pós-Falta (módulo/ângulo)**
Tensão durante na barra durante a aplicação de defeito na barra selecionada.
- **Empresa**

O relatório de fluxo nos circuitos contém as seguintes informações:

- **Tipo de circuito**
Figura que indica se o circuito é uma linha de transmissão, transformador, OLTC, etc.
- **Nome do circuito**
- **Barra/Subestação de**
Número da barra e subestação no terminal “de”.
- **Barra/Subestação para**
Número da barra e subestação no terminal “para”.
- **Circuito**
Número identificador do circuito (podendo ser diferente de 1 quando houverem circuitos paralelos).
- **Corrente de (módulo/ângulo)**
Corrente no terminal “de” durante o defeito.
- **Corrente para (módulo/ângulo)**
Corrente no terminal “para” durante o defeito.
- **Potência Nominal**
Potência nominal do circuito.
- **Empresa**

Ao clicar no símbolo de “+” no canto esquerdo de uma linha de resultado, a lista é expandida para exibir as grandezas nas fases e componentes de sequência, conforme indicado na Figura 6.25. Informações redundantes, como o nome do elemento e da subestação são omitidos.

	Barra	Nome	Subestação	Tensão Pré-Falta (pu)	Tensão Pré-Falta (°)	Tensão Durante Defeito (pu)	Tensão Durante Defeito (°)	Empresa
	1	B-01	SE-01	1.0400	0.00	0.8935	-0.57	WSCC
	2	B-02	SE-02	1.0250	9.28	0.0000	0.00	WSCC
	3	B-03	SE-03	1.0250	4.66	0.7791	4.35	WSCC
		Fase a		1.0250	4.66	0.7791	4.35	
		Fase b		1.0250	-115.33	0.7790	-115.65	
		Fase c		1.0250	124.67	0.7791	124.35	
		Seq. +		1.0250	4.66	0.7791	4.35	
		Seq. -		0.0000	80.54	0.0000	0.00	
		Seq. 0		0.0000	0.00	0.0000	0.00	
	4	B-04	SE-01	1.0250	-2.22	0.7398	-3.83	WSCC

Figura 6.25 Informações extras de fases e componentes de sequência disponíveis nos relatórios para sistemas com modelagem trifásica.

Por padrão, os resultados de módulo de tensão, módulo de corrente e potência estão em por unidade (pu). As unidades exibidas em todos os relatórios podem ser trocadas com o clique de botão direito sobre qualquer um dos relatórios. A Figura 6.26 mostra o menu de contexto exibido nos relatórios. Desmarcando a opção “Resultados em pu”, é possível escolher as unidades dos resultados de potência (opções *MVA* e *kVA*) e resultados de corrente (opções *kA* e *A*). As tensões serão exibidas em *kV* quando essa opção for desmarcada. Além disso, é possível alterar as unidades dos ângulos.

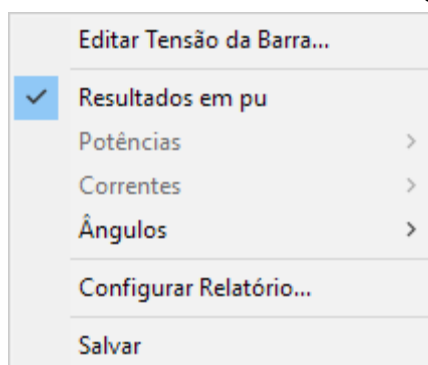


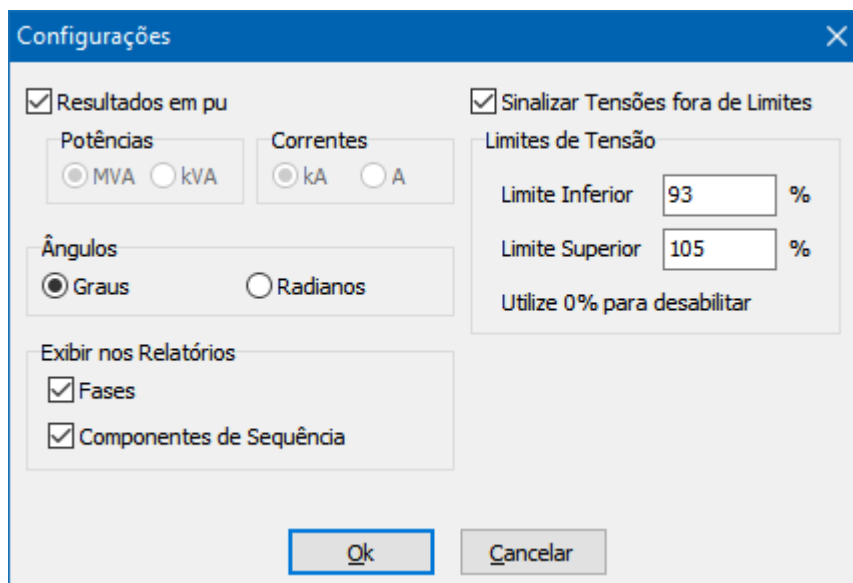
Figura 6.26 Menu de contexto do relatório com opções para a troca das unidades exibidas, configuração e para salvar o relatório.

Alternativamente, as unidades exibidas nos relatórios e outras opções podem ser alteradas através da opção “Configurar Relatório...”. A tela da Figura 6.27 será exibida, permitindo personalizar o que é exibido no relatório. Uma das opções é de limitar a exibição de dados de fases e/ou componentes de sequência, reduzindo a quantidade de informação disponível nos casos com modelagem trifásica, como os exibidos no relatório expandido da Figura 6.25.

As opções “Editar Tensão da Barra...”, ou edição do circuito no respectivo relatório, permite reconfigurar a tensão da barra (e os barramentos que a constituem) para efeitos de relatório. No relatório de fluxo nos circuitos, é possível editar dados de cadastro (nome, potência nominal, etc) dos elementos série (transformadores, linhas de transmissão, etc) assim como os dados elétricos, embora os resultados não sejam atualizados para refleti-los. Quando alterados parâmetros elétricos, o cálculo do curto-circuito deverá ser refeito manualmente.

É possível configurar o relatório para sinalizar tensões inadequadas. Na tela da Figura 6.27, no canto direito superior, há a opção “Sinalizar Tensões fora de Limites” marcada por padrão. Tensões cujo módulo seja inferior ao valor em “Limite Inferior” serão marcadas em azul nos relatórios, enquanto aquelas superiores ao valor em “Limite Superior” serão marcadas em vermelho. As tensões das componentes de sequência negativa e zero não

serão sinalizadas através dessas regras. Se o campo de “Limite Inferior” for definido igual a zero, não serão sinalizadas subtensões, e o mesmo vale para o campo de “Limite Superior”, deixando de sinalizar sobretensões.



The image shows a 'Configurações' (Settings) dialog box with a blue title bar and a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into several sections:

- Resultados em pu:** A checked checkbox. Below it are two groups of radio buttons:
 - Potências:** 'MVA' (selected) and 'kVA'.
 - Correntes:** 'kA' (selected) and 'A'.
- Ângulos:** 'Graus' (selected) and 'Radianos'.
- Exibir nos Relatórios:** Two checked checkboxes: 'Fases' and 'Componentes de Sequência'.
- Sinalizar Tensões fora de Limites:** A checked checkbox. Below it is a section titled 'Limites de Tensão' with two input fields:
 - 'Limite Inferior' with the value '93' and a '%' symbol.
 - 'Limite Superior' with the value '105' and a '%' symbol.Below these fields is the text 'Utilize 0% para desabilitar'.

At the bottom of the dialog are two buttons: 'Ok' (highlighted with a blue border) and 'Cancelar'.

Figura 6.27 Tela de configuração da exibição do relatório. Permite a escolha das unidades exibidas, informações de grandezas de fase ou de sequência exibidas, e sinalização de sub/sobretensões nos resultados.

Através do menu da Figura 6.26 é possível salvar o conteúdo de um relatório no formato de tabela CSV (*comma-separated values*). Ao especificar um arquivo, o conteúdo do relatório será salvo mantendo as unidades em exibição (podendo ser pu ou não, de acordo com as unidades configuradas na Figura 6.26 ou na Figura 6.27). Para modelagem trifásica, serão repetidas as linhas para cada barra nas diferentes fases e componentes de sequência, havendo uma coluna a mais para identifica-las. O arquivo reflete a ordenação de exibição dos resultados, as unidades escolhidas (pu, kV, etc), mas não reflete a ordem escolhida para as colunas.

6.6 Ilhas Elétricas

Na Figura 6.28 observa-se a tela correspondente ao relatório de “Ilhas Elétricas”. O painel à esquerda da tela apresenta as identificações de todas as ilhas elétricas existentes no sistema. O painel à direita apresenta os detalhes da ilha selecionada no painel à esquerda.

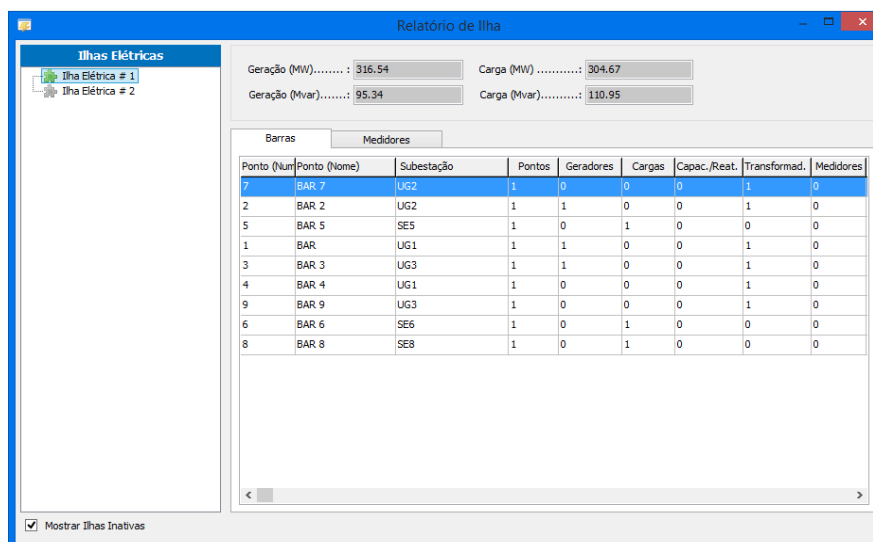


Figura 6.28 Relatório / Ilhas elétricas

6.7 Alteração Automática de Carga

O Simulight conta com uma ferramenta para a alteração automática do cenário de carga/geração da topologia em estudo. Através do menu **Ferramentas → Alteração Automática de Carga** é possível a alteração do nível de carregamento/geração do sistema tanto em valores percentuais quanto em valores absolutos dos níveis de potência ativa e reativa, conforme ilustrado na Figura 6.29.

A tela da ferramenta é dividida em três partes: abrangência da ferramenta, opções e campos de entrada.

Abrangência: no canto esquerdo do formulário, permite ao usuário escolher a abrangência de atuação da ferramenta, podendo ser global ou por dispositivos selecionados.

Opções: permite ao usuário escolher a modalidade de alteração (por percentual ou valor absoluto) e se a alteração será equivalente para a carga ativa e reativa.

Campos de Entrada: contém os campos para que o usuário preencha com os valores a serem acrescentados/decrementados para a carga ativa e reativa dos dispositivos considerados. Para a modalidade percentual, há duas barras deslizantes para agilizar a escolha de um valor.

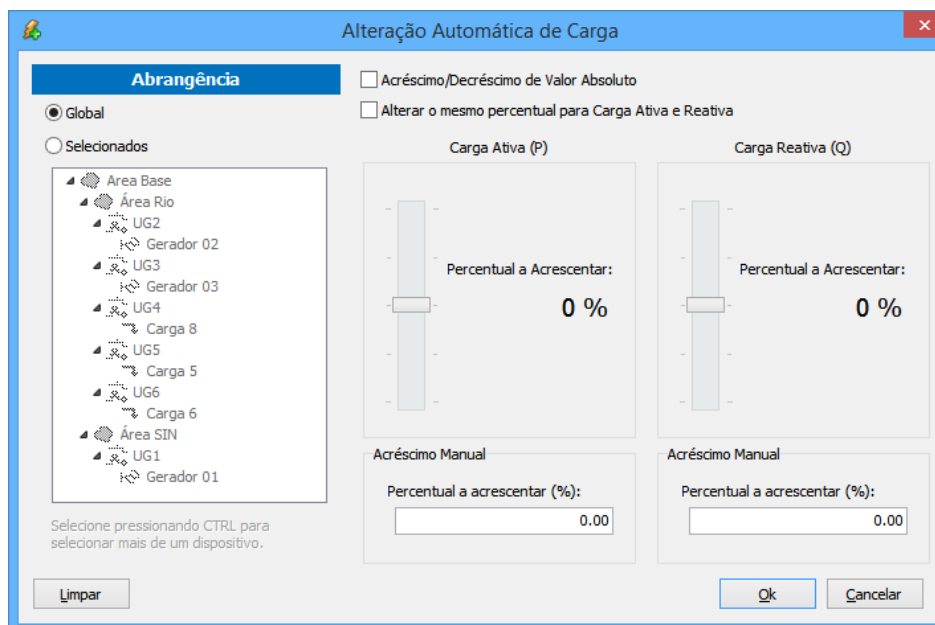


Figura 6.29 Ferramentas/Alteração Automática de Carga

A abrangência da ferramenta dita quais dispositivos terão seus valores pela ferramenta. Ela pode ser de dois tipos: global ou selecionados. A primeira aplica a alteração de carga em todos os geradores e cargas do sistema enquanto a última naqueles selecionados pelo usuário.

As opções são duas: acréscimo de valor absoluto no lugar de valor relativo e aumentar o mesmo percentual para carga ativa e reativa. A primeira permite ao usuário entrar com o valor de aumento ou decréscimo em MW/MVAR no lugar de valores percentuais. Nesse modo, as barras deslizantes serão desativadas e os campos de entrada numérica habilitados. A segunda opção desabilita o campo e a barra deslizante para a potência reativa e copia os valores de potência ativa.

A alteração por valor percentual (padrão) altera o valor dos parâmetros de potência ativa e reativa das cargas e geradores do sistema no percentual especificado, obedecendo a equação abaixo. Na abrangência global, todos os geradores são alterados pelo mesmo percentual enquanto na abrangência selecionada apenas os geradores selecionados sofrerão a mudança.

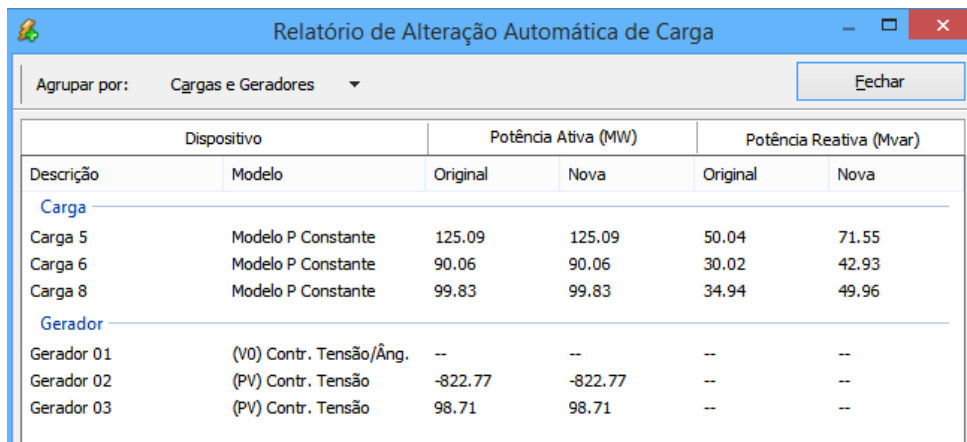
$$P_{final} = (1 + x_p) \times P_{original}$$

A alteração por valor absoluto altera o valor de potência ativa e reativa de cada carga pelo valor especificado, conforme a equação abaixo. Em seguida, reparte o total adicionado para todos os geradores do sistema, com base no seu fator de participação. Assim, nesse modo apenas cargas podem ser selecionadas na listagem.

$$P_{final_{absoluto}} = P_{original} + P_{alterar}$$

Ao aplicar a alteração, é exibida uma tela de relatório da alteração de carga (Figura 6.30). Nesse relatório, os dispositivos podem ser agrupados por tipo, por subestação ou área a que pertencem. Além disso, o relatório exibe o tipo de modelo utilizado, que nem sempre

pode implementar o parâmetro alterado. Por fim, o novo valor e o original são postos lado a lado para que se possa verificar o efeito desejado.



Dispositivo		Potência Ativa (MW)		Potência Reativa (Mvar)	
Descrição	Modelo	Original	Nova	Original	Nova
Carga					
Carga 5	Modelo P Constante	125.09	125.09	50.04	71.55
Carga 6	Modelo P Constante	90.06	90.06	30.02	42.93
Carga 8	Modelo P Constante	99.83	99.83	34.94	49.96
Gerador					
Gerador 01	(V0) Contr. Tensão/Âng.	--	--	--	--
Gerador 02	(PV) Contr. Tensão	-822.77	-822.77	--	--
Gerador 03	(PV) Contr. Tensão	98.71	98.71	--	--

Figura 6.30 Ferramentas/Alteração Automática de Carga/ Relatório de Alteração

6.8 Sistema Equivalente

6.8.1 Formulação do Equivalente de Rede

A construção de um sistema elétrico equivalente envolve a escolha de um conjunto de barras e dispositivos que serão retidos no sistema a ser estudado, e do conjunto de barras e dispositivos que serão equivalentados e removidos. Na Figura 6.31 mostra o sistema interno e sistema externo.

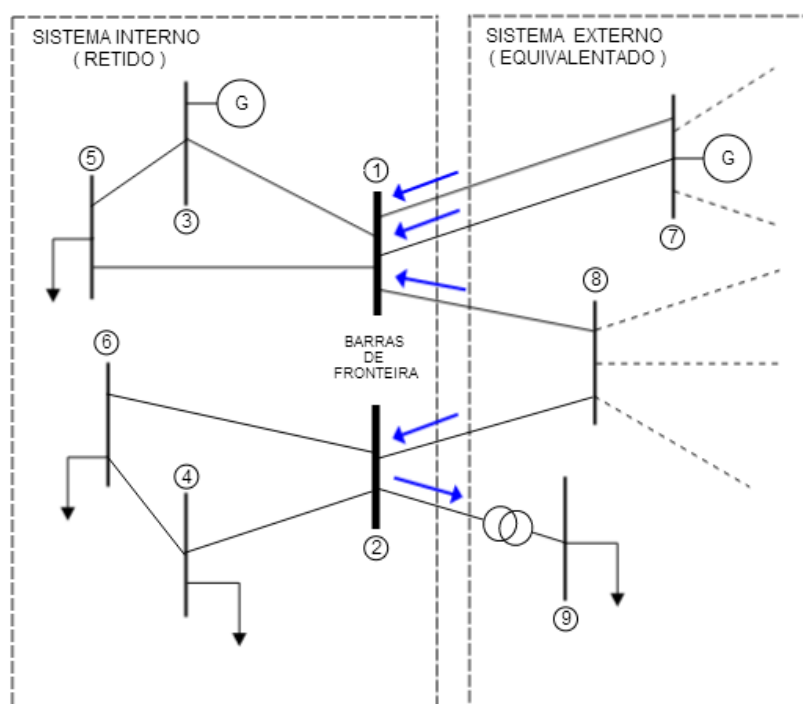


Figura 6.31 Decomposição de um sistema elétrico em sistema interno e externo.

6.8.2 Equivalente Estático e Dinâmico Simplificado

Neste trabalho será adotado um equivalente estático/dinâmico simplificado ilustrado na Figura 6.32. Cada injeção de potência do sistema externo numa barra de fronteira é substituída por um gerador elétrico conectado nesta barra. A este gerador é atribuído inicialmente um modelo de impedância constante, isto é, uma impedância fictícia $R + jX$ conectada da barra de fronteira à terra, com valores de R e X calculados para que o fluxo de potência injetado pela rede externa seja mantido. Assim, R assume valores negativos para potência ativa injetada na barra (gerador) e valores positivos para potência ativa drenada (carga). Esta substituição é feita de forma automática pela ferramenta de equivalentes de rede, mas deverá ser complementada pelo usuário como descrito a seguir.

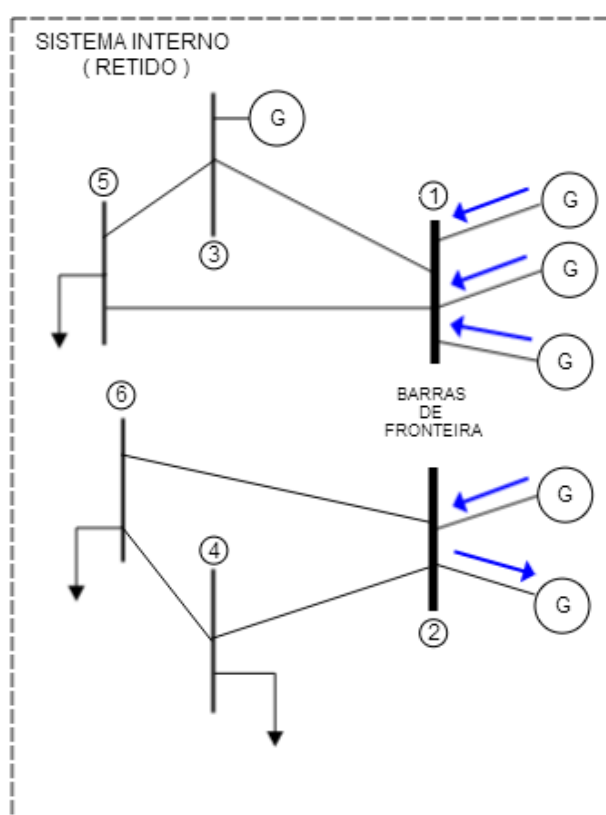


Figura 6.32 Sistema elétrico equivalentado com geradores nas barras de fronteira.

O sistema elétrico equivalente assim construído é um equivalente estático que reproduz no aplicativo de fluxo de potência o ponto de operação do sistema interno em relação ao sistema original. No entanto, a formulação do problema de fluxo de potência requer que exista uma barra $V\theta$ no sistema interno. Caso a barra $V\theta$ do sistema original esteja no sistema externo e tenha sido removida na construção do equivalente, uma nova barra $V\theta$ será escolhida automaticamente pela ferramenta. A escolha é feita na barra do sistema interno com maior geração de potência ativa, ou caso inexista geração no sistema interno, na barra de fronteira com maior injeção de potência ativa pelo sistema externo. A magnitude da tensão V e o ângulo de fase θ da barra são preservados nesta escolha.

Utilizando a interface do software *Simulight*, o usuário poderá substituir manualmente esta barra por outra se julgar mais adequada.

Para complementar o equivalente em sua característica de resposta dinâmica, a ferramenta de equivalentes irá incluir também um modelo dinâmico de máquina síncrona em cada gerador equivalente alocado nas barras de fronteira com injeção positiva de potência ativa, isto é, aqueles com valores de R negativos no modelo impedância constante e comportamento de gerador. Aqueles com injeção negativa de potência ativa (comportamento de carga) permanecem somente com o modelo de impedância constante.

O modelo de máquina síncrona adotado para o equivalente dinâmico é o modelo clássico de fonte de tensão atrás da reatância transitória, correspondendo ao modelo I do software *Simulight*. Os valores de constante de inércia H , reatância X'_d e potência nominal S_{base} são ajustados pela ferramenta nos valores de 60s, 10% e 200MVA respectivamente, o que equivale a 2000MVA de potência de curto-circuito em cada barra de fronteira. Estes valores devem ser ajustados manualmente pelo usuário para uma representação mais real das barras escolhidas como barras de fronteira. No decorrer deste projeto estes valores default serão reavaliados com vistas a se equivalentar o SIN frente ao sistema da Light, e também serão investigadas possibilidades de melhoria neste equivalente dinâmico.

6.8.3 Conectividade das Barras no Sistema Retido

Outro aspecto que é considerado na construção do sistema equivalente está relacionado com a conectividade das barras no sistema retido, que irá se refletir no número de ilhas elétricas resultante. Na Figura 6.32 a escolha das barras 1 e 2 como barras de fronteira resultou em duas ilhas elétricas distintas, uma na parte superior (barras 1, 3 e 5) e outra na parte inferior (barras 2, 4 e 6), o que nem sempre é o desejado. Caso fosse também retida a barra 8, somente uma ilha elétrica seria formada, mas esta escolha depende do conhecimento do usuário sobre o sistema que se deseja estudar, não sendo automatizada na ferramenta de equivalentes de rede a escolha otimizada das barras retidas. Eventualmente, uma escolha ideal poderá requerer do usuário uma análise dos diagramas unifilares.

6.8.4 Interface Gráfica da Ferramenta de Equivalente de Rede

Carregar a tela principal da ferramenta de equivalentes de rede. Na janela da direita (Sistema Externo), escolher as áreas, subestações e barramentos que devem ser retidos no sistema e movê-las para a janela da esquerda (Sistema Interno). A ferramenta irá exibir de forma destacada as barras de fronteira entre os dois sistemas, bem como as respectivas injeções de potência equivalente.

A Figura 6.33 mostra a execução da “Ferramenta de Geração de Equivalente de Rede” (seta vermelha) onde, ao clicar, veremos a tela de início do sistema equivalente, tal como é mostrado na Figura 6.34.

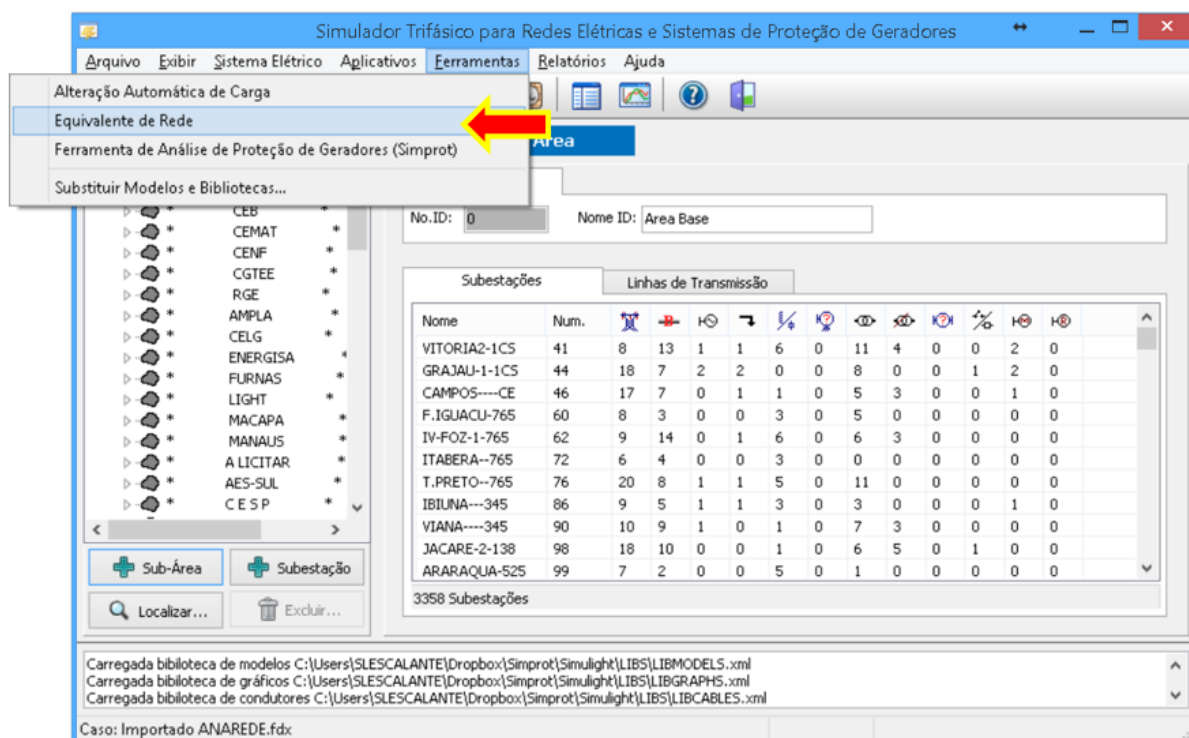


Figura 6.33 Executar a “Ferramenta de Geração de Equivalente de Rede”.

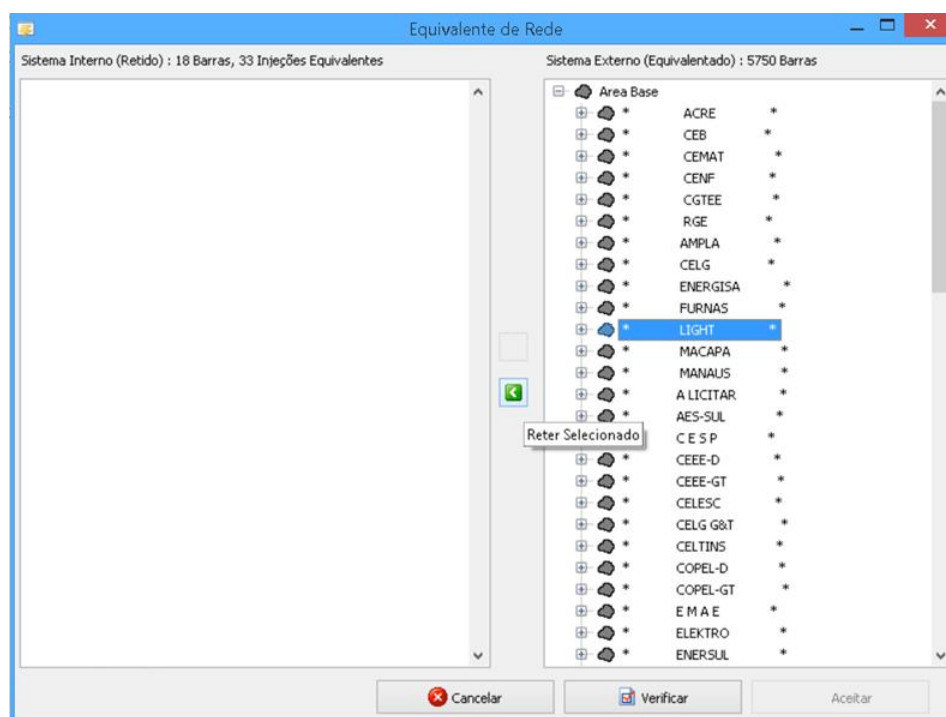


Figura 6.34 Tela para gerar o Equivalente de Rede.

Testar (botão verificar) se a configuração escolhida para o sistema retido representa adequadamente a área do sistema que se deseja estudar. Especial atenção deve ser dada quanto ao número de ilhas elétricas resultantes na construção do sistema equivalente. Idealmente o sistema retido deve possuir somente uma ilha elétrica principal (sendo aceitável a retenção de pequenas ilhas inativas que se formam para cada dispositivo série em estado desligado). Caso contrário, retornar à tela da ferramenta de equivalentes e

selecionar mais barras para o sistema retido de forma a garantir a conectividade entre as diversas ilhas, unindo-as em uma única ilha a ser estudada.

Após a verificação do sistema equivalente, clica-se em [OK] e o sistema equivalente será gerado e poderá ser salvo.

A ferramenta irá eliminar todos os componentes do sistema externo e substituir os dispositivos série que constituem as injeções de fronteira (linhas e transformadores) por dispositivos shunt (geradores), ajustando suas características e modelos conforme o valor da potência injetada. Para o fluxo de potência, todas as injeções são modeladas como gerador tipo PQ (potência ativa e reativa constantes), de forma a preservar o fluxo de potência original no sistema retido. Para a simulação dinâmica, cada injeção com parcela ativa negativa (comportamento de carga) é modelada como gerador tipo impedância constante. Cada injeção com parcela ativa positiva é representada pelo modelo clássico de máquina síncrona, isto é, uma fonte de tensão constante atrás da reatância transitória.

Finalizar a construção do sistema equivalente, verificando a seleção da barra $V\theta$. Caso a barra $V\theta$ do sistema original (gerador com modelo $V\theta$) tenha sido preservada por se localizar no subsistema interno, nenhum ajuste será necessário. Caso tenha sido removida por se localizar no subsistema externo, escolher uma nova geração $V\theta$ no sistema interno, cuidando para que o ângulo θ ajustado (em radianos) corresponda ao valor do ângulo de fase da tensão em sua barra terminal. Este gerador pode ser escolhido tanto entre os geradores originais do sistema interno quanto entre os geradores equivalentes de fronteira que foram adicionados, cujos nomes se iniciam com os caracteres "INJ EQV".

Ajustar os valores de reatância transitória (parâmetro x_{ld}) e das constantes de inércia (parâmetro H) das máquinas síncronas das injeções de fronteira, de forma a aproximar os níveis de curto-circuito originais das barras de fronteira e a inércia do sistema equivalentado.

Este último passo requer algum conhecimento do sistema equivalentado para um ajuste mais fino das injeções de fronteira e melhoria da precisão na resposta dinâmica.

6.8.5 Exemplo - Sistema Equivalente

Como exemplo, mostraremos a geração de um sistema equivalente reduzido do Sistema Interligado Nacional – SIN, este sistema será praticamente toda a rede elétrica compreendida na área do Estado do Rio de Janeiro. Uma representação gráfica deste sistema é mostrada na Figura 6.35, onde os pontos em azul representam injeção de potência elétrica para a Área Rio.

A Tabela 6.2 apresenta as barras de fronteira do sistema equivalente e a Tabela 6.3 apresenta um resumo deste sistema comparado com a base de dados completa do SIN.

Tabela 6.2. Barras de fronteira do sistema equivalente

Área	Subestação	Barra
Furnas	Vitoria	149 VITORIA--345
	Cachoeira Paulista	104 C.PAULIS-500
	Adrianópolis	140 ADRIANO--345
	Viana	2619 VIANA----138
A Licitar	Viana	3021 VIANA2---500
Demais Agentes RJ/ES	Nova Iguaçu	9608 N.IGUACU-500
CTEEP - Grande São Paulo	Santa Cabeça	461 S.CABECA-230
Energisa	Além Paraíba	3300 APARAIBA-138

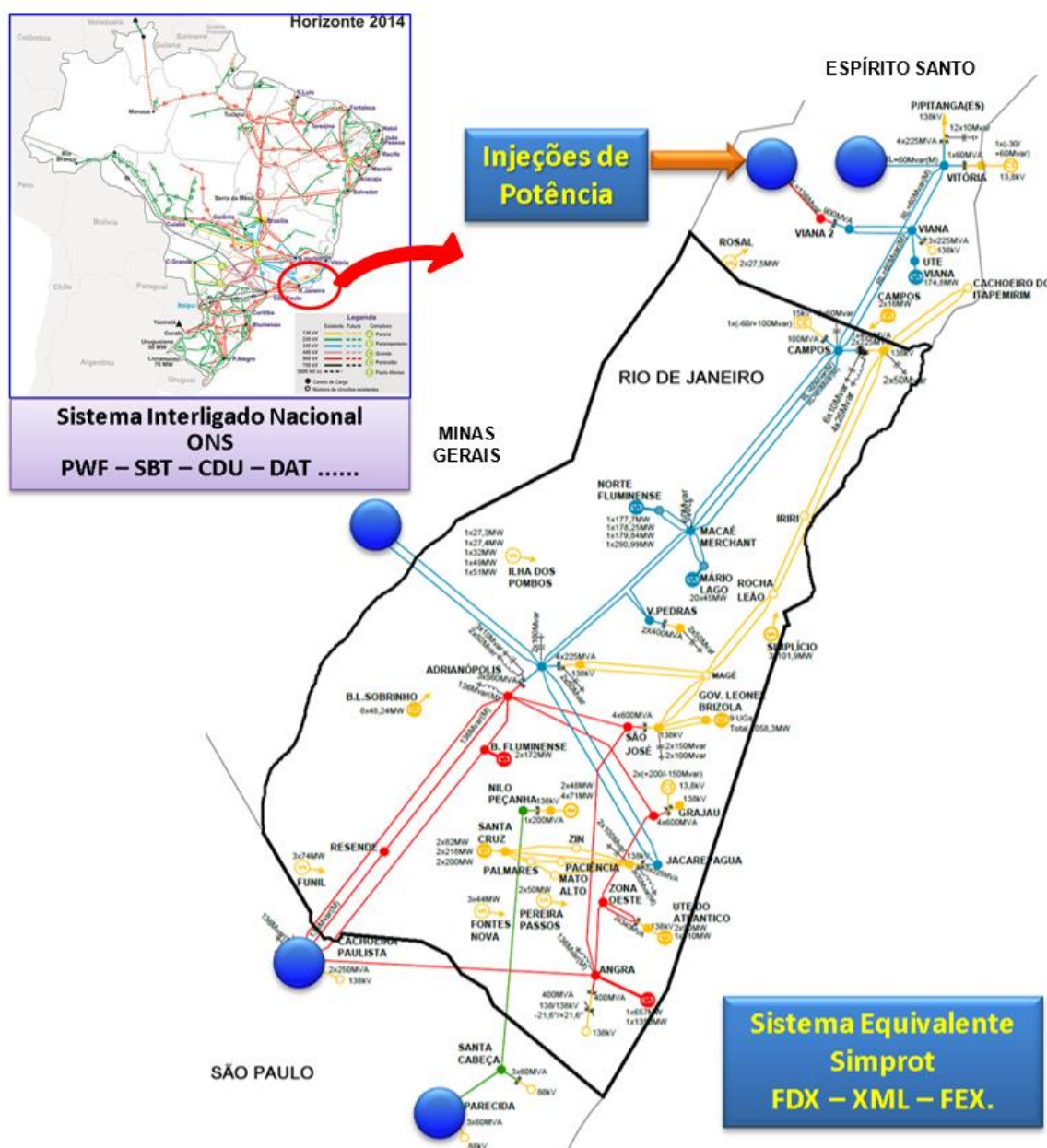


Figura 6.35 Sistema elétrico do Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 6.3. Resumo do sistema equivalente

DESCRIÇÃO Parâmetro	QUANTIDADE		
	SIN	Equivalente	
Número de ilhas ativas	1	1	
Número de barras (em ilhas ativas)	5629	485	8,62%
Número de barras de fronteira	---	8	
Número de barras de geração	1035	19	1,84%
Número de barras de carga	2238	226	10,10%
Número de linhas de transmissão	5003	1016	20,31%
Número de transformadores (incluindo LTCs)	3060	177	5,78%
Geração total (incluindo balanço de injeções de fronteira)	92154 MW	9662 MW	10,49%
Carga total	84489 MW	9492 MW	11,24%
Perda total	7665 MW	170 MW	2,22%

O sistema equivalente foi gerado a partir do arquivo de caso ANAREDE do SIN disponibilizado pelo ONS. O primeiro passo foi importar o arquivo JUN14PES.PWF na condição de carga pesada. A Figura 6.36 mostra um pequeno roteiro de como foi realizada tal importação.

Para executar o fluxo de potência é necessário ter pelo menos um gerador de referência ($V-\theta$). Para nosso sistema equivalente escolheu-se a injeção de potência da subestação de N.IGU5-A-013 (barra 4309).

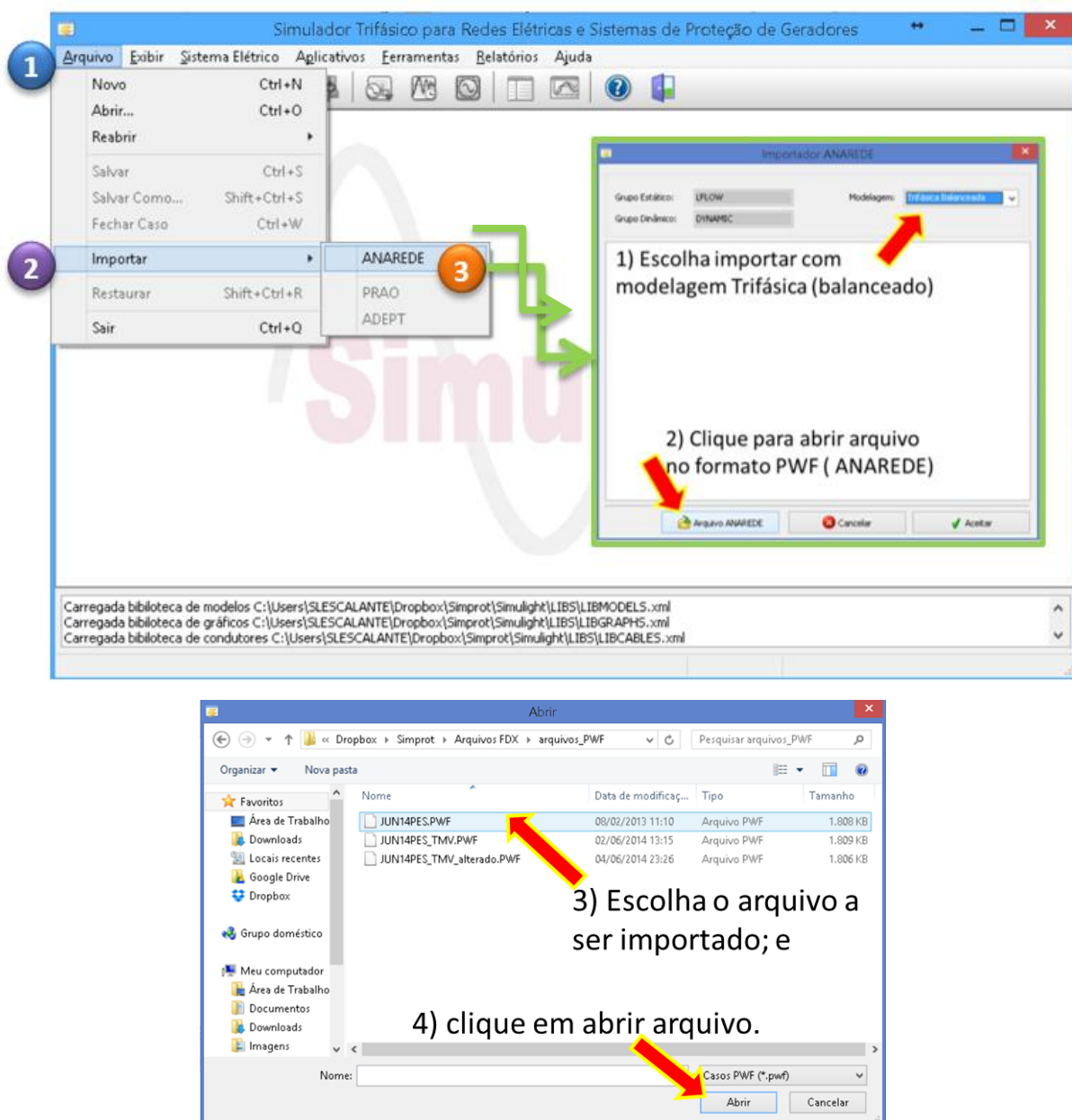


Figura 6.36 Importação do arquivo PWF (ANAREDE).

Agora iremos executar a “Ferramenta de Geração de Equivalente de Rede” (seta vermelha da Figura 6.37), com isso, teremos a tela de início do sistema equivalente (Figura 6.38). Em seguida, seleciona-se uma subestação ou empresa (grupo de subestações) tal como é indicada pelo símbolo ① (no lado esquerdo da figura). A seguir, clicando-se em ② (parte central da figura), é possível selecionar os itens que irão compor o novo sistema. Este procedimento é repetido até obter o sistema equivalente desejado.

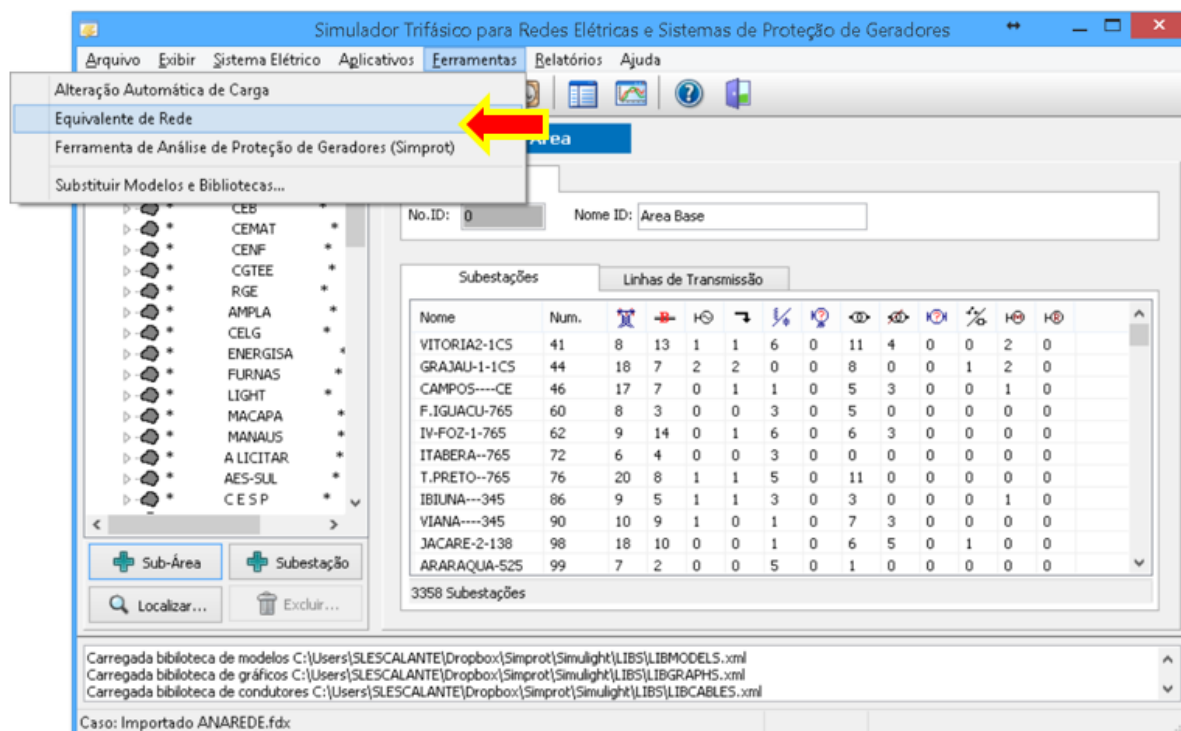


Figura 6.37 Executar a “Ferramenta de Geração de Equivalente de Rede”.

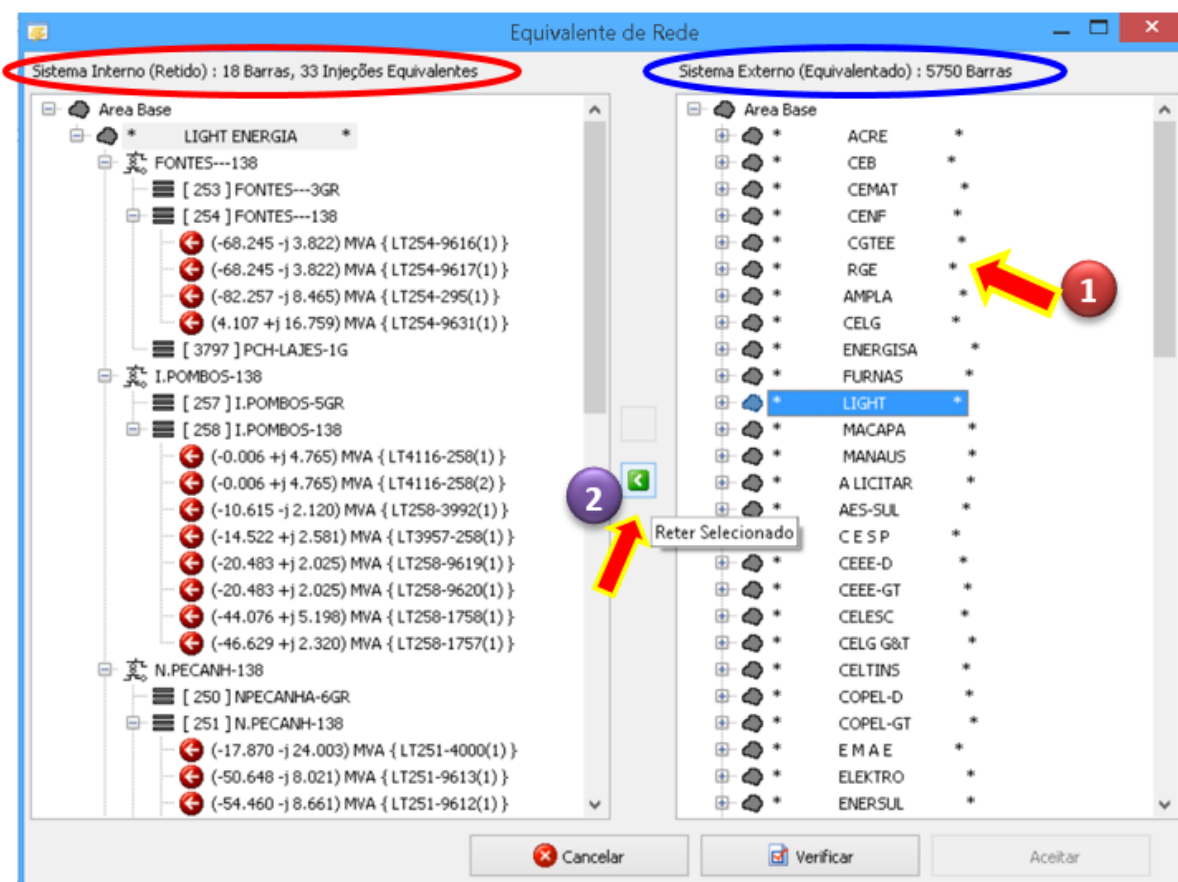


Figura 6.38 Tela para gerar o Equivalente de Rede.

A parte superior esquerda da Figura 6.38 mostra o número de barras retidas e o número de injeções que formam o sistema equivalente e as injeções, que podem ser

rapidamente identificadas pela seta vermelha . Com um clique duplo na seta de injeção de potência, a ferramenta indicará o barramento de origem de conexão da respectiva injeção.

Depois de verificar o sistema equivalente (botão [Verificar]), podemos clicar em [OK] e o sistema equivalente será gerado e poderá ser salvo.

7 Exemplos

Neste capítulo é apresentado um exemplo detalhado para a criação de um sistema elétrico de potência.

7.1 Exemplo 01: Sistema 9 barras

Neste sistema inicialmente mostraremos como criar um caso que permita executar uma análise de fluxo de potência, para posteriormente mostrar como modificar o caso para executar uma análise de estabilidade transitória.

7.1.1 Dados Fluxo de Potência

Nesta seção mostramos os dados estáticos do sistema agrupados em duas Tabelas. Inicialmente, as descrições das colunas correspondentes as Tabelas são definidas na *Seção A - Nomenclatura*. Seguidamente, na *Seção B* são mostrados os dados do sistema agrupados na Tabela 7.1 e na Tabela 7.2. Finalmente, na *Seção C* é mostrada a topologia do sistema, contendo dados consistentes e adicionais aos apresentados inicialmente nas Tabelas.

A. Nomenclatura

Dados das barras

B	Número da barra
Nome	Nome da barra
T	Tipo da barra (2 = V0; 1 = PV; 0 = PQ)
V_m	Módulo da tensão (p.u.)
V_a	Ângulo da tensão (graus)
P_D	Potência ativa de carga (MW)
Q_D	Potência reativa de carga (MVAR)
P_G	Geração de potência ativa (MW)
Q_G	Geração de potência reativa (MVAR)
B_S	Susceptância shunt (MVAR para $V = 1.0$ p.u.)
kV	Tensão base (kV)

Dados dos ramos

N_i	Número da barra de saída
N_F	Número da barra de chegada
T	Tipo do ramo (1= transformador, 0 = linha)
R	Resistência (p.u.)
X	Reatância (p.u.)
B	Susceptância total da linha (p.u.)
MVA	Máxima capacidade de transferência da potência aparente (MVA)
Tape	Tape do transformador

B. Dados do Sistema

Tabela 7.1. Dados das barras

B	Nome	T	V _m	V _a	P _D	Q _D	P _G	Q _G	B _S	kV
1	Barra 1	2	1.040	0.00	0.0	0.0	71.6	27.1	0.0	16.5
2	Barra 2	1	1.025	9.28	0.0	0.0	163.0	6.7	0.0	18.0
3	Barra 3	1	1.025	4.67	0.0	0.0	85.0	-10.9	0.0	13.8
4	Barra 4	0	1.026	-2.22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
5	Barra 5	0	0.996	-3.99	125.0	50.0	0.0	0.0	0.0	230.0
6	Barra 6	0	1.013	-3.69	90.0	30.0	0.0	0.0	0.0	230.0
7	Barra 7	0	1.026	3.72	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0
8	Barra 8	0	1.016	0.73	100.0	35.0	0.0	0.0	0.0	230.0
9	Barra 9	0	1.042	1.97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	230.0

Tabela 7.2. Dados dos ramos

N _I	N _F	T	R	X	B	MVA	Tape
2	7	1	0.0000	0.0625	0.0000	200.0	1.0000
7	8	0	0.0085	0.0720	0.1490	100.0	
8	9	0	0.0119	0.1008	0.2090	30.0	
9	3	1	0.0000	0.0586	0.0000	90.0	1.0000
7	5	0	0.0320	0.1610	0.3060	100.0	
9	6	0	0.0390	0.1700	0.3580	50.0	
5	4	0	0.0100	0.0850	0.1760	100.0	
6	4	0	0.0170	0.0920	0.1580	100.0	
4	1	1	0.0000	0.0576	0.0000	300.0	1.0000

C. Topologia

Os elementos mostrados na Tabela 7.1 e Tabela 7.2 encontram-se agrupados em duas áreas (Área Rio e Área SIN), 3 empresas (LIGHT(verde), AMPLA(vermelho) e OUTRAS) e 6 subestações (UG1, UG2, UG3, SE5, SE6 e SE8), tal e como mostrado na Figura 7.1.

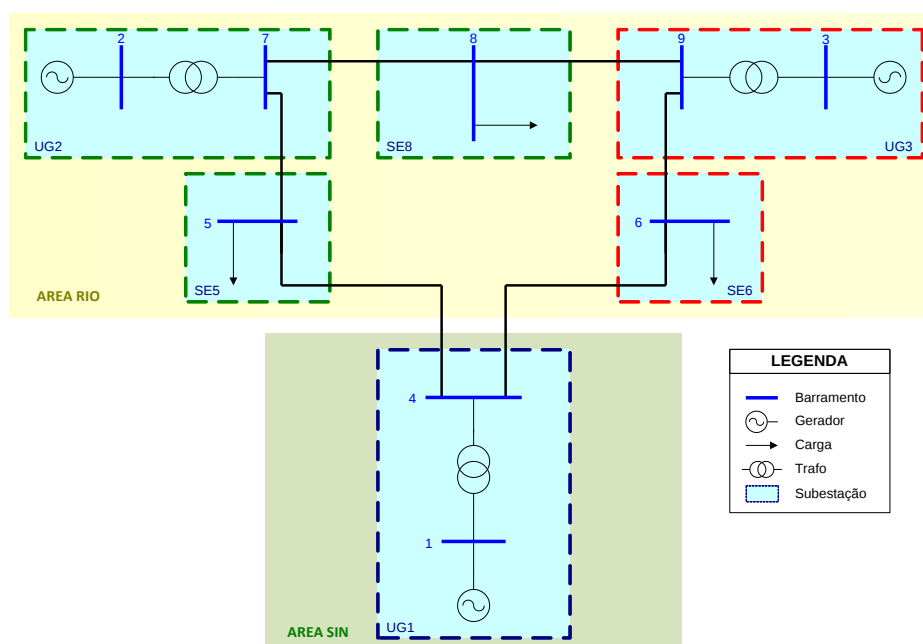


Figura 7.1 Topologia do Sistema 9 Barras.

7.1.2 Definindo uma topologia no Simulight

A partir do menu **Arquivo** → **Novo** o usuário poderá começar a criação de uma nova topologia, tal e como mostrado na Figura 7.2. É importante notar que cada Novo Caso possui uma Área Base criada automaticamente. (Seção 4.3)

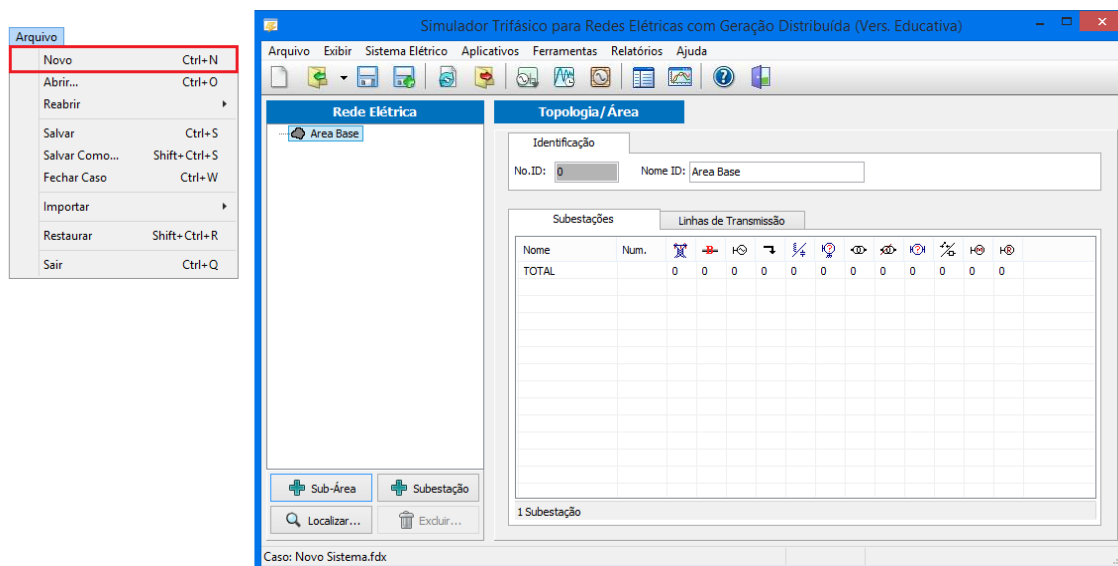


Figura 7.2 Arquivo / Novo Caso.

Inserção de Empresas

Recomenda-se inicialmente a criação das empresas no sistema. Para criar uma empresa basta clicar no menu **Sistema Elétrico** → **Controle de Empresas**, e fazer clique no botão [Adicionar], mostrando as telas da Figura 7.3. (Seção 4.7)

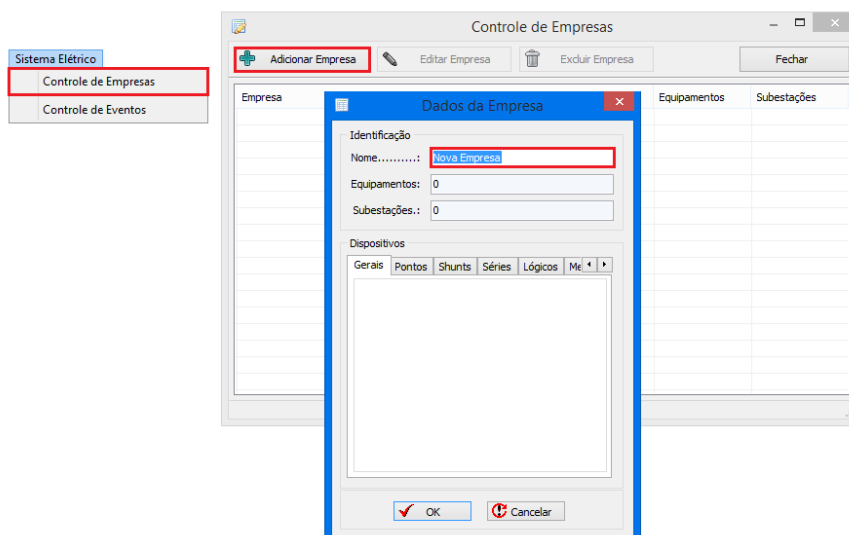


Figura 7.3 Sistema Elétrico / Controle de Empresas.

Nessa ultima tela, deve se preencher o nome da empresa (LIGHT) e clicar no botão [OK] (esquerda da Figura 7.4). Repetir o processo para inserir as outras empresas (AMPLA e OUTRAS). Na Figura 7.4, lado direito, mostra-se a tela de controle de empresas com as empresas inseridas.

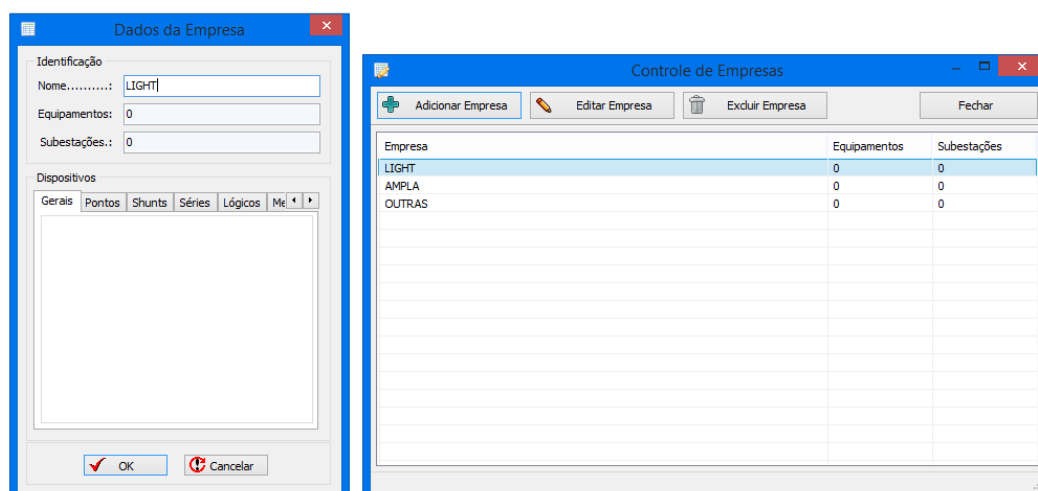


Figura 7.4 Controle de Empresas / Empresas adicionadas.

Inserção de Subáreas

Seguidamente recomenda-se a criação das subáreas no sistema. Para criar uma subárea basta selecionar no “Painel Rede Elétrica” a área pai (neste caso a Área Base) e logo clicar no botão “Adicionar Subárea”, tal e como mostrado na Figura 7.5. Na telinha que aparece tem que ser preenchido nome da subárea (Área Rio) e logo clicar no botão “OK”. O mencionado processo deve ser repetido mais uma vez para inserir a outra subárea (Área SIN). Na Figura 7.6 observa-se o painel “Rede Elétrica”, logo de efetuado dito processo.

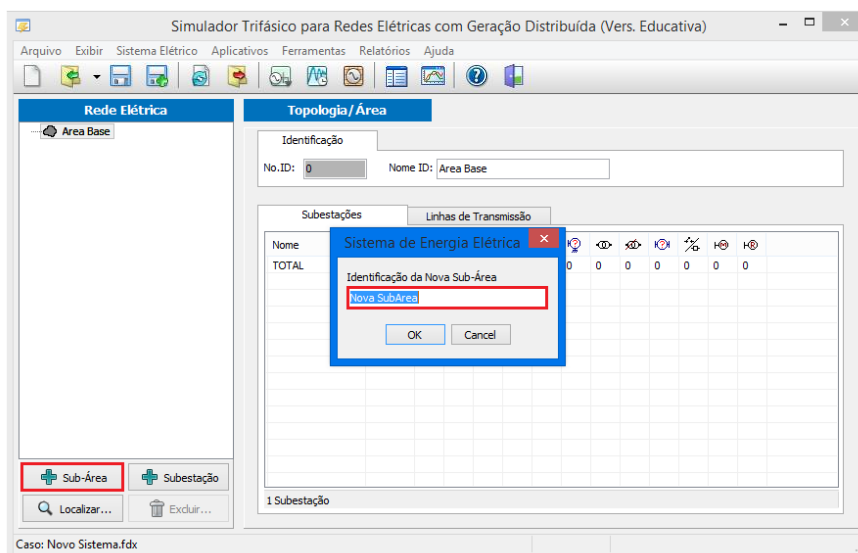


Figura 7.5 Sistema Elétrico / Adicionar Subárea.

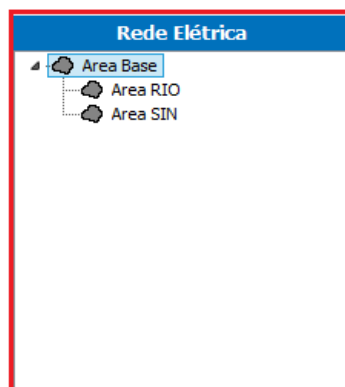


Figura 7.6 Sistema Elétrico / Subáreas adicionadas.

Inserção de Subestações

Seguidamente recomenda-se a criação das subestações no sistema. Para criar uma subestação basta selecionar no “Painel Rede Elétrica” a área pai (neste caso a Área SIN) e logo clicar no botão “Adicionar Subestação”, tal e como mostrado na Figura 7.7. Na telinha que aparece tem que ser preenchido nome da subestação (UG1), escolher a empresa proprietária, e logo clicar no botão “OK”. O mencionado processo deve ser repetido mais cinco vezes para inserir as outras subestações (UG2, UG3, SE5, SE6 e SE8).

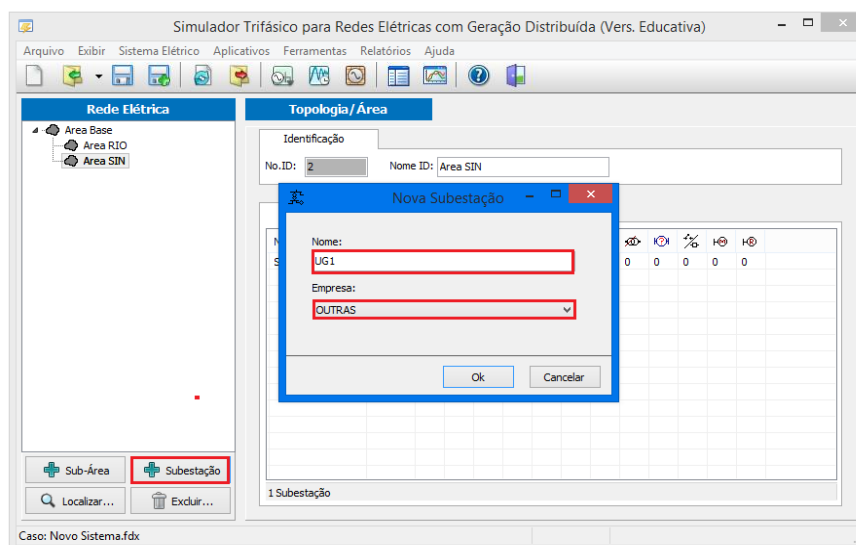


Figura 7.7 Sistema Elétrico / Adicionar Subestação.

Na Figura 7.8 observa-se o painel “Rede Elétrica”, logo de efetuado o processo recentemente descrito. É importante notar que cada subestação inserida possui um barramento criado automaticamente. Os elementos que compõem uma subestação podem ser visualizados no painel a direita da interface principal. Eles são agrupados em pontos (barramentos, nós), shunts (gerador, carga, reator, capacitor), séries (trafo, LTC, trecho), lógicos (disjuntor, seccionador), medidores, proteção (relés) e linhas de transmissão.

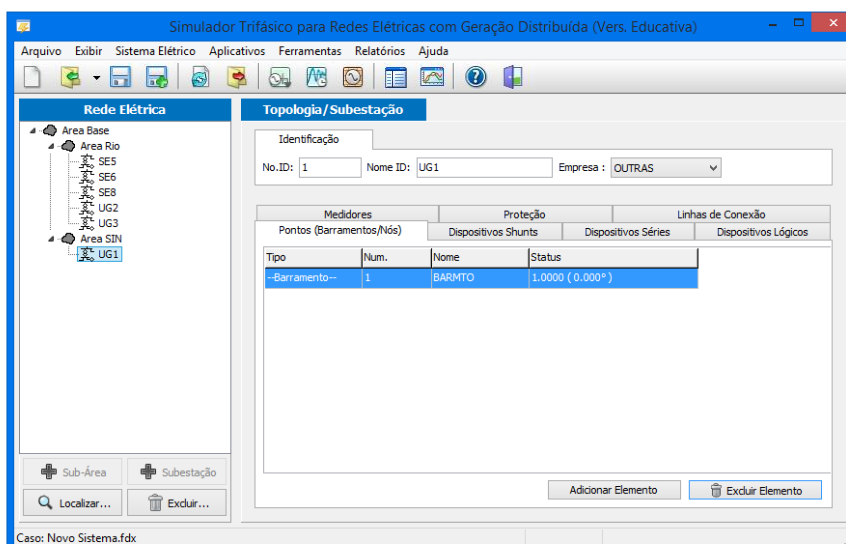


Figura 7.8 Sistema Elétrico / Subestações adicionadas.

Inserção de Dispositivos numa Subestação

Na Figura 7.1 pode-se observar que a subestação UG2 possui 2 barramentos, 1 shunt (gerador), 1 série (transformador) e duas linhas de conexão (transmissão) para com outras subestações.

Para criar um barramento basta selecionar no “Painel Rede Elétrica” uma subestação (neste caso UG2), logo selecionar a aba Pontos, e finalmente clicar no botão “Adicionar Elemento”, tal e como mostrado na Figura 7.9.

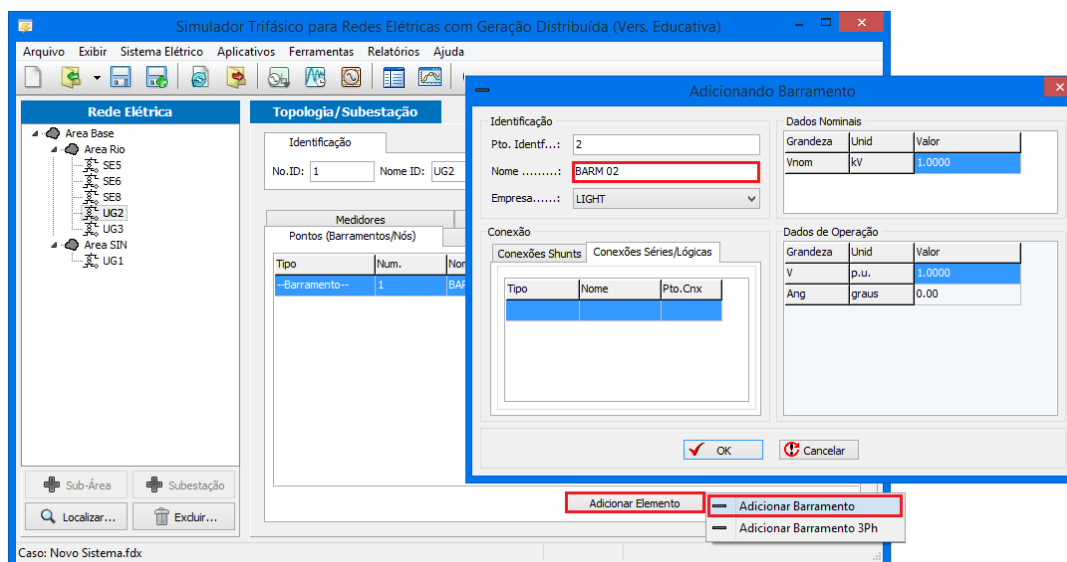


Figura 7.9 Sistema Elétrico / Adicionar Barramento.

Na Figura 7.10 pode-se observar o barramento recentemente adicionado na tela de fundo, na aba “Pontos”. Para editar a informação de algum ponto existente basta selecionar o elemento e clicar duas vezes nele. Na Figura 7.10 observa-se a edição do número (1 → 7), nome (BARMTO → BARM 02) e demais parâmetros do primeiro barramento.

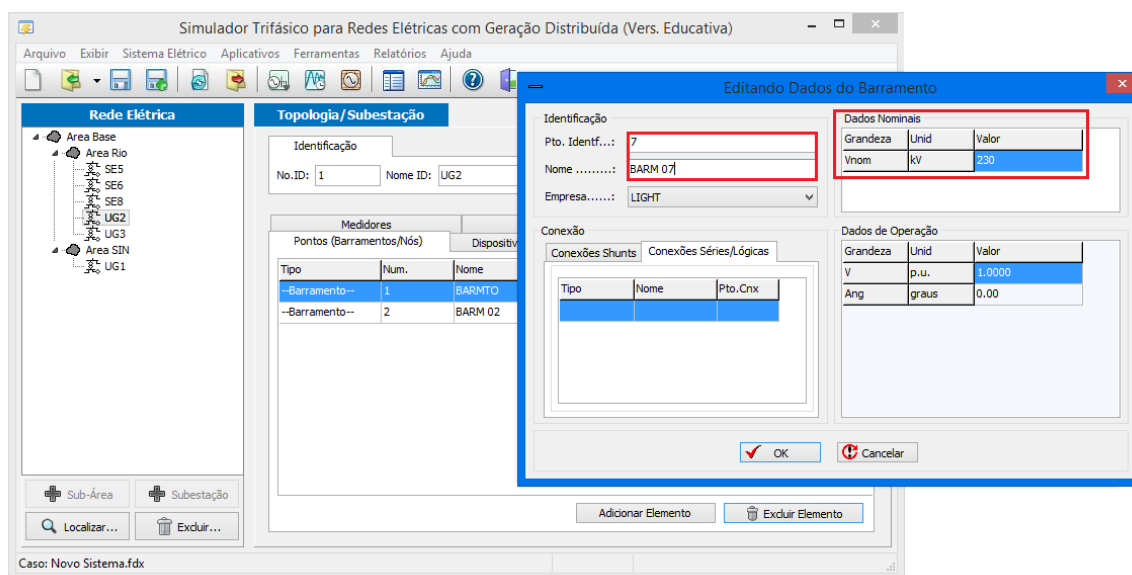


Figura 7.10 Sistema Elétrico / Editando Barramento.

Para criar um gerador basta selecionar no “Painel Rede Elétrica” uma subestação (neste caso UG2), logo selecionar a aba “Dispositivos Shunts”, e finalmente clicar no botão “Adicionar Elemento”, tal e como mostrado na Figura 7.11. Clicando no botão “OK” na janela do gerador, o mesmo será inserido na subestação.

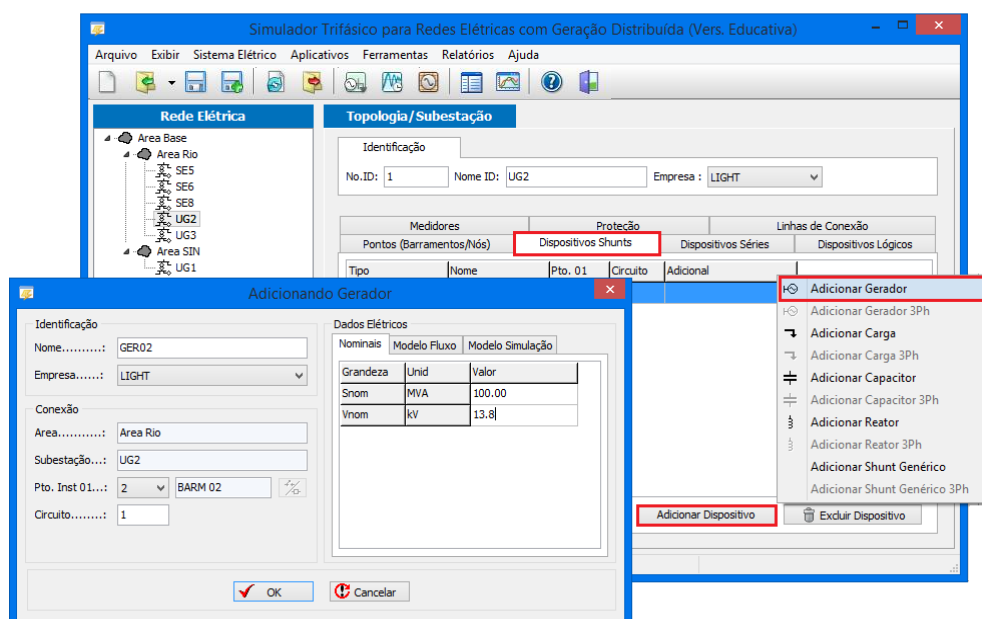


Figura 7.11 Sistema Elétrico / Adicionar Gerador.

Na Figura 7.12 pode-se observar o gerador recentemente adicionado na tela de fundo, na aba “Dispositivos Shunts”. Para editar a informação de algum shunt existente basta selecionar o elemento e clicar duas vezes nele. Na Figura 7.12 observa-se a edição do modelo do gerador para o fluxo de potência. O modelo escolhido é o PV, sendo editados os parâmetros P e Vref. O tipo de modelo assim como os parâmetros foi definido no início deste capítulo, na Tabela 7.1.

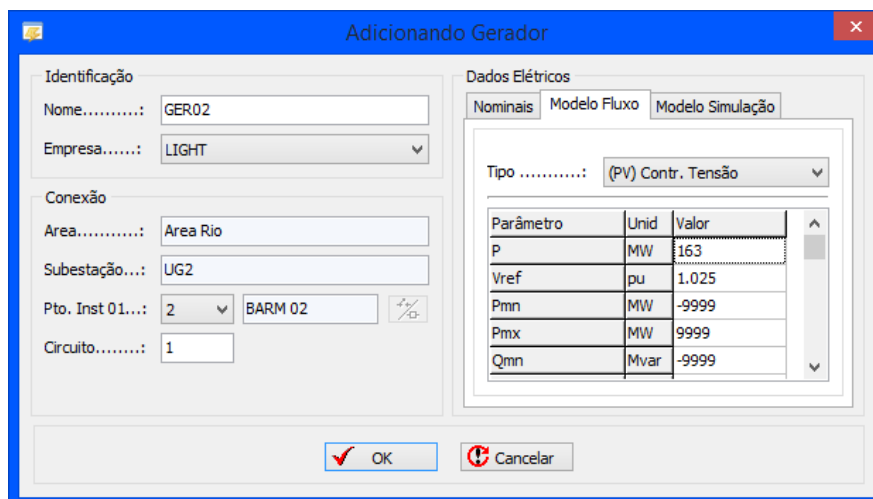


Figura 7.12 Sistema Elétrico / Editando Gerador.

A criação dos demais elementos (um transformador e duas linhas de transmissão) segue a mesma filosofia que a recentemente descrita para o gerador. Este processo deve ser repetido para as outras subestações, preenchendo os dados mostrados na seção 7.1.1.

Salvando uma Topologia

A partir do menu **Arquivo** → **Salvar Caso** o usuário poderá salvar o caso de estudo, tal e como mostrado na Figura 7.13.

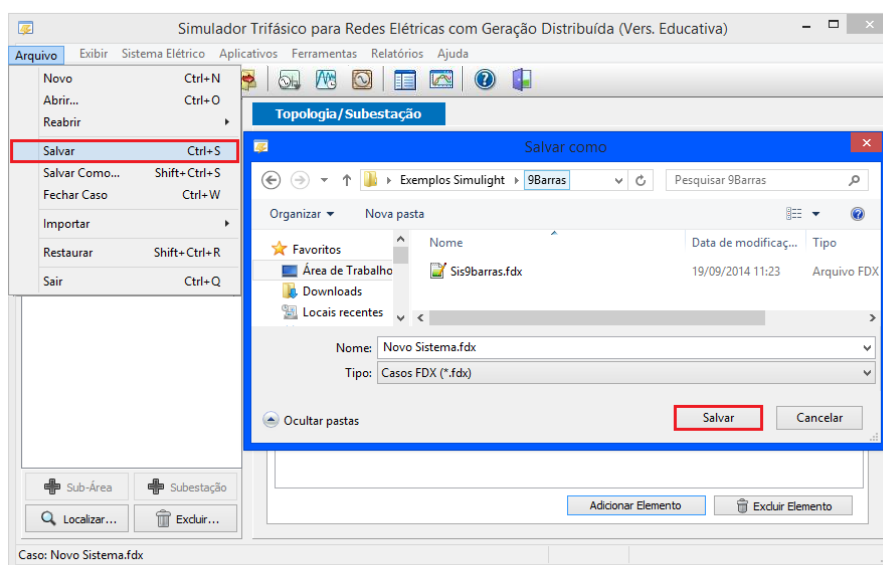


Figura 7.13 Arquivos / Salvar uma Topologia.

7.1.3 Executando Fluxo de Potência

A partir do menu **Aplicativos** → **Fluxo de Potência** o usuário poderá ter acesso ao respectivo aplicativo. Na Figura 7.14 observa-se a tela correspondente ao aplicativo Fluxo de Potência. O sistema possui somente uma ilha elétrica (Ilha # 1). A opção para as Tensões Iniciais recomendada é o “Desacoplado”. Para executar o aplicativo basta clicar no botão “EXECUTA”. O resultado do processo iterativo é mostrado no lado direito da janela. Pode-se observar que o processo somente precisou de 1 iteração, conseguindo convergência, sendo

os erros para cada iteração mostrados num grid. Para visualizar o estado da rede, produto da execução do aplicativo basta clicar no botão “Relatórios” e escolher o tipo desejado.

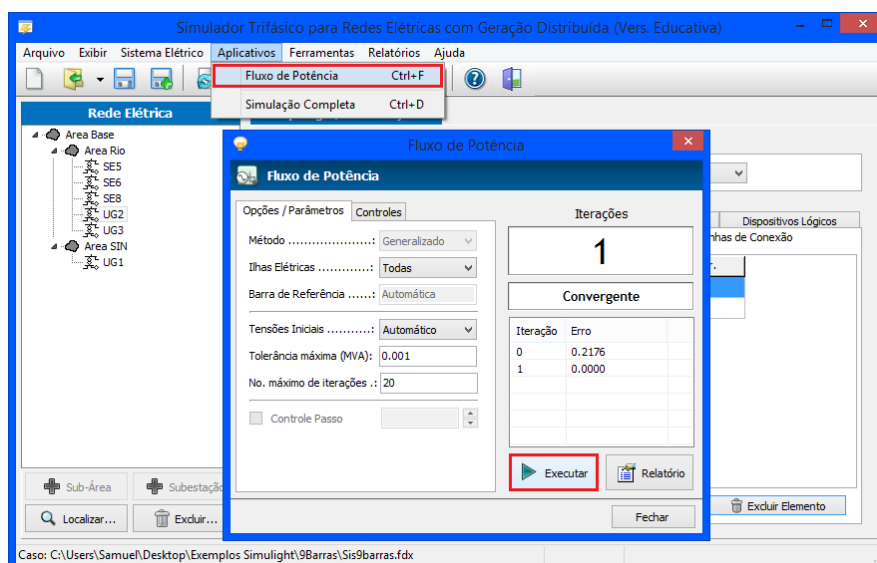


Figura 7.14 Aplicativos / Fluxo de Potência.

O Simulight oferece três tipos de relatórios. Os campos nos relatórios encontram-se agrupados em “Dados de Barra” e em “Dados de Linha”. Estes campos são os mesmos para os três relatórios, o que varia de um para outro é o critério de filtragem (Empresa, Ilha ou Subestação). Na Figura 7.15 pode-se observar o relatório por Empresa.

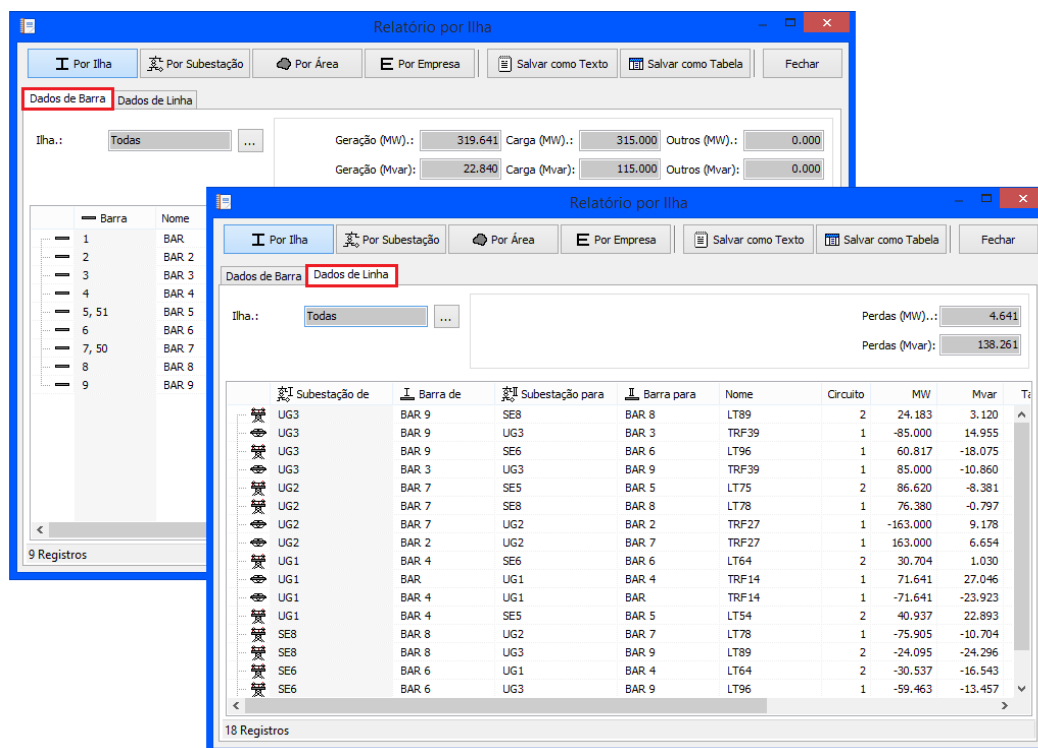


Figura 7.15 Aplicativos / Fluxo de Potência / Relatório por Empresa.

Na Figura 7.16 pode-se observar o estado da rede. Todos os dados colocados no gráfico foram obtidos do relatório mostrado na Figura 7.15.

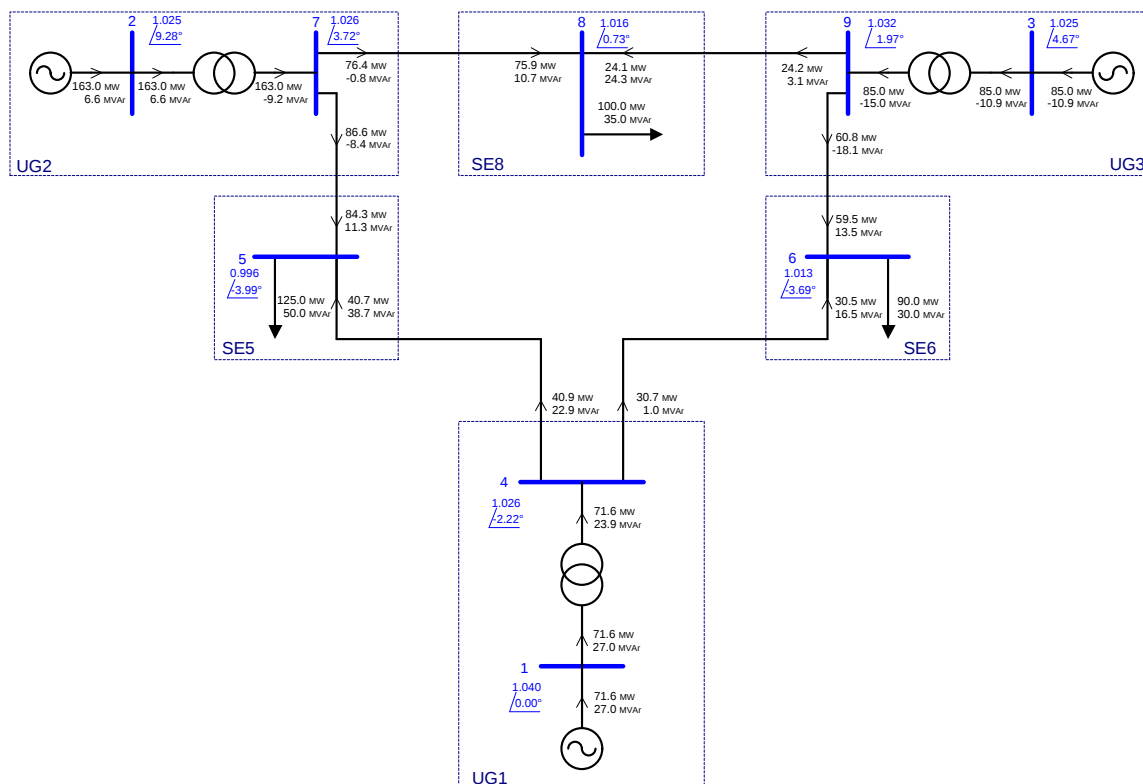


Figura 7.16 Aplicativos / Fluxo de Potência / Estado da Rede.

7.2 Exemplo 02: Resposta dinâmica (Sistema 9 barras)

Nesta seção será abordada a utilização do sistema elétrico em regime permanente (7.1) para a abordagem do comportamento do sistema 9 Barras em regime transitório.

Em especial será abordado o comportamento dinâmico dos ângulos dos geradores do sistema sob a condição de curto trifásico franco em uma das linhas do sistema elétrico, seguida pela abertura da linha em falta.

7.2.1 Preparação do Caso Base

Como em outros programas de análise de estabilidade transitória de redes elétricas, para a inicialização da simulação é necessária a obtenção do ponto de operação do sistema, no caso o carregamento do sistema, ou seja, os resultados do fluxo de potência obtidos na seção 7.1.

O estado do sistema no momento pré-falta é representado na Figura 7.17.

A evolução dos ângulos de carga dos geradores do sistema 9 Barras, será analisada para três diferentes configurações de modelo dinâmico dos geradores. Porém todos os casos serão analisados para a ocorrência dos mesmos eventos.

Eventos:

- Aplicação do curto trifásico franco na linha de conexão entre os barramentos 7 e 5 em 0.5 s.
- Abertura dos disjuntores da linha 7-5 em 83ms.

Casos:

1. Geradores com modelo dinâmico de simulação do tipo MD02
2. Geradores com modelo dinâmico de simulação do tipo MD02 e regulador de tensão modelo de 1oORD
3. Geradores com modelo dinâmico de simulação do tipo MD02, com regulador de tensão modelo de 1oORD e estabilizador de sistema de potência Modelo PSS_w.

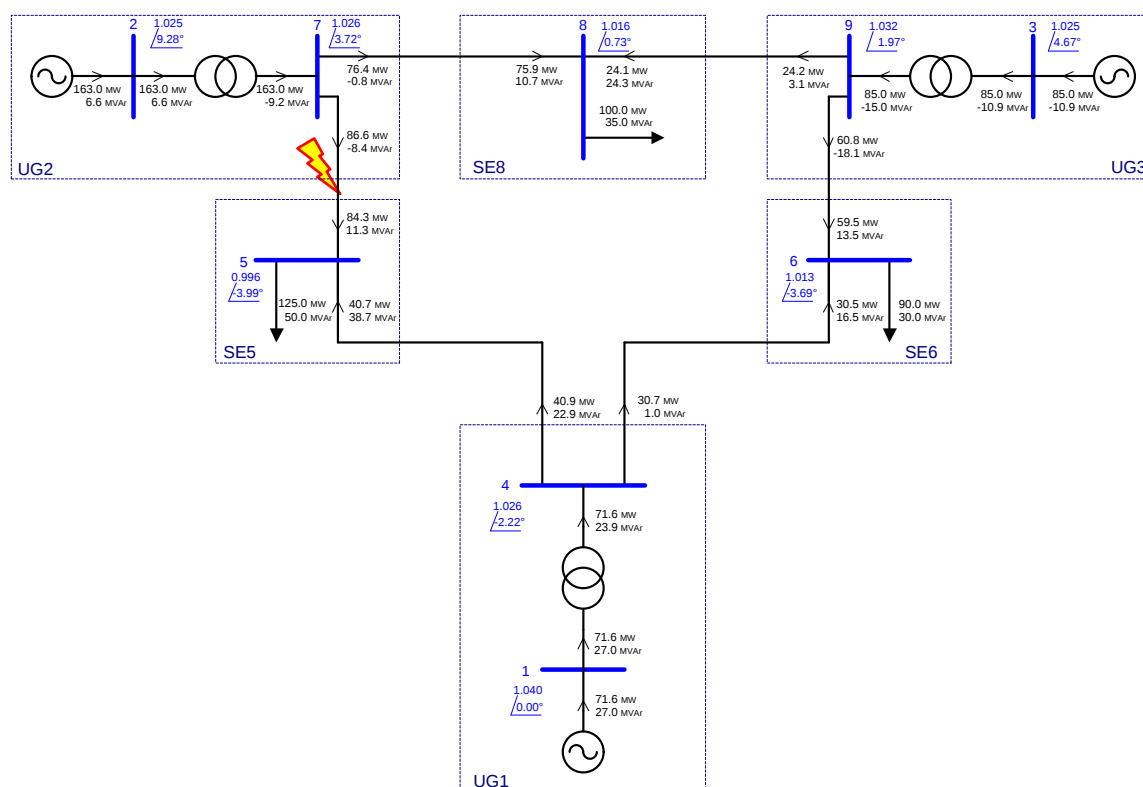


Figura 7.17 Carregamento pré-falta

A Tabela 7.3 esquematiza os modelos dinâmicos que serão usados em cada simulação.

Tabela 7.3. Dados dos modelos dinâmicos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Máquina Síncrona	MD02	MD02	MD02
Reg. Tensão	S/ Reg. Tensão	1oORD	1oORD
Reg. Velocidade	S/ Reg. Velocidade	S/ Reg. Velocidade	S/ Reg. Velocidade
Reg. Estabilizador	S/ Reg. Estabilizador	S/ Reg. Estabilizador	PSS_w

Para poder-se visualizar o comportamento dos ângulos de carga, dos geradores do sistema, e realizar a abertura da linha em falta, será necessária a inserção de medidores e dispositivos lógicos (disjuntores) no caso base.

7.2.2 Inserção de Medidores e Dispositivos Lógicos

Para se inserir um medidor, para visualização do comportamento do ângulo de carga de um gerador, basta clicar sobre a subestação desejada, clicar na aba “Medidores” e em “Adicionar Medidor” e escolher a opção, “Adicionar Med. Sinal” conforme mostrado na Figura 7.18.

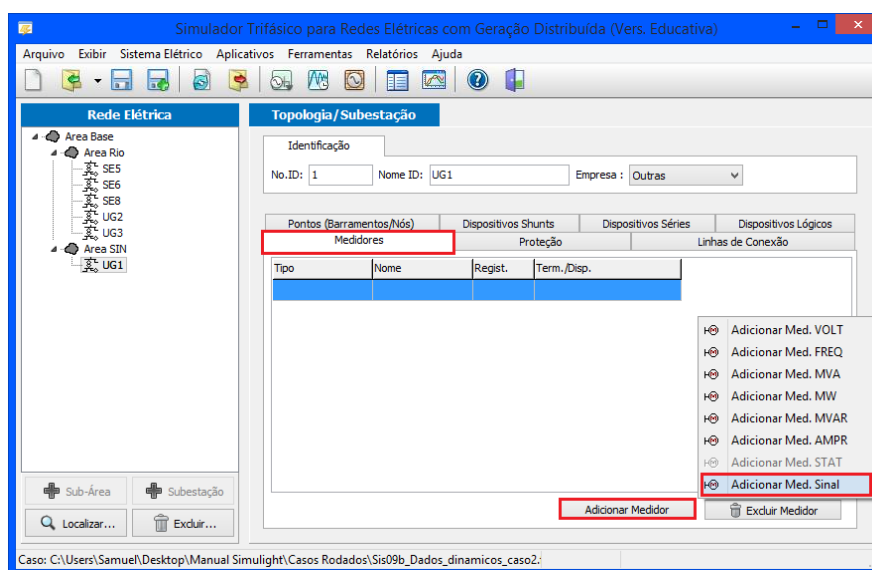


Figura 7.18 Sistema Elétrico/Adicionar Medidor

Na nova janela aberta, deve-se nomear a nova medida que será adicionada, além da escolha de qual dispositivo esta será condicionada e o tipo de sinal o qual se deseja medir. Entre os tipos de medidas, presentes na lista de sinal deve-se escolher a opção “delt”, conforme mostrado na Figura 7.19.

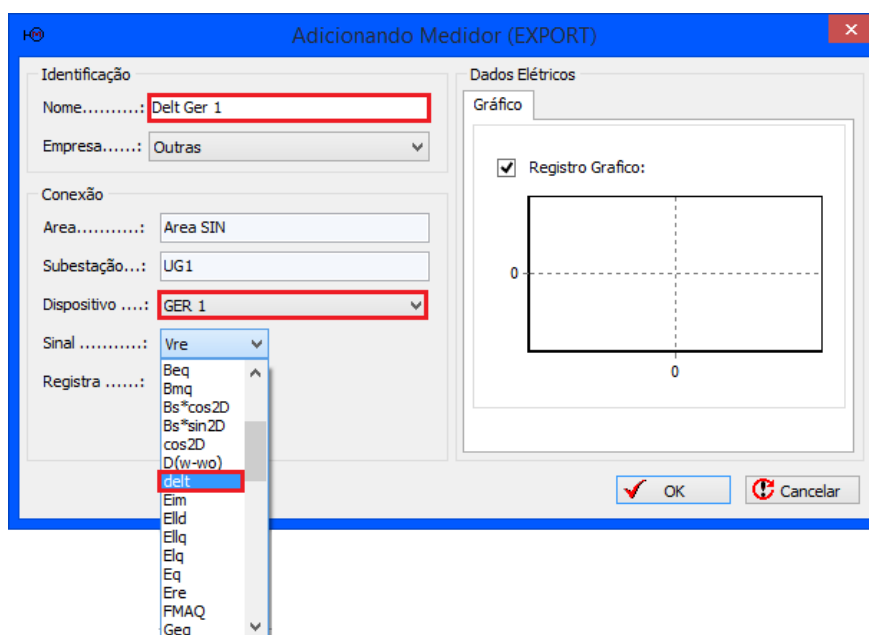


Figura 7.19 Sistema Elétrico/Editando Medidor

Para inserir-se um dispositivo lógico deve-se clicar na aba “Linhas de Conexão” e com o botão direito do mouse clicar sobre a linha na qual se deseja instalar um disjuntor e selecionar a opção “Inserir Disjuntor (Term. Int.)” (Figura 7.20). Depois de selecionada a opção, será aberta a janela da Figura 7.21, nesta pode-se nomear o dispositivo e alterar alguns dados de especificação.

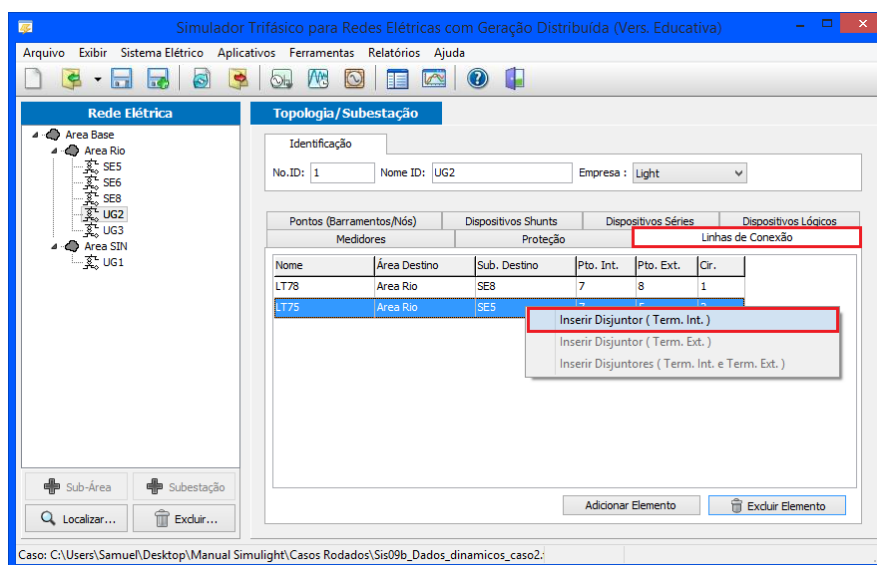


Figura 7.20 Sistema Elétrico/Adicionar Disjuntor

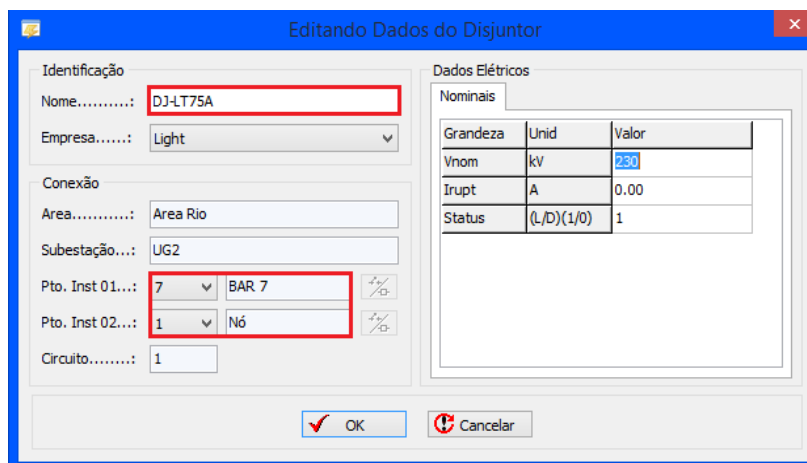


Figura 7.21 Sistema Elétrico/Editando Disjuntor

O ponto de instalação pode ser alterado nas opções “Pto. Inst. 01” e “Pto. Inst. 02”, automaticamente o Simulight irá criar um nó como “Pto. Inst. 02”, nomeado de acordo com os já existentes. Para renomear o ponto criado, basta ir à aba “Pontos (Barramentos/Nós)”, clicar duas vezes sobre o ponto desejado e editá-lo, conforme a Figura 7.22.

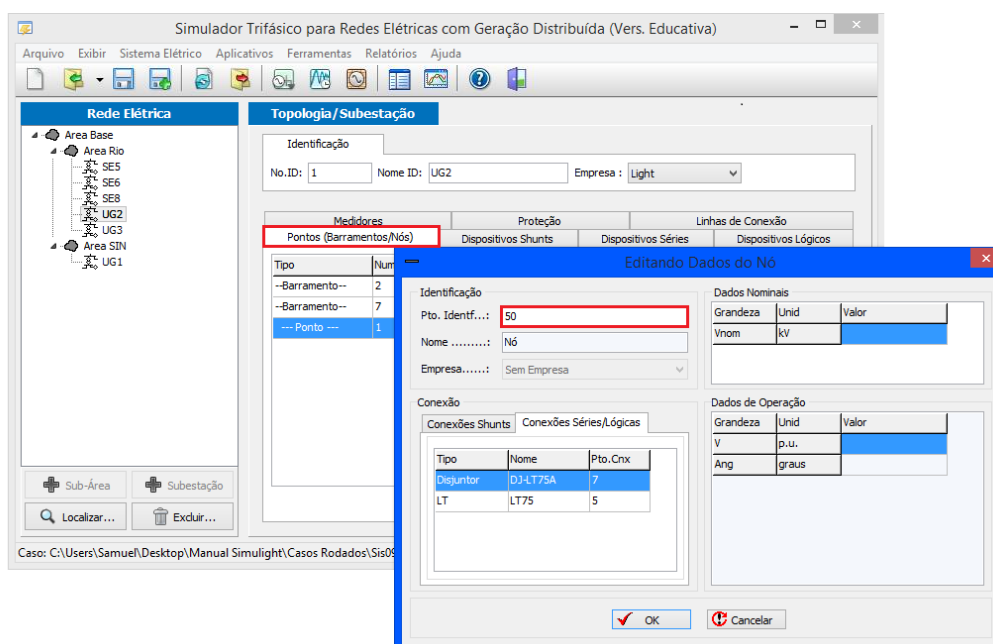


Figura 7.22 Sistema Elétrico/Editando Nó

Deve-se possuir um disjuntor em cada extremidade das linhas de conexão, para a abertura destas quando em falta, portanto o procedimento de inserção do disjuntor deve ser repetido na outra extremidade. Ao final a linha protegida estará conectada entre os nós criados pelo Simulight, conforme exemplificado na Figura 7.23.

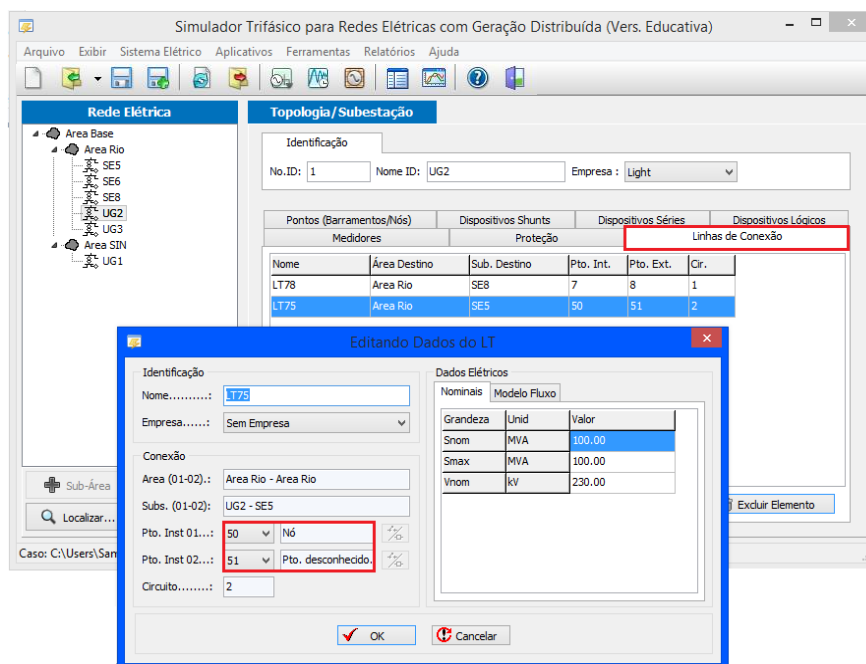


Figura 7.23 Sistema Elétrico/Editando Linha de Conexão

Estendendo a aplicação de medidores e dispositivos lógicos a todo o sistema, o caso base estará representado pelo diagrama da Figura 7.24.

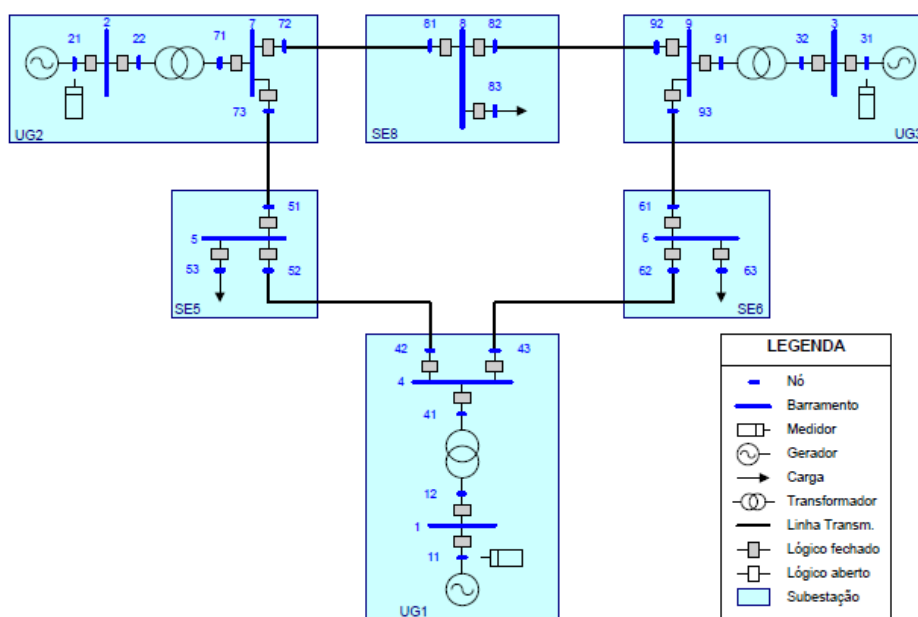


Figura 7.24 Sistema Elétrico/Medidores/Disjuntores.

Deve-se em seguida adicionar o controle de eventos.

7.2.3 Inserção dos Eventos

Os eventos que serão aplicados ao sistema para a análise da estabilidade transitória estão descritos na Tabela 7.4.

Tabela 7.4. Eventos adicionados

Eventos	Ocorrência
Aplicação de Curto Trifásico Franco	0.5 s
Abertura de Linha sob Falta	0.583 s

Para se inserir um evento basta clicar no menu Sistema Elétrico -> Controle de Eventos. Na janela aberta clicar em Adicionar Evento. Os eventos descritos na Tabela 7.4 serão inseridos a partir deste ponto.

Aplicando Curto

Para a aplicação de um curto trifásico franco basta escolher a opção “Aplicar Curto Circuito”, na janela aberta deverá ser atribuído o local (linha de conexão 7-5) e instante da aplicação do curto (0.5s). A caixa “curto ideal” deve ser mantida selecionada, para a aplicação de um curto circuito sem resistência. Os passos mencionados estão descritos na Figura 7.25.

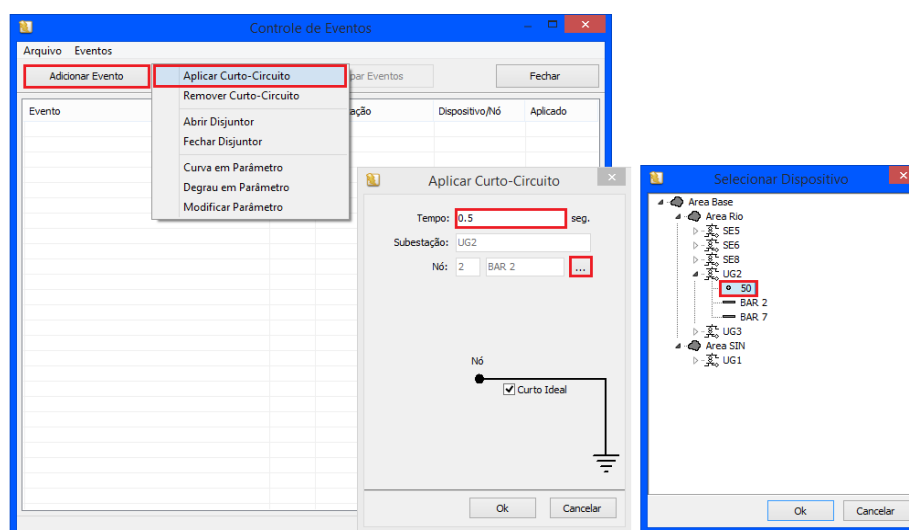


Figura 7.25 Controle de Eventos/Adicionar Curto

Abrindo Disjuntor

Para a abertura de um disjuntor basta selecionar a opção “Abrir Disjuntor”. Na janela aberta novamente deve-se selecionar qual dispositivo será operado e qual instante. A Figura 7.25 demonstra a operação para abertura do disjuntor presente na conexão entre a Linha 7-5 e o barramento 7, este procedimento deve ser repetido para a abertura do disjuntor presente na outra extremidade, entre a Linha 7-5 e o barramento 5.

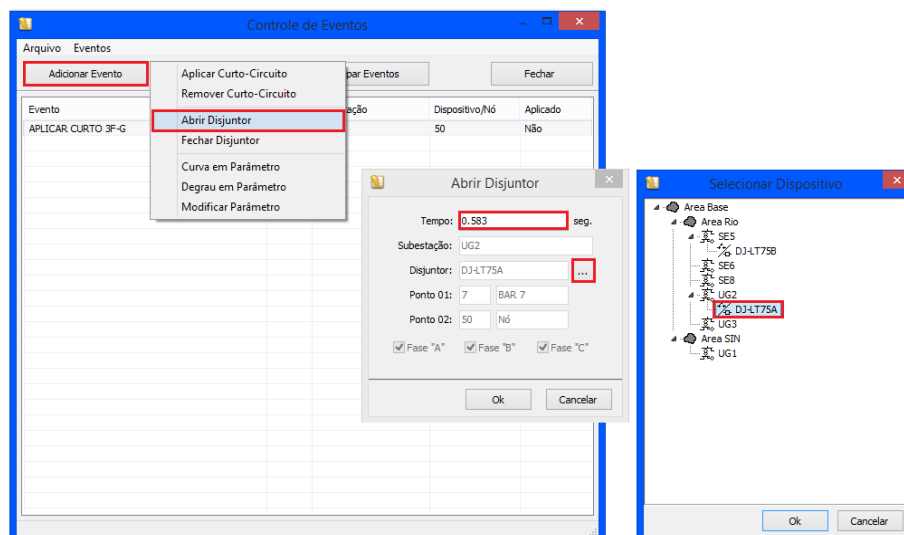


Figura 7.26 Controle de Eventos/Abrir Disjuntor

Salvando o arquivo com histórico de eventos

Os eventos adicionados podem ser salvos para a utilização posterior no mesmo caso base ou em outro. A utilização de um histórico de eventos em outro caso requer atenção, principalmente em alguns pontos, como os instantes e pontos de aplicação no sistema. Para salvar um histórico basta clicar na aba “Arquivo” e em seguida em “Exportar eventos...”, como ilustrado na Figura 7.27, ou utilizar o comando Ctrl+S no teclado. O procedimento para carregar um histórico é semelhante, deve-se novamente clicar na aba “Arquivo” e em seguida em “Importar eventos...”, o atalho Ctrl+O também pode ser utilizado.

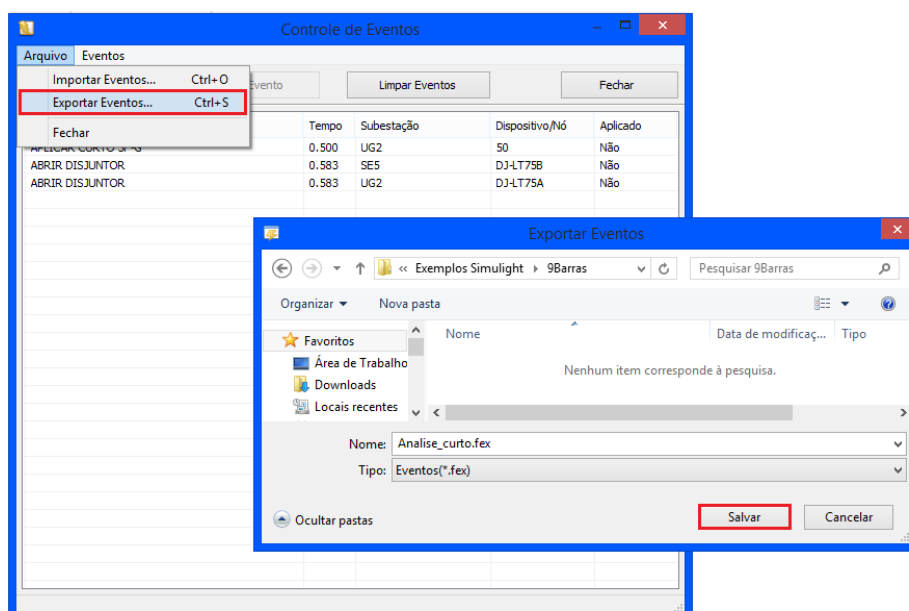


Figura 7.27 Controle de Eventos/Salvar Eventos

7.2.4 Análise da Resposta Dinâmica

Com os medidores, dispositivos lógicos e eventos inseridos, basta à inserção dos parâmetros dinâmicos dos geradores para a execução da simulação da resposta transitória do sistema.

Caso 1 – Máquina Modelo MD02

Para a edição dos parâmetros dinâmicos dos geradores para o Caso 1, deve-se clicar na aba “Dispositivos Shunts”, dar um duplo clique sobre o dispositivo de interesse, na janela aberta clicar na aba “Modelo Simulação”, na caixa “Tipo.....:”, o modelo “DINÂMICO Síncrono” deve ser selecionado. Em seguida na caixa “Máq. Síncrona....:” deve-se selecionar a opção “Modelo MD02”.

Ao clicar-se na seta verde presente ao lado de cada caixa de seleção de atuador dinâmico, podem-se editar os parâmetros do mesmo. Clicando-se na caixa ao lado da opção “Modelo MD02” uma nova janela será aberta para edição dos parâmetros dinâmicos de uma máquina com modelagem do Tipo MD02. A Figura 7.28 ilustra os passos acima citados. Os valores para o preenchimento dos modelos dos geradores do sistema 9 Barras estão presente na Tabela 7.5.

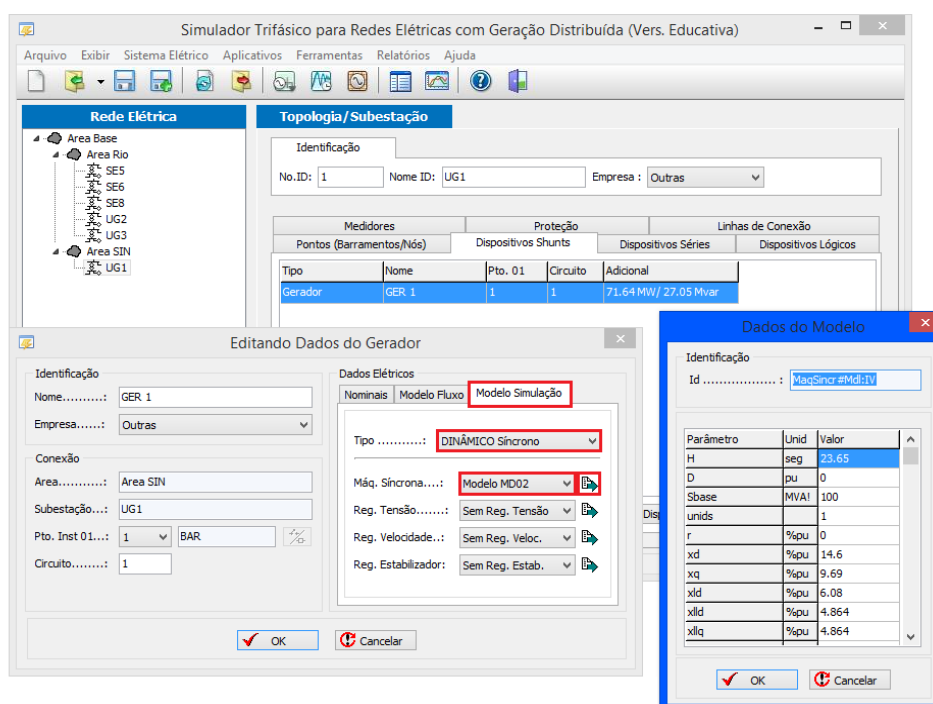


Figura 7.28 Sistema Elétrico/Dispositivos Shunts/Modelo Simulação

Tabela 7.5. Dados Modelo MD02 (Modelagem Máquina)

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
H [s]	23.65	6.40	3.01
D [pu]	0.00	0.00	0.00
Sbase [MVA!]	100.0	100.00	100.00
Unids	1.00	1.00	1.00
r [%pu]	0.00	0.00	0.00
xd [%pu]	14.60	89.58	131.30
xq [%pu]	9.69	86.45	125.80
xld [%pu]	6.08	11.98	18.13
xlld [%pu]	4.864	9.584	14.50
xllq [%pu]	4.864	9.584	14.50
Tldo [s]	8.96	6.00	5.89
Tlldo [s]	0.03	0.03	0.033
Tllqo [s]	0.06	0.078	0.07

Para se realizar a simulação basta acessar o menu “Aplicativos” e selecionar a opção “Simulação Completa” ou através da barra de ferramentas clicando-se sobre o respectivo botão. Também é possível a utilização do comando de atalho Ctrl+D.

Para executar a simulação completa deve-se clicar na caixa “Executar” da nova janela aberta, conforme exemplificado na Figura 7.29.

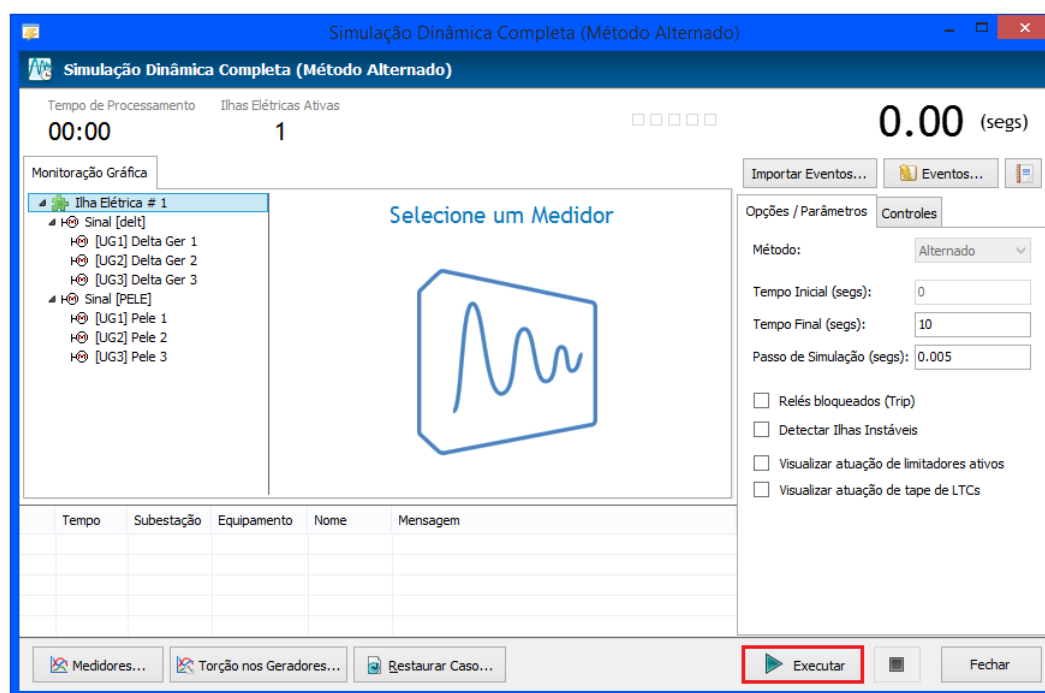
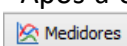


Figura 7.29 Aplicativos/Simulação Completa

Após a execução da simulação, para a visualização do resultado, basta clicar sobre o ícone  para a leitura dos dados dos medidores.

Na janela aberta, para a plotagem das variáveis, basta selecionar a variável de interesse, mantê-la selecionada e arrastá-la até a área de plotagem. Após a seleção dos três ângulos em interesse, deve-se selecionar uma das medidas como referência angular, para uma análise da estabilidade angular. Para isto basta clicar com o botão direito do mouse sobre a área de plotagem selecionar a opção “Selecionar Referência” e marcar o ângulo do gerador 1 como referência para os demais ângulos, conforme ilustrado na Figura 7.30.

A Figura 7.31 ilustra o comportamento dos ângulos de carga dos geradores do sistema 9 Barras, é observado que o sistema perde a estabilidade angular sob os eventos simulados.

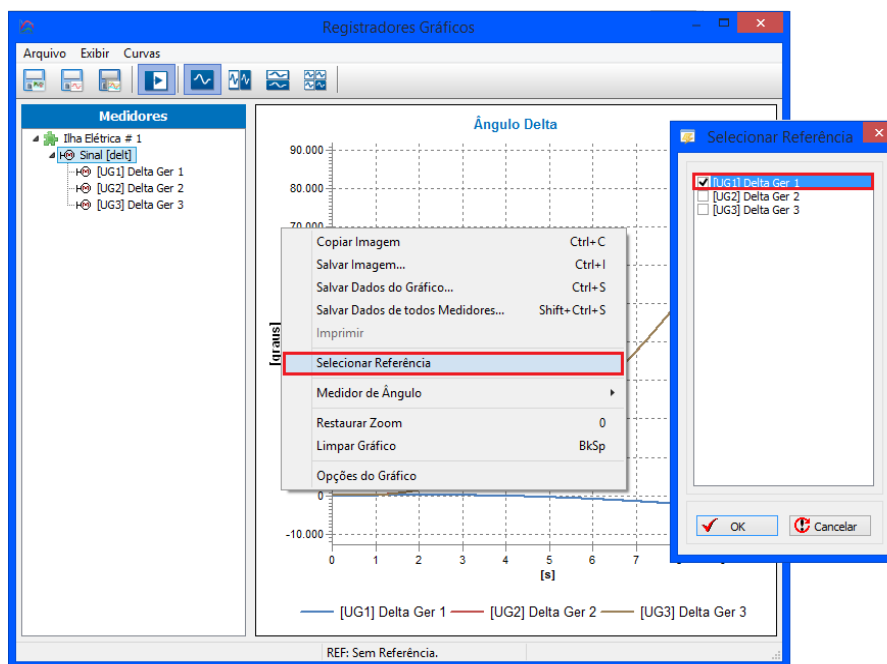


Figura 7.30 Aplicativos/Simulação Completa/Medidores/Selecionar Referência

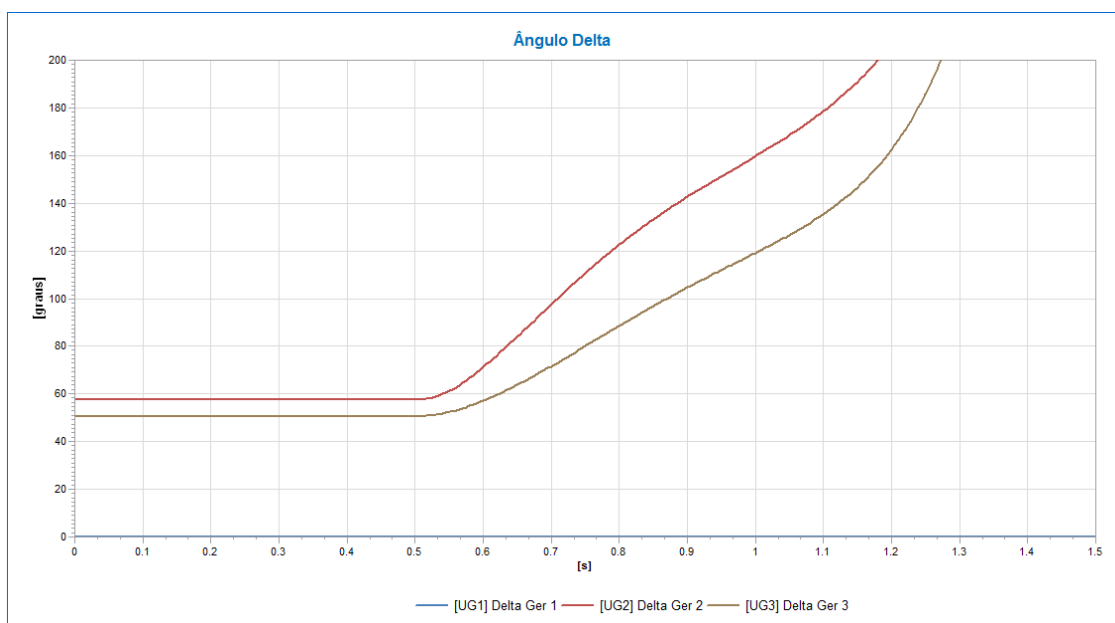


Figura 7.31 Evolução Angular/Caso 1

Caso 2 – Máquina Modelo MD02 e Regulador de Tensão de 1 Ordem

Para a execução do Caso 2, deve-se adicionar o Regulador de Tensão 1oORD no modelo de simulação dinâmica dos geradores do sistema, conforme descrito na Figura 7.32. Os parâmetros dos reguladores de tensão dos três geradores são iguais, e estão presentes na Tabela 7.6.

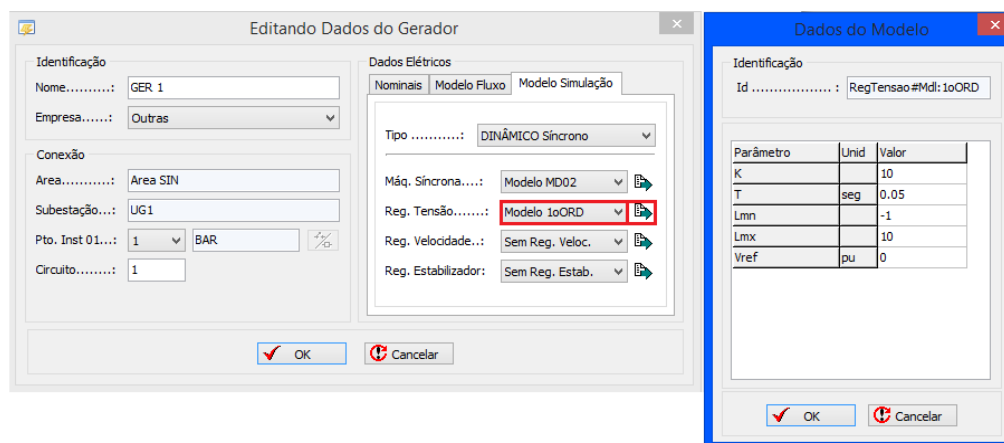


Figura 7.32 Sistema Elétrico/Dispositivos Shunts/Modelo Simulação

Tabela 7.6. Dados Modelo Regulador de Tensão 1oORD

Modelagem Regulador de Tensão 1oORD				
Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	
K	10.00	10.00	10.00	
T [s]	0.05	0.05	0.05	
Lmn	-1.00	-1.00	-1.00	
Lmx	10.00	10.00	10.00	
Vref [pu]	0.00	0.00	0.00	

O diagrama de blocos referente ao regulador de tensão de 1º Ordem está ilustrado na Figura 7.33.

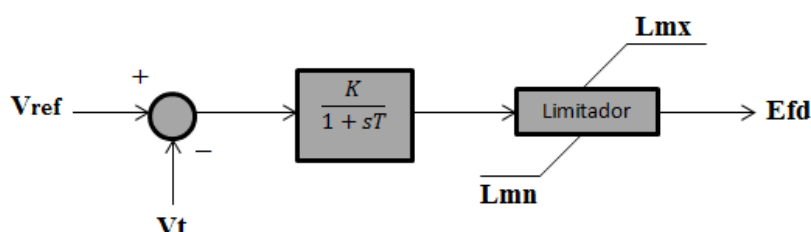


Figura 7.33 Diagrama de Blocos para o Regulador de Tensão de 1º Ordem

Os passos para execução da simulação e plotagem dos ângulos de carga são os mesmos efetuados para o Caso 1. Tornando-se novamente o ângulo de carga do gerador 1 como referencia angular, obtêm-se a resposta transitória presente na Figura 7.34. Pode-se observar que o sistema com regulação de tensão, não apresenta perda de estabilidade

angular conforme no Caso 1, porém o sistema apresenta baixo amortecimento nas oscilações causadas pelos eventos simulados, para se contornar tal problema faz-se uso de um estabilizador de sistema de potência (PSS), conforme será apresentado a seguir.

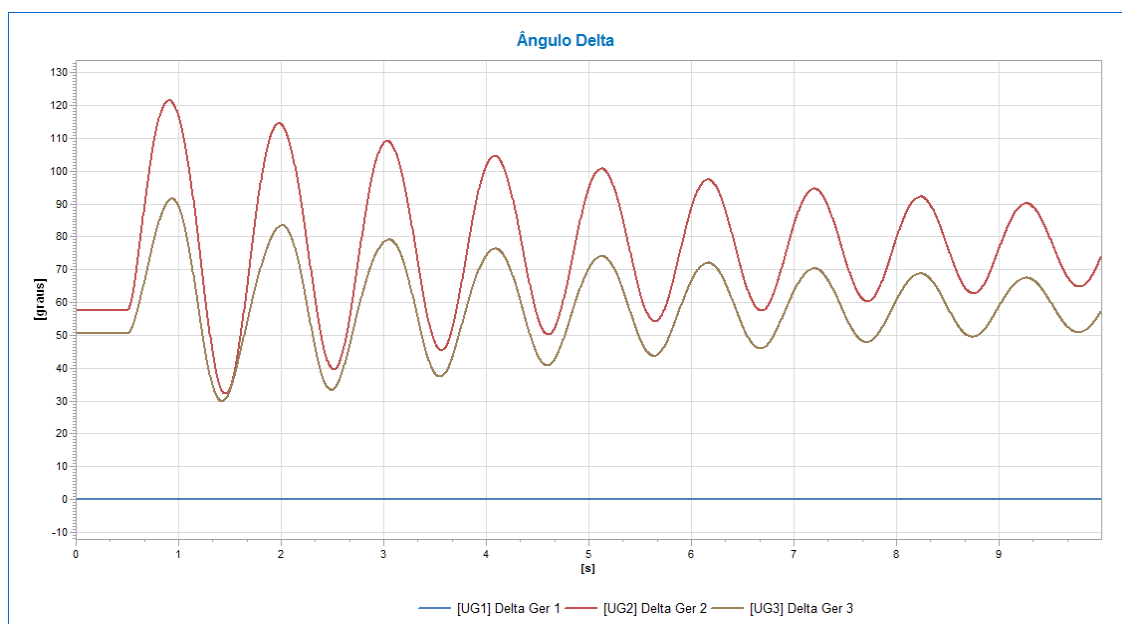


Figura 7.34 Evolução Angular/Caso 2

Caso 3 – Máquina Modelo MD02, Regulador de Tensão de 1 Ordem e Estabilizador de Sistema de Potência

A inserção de um estabilizador de sistema de potência Modelo PSS_w no modelo dinâmico dos geradores está ilustrada na Figura 7.35. Os parâmetros dos três estabilizadores são diferentes e estão presentes na Tabela 7.7.

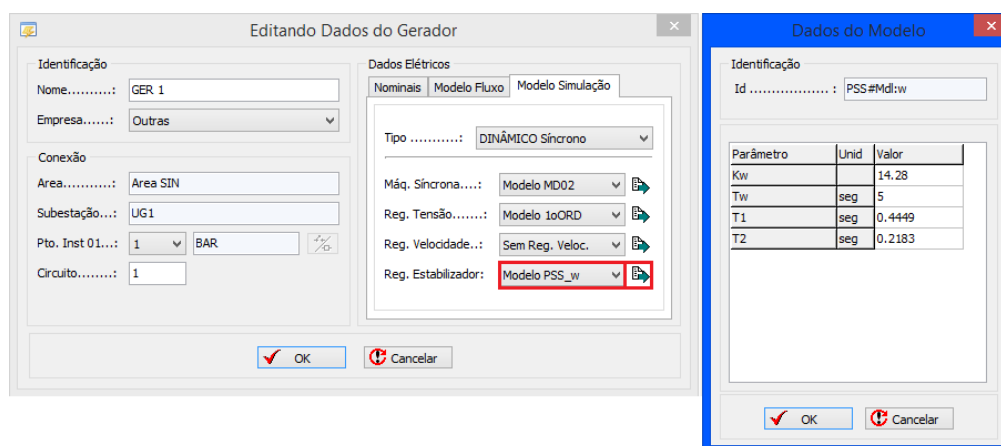


Figura 7.35 Sistema Elétrico/Dispositivos Shunts/Modelo Simulação

Tabela 7.7. Dados Modelo Estabilizador PSS_w

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
Kw	14.28	71.79	93.05
Tw [s]	5.00	5.00	5.00
T1 [s]	0.4449	0.2440	0.1881
T2 [s]	0.2183	0.0355	0.0459

O diagrama de blocos referente à ação do estabilizador de sistemas de potência (PSS) está ilustrado na Figura 7.36.

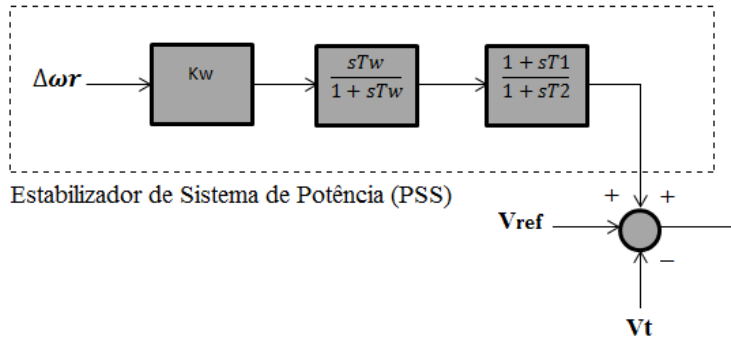


Figura 7.36 Diagrama de Blocos para o Estabilizador de Sistema de Potência (PSS)

A evolução dos ângulos dos geradores para o Caso 3 está ilustrada na Figura 7.37. Como esperado, é observado que o sistema se mantém estável em relação ao Caso 1 e apresenta maior amortecimento em relação ao Caso 2, estabilizando-se mais rapidamente.

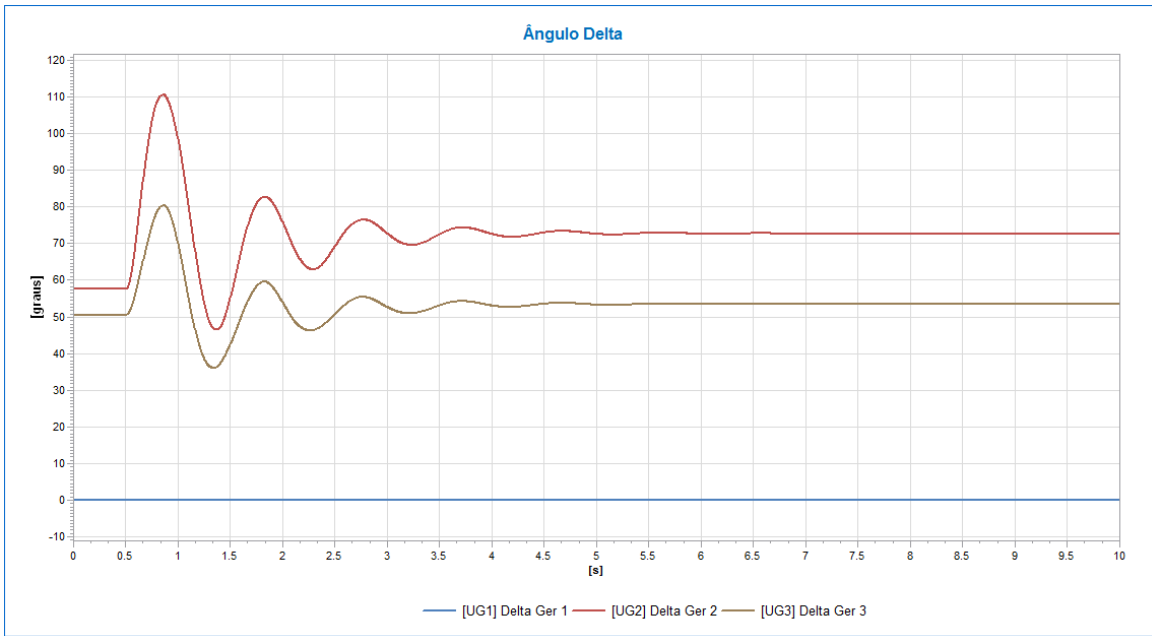


Figura 7.37 Evolução Angular/Caso 3.

8 Sistemas Trifásicos

8.1 Modelagem Trifásica

O Simulight compreende uma estrutura de classes cooperantes (“framework”), com orientação plena à Modelagem Orientada a Objetos (MOO) e desenvolvida em linguagem de programação C++. Inclui um aplicativo para análise de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) em regime permanente (fluxo de potência) e outro para análise dinâmica (estabilidade transitória) na frequência fundamental.

8.1.1 Considerações sobre a Modelagem Trifásica

Numa modelagem trifásica do SEE empregando MOO, duas abordagens podem ser adotadas para o grafo da rede elétrica: Uso de grafo trifásico e Uso de grafo monofásico equivalente. O Simulight utiliza a segunda abordagem, que é orientada para modelagem por dispositivos funcionais, onde os elementos de circuito já estão agrupados e representados diretamente em forma matricial, facilitando o trabalho de modelagem. [16]

O uso de um grafo monofásico equivalente permite um tratamento mais uniforme da topologia da rede pelos aplicativos, seja a modelagem elétrica trifásica ou monofásica equivalente, além de facilitar a implementação de formulações bloqueadas. Mais importante, as classes que representam os dispositivos do SEE também permanecem inalteradas, estando a diferença entre modelagem trifásica e monofásica equivalente exatamente no seu *estado* e no *modelo* que lhe é associado.

Tal abordagem permite ainda que a escolha entre modelagem trifásica ou monofásica equivalente (modelagem de sequência positiva) seja feita em tempo de execução, utilizando um mesmo conjunto de aplicativos para análise dinâmica. Estes aplicativos podem operar indistintamente sobre modelos trifásicos ou de sequência positiva, utilizando construções de programação com laços envolvendo todas as fases, três na modelagem trifásica e somente uma na modelagem de sequência positiva.

8.1.2 Descrição Funcional do SEE

A funcionalidade de um dispositivo do SEE, ao contrário de sua conectividade (contribuição para a topologia da rede elétrica), é essencialmente dependente do aplicativo que se pretende utilizar para a análise de seu comportamento.

Na estrutura do Simulight, esta funcionalidade é representada por meio de duas classes específicas, agregadas à classe DISPOSITIVO: a classe ESTADO e a classe MODELO, conforme ilustra a Figura 8.1. O estado permanece sempre acoplado ao dispositivo e determina sua condição mais atual de operação. Por outro lado, o modelo atualiza o valor do estado a cada instante de tempo (ou passo de processo iterativo), e pode ser substituído em tempo de execução conforme as necessidades do aplicativo em uso.

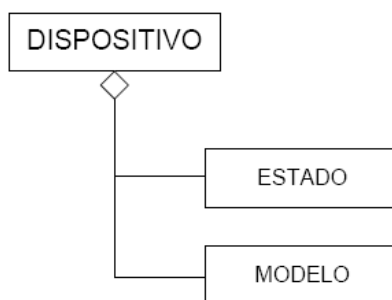


Figura 8.1 Composição da classe DISPOSITIVO

8.1.3 Equações Funcionais

A característica principal a ser modelada computacionalmente no Simulight é o comportamento dinâmico do SEE, representado matematicamente por um sistema de equações algébrico-diferencial. A principal funcionalidade das classes ESTADO e MODELO neste caso é o cálculo das contribuições do dispositivo para este sistema de equações, a ser utilizada pelo aplicativo de análise transitória.

Para facilitar o entendimento destas classes e introduzir a notação utilizada, as equações (8.1), (8.2) e (8.3) apresentam o sistema de equações algébrico-diferencial, em sua formulação original, algebrizada e linearizada para solução iterativa pelo método de Newton-Raphson, respectivamente. A equação (8.4) define a matriz jacobiana do sistema, apresentada em estrutura particionada. Nestas equações, as variáveis possuem os significados descritos na Tabela 8.1.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{cases} \quad (8.1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{cases} \quad (8.2)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{V} \\ \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{V} \\ \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

Estado

O estado do dispositivo deve reter sua condição operativa mais atual, como visto a partir de suas barras terminais. Para análise na frequência fundamental, o estado armazena variáveis algébricas (estado algébrico), representado por admitâncias complexas, e fasores de injeção de corrente (ou potência), aqui denominadas injeções internas do dispositivo.

Este conjunto de admitâncias e injeções internas são utilizados no cálculo das injeções nodais do dispositivo. Os somatórios das injeções nodais dos dispositivos conectados em todas as barra do sistema formam implicitamente o conjunto $\mathbf{g}$ de equações algébricas da rede elétrica.

Tabela 8.1. Equações e variáveis da descrição funcional

Símbolo	Significado
V	Representa o vetor de tensões nodais associadas às barras do SEE, e cujos componentes são variáveis algébricas.
x	Representa um vetor de variáveis diferenciais (que podem possuir componente não nulo de derivada em $\dot{x}$) ou algébricas (cujo respectivo componente em $\dot{x}$ é nulo) definidas internamente aos modelos de dispositivos.
g	Representa o conjunto de equações algébricas não-lineares definido pela rede elétrica, e formado pelo somatório das contribuições individuais de corrente ou potência de cada dispositivo.
f	Representa um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem, ou equações algébricas, definidas internamente aos modelos.
F	Representa o conjunto de equações diferenciais em f já algebrizadas por algum método adequado para solução numérica.
J₁	Representa a submatriz jacobiana dos dispositivos dinâmicos ou que possuem estados internos em seus modelos.
J₄	Representa a submatriz jacobiana da rede elétrica.
J₂ e J₃	Representam as submatrizes jacobiana da interface entre os dispositivos com estados internos e a rede elétrica.

As grandezas de estado são definidas em *componentes de fase*, formulação adotada como base do desenvolvimento desse projeto. A classe BARRA possui um estado especial, armazenando os fasores das tensões nas barras. Estas tensões, resolvidas no sistema de equações (8.1) são definidas como tensões para o nó elétrico de referência ou tensões *fase-terra*.

A classe ESTADO poderia ser especializada para cada tipo de dispositivo, mas seguindo o princípio de generalidade, são desenvolvidas as classes genéricas ilustradas na Figura 8.2 e Figura 8.3.

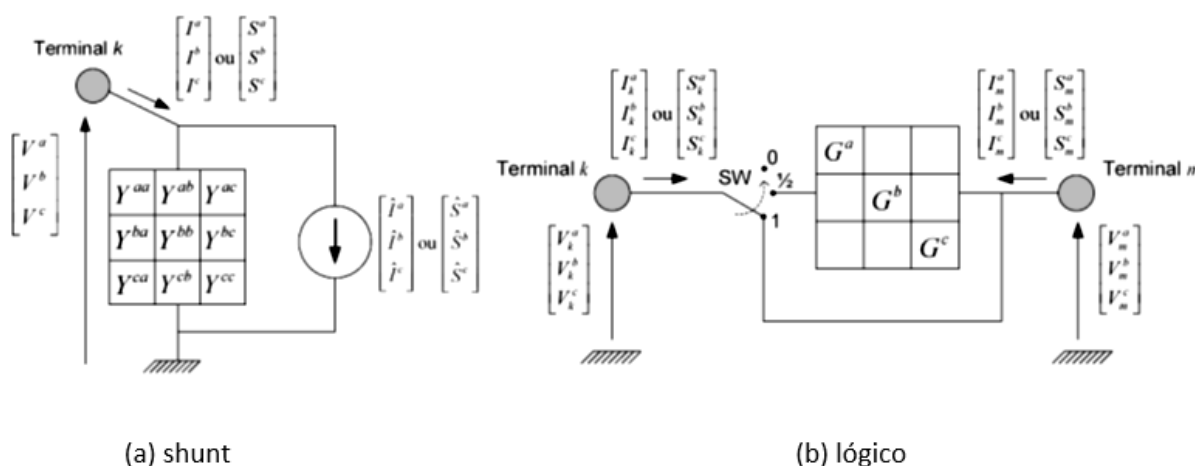


Figura 8.2 Estado do dispositivo trifásico SHUNT e LÓGICO

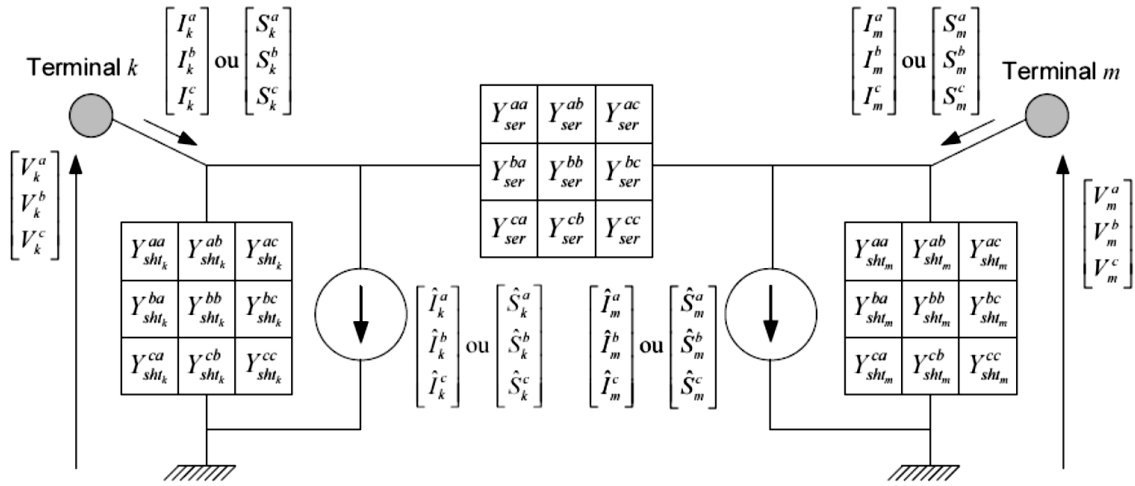


Figura 8.3 Estado do dispositivo trifásico SÉRIE

Estado Shunt

A Figura 8.2 (a) ilustra a estrutura do estado shunt trifásico, conectado ao estado de sua barra terminal k. Neste dispositivo, com apenas um terminal e uma matriz admitância Y^{abc} , os sufixos para índice de barra terminal e identificador de admitância não serão utilizados. Convenção de carga foi empregada para indicar o sentido das injeções internas

$\hat{I}^{abc}$ ou $\hat{S}^{abc}$, e nodais I^{abc} ou S^{abc} .

As equações (8.5) e (8.6), na forma complexa, são utilizadas pelo estado shunt no cálculo das injeções nodais de corrente ou potência, respectivamente:

$$I^s = \hat{I}^s + \sum_{t \in \alpha_p} Y^{st} V^t \quad (8.5)$$

$$S^s = \hat{S}^s + V^s \left(\sum_{t \in \alpha_p} Y^{st} V^t \right)^* \quad (8.6)$$

onde $s, t \in \alpha_p = \{a, b, c\}$.

Estado Série

A Figura 8.3 ilustra a estrutura do estado série trifásico, conectado aos estados de suas barras terminais k e m. Ele emprega as matrizes admitância $Y_{sht_k}^{abc}$, $Y_{sht_m}^{abc}$ e Y_{ser}^{abc} , e dois vetores de injeção interna, $\hat{I}^{abc}$ ou $\hat{S}^{abc}$, um para cada terminal.

Para permitir a representação de alguns tipos de dispositivos, tais como transformadores com defasagens angulares, o estado série admite ainda uma marcação de polaridade para acesso à matriz admitância série. Quando o dispositivo tem marcação de polaridade, o acesso ao seu estado pelo terminal k (definido como terminal de polaridade direta) toma a matriz Y_{ser}^{abc} para o cálculo de injeções. Quando o acesso é feito pelo terminal m (definido como terminal polaridade transposta), é tomada a matriz série transposta,

$$\left[Y_{ser}^{abc} \right]^T$$

As equações (8.7) e (8.8) são utilizadas pelo estado série no cálculo das injeções nodais de corrente ou potência no terminal k , respectivamente:

$$I_k^s = \hat{I}_k^s + \sum_{t \in \alpha_p} [(Y_{sht_k}^{st} + Y_{ser}^{st})V_k^t - Y_{ser}^{st}V_m^t] \quad (8.7)$$

$$S_k^s = \hat{S}_k^s + V_k^s \left(\sum_{t \in \alpha_p} [(Y_{sht_k}^{st} + Y_{ser}^{st})V_k^t - Y_{ser}^{st}V_m^t] \right)^* \quad (8.8)$$

Onde $s, t \in \alpha_p = \{a, b, c\}$. Para o terminal m , as expressões são obtidas simplesmente trocando-se os índices de barra k e m , observando-se a marcação de polaridade para o acesso ao elemento Y_{ser}^{set} .

Estado Lógico

Uma versão especializada do estado série foi considerada para a família de dispositivos lógicos, necessária para a representação de chaves não ideais. Ele está ilustrado na Figura 8.2(b). O conjunto de admitâncias é reduzido a somente três condutâncias série desacopladas, uma por fase, acrescido de uma chave ideal SW de três posições. Nas posições 0 e 1, correspondendo aos estados ideais aberto e fechado, o dispositivo lógico deverá ser removido da rede elétrica pelo configurador, sendo os nós terminais k e m mantidos como barras distintas ou colapsados numa barra comum. Na posição intermediária identificada como “1/2” na Figura 8.2(b), o dispositivo lógico permanece inserido na rede elétrica, sendo tratado como um dispositivo série comum, porém com cálculo de injeções considerando somente as condutâncias série, isto é, otimizado em relação ao estado série da Figura 8.3.

As equações (8.9) e (8.10) são utilizadas pelo estado lógico no cálculo das injeções nodais de corrente ou potência no terminal k , respectivamente:

$$I_k^s = G^s(V_k^s - V_m^s) \quad (8.9)$$

$$S_k^s = V_k^s [G^s(V_k^s - V_m^s)]^* \quad (8.10)$$

onde $s \in \alpha_p = \{a, b, c\}$.

8.1.4 Simulação Dinâmica Trifásicas

A formulação matemática do problema trifásico em nada difere da formulação convencional de sequência positiva. A seguir os modelos Trifásicos para o SEE.

Todos os modelos trifásicos desenvolvidos nesta seção foram implementados numa biblioteca de modelos, utilizando tão somente os blocos construtivos existentes na biblioteca do Simulight.

8.1.4.1 Linha de Transmissão C.A.

O modelo de linha de transmissão em corrente alternada, para análise dinâmica ou de regime permanente na frequência fundamental, é o convencional modelo π -equivalente, apresentado na Figura 8.4. O modelo em componentes de fase é geral, permitindo

representar linhas balanceadas ou desbalanceadas. Os parâmetros são calculados a partir das características geométricas da linha e inseridos no modelo na forma de admitâncias.

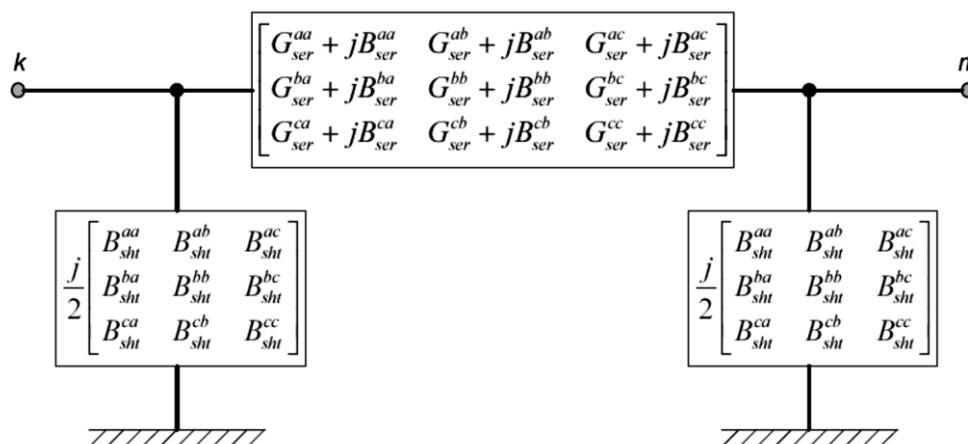


Figura 8.4 Modelo de linha de transmissão

8.1.4.2 Transformador de Tape Fixo

Modelos trifásicos para transformadores, especialmente para aqueles com as usuais ligações em delta ou estrela, são razoavelmente bem documentados na literatura ([7] [17] [18] [19] [20] [21]). Em geral, o modelo trifásico para um transformador de dois enrolamentos é expresso na forma de dois grupos de bobinas magneticamente acopladas, como ilustrado na Figura 8.5.

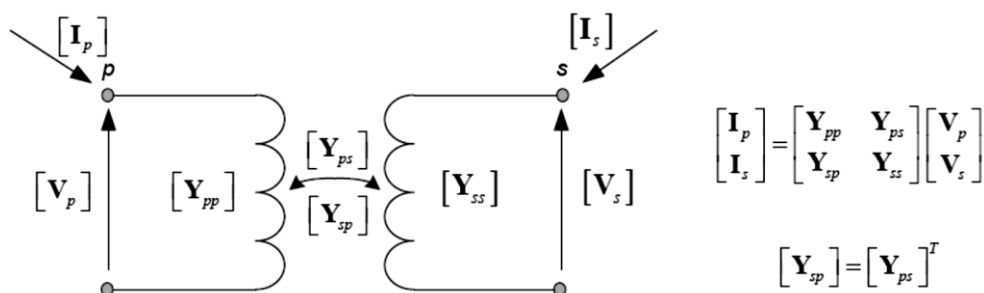


Figura 8.5 Representação de Transformador

As submatrizes Y_{pp} , Y_{ss} , Y_{ps} e Y_{sp} definem uma matriz admitância de barras própria do transformador, e estão definidas na Tabela 8.2 de acordo com o seu tipo de conexão. As submatrizes Y_I , Y_{II} e Y_{III} são definidas por:

$$\mathbf{Y}_I = \begin{bmatrix} y_t & & \\ & y_t & \\ & & y_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{II} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{III} = \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \\ & -y_t & y_t \\ y_t & & -y_t \end{bmatrix}$$

Onde y_t é a admitância de dispersão primário-secundário do transformador em pu.

Tabela 8.2. Submatrizes para transformadores trifásicos

Conexão do Transformador		Admitância própria		Admitância mútua
Barra p	Barra s	Y_{pp}	Y_{ss}	Y_{ps}, Y_{sp}
$Y_{aterrado}$	$Y_{aterrado}$	Y_I	Y_I	$-Y_I$
$Y_{aterrado}$	Y	$\frac{1}{3}Y_{II}$	$\frac{1}{3}Y_{II}$	$-\frac{1}{3}Y_{II}$
$Y_{aterrado}$	Δ	Y_I	Y_{II}	Y_{III}
Y	Y	$\frac{1}{3}Y_{II}$	$\frac{1}{3}Y_{II}$	$-\frac{1}{3}Y_{II}$
Y	Δ	$\frac{1}{3}Y_{II}$	Y_{II}	Y_{III}
Δ	Δ	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$

Se o transformador tem taps, com relação $\alpha:\beta$ entre primário e secundário, onde α e β são os valores de tape primário e secundário em pu, então as submatrizes devem ser modificadas da seguinte forma:

- Divida a matriz admitância própria do lado primário por α^2
- Divida a matriz admitância própria do lado secundário por β^2
- Divida as matrizes admitância mútuas por $\alpha\beta$.

No sistema pu, um enrolamento conectado em delta tem um tape inerente de $\sqrt{3}$.

Na implementação computacional, o transformador trifásico é modelado como um dispositivo série, devendo sua matriz admitância de barras ser traduzida para uma representação π -equivalente, tal como mostrado na Figura 8.6. Uma vez que a matriz admitância mútua é assimétrica para conexões que introduzem defasagens angulares entre primário e secundário (Y - Δ ou Δ - Y), o elemento série deve empregar marcação de polaridade: no acesso pelo terminal primário é tomada a matriz $-Y_{ps}$, enquanto que no acesso pelo terminal secundário é tomada a matriz $-Y_{ps}^T (= -Y_{sp})$.

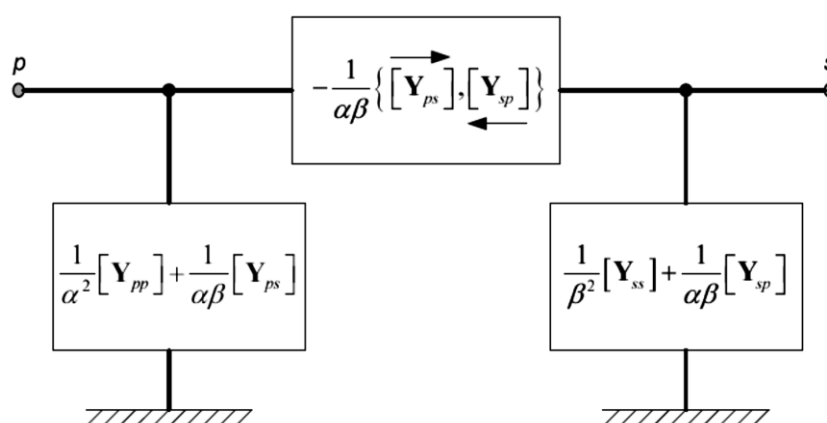


Figura 8.6 Representação π -equivalente do Transformador de dois enrolamentos.

Transformador com Variação Automática de Tape (LTC): são modelados com emprego da mesma estrutura π -equivalente da Figura 8.6, acrescentando-se um controlador de tape.

8.1.4.3 Cargas

Em sistemas trifásicos, as cargas são usualmente especificadas como potências individuais consumidas por fase. No caso de cargas monofásicas conectadas entre fases ou cargas trifásicas conectadas em delta, os valores especificados se referem ao consumo em cada ramo da conexão. Assim como no caso monofásico, estes valores podem ser considerados constantes ou expressos como funções das tensões terminais. O modelo ZIP mais geral permite compor a carga em parcelas segundo sua dependência da tensão. Dois tipos básicos de conexão devem ser considerados: cargas ligadas em estrela aterrada e cargas ligadas em delta.

8.1.4.4 Chaves

Dispositivos trifásicos de seccionamento (disjuntores, seccionadoras, etc.) podem ser associados com os seguintes estados lógicos (Figura 8.7):

- Estado ideal aberto em todas as fases (impedância infinita entre os terminais);
- Estado ideal fechado em todas as fases (impedância nula entre os terminais);
- Estado não ideal aberto na fase a;
- Estado não ideal aberto na fase b;
- Estado não ideal aberto na fase c;
- Estado não ideal aberto nas fases a e b;
- Estado não ideal aberto nas fases a e c;
- Estado não ideal aberto nas fases b e c;
- Estado não ideal aberto em todas as fases;
- Estado não ideal fechado em todas as fases;

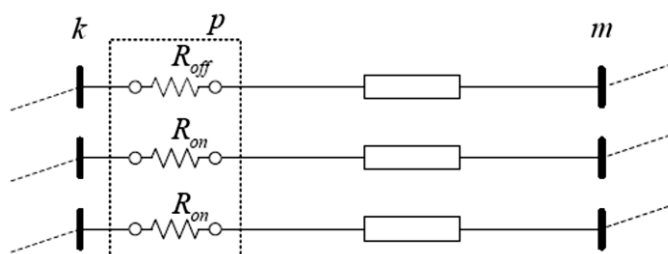


Figura 8.7 Representação de chave trifásica em estado não ideal

8.1.4.5 Representação de Defeitos

A representação de defeitos é bastante simplificada quando a rede é modelada em componentes de fase, diferentemente do que ocorre em componentes simétricos.

Defeitos Shunt

O modelo geral para representação de curtos-circuitos é mostrado na Figura 8.8

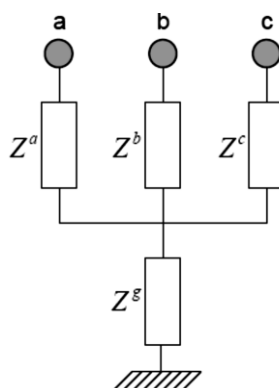


Figura 8.8 Modelo geral de defeito shunt

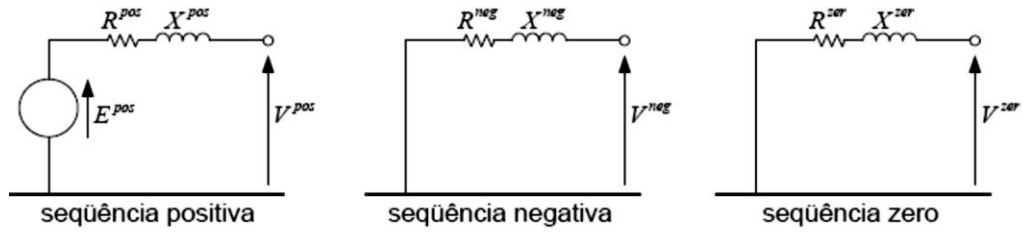
Defeitos Série

Defeitos série também podem ser facilmente representados com auxílio do modelo geral de chave. Uma chave fictícia deve ser inserida em cada ponto de defeito, e manobrada de acordo com tipo de defeito a ser representado.

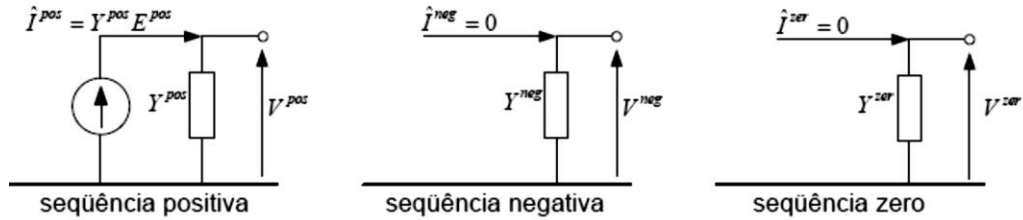
Máquina Síncrona

A máquina síncrona é um dispositivo construtivamente balanceado, podendo ser representada por uma fonte de tensão trifásica balanceada atrás das suas impedâncias de sequência. Um modelo Thévenin equivalente para a máquina em componentes simétricos é mostrado na Figura 8.9(a). As impedâncias de sequência da máquina síncrona contêm as informações requeridas para a análise desbalanceada e são parâmetros do modelo.

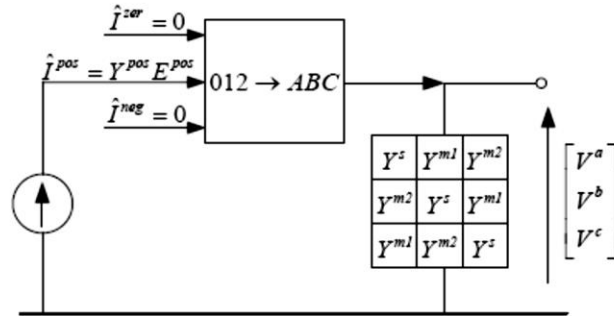
A utilização direta do modelo Thévenin requer a criação de novas barras internas aos geradores, sendo frequentemente utilizado na literatura, convertido para componentes de fase [[7] , [22] , [23]]. Para evitar a criação destas barras, um modelo Norton equivalente pode ser construído, em componentes simétricos ou em componentes de fase, conforme Figura 8.9(b) e Figura 8.9(c). Estes modelos permitem a representação da máquina síncrona como um dispositivo shunt genérico (Figura 8.2a).



(a) Equivalente Thévenin em componentes simétricos



(b) Equivalente Norton em componentes simétricos



(c) Equivalente Norton em componentes de fase

Figura 8.9 Representação geral de fontes de tensão balanceadas

Na Figura 8.9(c), as injeções internas equivalentes foram mantidas em componentes simétricos, para enfatizar que somente uma tensão interna balanceada é efetivamente gerada e “distribuída” pelas três fases. Os modelos de regime permanente e dinâmico construídos pelo Simulight serão baseados nesta representação.

As impedâncias e admitâncias da máquina em componentes simétricos e de fase estão relacionadas pelas equações:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Z}^{012} &= \begin{bmatrix} R^{zer} + jX^{zer} & & \\ & R^{pos} + jX^{pos} & \\ & & R^{neg} + jX^{neg} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{Y}^{012} = [\mathbf{Z}^{012}]^{-1} &= \begin{bmatrix} G^{zer} + jB^{zer} & & \\ & G^{pos} + jB^{pos} & \\ & & G^{neg} + jB^{neg} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{Y}^{abc} = [\mathbf{T}^S][\mathbf{Y}^{012}][\mathbf{T}^S]^{-1} &= \begin{bmatrix} Y^s & Y^{m1} & Y^{m2} \\ Y^{m2} & Y^s & Y^{m1} \\ Y^{m1} & Y^{m2} & Y^s \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

onde $\mathbf{T}^S$ é a matriz de transformação para componentes simétricos.

A impedância de sequência positiva depende da escala de tempo de interesse, enquanto que as de sequência negativa e zero são invariantes na frequência fundamental. Uma breve descrição destes parâmetros da máquina síncrona é dada a seguir. Uma discussão detalhada pode ser encontrada na referência [2]

R^{pos} : resistência de sequência positiva é efetivamente a resistência C.A. de armadura da máquina, com valores típicos na faixa de 0.2 a 1.5%.

X^{pos} : reatância de sequência positiva depende da escala de tempo considerada. Se os efeitos da saliência forem desprezíveis, $X^{pos} = X_d''$ para condição subtransitória, X_d' para a condição transitória e X_d para condição de regime permanente. Caso contrário, o procedimento usual para representação da máquina em estudos de estabilidade é tomar o valor médio dos parâmetros de eixo direto e quadratura, aplicando-se compensações na fonte de injeção de corrente do equivalente Norton.

R^{neg} : resistência de sequência negativa traduz o efeito de aquecimento dos circuitos de rotor, que aparecem como curto-circuitados para o fluxo de sequência negativa, de forma semelhante ao que ocorre na máquina de indução. Seu valor é significativamente maior que o da resistência de armadura, é dado aproximadamente por:

$$R^{neg} = R_a + \frac{R_r}{2}$$

onde R_r é a resistência que representa as perdas totais no rotor e $R_a = R^{pos}$ é a resistência de armadura. O valor de resistência de sequência negativa pode variar numa faixa de 1,1 a 60%, sendo dependente do material empregado nos enrolamentos amortecedores do rotor.

X^{neg} : reatância de sequência negativa depende do tipo de desbalanço imposto na máquina. Seu valor é dado por:

$$X^{neg} = \frac{X_d'' + X_q''}{2}, \text{ para correntes senoidais de sequência negativa aplicadas, ou}$$

$$X^{neg} = 2 \frac{X_d'' X_q''}{X_d'' + X_q''}, \text{ para tensões senoidais de sequência negativa aplicadas.}$$

R^{zer} : resistência de sequência zero é ligeiramente superior à R^{pos} , devido a um pequeno efeito de aquecimento no rotor causado por componentes de fluxo de segundo e quarto harmônico, quando correntes de sequência zero fluem pelo estator. Esta diferença é usualmente insignificante.

X^{zer} : reatância de sequência zero é também ligeiramente superior à reatância de dispersão da máquina, devido a distribuição não perfeitamente senoidal dos enrolamentos de armadura. Esta diferença é também insignificante.

8.1.4.6 Modelo de Gerador trifásico em Regime permanente:

A Figura 8.10, Figura 8.11 e Figura 8.12 mostram os modelos em regime permanente para o gerador V- θ , P-V e P-Q trifásico respectivamente.

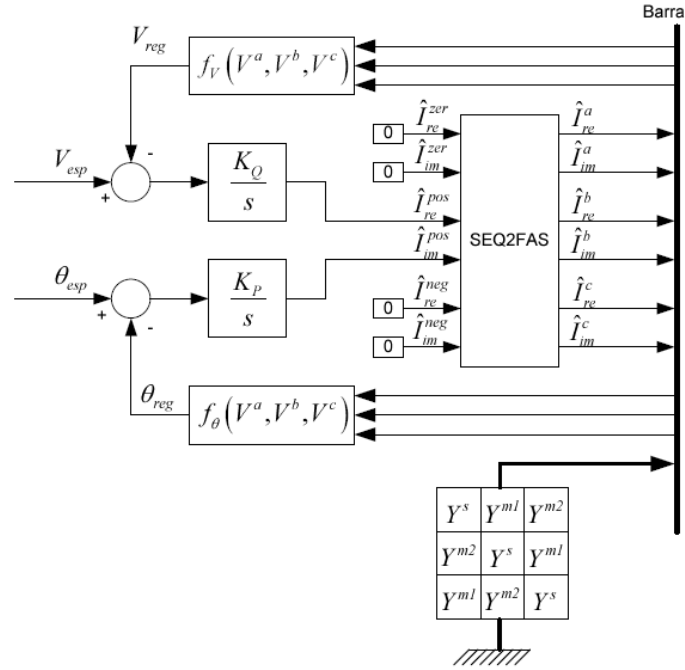


Figura 8.10 Modelo em regime permanente para o gerador V-θ trifásico.

Nesta figura, V_{esp} e θ_{esp} são as variáveis de referência especificadas para a geração.

O bloco $f_V(V^a; V^b; V^c)$ representa a função de controle do regulador de tensão.

A função $f_\theta(V^a; V^b; V^c)$ permite especificar a que tensão se refere o valor especificado para referência angular. Na Figura 8.11, V_{esp} e P_{esp} são as variáveis de referência especificadas para a geração. A potência injetada pode ser calculada por:

$$P_{inj} = 3[V_{re}^{pos} \hat{I}_{re}^{pos} + V_{im}^{pos} \hat{I}_{im}^{pos} - G^{pos}(V^{pos})^2 - G^{neg}(V^{neg})^2 - G^{zer}(V^{zer})^2]$$

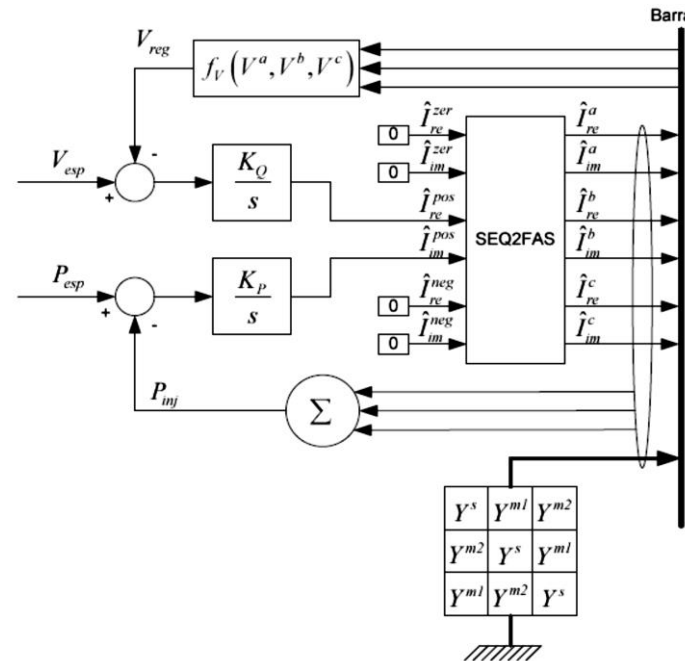


Figura 8.11 Modelo em regime permanente para o gerador P-V trifásico.

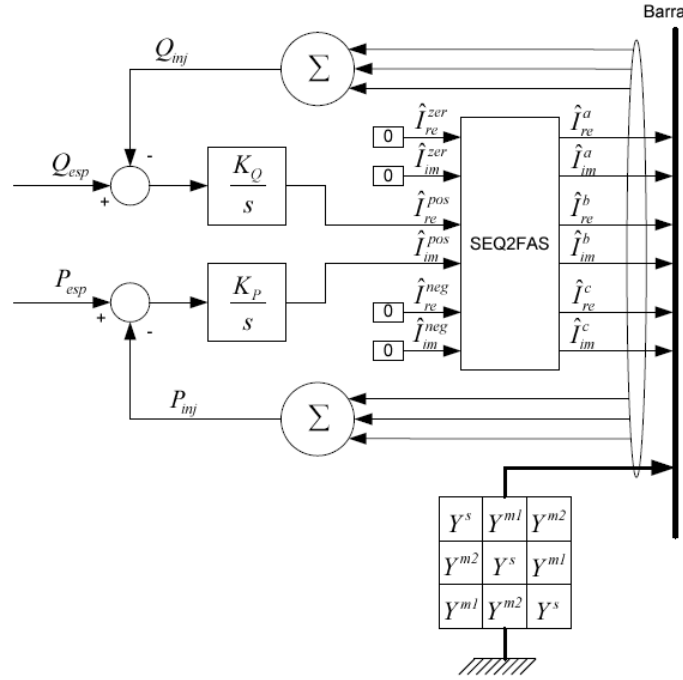


Figura 8.12 Modelo em regime permanente para o gerador P-Q trifásico.

Na Figura 8.12, P_{esp} e Q_{esp} são as variáveis de referência especificadas para a geração.

A potência reativa total pode ser calculada da forma:

$$Q_{inj} = 3[V_{re}^{pos} \hat{i}_{im}^{pos} - V_{im}^{pos} \hat{i}_{re}^{pos} - B^{pos}(V^{pos})^2 - B^{neg}(V^{neg})^2 - B^{zer}(V^{zer})^2]$$

Nas três figuras anteriores, tem-se:

$$Y^{abc} = [T^S][Y^{012}][T^S]^{-1} = \begin{bmatrix} Y^s & Y^{m1} & Y^{m2} \\ Y^{m2} & Y^s & Y^{m1} \\ Y^{m1} & Y^{m2} & Y^s \end{bmatrix}$$

Onde T^S é a matriz de transformação para componentes simétricos.

$$Z^{012} = \begin{bmatrix} R^{zer} + jX^{zer} & & \\ & R^{pos} + jX^{pos} & \\ & & R^{neg} + jX^{neg} \end{bmatrix}$$

$$Y^{012} = [Z^{012}]^{-1} = \begin{bmatrix} G^{zer} + jB^{zer} & & \\ & G^{pos} + jB^{pos} & \\ & & G^{neg} + jB^{neg} \end{bmatrix}$$

$$\dot{P} = 0 = K_P(\theta_{esp} - \theta)$$

$$\dot{Q} = 0 = K_Q(V_{esp} - V)$$

Os ganhos K_P e K_Q são irrelevantes para a solução de regime permanente. $\hat{i}_{re}^{pos}$ e $\hat{i}_{im}^{pos}$ são as partes real e imaginária da injeção de corrente de sequência positiva. POL2RET é o bloco de transformação de coordenadas polares para retangulares e o bloco algébrico SEQ2FAS efetua a transformação de componentes simétricos.

8.1.5 Modelo de Gerador trifásico dinâmico:

O comportamento da máquina síncrona sob efeito da sequência negativa é similar ao de uma máquina de indução operando com escorregamento $s = 2$, cujo circuito equivalente é ilustrado na Figura 8.13. R_r representa as perdas totais no cobre do rotor, e a potência mecânica transferida do rotor para o eixo está associada com $|R_r(1 - s)|_{s=2} = -R_r = 2$. Portanto, metade das perdas no rotor é fornecida pelo estator, e a outra metade é drenada do rotor, na forma de torque de frenagem.

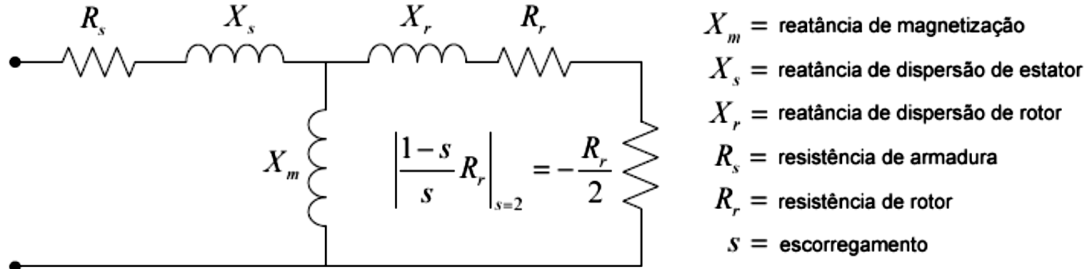


Figura 8.13 Circuito equivalente do motor de indução.

Onde o torque de sequência negativa: $T^{neg} = R_r/2 (I^{neg})^2$

Onde I^{neg} é o componente de sequência negativa da corrente de armadura. O torque se sequência positiva, proveniente do modelo de Park aplicado à sequência positiva é dado por ($\omega=1.0$ pu)

$$T^{pos} = V_d I_d + V_q I_q + R_a (I^{pos})^2$$

$$R^{neg} = \frac{R_r}{2} + R_a$$

O modelo dinâmico proposto para a máquina síncrona trifásica se baseia na mesma estrutura de representação Norton equivalente dos modelos de regime permanente, e é detalhado na Figura 8.14. Inerentemente, é um modelo em componentes simétricos, acoplado à rede em componentes de fase via blocos de transformação fase-sequência-fase.

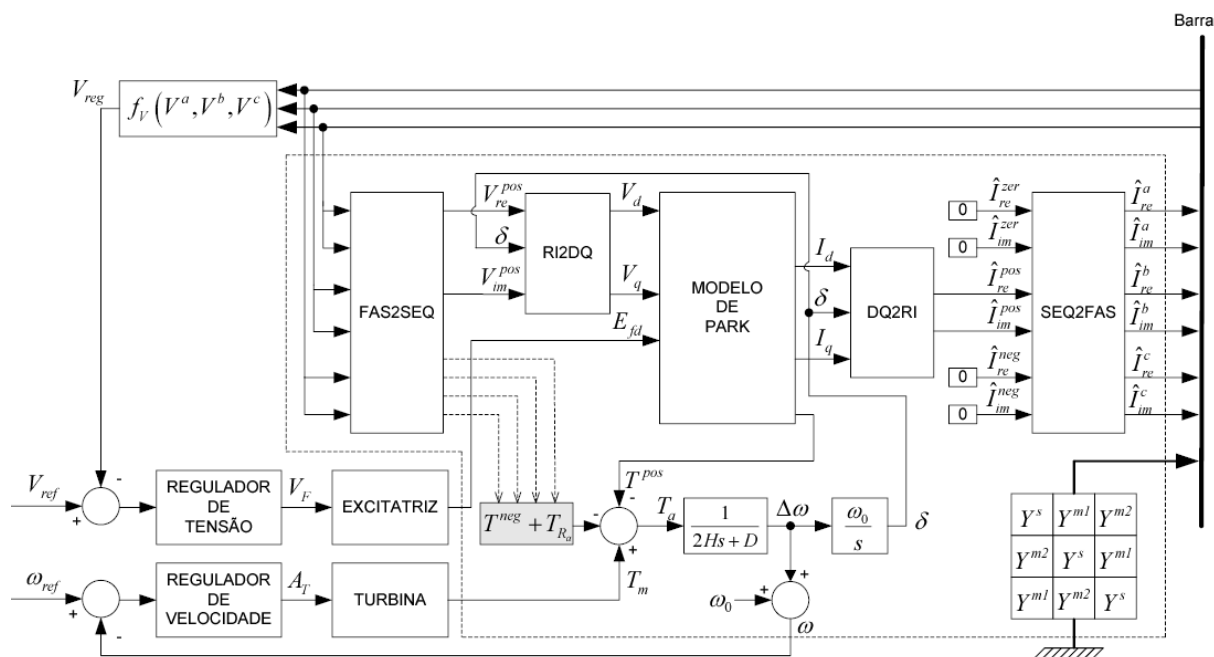


Figura 8.14 Modelo Dinâmico para a Máquina Síncrona trifásica.

Nesta figura se mostra o modelo da máquina síncrona trifásica com seus blocos de excitação e controle. O único acoplamento dinâmico do modelo com o desbalanço na rede elétrica está na equação de oscilação de rotor. O componente unidirecional do torque de sequência negativa, a ser inserido na equação de oscilação de rotor, pode ser calculado por:

$$T^{neg} = \frac{R_r}{2} (I^{neg})^2$$

Onde I^{neg} é o componente de sequência negativa da corrente de armadura. O torque de sequência positiva, proveniente do modelo de Park aplicado à sequência positiva é dado por ($\delta = 1:0$ pu):

$$T^{pos} = V_d I_d + V_g I_g + R_a (I^{pos})^2$$

De $R^{neg} = R_r/2 + R_q$ e com auxílio da Figura 8.9(b):

$$G^{neg}(V^{neg})^2 = R^{neg}(I^{neg})^2 = T^{neg} + R_a(I^{neg})^2$$

Esta equação anterior fornece o torque de sequência negativa, acrescido de uma parcela de perdas devido ao componente de sequência negativa da corrente de armadura. Logo, complementando o balanço potência/torque da máquina síncrona com modelagem trifásica:

$$G^{zer}(V^{zer})^2 = R^{zer}(I^{zer})^2 = R_g(I^{zer})^2$$

A equação de oscilação do rotor pode ser escrita da forma:

$$T_a = T_m - T^{pos} - [G^{neg}(V^{neg})^2 - G^{zer}(V^{zer})^2] - D(\omega - \omega_0)$$

Onde T_a é o torque acelerante, T_m é o torque mecânico da máquina motriz e D é a constante de amortecimento.

$$[T^{neg} + T_{R_a}] = [G^{neg}(V^{neg})^2 + G^{zer}(V^{zer})^2]$$

8.1.6 Modelo Dinâmico para a Máquina de Indução Trifásica

O modelo dinâmico para a máquina de indução trifásica é formado simplesmente por agregação dos três modelos de sequência, acoplados à rede em componentes de fase via blocos de transformação fase-sequência-fase. Ele está ilustrado na Figura 8.15, onde a variável escorregamento s foi substituída por $slip$ para evitar ambiguidade com a variável s dos integradores. Como mencionado, o mesmo modelo é aplicado no cálculo do fluxo de potência.

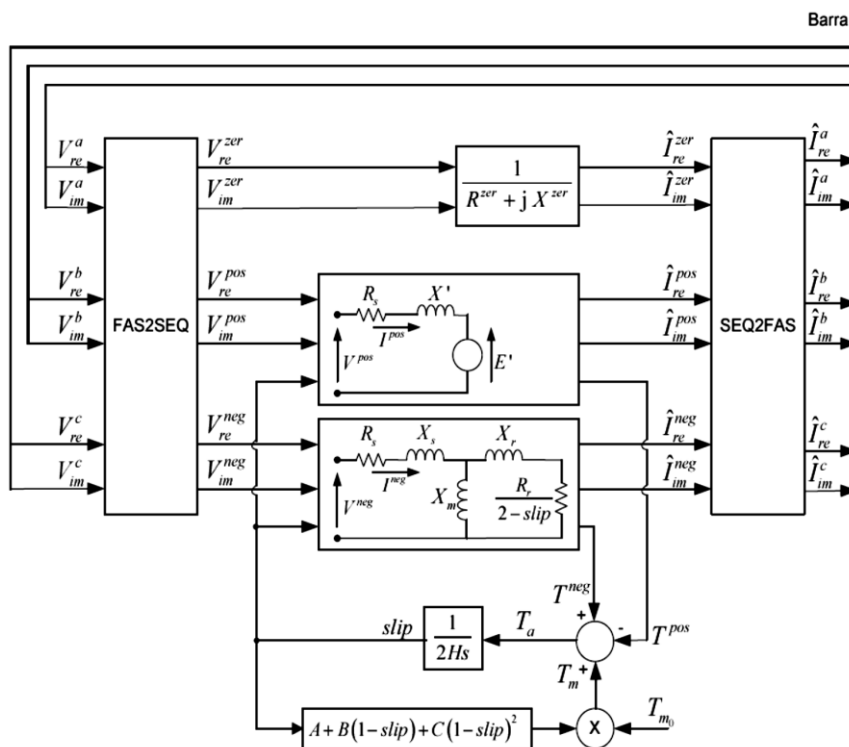


Figura 8.15 Modelo Dinâmico para a Máquina de Indução trifásica.

8.1.7 Forma Geral de Dispositivos Shunt

Os modelos trifásicos desenvolvidos para máquinas girantes, incluindo os modelos de regime permanente para geradores (barras P V, P Q e V θ), foram equacionados em componentes simétricos e acoplados numa barra cujas tensões e injeções de outros dispositivos estão representadas em componentes de fase. Na frequência fundamental, com representação fasorial das tensões e correntes, estes modelos são governados pelo movimento do rotor, por definição associado à sequência positiva. Por outro lado, dispositivos estáticos como linhas de transmissão, transformadores e cargas são mais naturalmente modelados em componentes de fase.

A Figura 8.16 ilustra uma forma geral para representação de dispositivos shunt. Os blocos FAS2SEQ e SEQ2FAS aplicam as transformações necessárias nas tensões e correntes. Quando parcelas de admitâncias shunt estão presentes no modelo, estas devem também ser transformadas, o que por sua vez equivale a aplicar transformações de componentes nas tensões e nas correntes injetadas (absorvidas) pela admitância. Se estas admitâncias forem constantes, a transformação é paramétrica, isto é, aplicada somente uma vez nos parâmetros do modelo, o que reduz o esforço computacional.

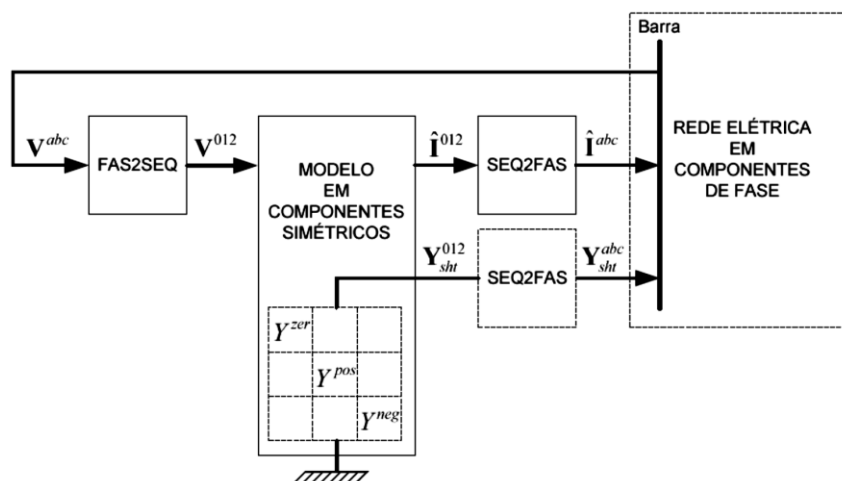


Figura 8.16 Forma geral para representação de dispositivo shunt.

8.1.8 Forma Geral de Dispositivos Série

A Figura 8.17 apresenta um modelo em componentes simétricos acoplado às suas duas barras terminais com modelagem em componentes de fase, empregando formulação de injeções de corrente. Outras variações podem ser construídas para dispositivo ou barras terminais com modelagem diferente, fase ou sequência, trifásico ou monofásico equivalente, aplicando os blocos de transformação adequados.

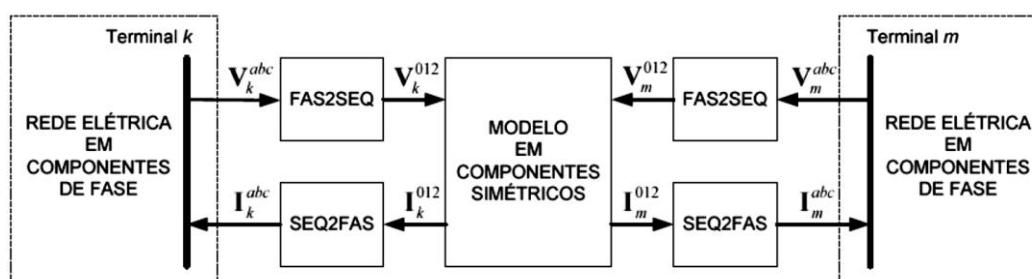


Figura 8.17 Forma geral para representação de dispositivo shunt.

A interface de rede foi formulada a partir das expressões de injeção de corrente e de um elemento π passivo, o qual não possui estados internos.

8.2 Interface de Rede Trifásica x Monofásica Equivalente

A existência de barras com modelagem trifásica e barras com modelagem de sequência positiva na mesma formulação do problema introduz uma nova interface no Simulight de dispositivo série que interligue duas barras com modelagens diferentes (monofásico e trifásico). Esta interface tem como princípio a Figura 8.16 e tem

equacionamento para um elemento π passivo, podendo representar linhas de transmissão ou transformadores sem variação automática de tape.

A Figura 8.18 mostra a modelagem de uma rede trifásica modelada em componentes simétricos, que é daqui que vamos a obter nossa rede em componentes de fase, que o Simulight utiliza.

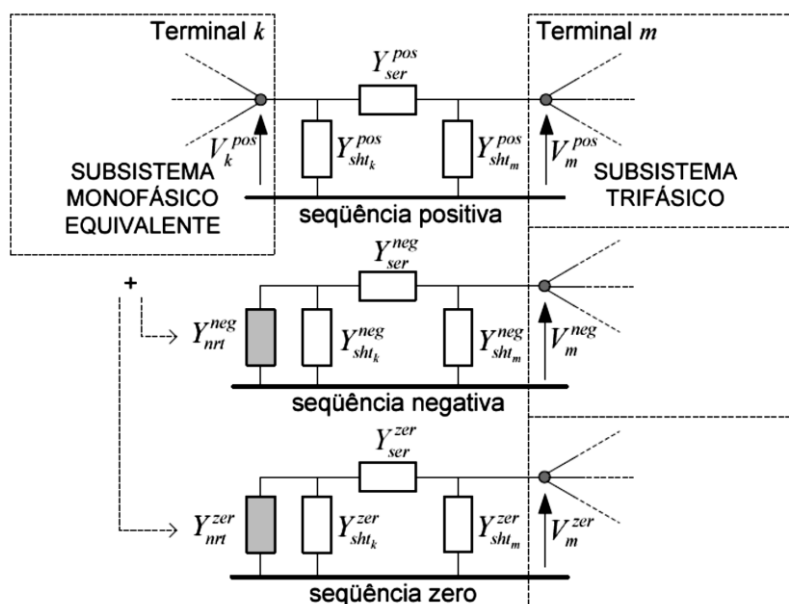


Figura 8.18 Forma geral para representação de dispositivo shunt.

A rede em componentes de fase os elementos do subsistema trifásico têm suas admitâncias acopladas entre fases, formando blocos 3×3 na matriz admitância de barras e blocos 6×6 na matriz jacobiana. No subsistema monofásico equivalente, a representação envolve blocos 1×1 e 2×2 , respectivamente, tal como é mostrada na Figura 8.19.

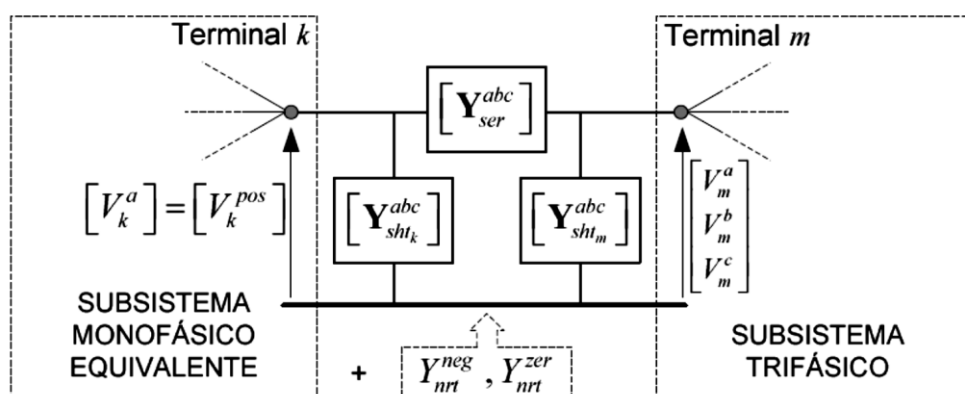


Figura 8.19 Interface de rede em componentes de fase.

Para a formulação, as injeções de corrente e tensões inicia em coordenadas retangulares adequada para sistemas trifásicos, e a tensão no terminal monofásico

equivalente k é perfeitamente balanceada. Isto equivale a assumir que Y_{nrt}^{neg} e Y_{nrt}^{zer} são infinitos, ou que o terminal k está aterrado para a sequência negativa e sequência zero.

Modelagem Híbrida Monofásica/Trifásica (Monotri):

Essa implementação permite que uma parte do sistema seja modelada de forma monofásica (sequência positiva) e outra parte seja modelada de forma trifásica [5].

Por exemplo, a Figura 8.20 mostra uma possível utilização da modelagem Monotri, onde se representa o sistema de transmissão com modelos monofásicos (parte vermelha) e os sistemas de subtransmissão e distribuição com modelos trifásicos (parte cinza). O Simulight pode utilizar a representação Monotri tanto no problema de fluxo de potência quanto no problema de estabilidade transitória.

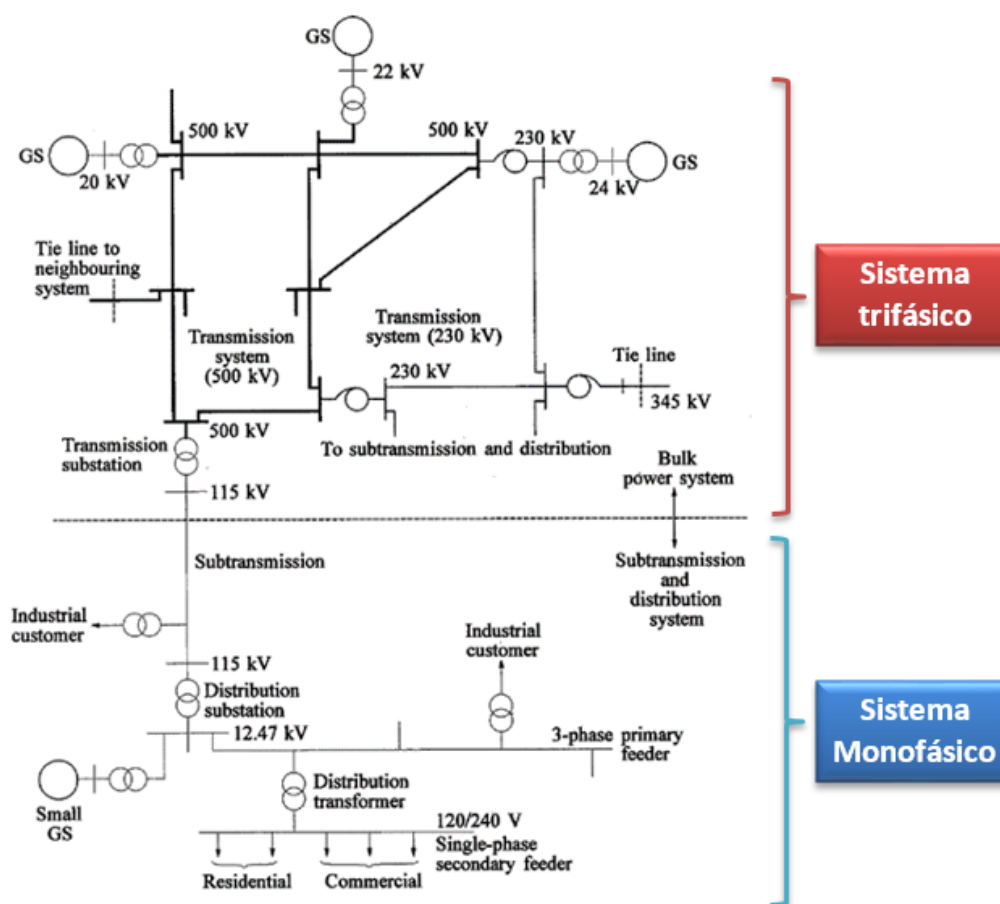


Figura 8.20 Utilização da modelagem híbrida monofásica/trifásica

Relatórios no Simulight 3 ϕ :

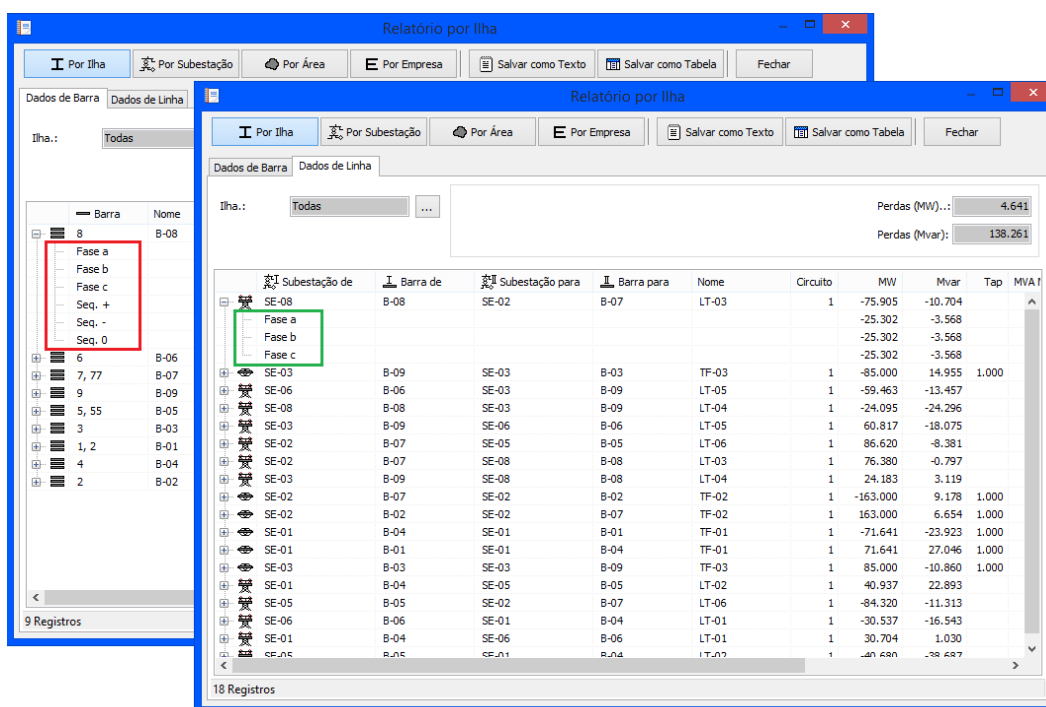


Figura 8.21 Relatório após execução de Fluxo do potencia

Gráficos de Medidores:

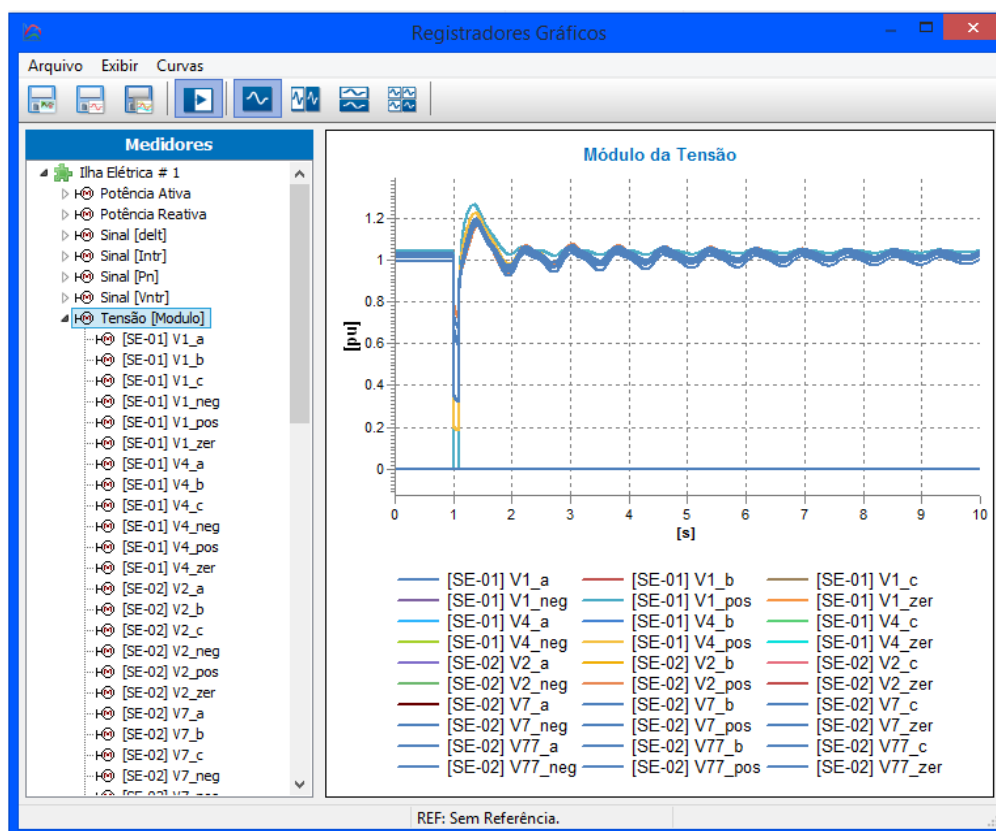


Figura 8.22 Gráfico após execução de um evento

9 Simprot

9.1 Introdução

O Simprot ou Simulador de Falhas para Análise de Proteção em Sistemas Geradores é o produto final do projeto entre a COPPE e a Light Energia. O Simprot foi desenvolvido pela COPPE/UFRJ (Fundação Coppetec) para a Light Energia S.A., regido pelo contrato P&D 4500292527 (referência Coppetec PEE-17263).

O Simprot possibilita a avaliação da resposta do sistema de proteção a inúmeras possibilidades de eventos, permitindo detectar falhas de coordenação e necessidades de reajustes na proteção. [24]

Tendo em vista que o *Simulight* é um programa maduro, com uma estrutura de classes consolidada, interface gráfica amigável e recursos gráficos avançados, o Simprot foi incorporado aos módulos já existentes no *Simulight*, ou seja, o simulador de falhas passa a ser um dos aplicativos disponíveis no *Simulight*, assim como são o cálculo de Fluxo de Potência e a Simulação Dinâmica.

9.2 Especificação Funcional dos Módulos

Levando-se em consideração a estratégia de implementação descrita na seção anterior, a especificação funcional dos módulos apresentados na Figura 9.1, será realizada como a seguir:

- *Geração do Banco de Dados*: os dados da rede elétrica, na qual estão conectados os geradores em estudo, foram obtidos dos arquivos do SIN disponibilizados pelo NOS. Como já discutido em reuniões com engenheiros da Light, considera-se desnecessária a modelagem completa de todo o SIN para os estudos previstos com o Simprot. No equivalente do sistema elétrico gerado foram acrescentados os modelos dos geradores e controladores em estudo, assim como dos dispositivos de proteção. Esses modelos poderão ser definidos utilizando a biblioteca de modelos disponíveis no *Simulight*, a qual pode ser acessada através de sua interface.
- *Modelo do Sistema*: utilizando o banco de dados como definido acima, o programa *Simulight* gera *automaticamente* o modelo matemático do sistema elétrico, incluindo os geradores e seus controladores, e o sistema de proteção.
- *Simulação de Eventos*: a simulação de eventos, tais como curtos-circuitos, abertura de chaves e disjuntores, etc., pode ser modelada no *Simulight* através de informações fornecidas à sua interface ou diretamente na tela do Simprot, na qual o usuário poderá definir o gerador escolhido para o estudo, a lista de dispositivos de proteção do mesmo, as características da simulação, e os eventos que serão simulados. Essa tela e outras, estão descritas em detalhes na Seção 9.4.

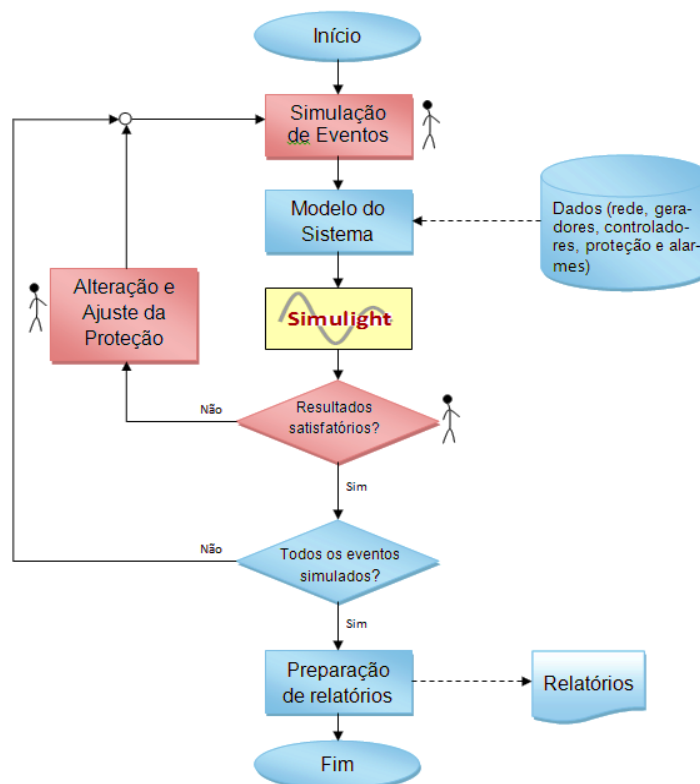


Figura 9.1 Estrutura funcional do software SimProt.

- **Simulação:** uma vez definido o sistema a ser simulado, a simulação propriamente dita é executada acionando as funções Fluxo de Potência, para calcular as condições iniciais da simulação, e Simulação Dinâmica para simular a evolução dinâmica do sistema e, conseqüentemente, a atuação do sistema de proteção.
- **Análise de Resultados:** a análise dos resultados da simulação poderá ser executada em dois tempos: a) durante o processo de simulação, através de tela específica que indica a evolução no tempo de variáveis (correntes tensões, etc.) previamente escolhidas e a indicação da atuação ou alarme de dispositivos de proteção, através de tela especial em desenvolvimento e descrita na Seção 9.4; b) no final da simulação, analisando o resultado completo da mesma, em telas já disponíveis no *Simulight*, as quais mostram a evolução temporal das variáveis escolhidas e os eventos resultantes das simulações (atuação da proteção, aberturas de disjuntores, etc.).
- **Alteração e Ajustes da Proteção:** caso seja detectada uma atuação incorreta de algum dispositivo de proteção, as características dos mesmos poderão ser alteradas através da interface padrão do *Simulight* e a nova característica visualizada através de telas específicas.

9.3 Modelagem Computacional dos Relés de Proteção

A implementação dos relés de proteção no programa Simulight teve início no ano de 2007, durante o projeto de P&D “Desempenho Dinâmico da Geração Distribuída frente a Perturbações no SIN e de Manobras na Rede de Distribuição”, desenvolvido pela COPPE/UFRJ para a Light. Na ocasião foram desenvolvidos modelos computacionais para os

relés 21 (distância), 25 (verificação de sincronismo), 27 (subtensão), 50/51 (sobrecorrente instantâneo/temporizado), 59 (sobretensão), 67 (função direcional) e 81u/o (sub/sobrefrequência). Estes modelos eram aplicados somente na simulação de sequência positiva (monofásica equivalente) do sistema elétrico, que era a então disponível no programa Simulight.

No ano de 2009 teve início o projeto de P&D “Pesquisa e Implementação de Simulação Dinâmica Trifásica nas Redes de Distribuição com Geração Distribuída”, também desenvolvido pela COPPE/UFRJ para a Light, ocasião em que o simulador foi expandido para uma modelagem trifásica da rede elétrica empregando componentes de fase. Este desenvolvimento permitiu mais um avanço na modelagem dos sistemas de proteção, pois os relés passaram a ter disponível como grandeza de entrada para supervisão tensões ou correntes em qualquer uma das fases, redes de sequência, ou mesmo no neutro, ainda que em representação implícita. A grandeza frequência (de barra ou de ilha elétrica) permanece como uma variável inerentemente de sequência positiva, pois seu valor é essencialmente dependente da dinâmica eletromecânica das máquinas elétricas e do balanço carga total x geração total, praticamente não sendo afetada por desequilíbrios entre fases. Na ocasião foram desenvolvidos modelos computacionais para os relés 51G (sobrecorrente de neutro) e 59G (sobretensão de neutro), específicos para geradores.

No ano de 2013 teve início o projeto de P&D “Simulador de Falhas para Análise de Proteção em Sistemas Geradores” desenvolvido pela COPPE/UFRJ para a Light Energia, onde foram elaborados modelos computacionais para os relés 24 (sobre-excitação volts/hertz), 32 (reversão de potência ou motorização), 40 (perda de campo), 46 (sobrecorrente de sequência negativa), 47 (sobretensão de sequência negativa), 49 (imagem térmica de corrente) e 51V (sobrecorrente temporizada com restrição de tensão). Além disto, visando uma simulação mais realística, os modelos de relés desenvolvidos nos P&D anteriores foram revistos e adequados para permitir uma representação das características específicas dos relés aplicados nas usinas de geração da Light, conforme descrito nos catálogos de seus fabricantes.

No Simulight, a abordagem de um conjunto de funções de proteção não é a de um “relé multifunção”, se assemelhando mais à aplicação do relé convencional eletromecânico, onde uma unidade de relé deve ser empregada separadamente para cada função de proteção, cada uma das fases, rede de sequência, e para operação em alarme, monitoração ou trip.

9.3.1 Relé Base

A estrutura computacional básica de um relé de proteção está ilustrada na Figura 9.2. Deste modelo denominado Relé Base derivam todos os outros modelos de relés, por meio da adição de uma ou mais funções de proteção.

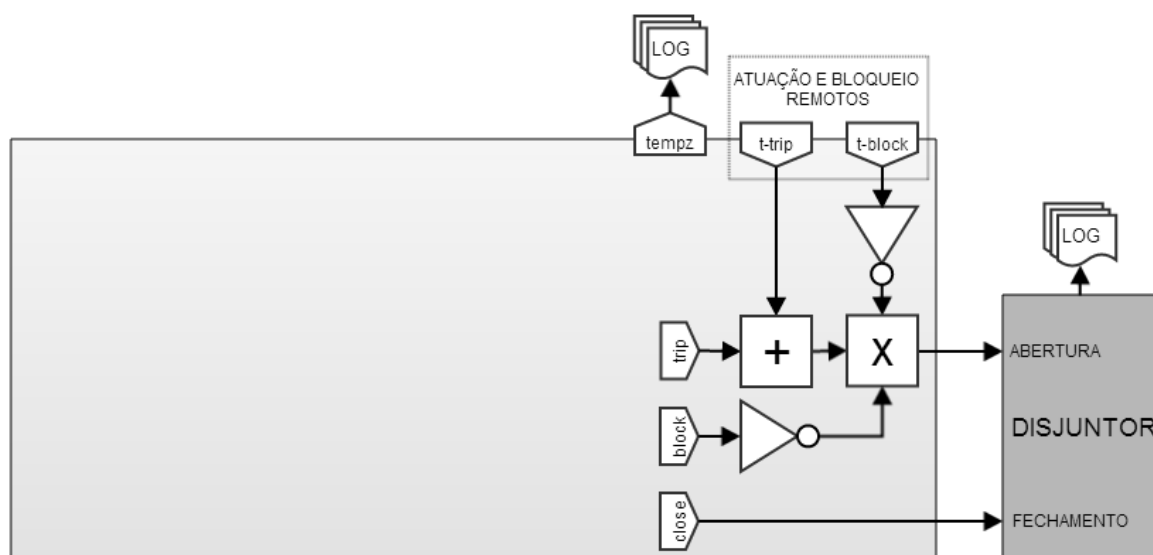


Figura 9.2 Estrutura computacional base do relé

O relé se conecta a um disjuntor, para o qual envia sinais de abertura e fechamento. A variável interna *close* pode se conectar internamente a outros blocos de função para enviar um sinal de fechamento ao disjuntor, como ocorre por exemplo com o uso da função de proteção 25 (verificação de sincronismo). A variável *trip* faz o mesmo para o sinal de abertura, sendo porém controlada pela variável *block*, que tem a função de bloquear o sinal de abertura para certas condições, como ocorre por exemplo com o uso da função de proteção 67 (direcional). As variáveis *t-trip* e *t-block* fazem o mesmo para sinais externos ao modelo base, permitindo que o relé receba sinais de atuação e bloqueio remotos.

A variável *tempz* se conecta internamente a blocos de função para indicar por meio de evento de log uma condição de sensibilização do relé, por exemplo, quando uma grandeza monitorada ultrapassa o seu valor de pick-up. Por sua vez, o disjuntor também envia ao ambiente de simulação eventos de log de abertura e fechamento. Atualmente o relé pode ser configurado com 3 modos de operação: o de *atuação*, onde os sinais de abertura e fechamento efetivamente operam o disjuntor, o de *monitoração*, onde somente um evento de log é gerado e o disjuntor não opera (mensagem “teria operado o relé de proteção xyz”), e o modo de *alarme*, funcionalmente equivalente ao modo de monitoração, porém com uma mensagem de log diferente (“alarmou o relé de proteção xyz”). No modo de alarme, o uso de um disjuntor acoplado ao relé é opcional.

9.3.2 Relé de Sobrecorrente Instantâneo (50)

A Figura 9.3 apresenta o modelo completo do relé de sobrecorrente instantâneo (função 50), que também permite representar um relé de tempo definido (temporização fixa). O parâmetro *Tr* pode assumir um valor nulo (relé instantâneo) ou não-nulo, para modelar qualquer retardo não intencional (tempo para início de abertura de contato de disjuntores e tempo de eliminação do arco elétrico nos contatos) ou mesmo um retardo intencional (relé de temporização fixa).

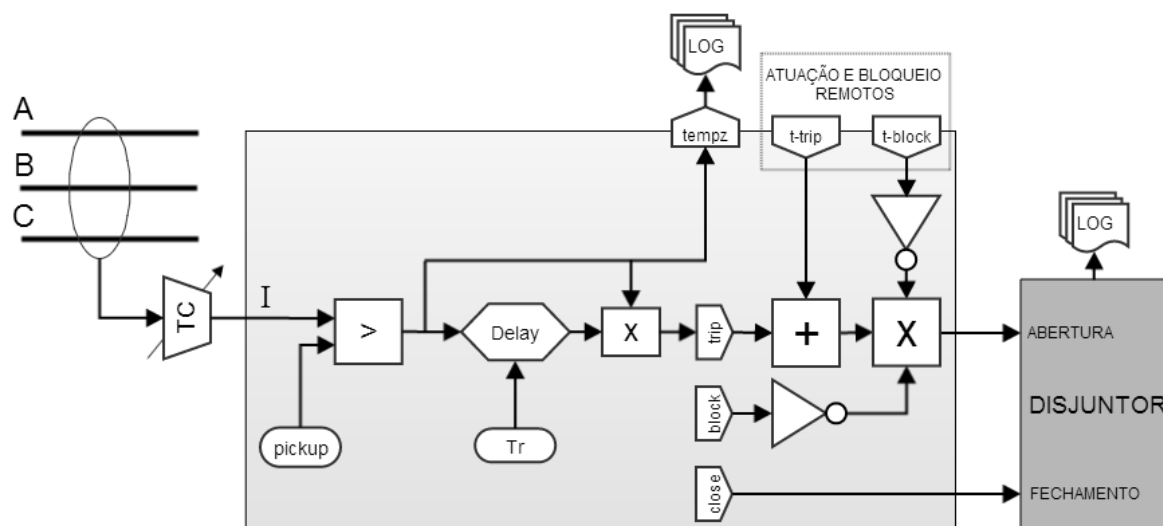


Figura 9.3 Relé de sobrecorrente instantâneo (ou com temporização fixa)

Um modelo de TC acoplado ao relé se conecta a um ramo da rede elétrica, que pode ser um dispositivo shunt ou série. Para o caso do relé 50, o TC pode ser configurado para medir e entregar ao relé um valor de corrente de qualquer das fases (A, B, C) ou rede de sequência (“+”, “-”, “0”), ou ainda a corrente de retorno obtida pelo somatório das correntes nas três fases (“N” ou neutro implícito). Essencialmente o modelo de TC empregado tem a função de um *transdutor de correntes*, podendo representar um ou mais transformadores de corrente fisicamente acoplados ao relé. A corrente I assim obtida é comparada com o valor do parâmetro *pickup*. Quando ultrapassado este valor, é gerado um evento de log de sensibilização do relé e começa no bloco *Delay* a contagem do tempo T_r para a efetivação do trip. Se durante este intervalo a corrente retornar a um valor inferior ao de pick-up, o relé sofre o *reset* e o trip não ocorre.

9.3.3 Relé de Sobrecorrente Temporizado (51)

A Figura 9.4 apresenta o modelo de relé de sobrecorrente de temporizado (função 51) com curva de tempo inverso. De forma análoga ao relé 50, este relé utiliza agora a razão entre a corrente monitorada e o valor de pick-up para calcular o tempo de retardo até o trip. Este relé implementa diversas curvas de tempo inverso padrão IEC e IEEE, conforme definido nas referências [25] e [26].

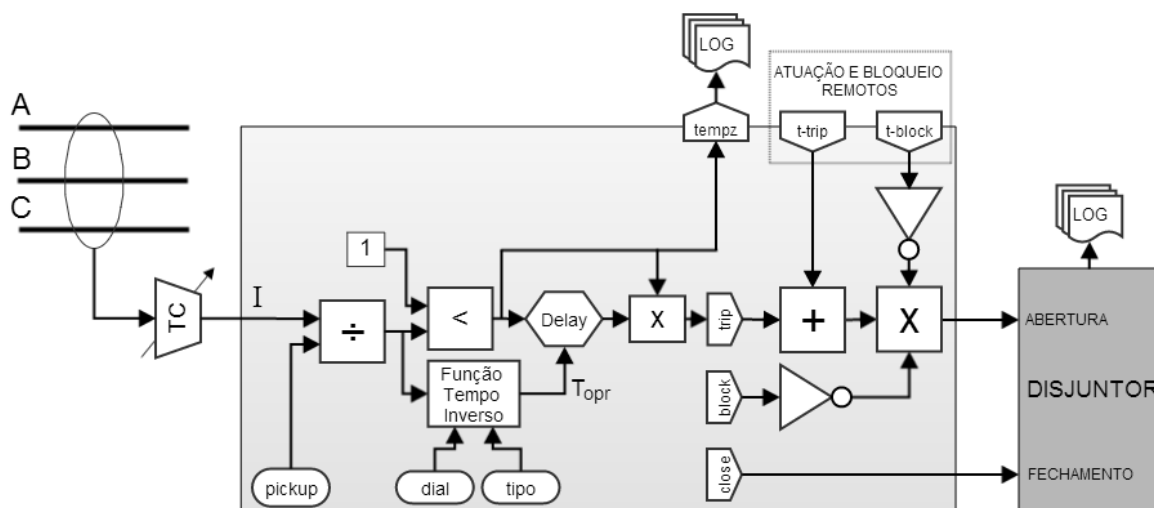


Figura 9.4 Relé de sobrecorrente temporizado (curva de tempo inverso)

Os parâmetros *dial* e *tipo* são utilizados na função de tempo inverso, sendo o tempo de operação T_{opr} definido pelas equações:

$$T_{opr} = \left(\frac{0.0515}{\left(\frac{I}{pickup} \right)^{0.02} - 1} + 0.1140 \right) \times dial, \text{ para tipo} = 1 \text{ (curva moderadamente inversa)}$$

$$T_{opr} = \left(\frac{19.61}{\left(\frac{I}{pickup} \right)^2 - 1} + 0.4910 \right) \times dial, \text{ para tipo} = 2 \text{ (curva muito inversa)}$$

$$T_{opr} = \left(\frac{28.2}{\left(\frac{I}{pickup} \right)^2 - 1} + 0.1217 \right) \times dial, \text{ para tipo} = 3 \text{ (curva extremamente inversa)}$$

9.3.4 Relé de Sobrecorrente Temporizado com Restrição de Tensão (51V)

A Figura 9.5 apresenta o modelo implementado para o relé de sobrecorrente temporizado com restrição de tensão (função 51V), de aplicação específica para geradores. Além do TC acoplado ao relé, um modelo de TP também é empregado, e de forma análoga ao modelo de TC, se comporta com um *transdutor de tensões*, podendo ser configurado para medir e entregar ao relé um valor de tensão de qualquer das fases (A, B, C) ou rede de sequência (“+”, “-”, “0”). No entanto, nas aplicações usuais do relé 51V somente o monitoramento de fases (correntes e tensões) é empregado, com uma unidade da função 51V para cada fase (A, B, C).

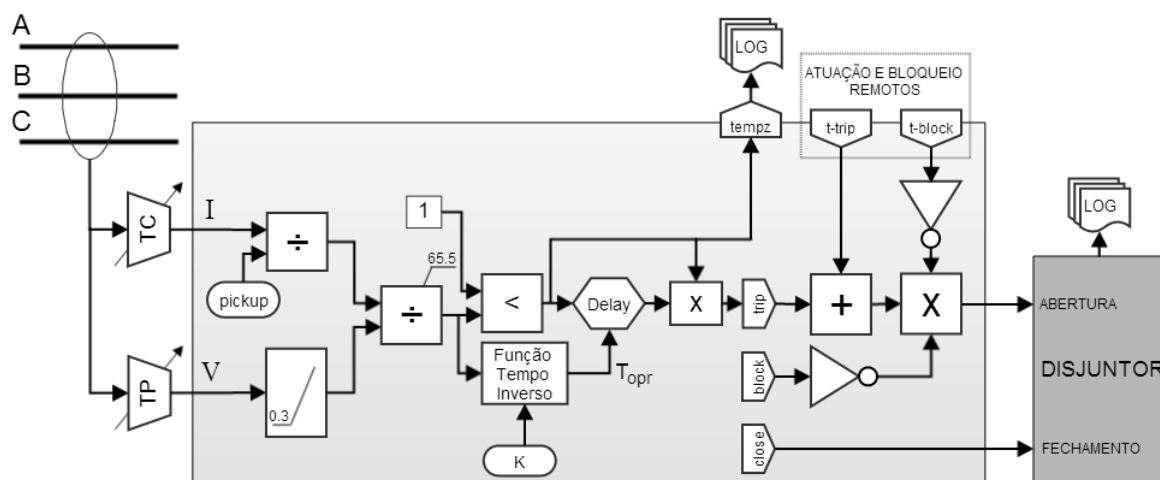


Figura 9.5 Relé de sobrecorrente temporizado com restrição de tensão

A implementação adotada para a característica de tempo inverso e de restrição de tensão é a do relé tipo DGP, da *General Electric*, conforme descrito no seu manual [27] :

$$T_{opr} = \frac{K}{\sqrt{\frac{I/pickup}{V}} - 1}$$

Onde K é uma constante (parâmetro do relé).

9.3.5 Relé de Sobrecorrente de Terra (51G)

A Figura 9.6 mostra o diagrama do relé de sobrecorrente de terra (função 51G), usualmente aplicado em geradores na proteção de faltas à terra. O modelo da função de proteção é o mesmo do relé 51, sendo o TC instalado no ramo de conexão do neutro do equipamento à terra, medindo a corrente de neutro I_{ntr} . A impedância de aterramento de valor Z_{ntr} pode assumir um valor nulo no caso de aterramento sólido.

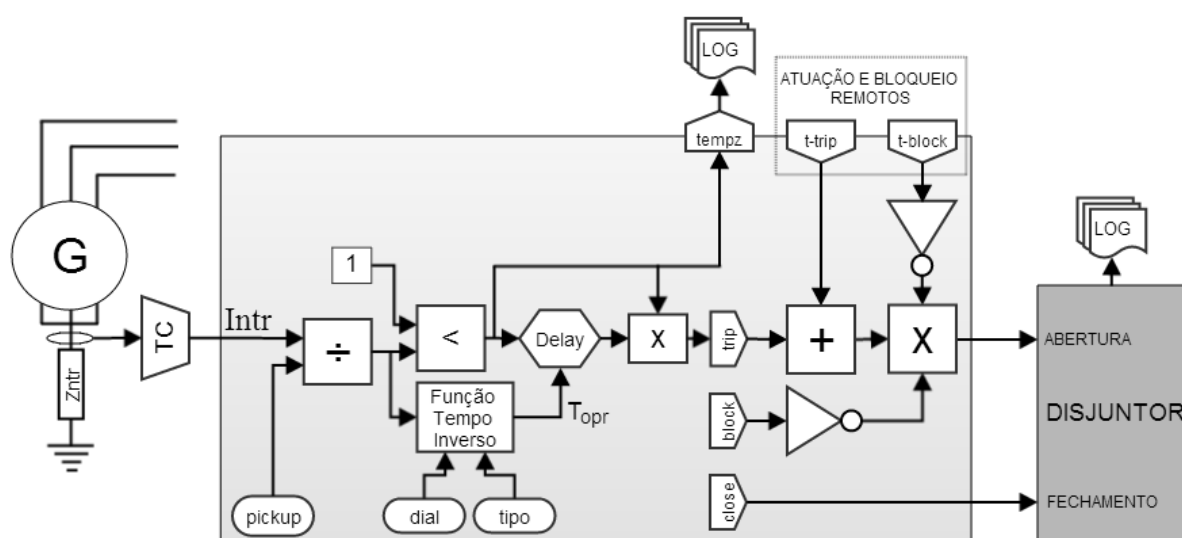


Figura 9.6 Relé de sobrecorrente de terra

9.3.6 Relé de Sobretensão (59)

A Figura 9.7 apresenta o modelo de relé de sobretensão (função 59) desenvolvido para este trabalho com uma característica composta de tempo inverso e tempo definido. A característica de tempo inverso é a do relé tipo DGP, da General Electric, conforme descrito no seu manual [27], sendo adicionada uma parcela de tempo definido T_r :

$$T_{opr} = \frac{K}{\left(\frac{V}{pickup}\right)^p - 1} + T_r$$

onde K e p são parâmetros do relé. Fazendo K nulo, o relé opera com característica de tempo definido pelo valor do parâmetro T_r .

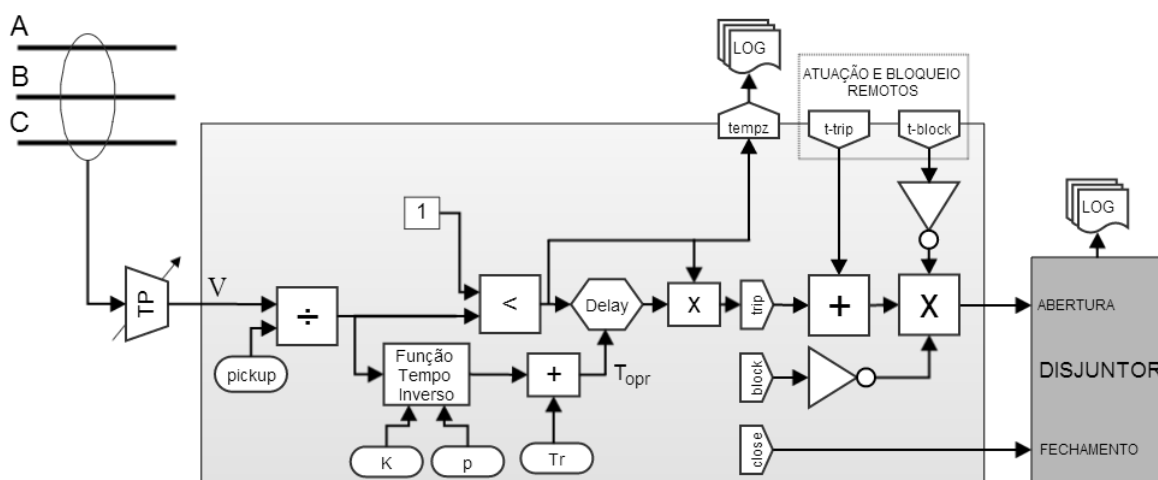


Figura 9.7 Relé de sobretensão (característica de tempo inverso/definido)

9.3.7 Relé de Subtensão (27)

A Figura 9.8 apresenta o modelo de relé de subtensão (função 27), também com uma característica composta de tempo inverso e tempo definido. A função característica de tempo inverso é análoga à do relé de sobretensão, sendo adicionada uma parcela de tempo definido T_r :

$$T_{opr} = \frac{K}{\left(\frac{pickup}{V}\right)^p - 1} + T_r$$

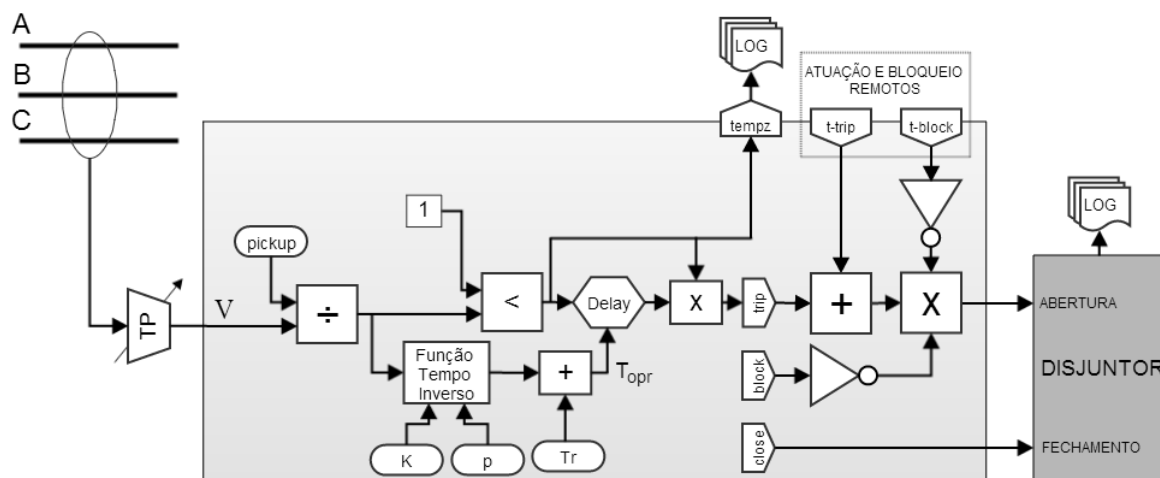


Figura 9.8 Relé de subtensão (característica de tempo inverso/definido)

9.3.8 Relé de Sobretensão de Terra (59G)

A Figura 9.9 mostra o diagrama do relé de sobretensão de terra (função 59G), que é o análogo do relé de sobrecorrente de terra (51G), aplicado em geradores com aterramento do neutro através de impedância. O modelo da função de proteção é o mesmo desenvolvido para o relé 59, porém o TP é conectado ao ponto de conexão do neutro com a impedância de valor Z_{ntr} , medindo a tensão de neutro V_{ntr} .

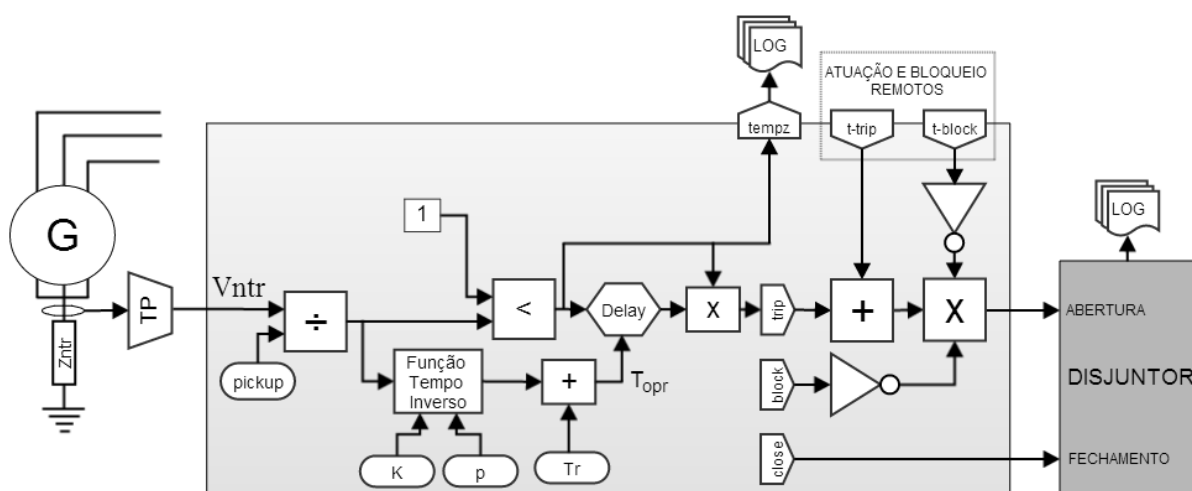


Figura 9.9 Relé de sobretensão de terra

9.3.9 Relé de Sobrecorrente de Sequência Negativa (46)

A Figura 9.10 apresenta o modelo de relé de sobrecorrente de sequência negativa (função 46), também desenvolvido para este projeto com uma característica composta de tempo inverso e tempo definido. A característica de tempo inverso é a do relé tipo DGP, da General Electric, conforme descrito no seu manual [27], sendo adicionada uma parcela de tempo definido T_r :

$$T_{opr} = \frac{K_2}{\left(\frac{I_2}{pickup}\right)^2} + T_r$$

onde I_2 é a corrente de sequência negativa e K_2 é uma constante.

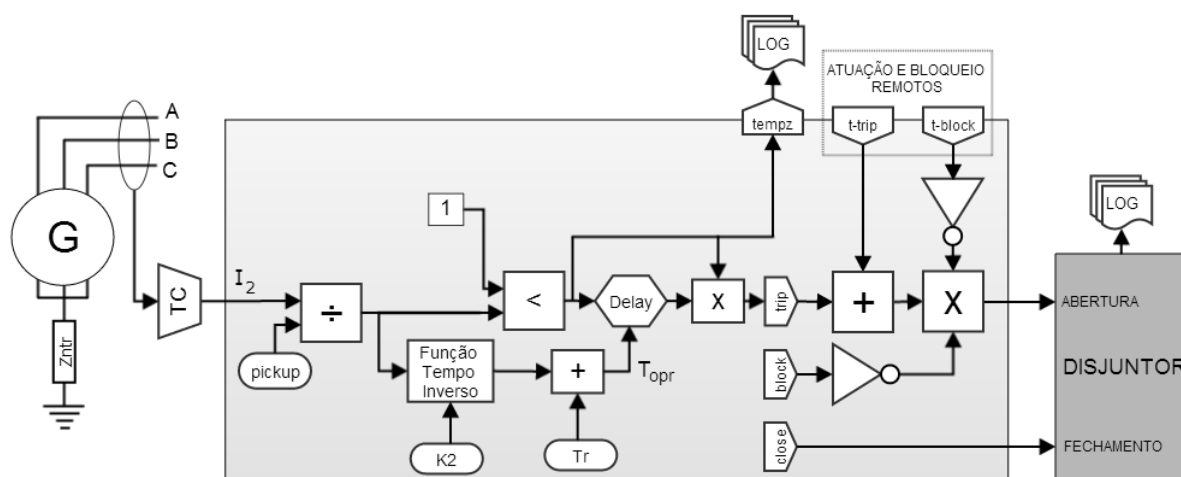


Figura 9.10 Relé de sobrecorrente de sequência negativa

9.3.10 Relé de Sobretensão de Sequência Negativa (47)

A Figura 9.11 apresenta o modelo de relé de sobretensão de sequência negativa (função 47), análogo do relé de sobrecorrente de sequência negativa (função 46). A característica de tempo inverso é a mesma do relé 46, com a tensão de sequência negativa V_2 substituindo a corrente:

$$T_{opr} = \frac{K_2}{\left(\frac{V_2}{pickup}\right)^2} + T_r$$

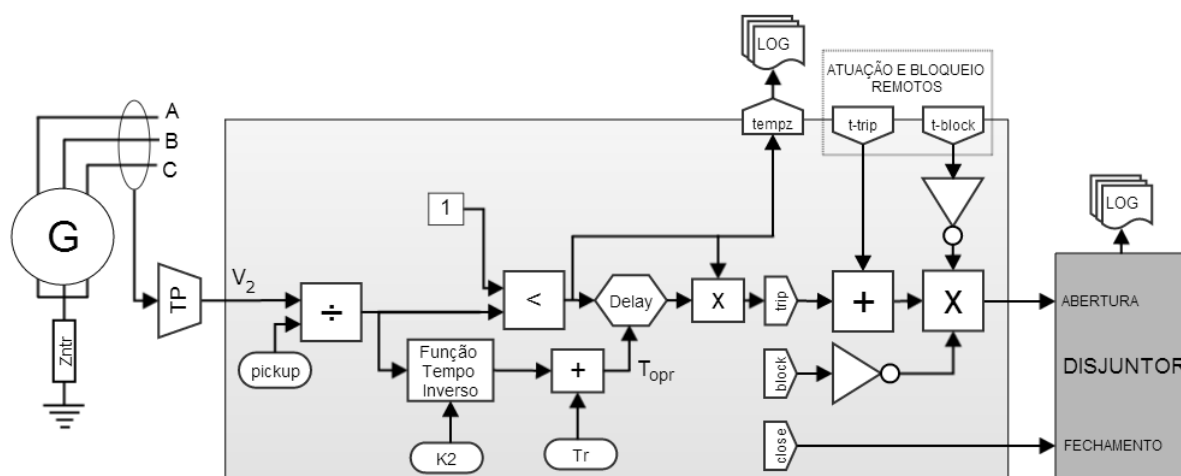


Figura 9.11 Relé de sobretensão de sequência negativa

9.3.11 Relé de Imagem Térmica (49)

A proteção de máquinas elétricas contra aquecimento excessivo devido a sobrecargas pode operar tanto com base em medição direta de temperatura (por meio de dispositivos RTD posicionados nos enrolamentos), ou com base em medição de corrente para avaliação da temperatura (por meio de um modelo de “imagem térmica de corrente”), ou por uma combinação de ambos. Como o software Simulight é um simulador de grandezas elétricas do sistema de energia, foi desenvolvido o modelo de imagem térmica ilustrado na Figura 9.12, que opera unicamente a partir da corrente de armadura da máquina.

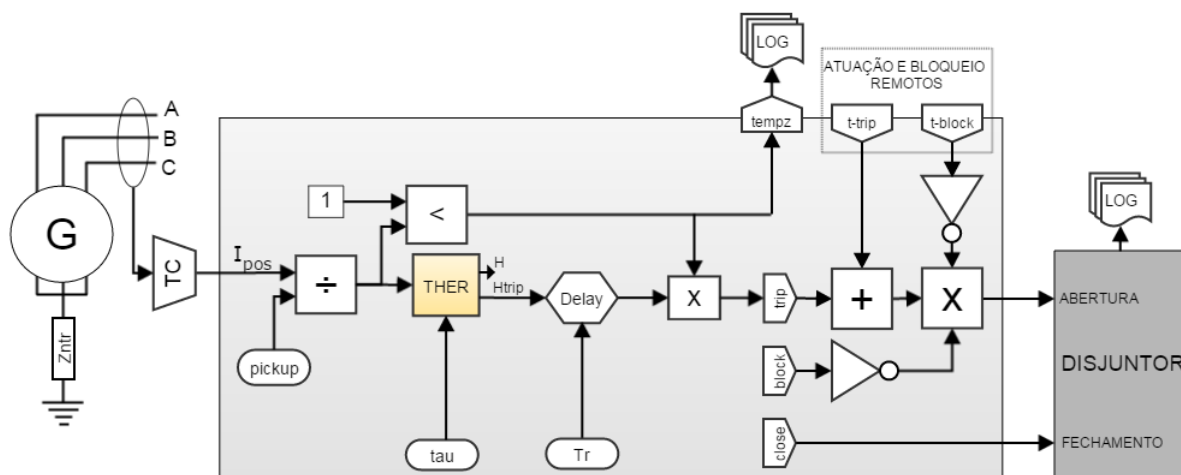


Figura 9.12 Relé de Imagem Térmica.

Na Figura 9.12, o TC é pré-configurado para medir a corrente de sequência positiva I_{pos} da máquina, que é dividida pelo valor ajustado de *pickup*. Valores de corrente maiores que o de *pickup* sinalizam pela porta *tempz* a sensibilização do relé térmico. A razão I_{pos} / I_{pickup} é imputada no bloco computacional THER dedicado para o cálculo do nível de aquecimento da máquina, representado pela variável de saída *H*, que pode assumir valores reais entre 0 (máquina na temperatura ambiente) e 1 (máquina na temperatura máxima admissível, condição de trip). A saída auxiliar *Htrip* é uma saída discreta com valor 0, assumindo o valor 1 somente na condição de trip ($H = 1$). O uso da saída discreta simplifica a construção do modelo do relé, por não requerer blocos comparadores adicionais.

O bloco THER implementa a solução numérica da equação diferencial do modelo térmico da máquina, como descrito nas referências [28] e [29]. O nível de aquecimento da máquina num dado instante de tempo é calculado por:

$$H(t) = \left(\frac{I_{pos}}{I_{pickup}} \right)^2 \frac{\Delta t}{\Delta t + \tau} + \frac{\tau}{\Delta t + \tau} H(t - \Delta t)$$

onde τ é a constante de tempo de aquecimento da máquina e $H(t - \Delta t)$ é o nível de aquecimento no instante de tempo do passo anterior da simulação. No início da simulação ($t = 0$), a condição inicial do nível de aquecimento é calculado a partir da corrente da máquina por:

$$H(0) = \left(\frac{I_{pos}}{I_{pickup}} \right)^2$$

De forma análoga aos demais relés, acrescentou-se ainda na função 49 uma característica adicional de tempo definido, representado pelo parâmetro T_r e implementada por um bloco *Delay* em cascata com a saída *Htrip*. Fazendo $\tau = 0$, elimina-se a inércia térmica e o relé opera unicamente com característica de tempo definido. Fazendo $T_r = 0$, elimina-se o atraso no bloco *Delay* e o relé opera unicamente por característica térmica. Este recurso permite implementar funções de alarme de tempo definido utilizando-se a mesma função de proteção 49.

9.3.12 Relé Reversão de Potência (32)

A Figura 9.13 apresenta o modelo do relé de reversão de potência ativa (ou relé de motorização), tipicamente aplicado em unidades geradoras não para proteção da máquina síncrona, mas sim para proteção da máquina acionadora ou do sistema elétrico. Um transdutor de potência representado pelo bloco PQ entrega ao relé o valor da potência ativa total que entra no gerador (somatório das potências nas fases), que assume um valor positivo no caso de motorização. O relé é sensibilizado para potências maiores que o valor de pick-up, e opera com característica de tempo definido pelo parâmetro T_r .

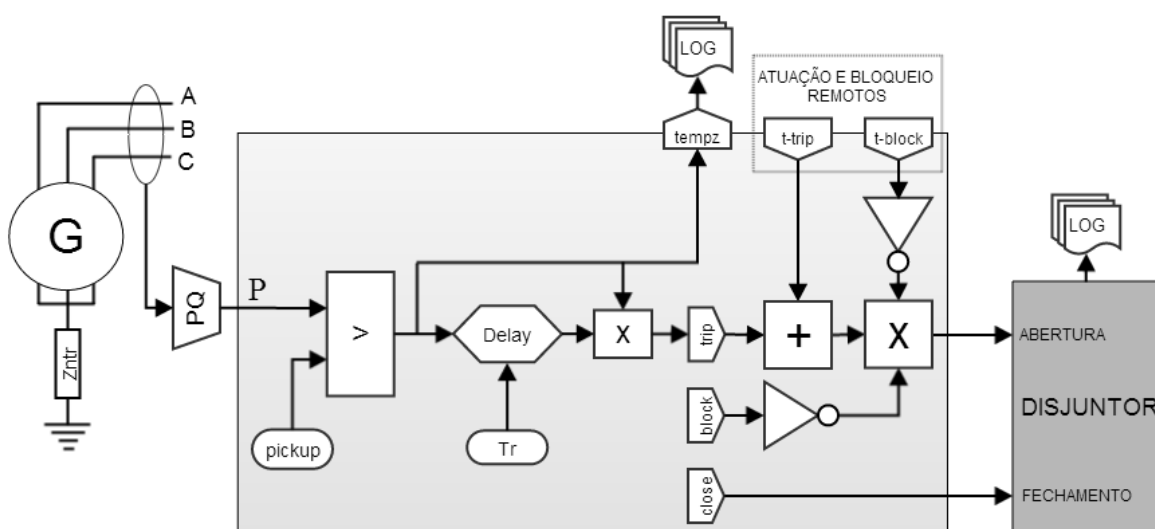


Figura 9.13 Relé reversão de potência ativa (motorização)

9.3.13 Relés de Subfrequência (81u) e Sobrefrequência (81o)

A Figura 9.14 apresenta os modelos dos relés de subfrequência (81u) e sobrefrequência (81o), que diferem entre si somente no operador utilizado no bloco comparador com o valor de pick-up ($<$ ou $>$, respectivamente). A característica é de tempo definido pelo parâmetro T_r . Um transdutor de frequência representado pelo bloco FR entrega ao relé um valor de frequência elétrica no ponto de conexão (frequência de barra), calculada a partir da derivada do ângulo de fase da tensão de sequência positiva neste ponto.

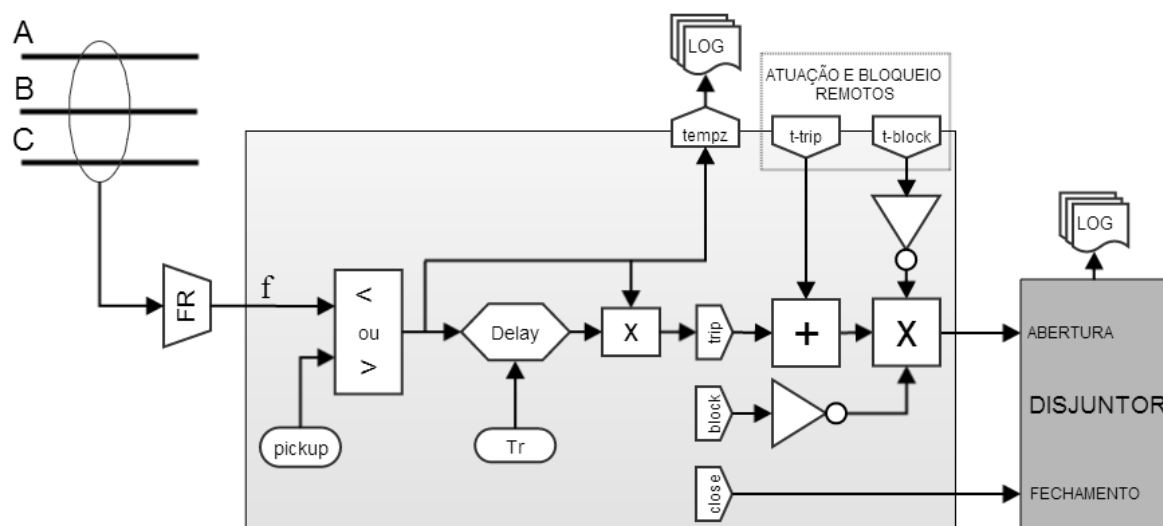


Figura 9.14 Relés de subfrequência e sobrefrequência

9.3.14 Relé de Sobre-Excitação Volts por Hertz (24)

A Figura 9.15 apresenta o modelo do relé de proteção contra sobre-excitação (ou relé de volts por hertz). Os transdutores representados pelos blocos TP e FR entregam ao relé o valores da tensão e frequência, respectivamente. A razão destas grandezas é comparada com o valor pick-up e o relé opera com característica de tempo definido pelo parâmetro T_r .

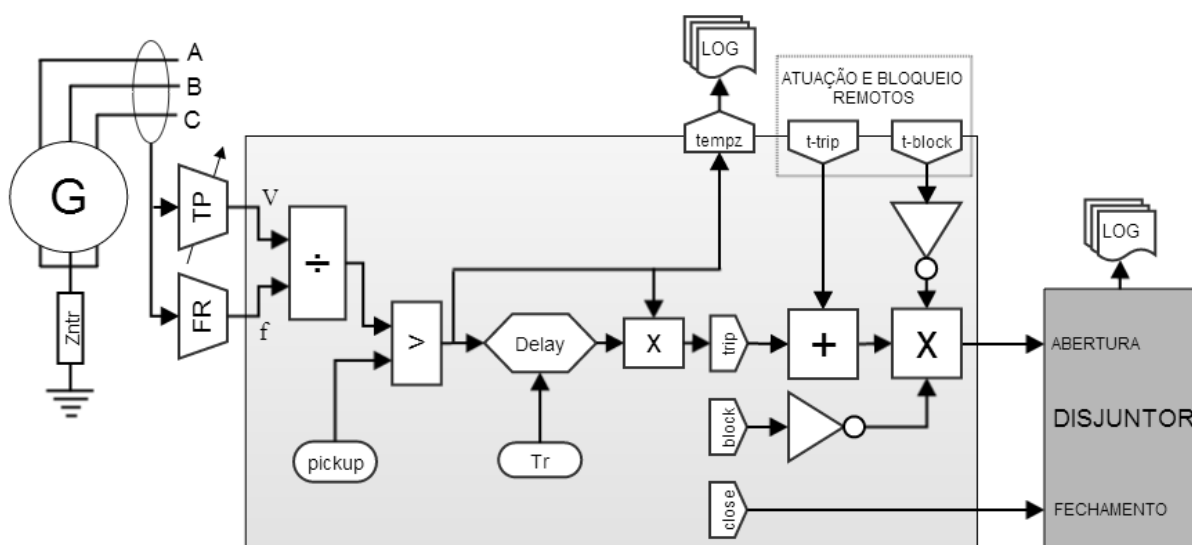


Figura 9.15 Relé de sobre-excitação volts por hertz

9.3.15 Relé de Distância (21)

A Figura 9.16 apresenta o modelo desenvolvido para o relé de distância. Os transdutores de tensão e corrente configuráveis entregam ao relé os fasores tensão e corrente medidos em um ponto do sistema elétrico, sendo então computada a impedância complexa Z vista a partir deste ponto. Uma impedância Z_o ($R_o + j X_o$) definida como parâmetro é subtraída da impedância Z , e o módulo da impedância resultante é comparado com o valor de pick-up. Para valores menores que o do parâmetro *pickup*, o relé opera com

característica de tempo definido pelo parâmetro T_r . A Figura 9.17 mostra o diagrama de operação do relé de distância. A região de operação é definida no plano R-X como um círculo com centro em (R_o, X_o) e raio igual ao parâmetro *pickup*.

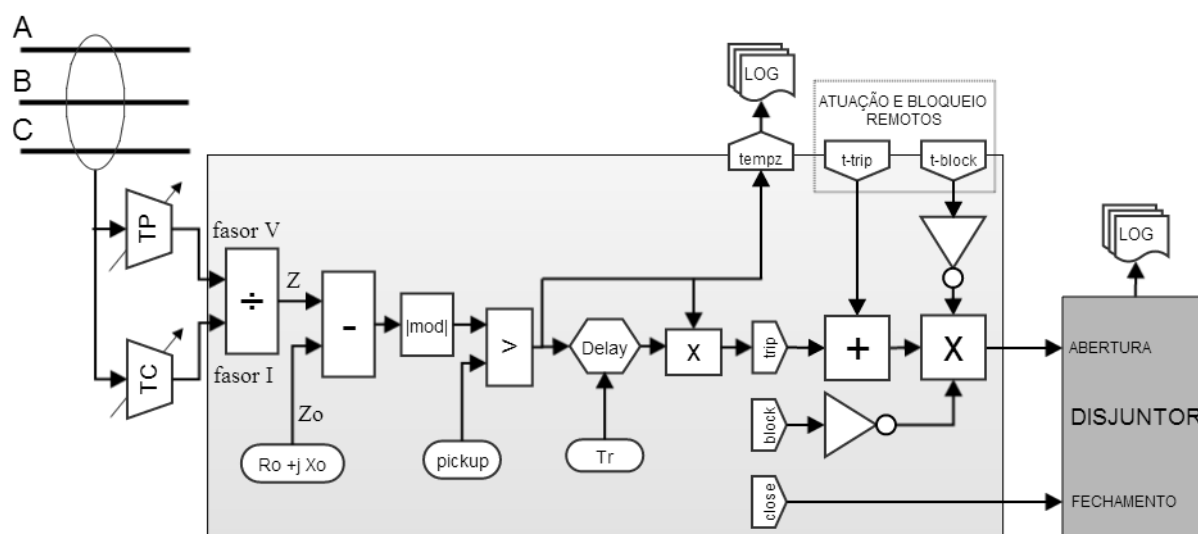


Figura 9.16 Relé de distância

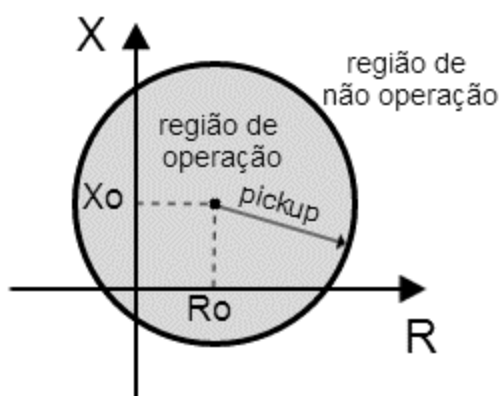


Figura 9.17 Diagrama de operação do relé de distância

9.3.16 Relé de Perda de Excitação (40)

A Figura 9.18 mostra o modelo do relé de perda de excitação (ou perda de campo) em geradores, enquanto que a Figura 9.19 mostra o seu diagrama de operação. Este relé é um caso particular do relé de distância (função 21), onde o parâmetro R_o é nulo, e o parâmetro X_o , assumido nesta aplicação como tendo sempre um valor negativo e maior em valor absoluto que o valor de pick-up (isto é, região de operação capacitiva), e sendo o seu valor absoluto denominado X_c (isto é, X_c deve ser informado sempre como um valor positivo e maior que o valor de pick-up). Os fasores tensão e corrente utilizados no cálculo da impedância são os de sequência positiva.

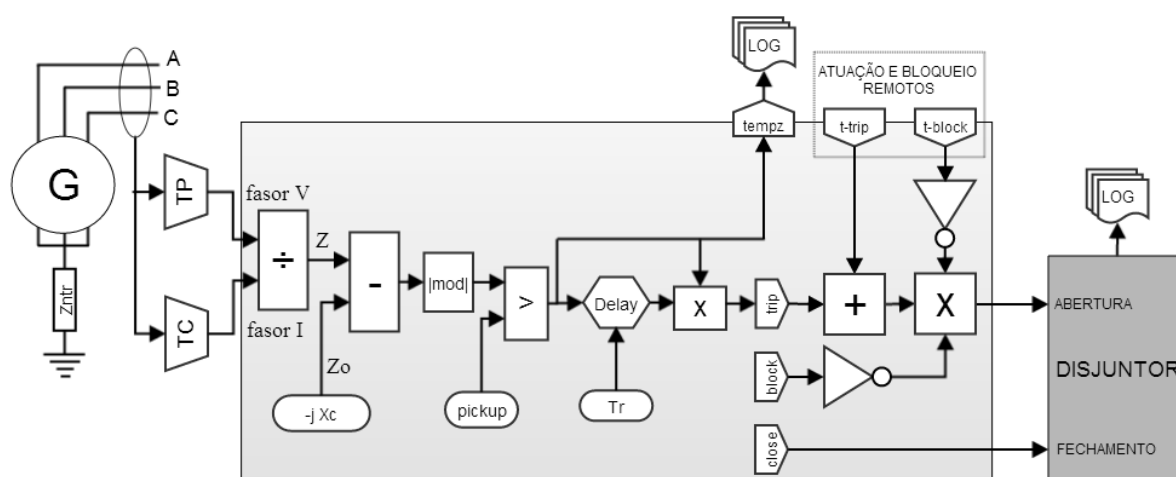


Figura 9.18 Relé de perda de excitação

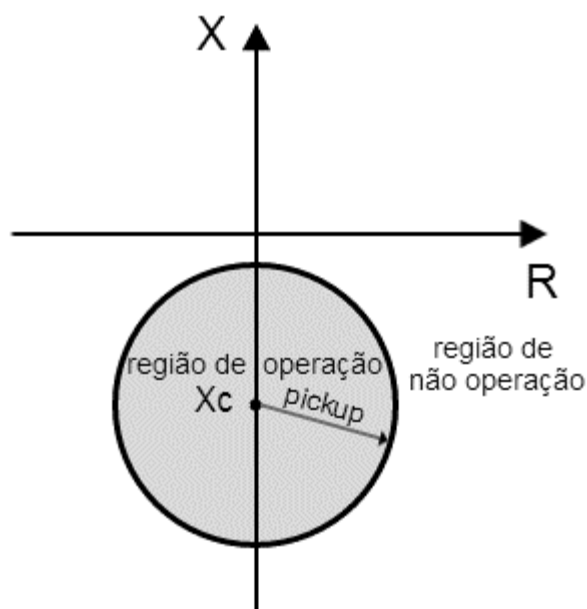


Figura 9.19 Diagrama de operação do relé de perda de excitação

Tipicamente os ajustes de *pickup* e X_c são escolhidos como:

$$pickup = \frac{1}{2} X_d$$

$$X_c = \frac{1}{2} (X'_d + X_d)$$

onde X_d e X'_d são as reatâncias síncrona e transitória do gerador, respectivamente.

9.3.17 Relé de Verificação de Sincronismo (25)

A Figura 9.20 mostra o modelo do relé de verificação de sincronismo. O relé utiliza dois transdutores de tensão TP1 e TP2 conectados nos lados de um disjuntor inicialmente aberto e que será fechado somente quando houver condição de sincronismo entre os terminais. Os TPs são previamente configurados para medir tensão de sequência positiva. A condição de sincronismo é obtida quando a magnitude da diferença entre as tensões V2 e

V1 for menor que um valor pré-estabelecido, e permanecer assim por um intervalo de tempo suficiente para garantir o fechamento seguro do disjuntor. Graficamente, como ilustrado na Figura 9.21, quando o fasor V2-V1 permanecer dentro o círculo de raio igual ao parâmetro *pickup* pelo tempo *Tr*.

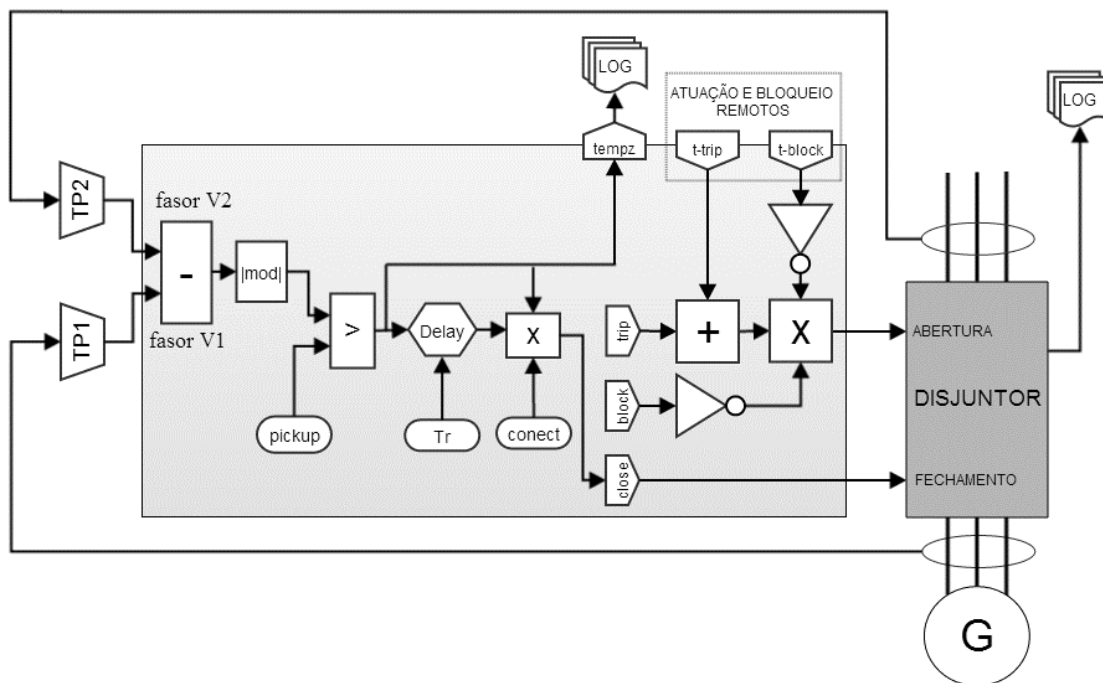


Figura 9.20 Relé de verificação de sincronismo

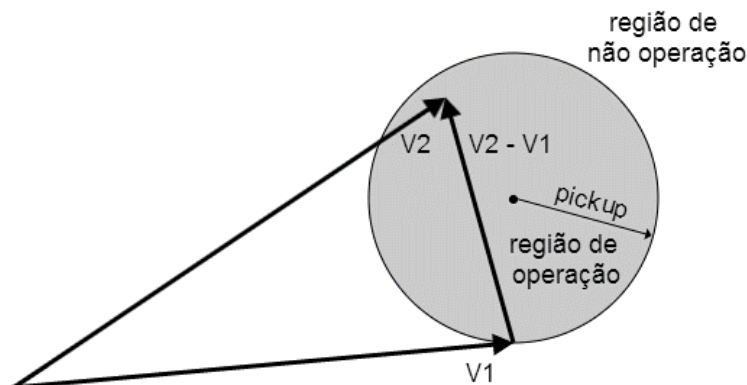


Figura 9.21 Diagrama de operação do relé de verificação de sincronismo

9.3.18 Função Direcional (67)

Os relés 50, 51 (sobrecorrente) e 21 (distância) são dotados de uma característica adicional para identificar a direção da corrente ou impedância medida, isto é, possuem também uma função direcional (67). A Figura 9.22 apresenta o modelo da função direcional instalada dentro da estrutura do relé base. Os transdutores de corrente e tensão configuráveis entregam ao relé os ângulos de fase da corrente e da tensão. Esta função define uma região de bloqueio e uma região de atuação (não bloqueio), onde os parâmetros *teta* e *R90°* permitem o ajuste do relé. A função 67 pode ser melhor entendida graficamente através da Figura 9.23, onde estão representadas as duas regiões definidas pelo relé. Assim,

correntes na região de disparo do rele I1 permitem a atuação de uma determinada função (sobrecorrente, por exemplo) enquanto correntes na região de bloqueio do rele I2 inibem a atuação da função.

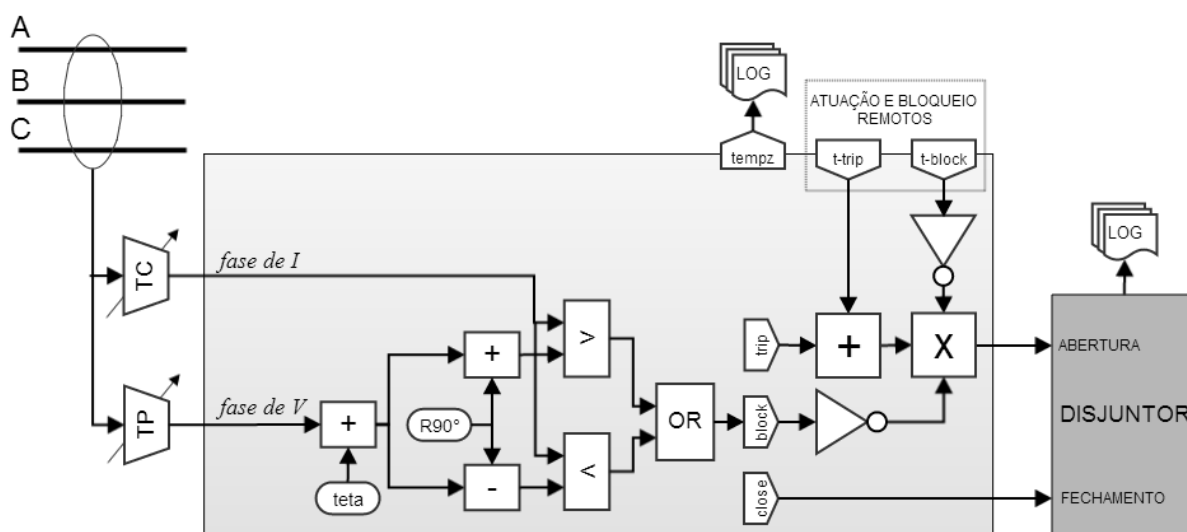


Figura 9.22 Função direcional

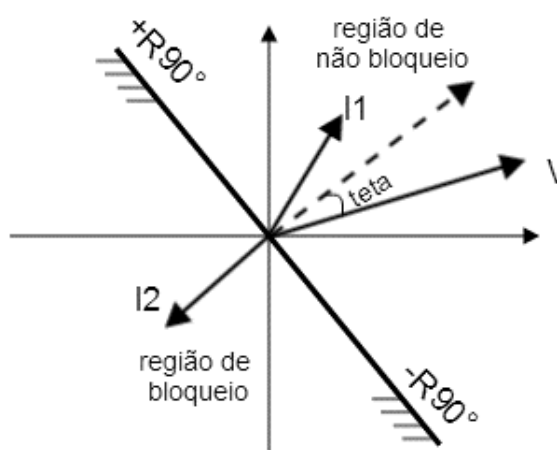


Figura 9.23 Diagrama de operação da função direcional

9.4 Desenvolvimento da Interface Simprot

O desenvolvimento da interface SimProt tem como foco a implementação de diversas funcionalidades que visam agilizar o estudo da proteção de sistemas geradores. Dentre esses recursos, está a busca rápida por geradores, útil em modelos de sistemas de grande porte, o acesso rápido aos relés instalados, a instalação de novos relés num gerador, a visualização de suas características e ainda a possibilidade de analisar o desempenho da proteção através da simulação de distúrbios no domínio do tempo.

9.4.1 Utilização da ferramenta

A utilização da ferramenta Simprot é resumida no fluxograma da Figura 9.24. O usuário inicia o Simulight e carrega o sistema que deseja estudar. As etapas seguintes são descritas nas seções 9.4.2 (seleção de gerador e tela principal), 9.4.3 (dados da proteção) e 9.4.4 (simular defeitos e resultados).

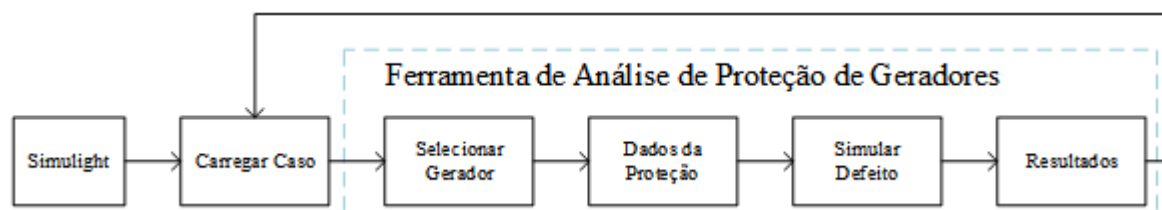


Figura 9.24 Fluxograma de utilização da ferramenta de análise de proteção de geradores.

9.4.2 Acesso à tela principal

A ferramenta de Análise de Proteção de Geradores, também chamada Simprot, é acessada pela interface principal. Na Figura 9.25 estão destacados o botão na barra de ferramentas e o menu para acesso da ferramenta. A ausência do botão e do menu indica que a versão instalada do Simulight não possui a ferramenta Simprot.

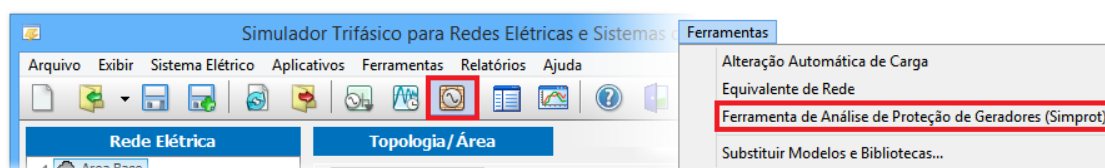


Figura 9.25 Acesso à ferramenta de Análise de Proteção de Geradores (Simprot).

Ao acessar o botão ou o menu, a janela de seleção de geradores da Figura 9.26 surgirá. Por padrão, serão exibidos apenas os geradores que possuam relés de proteção associados a seus terminais. Essa opção pode ser desabilitada desmarcando “Listar apenas geradores com proteção”. A listagem de geradores é organizada por Subestação (na figura “FONTES---138”), indicando a sua área (na figura “* LIGHT ENERGIA *”). O campo *Procurar* busca pelo nome de geradores, subestações, áreas ou empresas conforme o usuário digita. Selecione um gerador e clique Ok para continuar na ferramenta.

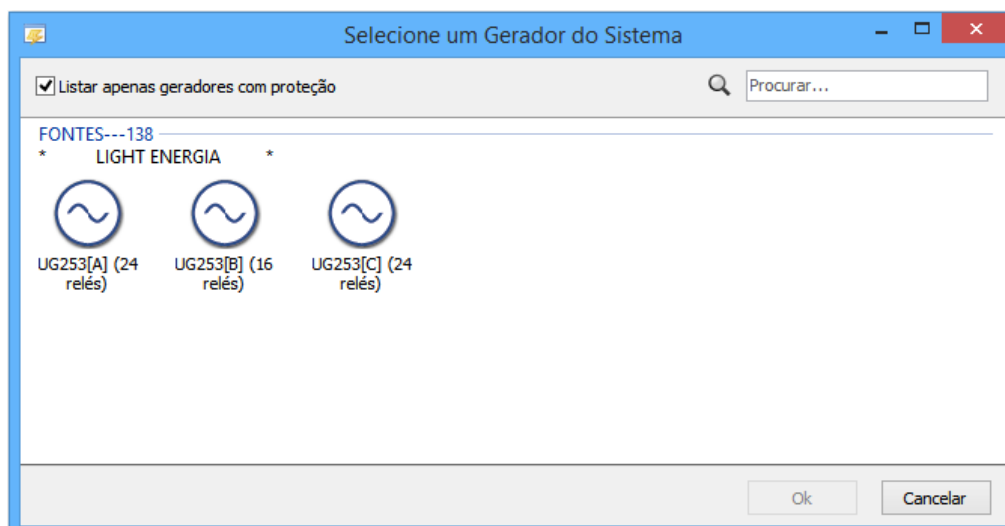


Figura 9.26 Tela de seleção de geradores.

A próxima tela é a interface principal da ferramenta Simprot. Essa tela agrega todas as funcionalidades da ferramenta: unidades de proteção instaladas, características da proteção, acesso ao gerador e aos modelos da proteção, simulação de defeitos, relatórios de eventos e gráficos.

Essa tela é dividida em duas partes, conforme pode ser visto na Figura 9.27. Ao lado esquerdo está o diagrama de proteção do gerador e ao direito a área de visualização de características da proteção, à simulação e aos resultados da simulação.

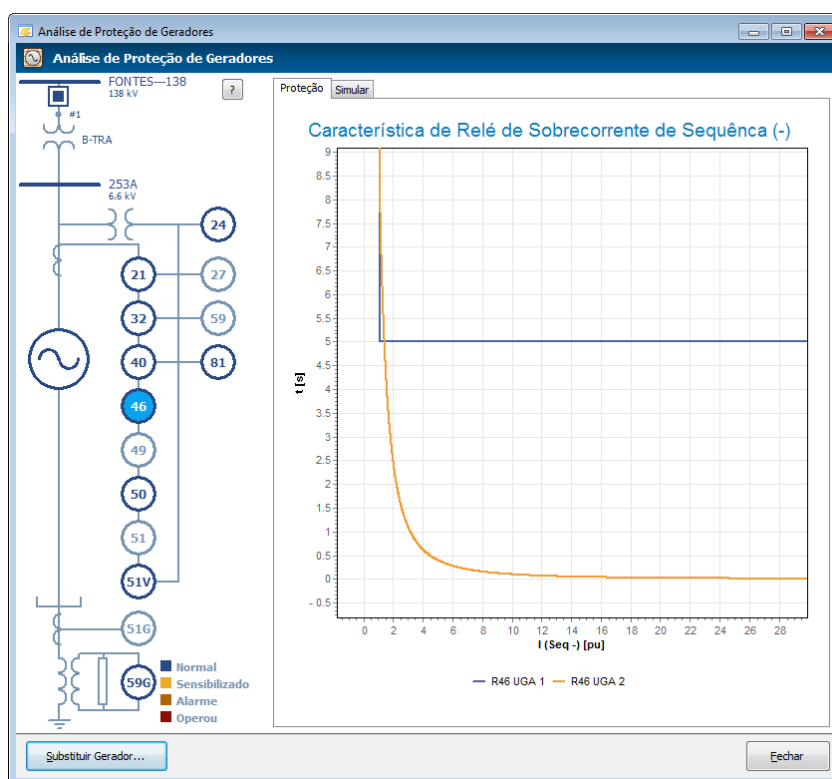


Figura 9.27 Interface principal da ferramenta Simprot.

9.4.3 Diagrama e Gráfico de Característica da Proteção

O diagrama de proteção pode ser melhor visualizado na Figura 9.28(a). Ele indica alguns elementos associados ao gerador em estudo, como o barramento de alta tensão e de baixa tensão e disjuntores associados. Dados de bases do gerador podem ser acessados pelo botão “?” no canto superior direito, indicados na Figura 9.28 (b).

Os elementos mais importantes são os relés, que são agrupados por função. Aquelas com coloração mais clara indicam que não há relé da função instalado mas que é impossível instalar. A Figura 9.28 (c) mostra o menu acessível pelo clique direito sobre o relé não instalado. Aquelas com a borda azul mais escura indicam que há ao menos um relé da função instalado. A Figura 9.28 (d) mostra o menu associado ao clique direito, com mais opções.

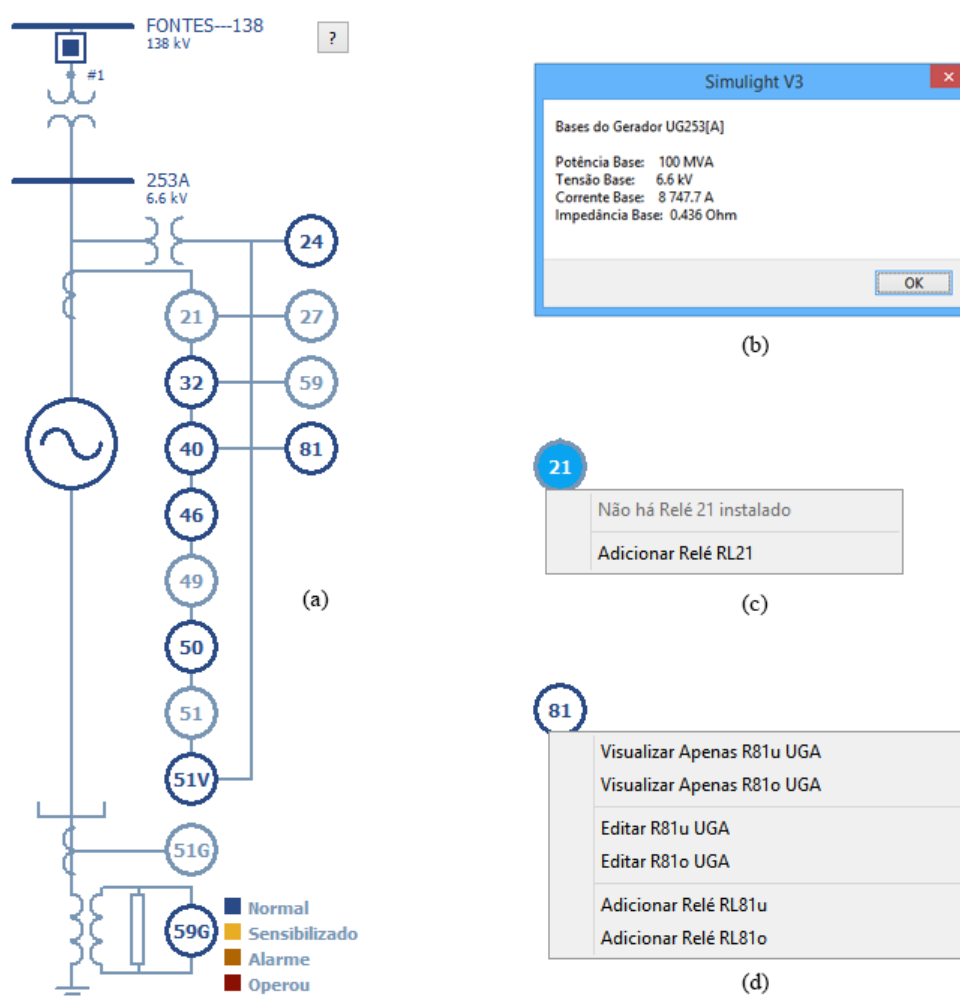


Figura 9.28 (a) Diagrama de proteção; (b) bases associadas ao sistema e gerador; (c) menu de adição de relé; (d) menu de visualização e edição de relé instalado.

O código de coloração dos relés é melhor definido na Tabela 9.1. Durante a simulação, os símbolos dos relés podem mudar de cor conforme os relés são sensibilizados ou atuam. Um estado é mais prioritário que o outro, isto é, se de uma determinada função

um relé foi sensibilizado e outro operou abrindo disjuntor, o diagrama indicará a operação por ser prioritária.

Tabela 9.1. Código de cores do diagrama de relés

Cor	Significado	Descrição
	Função não instalada	Indica que não há relés dessa função instalado para esse gerador. Um relé pode ser instalado através do clique com o clique direito.
	Função instalada	Indica que há ao menos um relé dessa função instalado nesse gerador. O relé pode ser editado através do duplo clique ou por menu do clique direito.
	Função sensibilizada	Indica que ao menos um relé da função foi sensibilizado e poderá/poderia atuar após o seu tempo de operação.
	Função em alarme	Indica que ao menos um relé da função passou do seu tempo de atuação e emitiu um alarme. Estado de maior prioridade que o sensibilizado.
	Função operou	Indica que ao menos um relé da função operou abrindo um disjuntor. Estado de maior prioridade que o de alarme.

O duplo clique em um relé abre a tela de edição de relé descrita no item Proteção (5.3.6). Havendo mais de um relé instalado, o primeiro relé instalado será o preferencial na edição. Utilizando o menu da Figura 9.28 (d) é possível editar outro relé e o mesmo menu dá acesso para visualização de característica individualmente (*“Visualizar Apenas ...”*). Para exibir e comparar mais características, use as opções *“Incluir Relé ...”* que adicionam na visualização atual outra característica. O resultado pode ser visto na Figura 9.29 (a). Um novo relé da função pode ser adicionado com a opção *“Adicionar Relé ...”*.

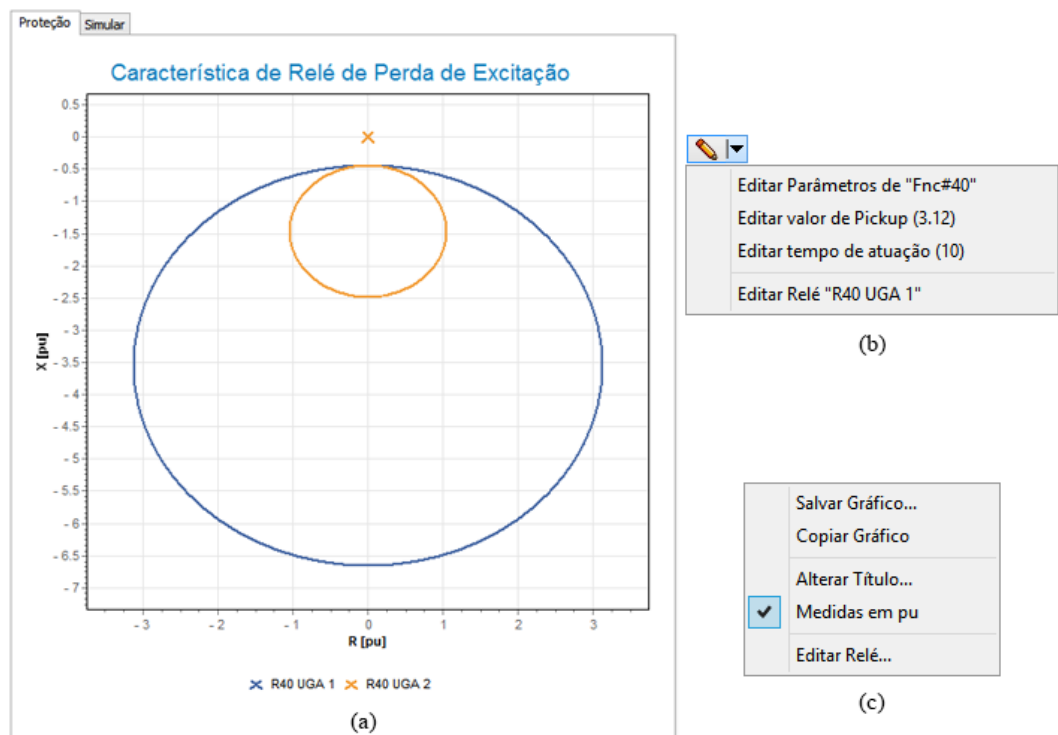


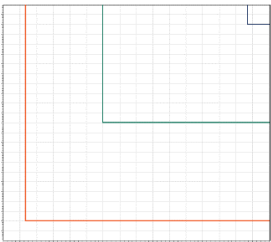
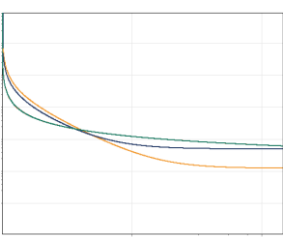
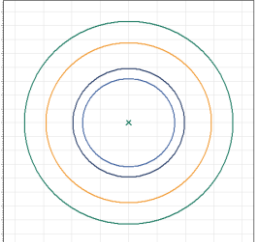
Figura 9.29 (a) característica da proteção; (b) menu de edição de característica; (c) menu do gráfico.

A Figura 9.29 (a) exibe, por padrão, a característica em *pu* do(s) relé(s) selecionado(s) no diagrama da Figura 9.28 (a). Se apenas uma característica estiver sendo exibida, é possível editá-la através do botão em forma de lápis no canto superior direito do gráfico, conforme mostra a Figura 9.29 (b). Esse botão dá acesso a um menu que permite acesso ao modelo (“*Editar parâmetros de ...*”), editar valor de *pick-up* (parâmetro *pickup*, se disponível), editar tempo de atuação (parâmetro *Tr*, se disponível) e editar o relé diretamente.

Se desejado, as unidades do gráfico podem ser alteradas acessando o menu de clique direito sobre o diagrama e desmarcando “*Medidas em pu*”, conforme Figura 9.29 (c). Outras opções do menu incluem copiar e salvar o gráfico em arquivo ou editar o título exibido.

As características possíveis exibidas no gráfico são listadas na Tabela 9.2, bem como as funções dos relés que as adotam. Relés que implementam característica de tempo inverso podem ser configurados como tempo definido. Relés cuja característica é uma região também são do tipo tempo definido, embora a grandeza monitorada deve ultrapassar um limite em duas dimensões.

Tabela 9.2. Características exibidas na ferramenta

Tipo	Tempo Definido	Tempo Inverso	Região
Gráfico			
Descrição	Tempo definido para	Tempo é inversamente	Atua se a grandeza

	atuar quando medida superar <i>pickup</i>	proporcional ao valor da medida	monitorada entrar ou sair da região definida
Relés	24, 32, 50, 810/U	27, 46, 47, 51, 51V, 51G, 59, 59G	21 e 40

9.4.4 Simulação e Resultados

Abrindo a aba “*Simular*” na tela do Simprot dá acesso às opções de simulação da Figura 9.30. Elas são opções de visualização durante a simulação, duração e passo de simulação e tipo de evento/defeito aplicado.

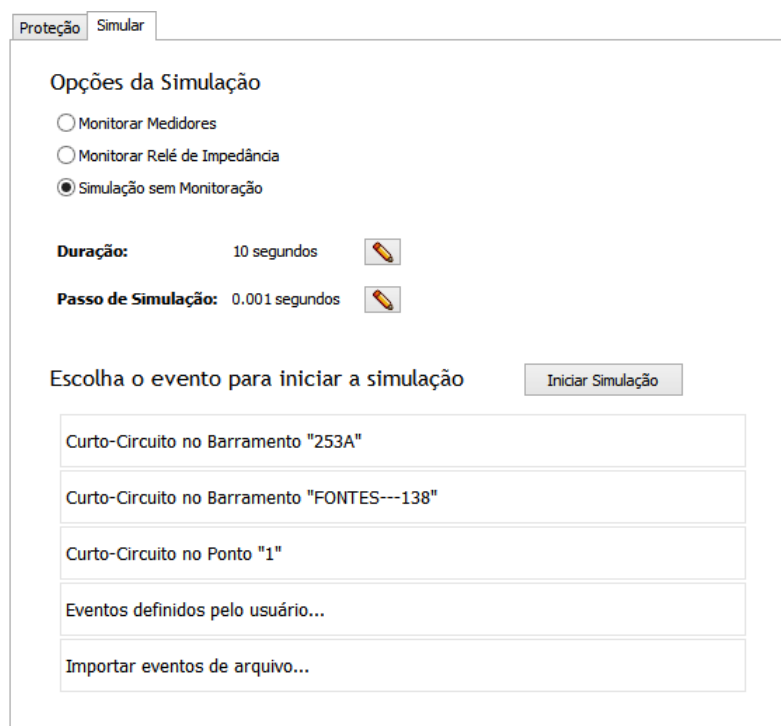


Figura 9.30 Aba de configuração da simulação

A Tabela 9.3 identifica as diferentes opções.

Tabela 9.3. Opções de monitoração na simulação

Tipo	Descrição
Monitorar Medidores	Mostra uma lista de medidores associados ao gerador em estudo cuja curva de medição pode ser monitorada durante a simulação. Útil para acompanhar se um sistema é estável ou a acomodação após a aplicação de um distúrbio. Pode apresentar impacto na performance em simulações mais longas.
Monitorar Relé de Impedância	Exibe, durante a simulação e ao final dela, um gráfico de excursão da impedância do gerador. Essa opção estará disponível apenas se houverem instalados quatro medidores: módulo e ângulo da tensão, módulo e ângulo da corrente. Todos os medidores devem medir o mesmo tipo de componente (Exemplo: sequência positiva ou fase A).

Tipo	Descrição
	Além disso, é necessário selecionar um relé do tipo 21 ou 40. Apresenta impacto na performance da simulação.
Simulação sem Monitoração	Opção com monitoração gráfica desabilitada (padrão). Recomendável quando se tem conhecimento do efeito do distúrbio ou deseja-se melhor performance.
Duração	Duração da simulação em segundos. O valor padrão é 10. O valor deve ser suficiente para acomodar os eventos e seus efeitos. A simulação pode ser interrompida uma vez iniciada através do botão “Parar”.
Passo de Simulação	Configura o passo de cálculo da simulação. O valor padrão é 0,001 (1 milissegundo) mas alguns casos podem ser executados com 0,005 ou 0,010. Quanto menor o passo e maior a duração, maior a quantidade de memória utilizada o tempo de processamento necessário para concluir a simulação. Uma solução para divergências no início da simulação é a redução do passo.
Evento de Curto-Circuito	Aplica um evento de curto-circuito no ponto ou barramento indicado aos 100 milissegundos de simulação. Abre uma janela de edição de evento para a configuração da natureza do mesmo (trifásico, etc).
Eventos definidos pelo usuário	Abre a tela de controle de eventos descrita em Controle de Eventos (6.2) para que o usuário possa definir os próprios eventos, como aplicação de curtos-circuitos em outras áreas do sistema.
Importar Eventos	Abre a tela de carregamento de arquivo para que o usuário importe eventos pré-definidos de um arquivo.
Iniciar simulação	Executa o fluxo de potência implicitamente e inicia a simulação, bloqueando alguns elementos da interface. Se alguma opção de monitoração for selecionada, exibirá o gráfico.

Durante a simulação, uma listagem monitora o estado dos diversos relés associados ao gerador. Conforme os relés mudem de estado, a lista é preenchida com essas informações e o diagrama é atualizado para indicar as mudanças. A Figura 9.31 mostra que três relés do tipo 51V foram sensibilizados na ordem das fases A, B e depois C. Nesse estado, o relé inicia uma contagem de tempo associado à sua característica e poderá operar abrindo um disjuntor ou emitindo um alarme. O disjuntor que for aberto durante a simulação é atualizado para um símbolo sem preenchimento no diagrama da Figura 9.28 (a).

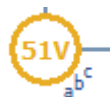


Figura 9.31 Símbolo de relé sensibilizado no diagrama, com indicação de fases sensibilizadas na ordem a, b e c.

Ao final da simulação, a aba “Simular” é ocultada e em seu lugar aparece a aba “Resultados”. A aba “Simular” retornará somente quando o usuário restaurar o caso, reabrir o programa ou abrir um sistema diferente.

A tela inicial da aba “Resultados” é o relatório gráfico da Figura 9.32. Se a opção de monitorar medidor foi utilizada, o gráfico exibido é exatamente o do medidor selecionado. Se a opção de monitorar impedância tiver sido selecionada, o gráfico de impedância será exibido. O usuário pode navegar pelos medidores associados ao gerador pelos botões de navegação na parte inferior ou pela lista suspensa, tal como mostra a Figura 9.32.

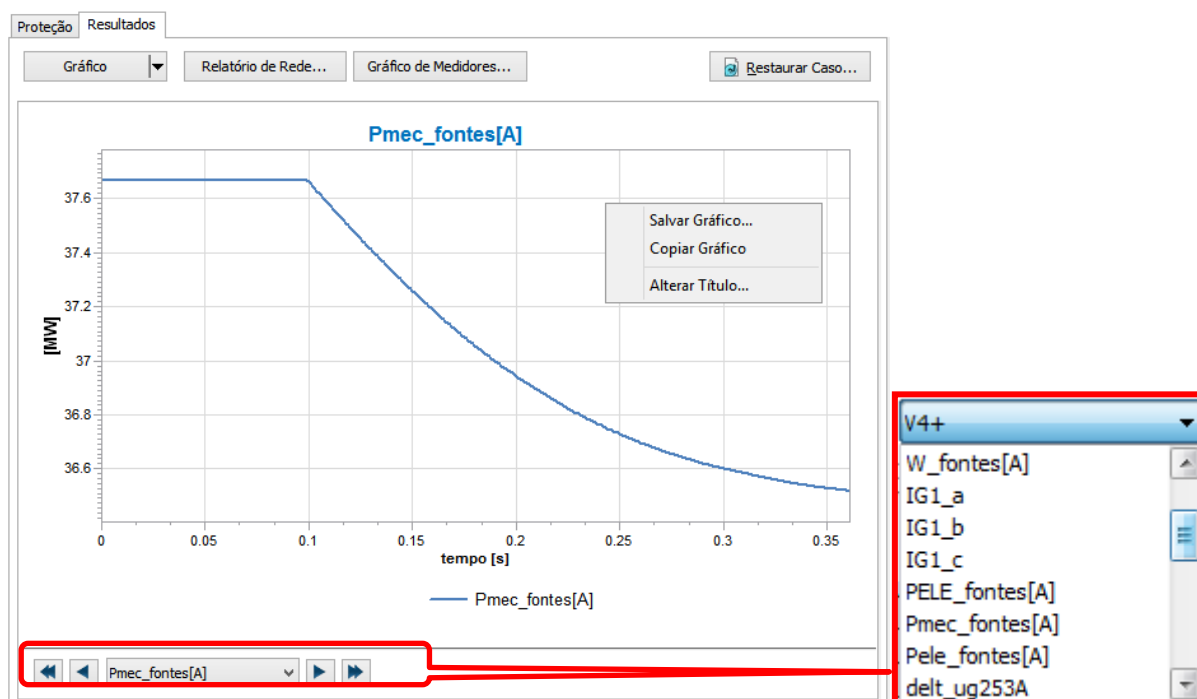


Figura 9.32 Tela de relatório gráfico dos resultados da simulação

O usuário pode salvar ou copiar o gráfico através do menu de clique direito sobre o mesmo. Além disso, ele pode visualizar o relatório de rede (ver Relatórios, 6.4) e gráficos de medidores de todo o sistema (ver Simulação Completa, 6.3). Além do relatório gráfico, outros relatórios são acessíveis da tela do Simprot. São eles o relatório de eventos e o relatório de relés, acessíveis através do menu suspenso do botão “Gráfico”.

O relatório de eventos, indicado na Figura 9.33, indica diversos eventos ocorridos durante a simulação. Todos os eventos são listados pelo tempo de ocorrência, subestação onde ocorreu, tipo e nome de equipamento ou nó afetado e uma mensagem descritiva. O relatório indica a aplicação de algum distúrbio (*Aplicado curto-circuito em barra*), mudança de estado em relés (*Sensibilizou relé de proteção*), mudança da topologia (*Aberto equipamento de manobra* e *O número de ilhas mudou de x para y*), ocorrência de divergência (*divergência detectada*) e finalização, indicando o tempo de processamento. O clique com o botão direito sobre o relatório dá acesso a opção de salvar o relatório em formato texto ou csv.

Proteção		Resultados			
Eventos		Relatório de Rede...		Gráfico de Medidores...	
				Restaurar Caso...	
	Tempo	Subestação	Equipamento	Nome	Mensagem
▶	0.100	FONTES-----	NO	4	APLICADO CURTO-CIRCUITO EM BARRA
●	0.101	FONTES-----	RL51V	R51V UGA 1	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL51V	R51V UGA 2	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL51V	R51V UGA 3	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 UGA 1	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 UGA 2	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 UGA 3	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-2 UGA 1	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-2 UGA 2	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-2 UGA 3	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 SR745...	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 SR745...	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 SR745...	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.101	FONTES-----	RL50	R50-1 SR745...	SENSIBILIZOU RELÉ DE PROTEÇÃO
○	0.313	FONTES-----	RL51V	R51V UGA 1	OPEROU RELÉ DE PROTEÇÃO
▶	0.313	FONTES-----	DISJINT	DJ-B-TRA	ABERTO EQUIPAMENTO DE MANOBRA
○	0.313	FONTES-----	RL51V	R51V UGA 2	OPEROU RELÉ DE PROTEÇÃO
○	0.313	FONTES-----	RL51V	R51V UGA 3	OPEROU RELÉ DE PROTEÇÃO
●	0.313				O numero de ilhas mudou de 1 para 2
○	0.361				Simulação finalizada em 7,515 segundos.

Figura 9.33 Tela de relatório de eventos da simulação

Finalmente, o relatório de relés da Figura 9.34 indica todas as mudanças de estados dos relés, mostrando um subconjunto das informações do relatório de eventos. Esse relatório indica o relé, o seu tipo de ação (*monitoração*, *alarme* e *operação*), o disjuntor associado e o seu estado. O relatório permite a ordenação pelos diferentes campos e colore as mudanças de estado de maneira similar ao diagrama de relés. A opção de salvar também é acessível pelo menu de clique direito.

Proteção		Resultados			
Relés		Relatório de Rede...		Gráfico de Medidores...	
				Restaurar Caso...	
	Tempo	Relé	Estado	Ação	Disjuntor
●	0.101	R50-2 UGA 1	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-1 SR745 U...	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-2 UGA 2	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-2 UGA 3	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-1 SR745 U...	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-1 SR745 U...	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R51V UGA 1	Sensibilizou	Operação	DJ-B-TRA
●	0.101	R51V UGA 2	Sensibilizou	Operação	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-1 UGA 3	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-1 UGA 2	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.101	R51V UGA 3	Sensibilizou	Operação	DJ-B-TRA
●	0.101	R50-1 UGA 1	Sensibilizou	Monitoração	DJ-B-TRA
●	0.313	R51V UGA 1	Operou	Operação	DJ-B-TRA
●	0.313	R51V UGA 2	Operou	Operação	DJ-B-TRA
●	0.313	R51V UGA 3	Operou	Operação	DJ-B-TRA

Figura 9.34 Tela de relatório de relés

9.5 Exemplos

9.5.1 Sistema Máquina x Barra Infinita

A Figura 9.35 apresenta o diagrama do sistema Máquina x Barra Infinita utilizado neste exemplo.

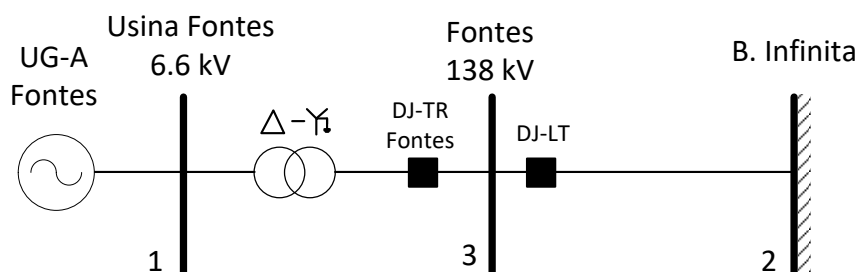


Figura 9.35 Diagrama Unifilar - Máquina x Barra Infinita

O arquivo que modela este sistema está disponível no diretório de instalação do programa com o nome MBINF.FDX. Após carregar este arquivo, pode-se acessar a Ferramenta de Análise de Proteção de Geradores conforme indicado pela Figura 9.36.

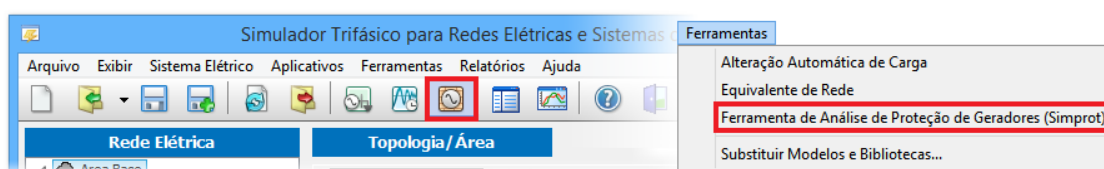


Figura 9.36 Abertura da Ferramenta de Análise de Proteção de Geradores (Simprot)

A Figura 9.37 apresenta a tela inicial da Ferramenta de Análise de Proteção de Geradores. Nesta tela é possível verificar o total de relés instalados na UG-A de Fontes.

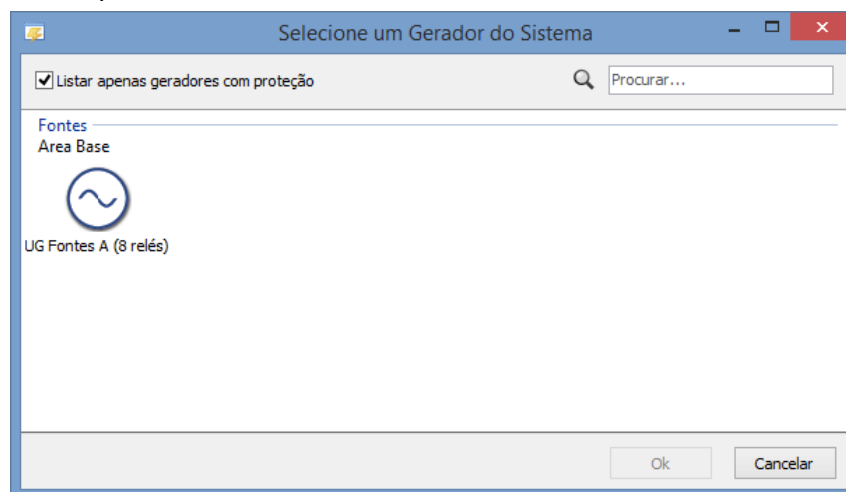


Figura 9.37 Tela inicial da Ferramenta de Análise de Proteção de Geradores (Simprot)

Ao realizar duplo clique no ícone do gerador, a tela de Análise de Proteção de Geradores, detalhada na Seção 5.3.6, é aberta. Como pode ser observado na Figura 9.38, este sistema possui três funções de proteção modeladas. São três relés pertencentes à função 50 (sobrecorrente instantâneo), um em cada fase, três relés da função 51V (sobrecorrente com restrição de tensão), também um em cada fase, e dois na função 81 (sub e sobrefrequência).

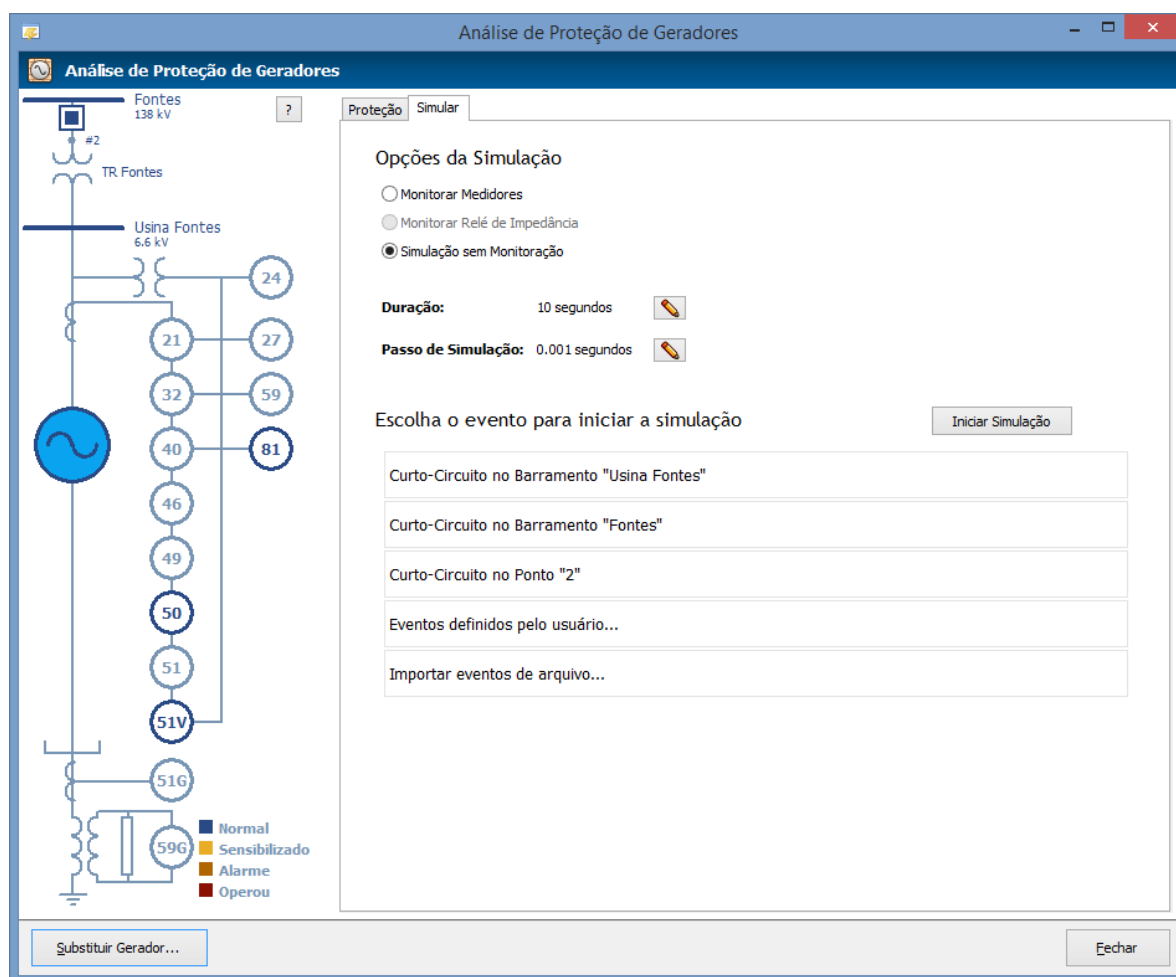


Figura 9.38 Tela de Análise de Proteção de Geradores (Simprot)

Os ajustes dos relés podem ser acessados através da tela de edição de relés, conforme descrito na Seção 5.3.6.

A seguir é aplicado um curto-circuito trifásico franco na barra de 138kV de Fontes Nova. Para tal, basta clicar no botão do evento pré-definido “Curto-Circuito no Barramento “Fontes””, como indicado pela Figura 9.39.

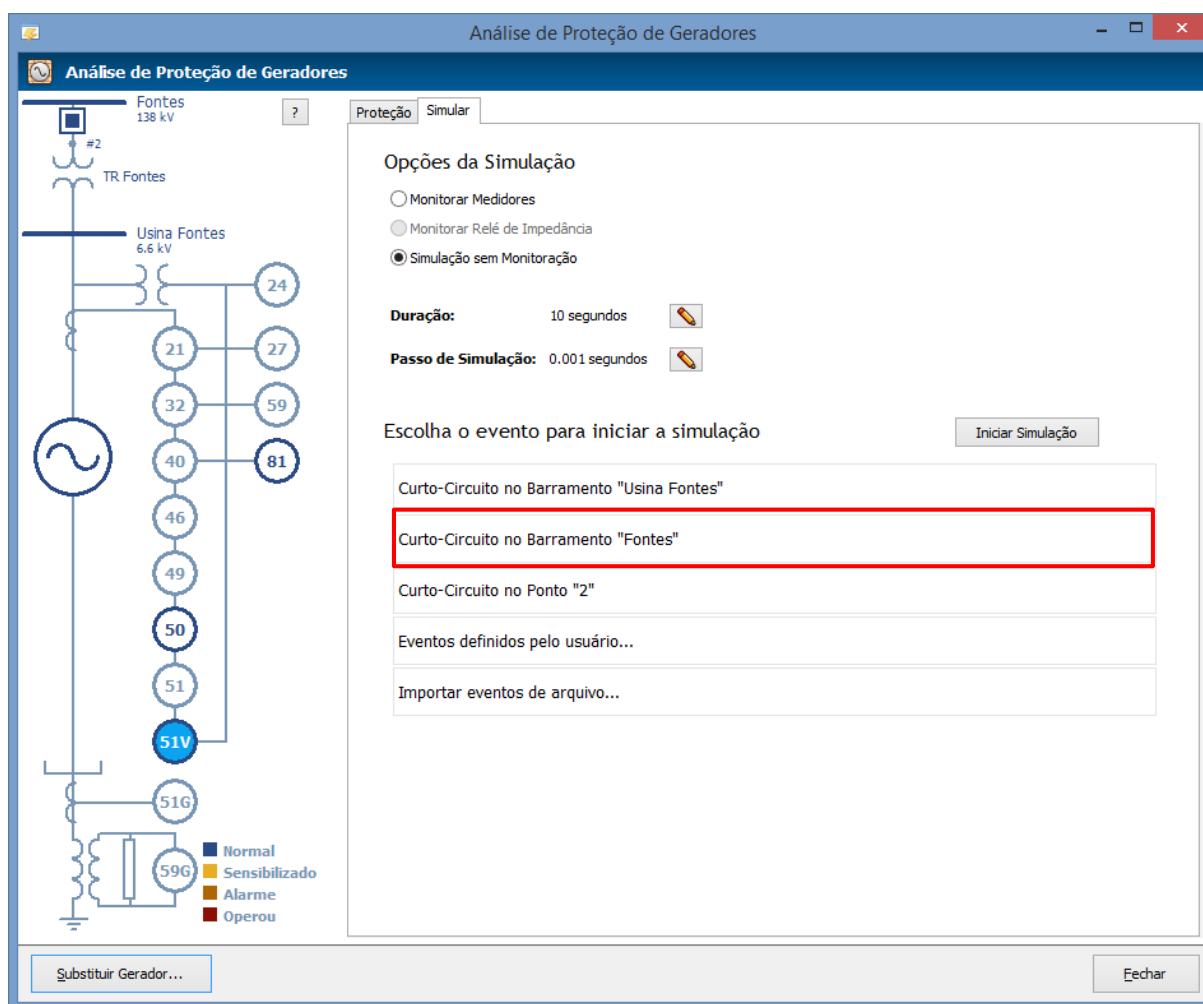


Figura 9.39 Aplicação de evento pré-definido

Então, a tela de edição do curto-circuito, Figura 9.40, é aberta. Pode-se, assim, editar os parâmetros do curto, de acordo com o especificado na Seção 6.2.

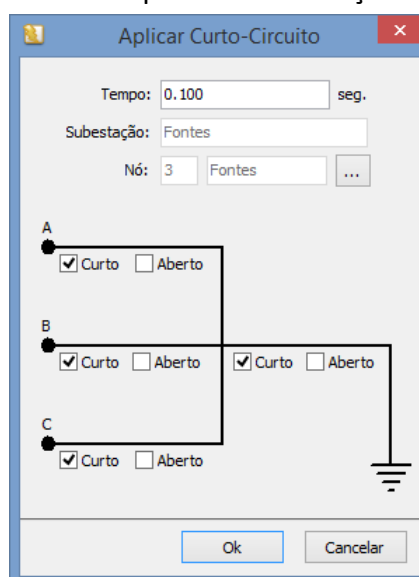


Figura 9.40 Aplicação de evento pré-definido

Após a simulação do evento descrito, pode-se analisar o funcionamento da proteção. A Figura 9.41 apresenta o histórico de eventos e das alterações de estado dos relés. Nota-se

que, os relés de sobrecorrente instantâneos (50) das três fases foram sensibilizados e os relés de sobrecorrente com restrição de tensão (51V) sensibilizam e, posteriormente, operam abrindo o disjuntor TR-Fontes.

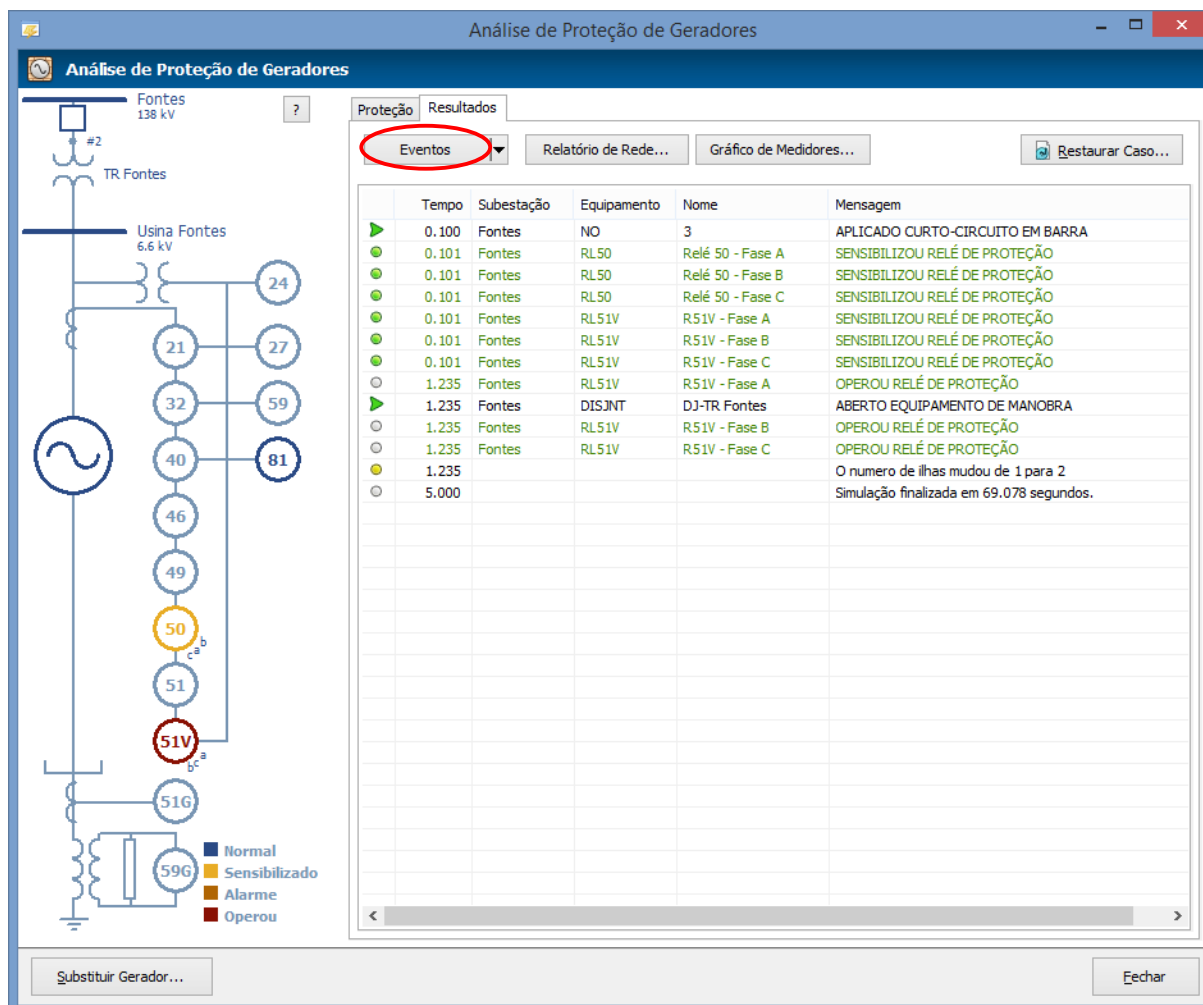


Figura 9.41 Histórico de eventos e estados dos relés

Os estados dos relés também podem ser visualizados alterando-se para o relatório “Relés”, como mostrado na Figura 9.42, ou ainda pelas cores indicadas no diagrama unifilar.

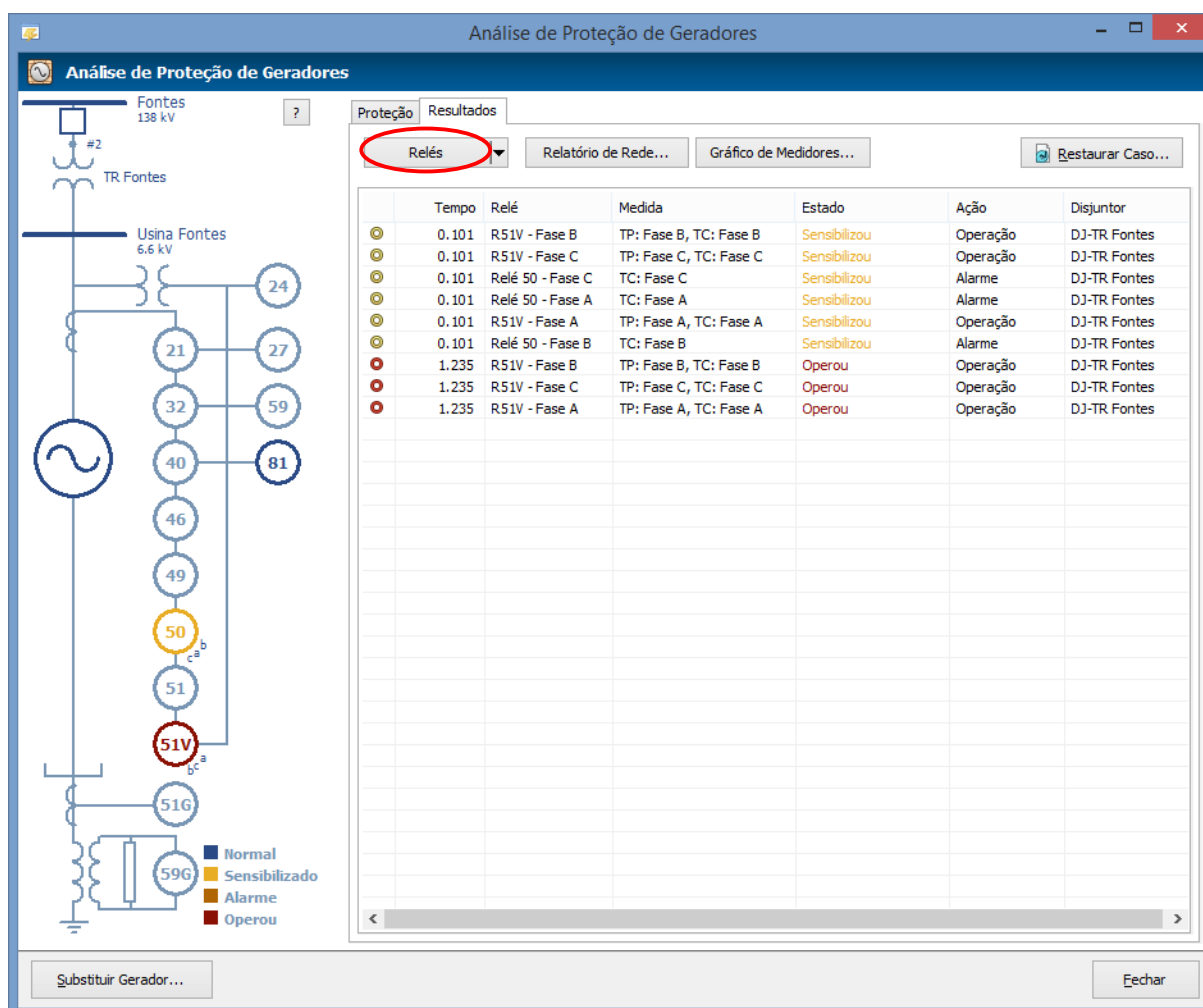
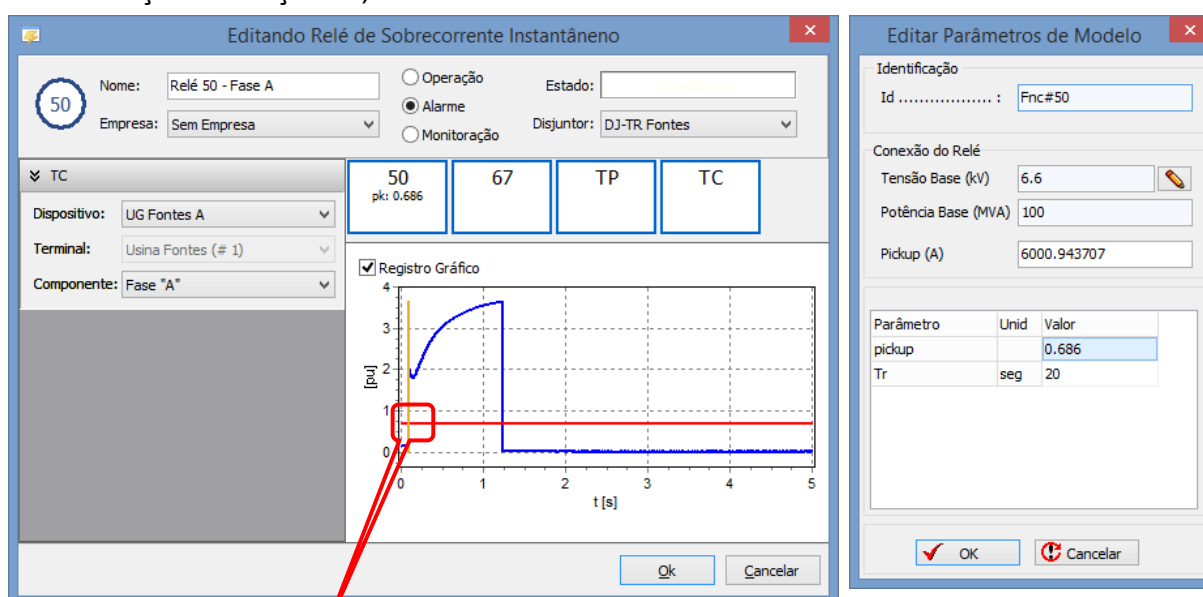


Figura 9.42 Relatório de estado de relés

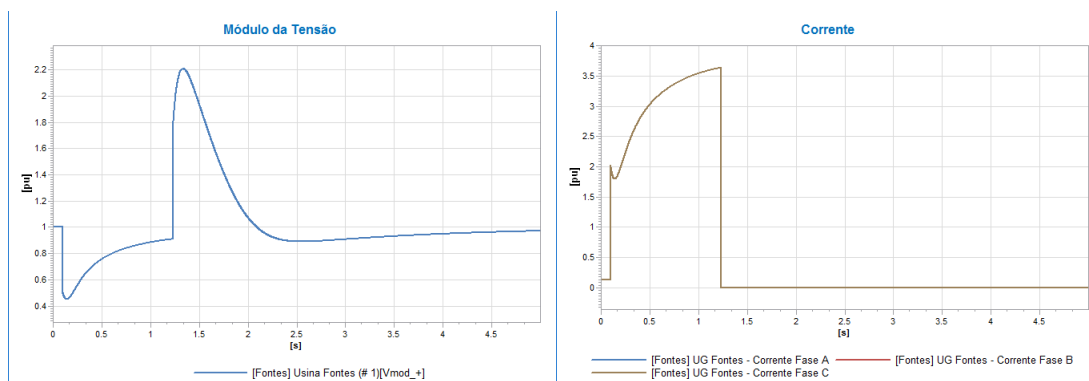
Ao abrir a tela de edição, é possível verificar no registro gráfico o instante de sensibilização e/ou atuação de cada relé. A Figura 9.43 exemplifica o citado para a sensibilização da função 50, fase A.



Sensibilização do relé

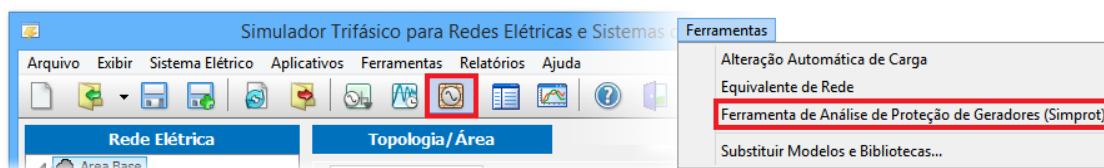
Figura 9.43 Instante de sensibilização – relé 50 fase A

A seguir, a Figura 9.44 mostra os gráficos de módulo da tensão de sequência positiva e das correntes nas fases para o evento aplicado.

**Figura 9.44** Gráficos de tensão e corrente para o evento aplicado

9.5.2 Sistema Equivalente – Light Energia

Para executar a ferramenta Simprot ou Ferramenta para Análise de Proteção tal como realizamos os passos tal como foi mostrada na Figura 9.25 que é repetida na Figura 9.45, com isso será aberta a tela do Simprot que é mostrada na Figura 9.46.

**Figura 9.45** Abertura da Ferramenta de Análise de Proteção de Geradores (Simprot).

Nesta tela inicial (lado esquerdo da Figura 9.46) mostra os geradores do sistema que contêm proteção. Para este exemplo, são três geradores da usina FONTES---138 da Light Energia, e contém um total de 85 relés (26 em UG253[A], 33 em UG253[B] e 26 em UG253 [C]) que conforme a seção 5.3.6, os relés pode atuar em três diferentes modos: operação, monitoração e alarme. A Figura 9.47 relaciona a lista de relés instalados na usina UG253[A].

O lado direito da Figura 9.46 mostra um pequeno diagrama unifilar indicando as conexões dos geradores da usina Fontes Nova.

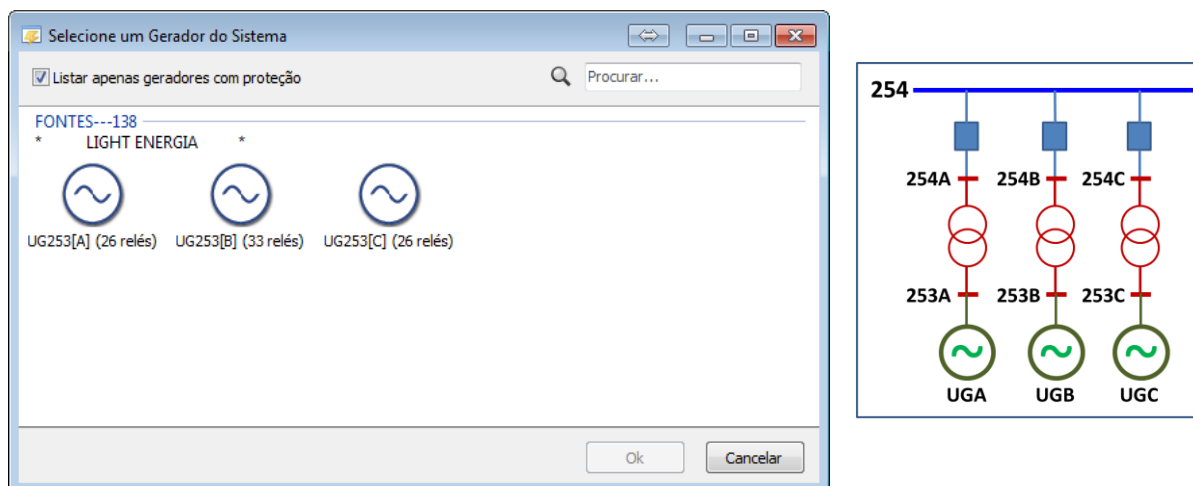


Figura 9.46 Tela inicial da Ferramenta de Análise de Proteção de Geradores (Simprot).

Com um clique no gerador UG253 [A] da Figura 9.46, ativa-se a tela mostrada na Figura 9.47, na parte direita da figura mostra a aba proteção onde pode-se observar as características dos relés, tal como já foi detalhada na Seção 5.3.6.

Lista de Relés na UGA

- 1ra. Coluna mostra o **Tipo** de relé
- 2da. Coluna o **Nome** do relé designado pelo usuário.
- 3ra Coluna **Disjuntor**: indica o disjuntor ligado ao relé a qual este será acionado para proteger o gerador.
- 4ta Coluna **Medida**: pode-se observar o dispositivo usado para a utilização do Relé.
- 5ta Coluna **Ação**: mostra o tipo de configuração: Monitoramento, Atuação e Alarma.

Tipo	Nome	Disjuntor	Medida	Ação
Relé 46	R46 UGA 1	DJ-B-TRA	TC: Seq. -	Monitoração
Relé 46	R46 UGA 2	DJ-B-TRA	TC: Seq. -	Atuação
Relé 40	R40 UGA 1	DJ-B-TRA	TP: Seq. +, TC: Seq. +	Monitoração
Relé 40	R40 UGA 2	DJ-B-TRA	TP: Seq. +, TC: Seq. +	Atuação
Relé 32	R32 UGA 1	DJ-B-TRA	Potência	Monitoração
Relé 32	R32 UGA 2	DJ-B-TRA	Potência	Atuação
Relé 51V	R51V UGA 1	DJ-B-TRA	TP: Fase A, TC: Fase A	Atuação
Relé 51V	R51V UGA 2	DJ-B-TRA	TP: Fase B, TC: Fase B	Atuação
Relé 51V	R51V UGA 3	DJ-B-TRA	TP: Fase C, TC: Fase C	Atuação
Relé 59G	R59G UGA	DJ-B-TRA	TP: Ntr.	Atuação
Relé 24	R24 UGA 1	DJ-B-TRA	TP: Fase A, Freq.	Monitoração
Relé 24	R24 UGA 2	DJ-B-TRA	TP: Fase B, Freq.	Monitoração
Relé 24	R24 UGA 3	DJ-B-TRA	TP: Fase C, Freq.	Monitoração
Relé 59	R59 UGA	DJ-B-TRA	TP: Seq. +	Atuação
Relé 8IU	R8IU UGA	DJ-B-TRA	Frequência	Atuação
Relé 8IO	R8IO UGA	DJ-B-TRA	Frequência	Atuação
Relé 21	R21 Z1 DLP-GE UGA	DJ-B-TRA	TP: Seq. +, TC: Seq. +	Atuação
Relé 21	R21 Z2 DLP-GE UGA	DJ-B-TRA	TP: Seq. +, TC: Seq. +	Atuação
Relé 50	R50-1 UGA 1	DJ-B-TRA	TC: Fase A	Monitoração
Relé 50	R50-1 UGA 2	DJ-B-TRA	TC: Fase B	Monitoração
Relé 50	R50-1 UGA 3	DJ-B-TRA	TC: Fase C	Monitoração
Relé 50	R50-2 UGA 1	DJ-B-TRA	TC: Fase A	Monitoração
Relé 50	R50-2 UGA 2	DJ-B-TRA	TC: Fase B	Monitoração
Relé 50	R50-2 UGA 3	DJ-B-TRA	TC: Fase C	Monitoração
Relé 50	R50-1 SR745 UGA 1	DJ-B-TRA	TC: Fase A	Monitoração
Relé 50	R50-1 SR745 UGA 2	DJ-B-TRA	TC: Fase B	Monitoração
Relé 50	R50-1 SR745 UGA 3	DJ-B-TRA	TC: Fase C	Monitoração
Relé 50	R50-2 SR745 138kV 1	DJ-B-TRA	TC: Fase A	Monitoração
Relé 50	R50-1 SR745 138kV 1	DJ-B-TRA	TC: Fase B	Monitoração
Relé 50	R50-1 SR745 138kV 2	DJ-B-TRA	TC: Fase C	Monitoração
Relé 46	R46 SR745 138kV 1	DJ-B-TRA	TC: Seq. -	Monitoração

Figura 9.47 Lista de relés instalados na UG253[A] de Fontes.

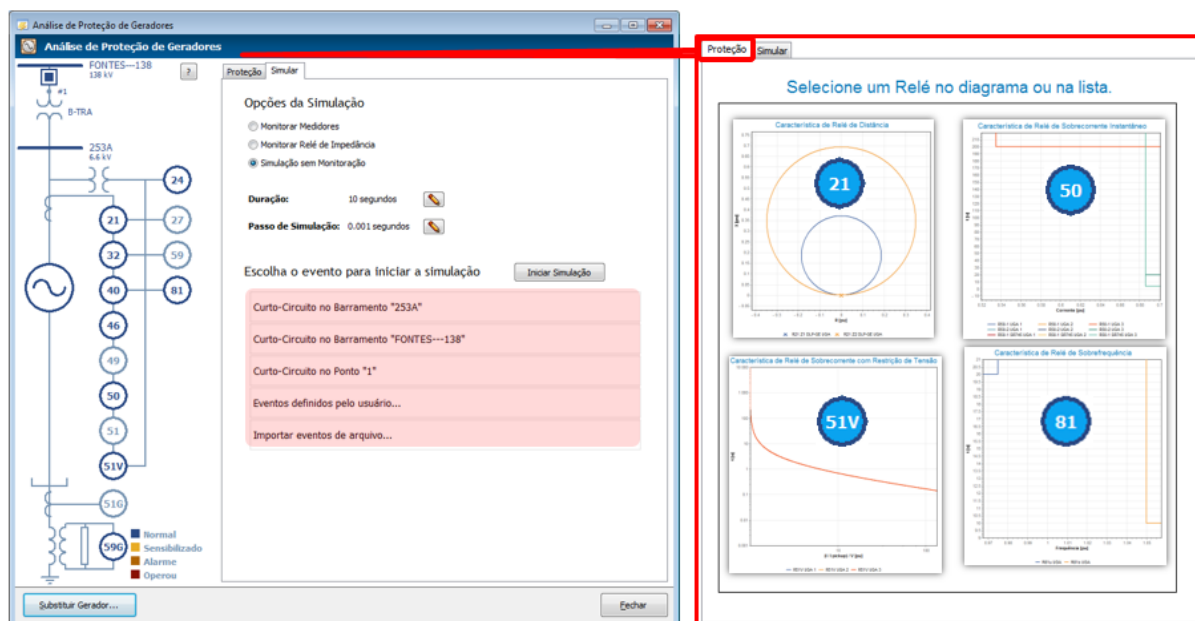
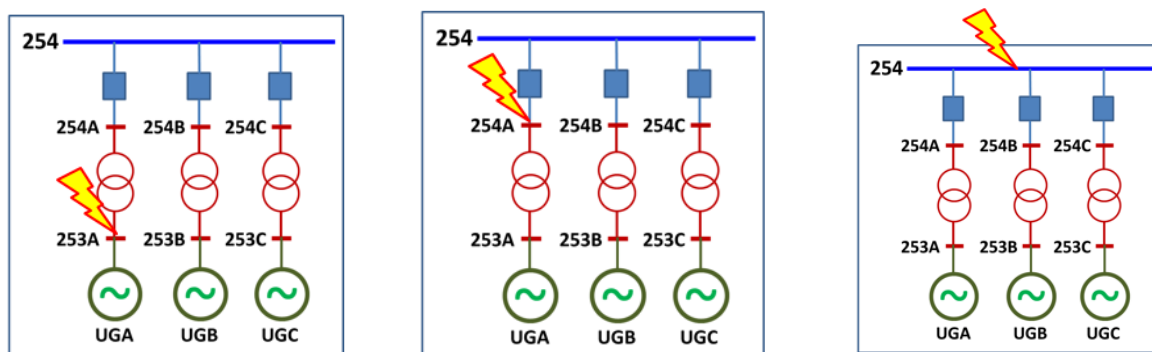


Figura 9.48 Tela do Simprot, Lista de relés instalados na UG253[A] de Fontes.

O lado esquerdo da Figura 9.48 mostram-se os eventos pré-definidos assim como a possibilidade de inserir novos eventos ou importar eventos de um arquivo externo. Estes eventos pré-definidos podem ser detalhados na Figura 9.49.



(a)



(b) Curto em 253A

(c) Curto em 254A

(d) Curto em 1 ou em 254

Figura 9.49 Eventos pré-definido: curto-circuito no barramento 253[A], 254[A] e 254.

Logo iremos simular um evento pré-definido, assim como indicada pela seta azul na Figura 9.49(a), trata-se de um curto-circuito na barra 253[A]. Ao clicar neste evento (**Curto-Circuito no Barramento “253A”**) será aberta a tela da Figura 9.50, onde o usuário tem a possibilidade de modificar o evento, tal como foi indicadas na seção 6.2.

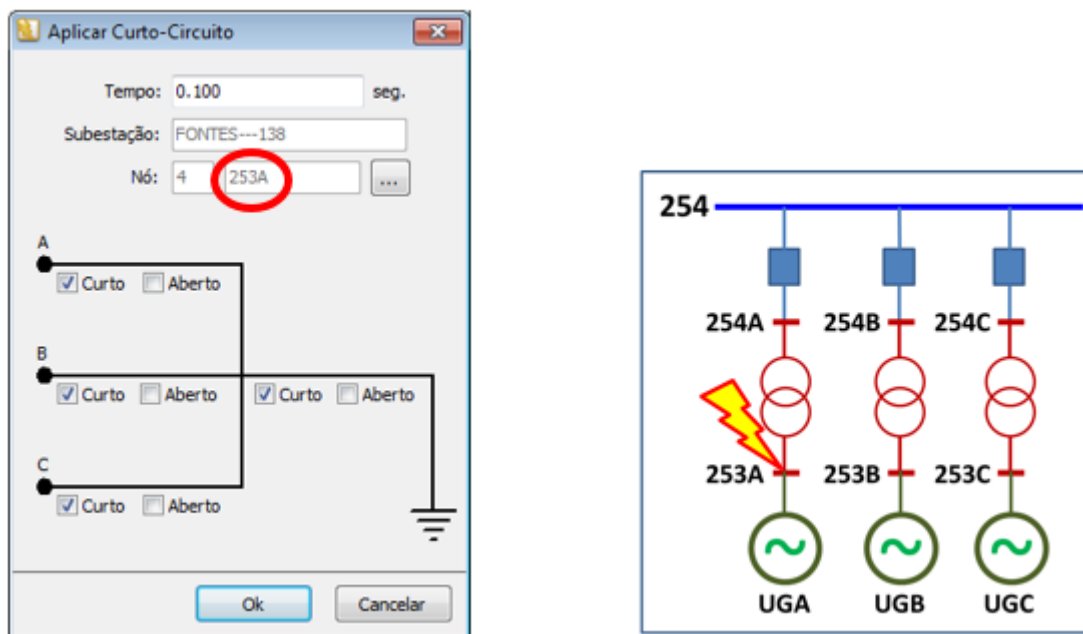


Figura 9.50 Evento de curto-circuito no barramento 253[A].

Durante a simulação, pode-se observar o LOG dos relés, conforme ilustra a Figura 9.51, sendo possível verificar quais relés vão atuar, sensibilizar ou alarmar e em que instante estas vão acontecer.

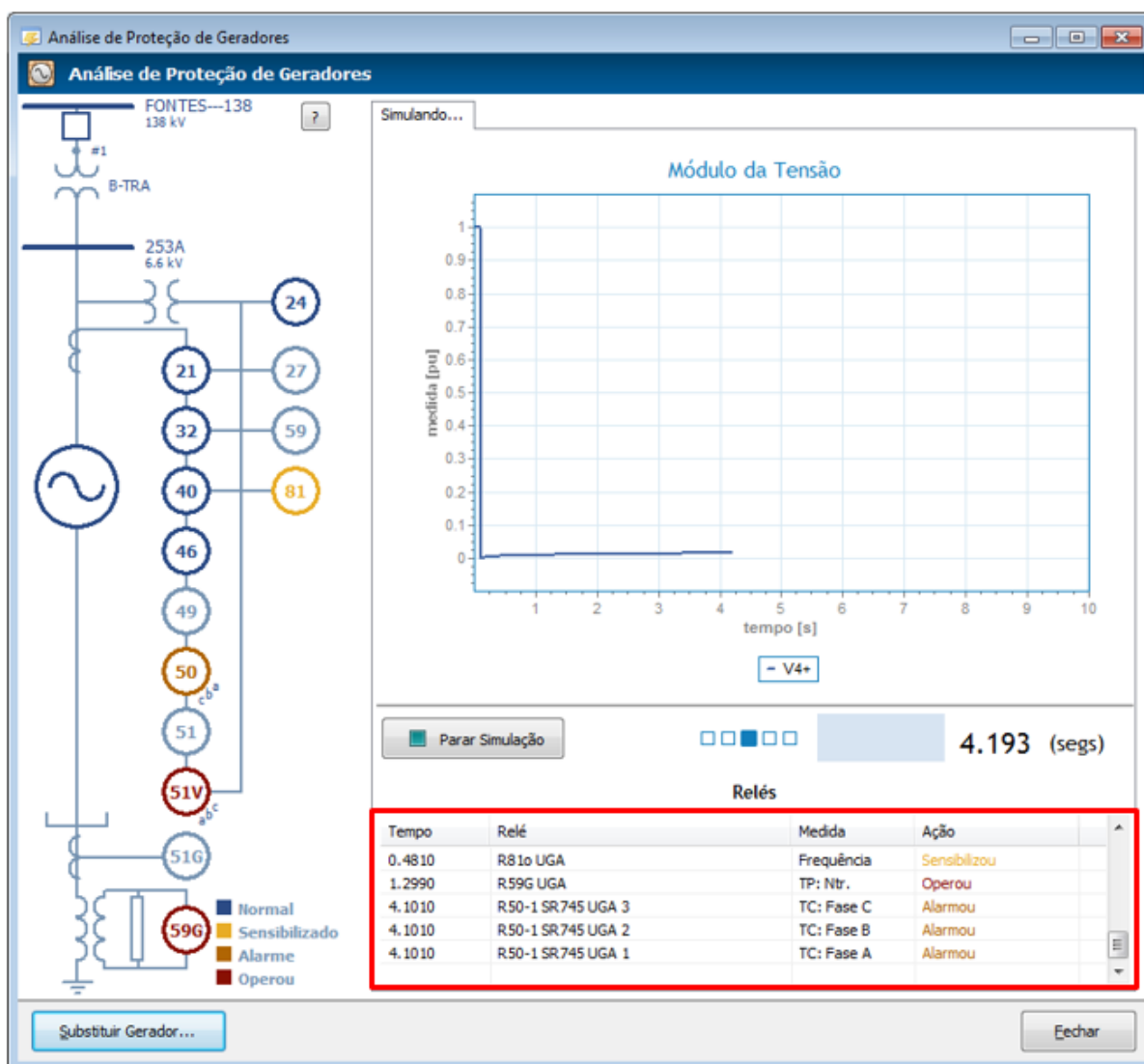


Figura 9.51 Durante a simulação, observa-se o relé que é sensibilizado, alarmado ou atuado.

Ao final da simulação podemos ver a lista e o estado dos relés, clicando em “Relés” na parte superior da Figura 9.52.

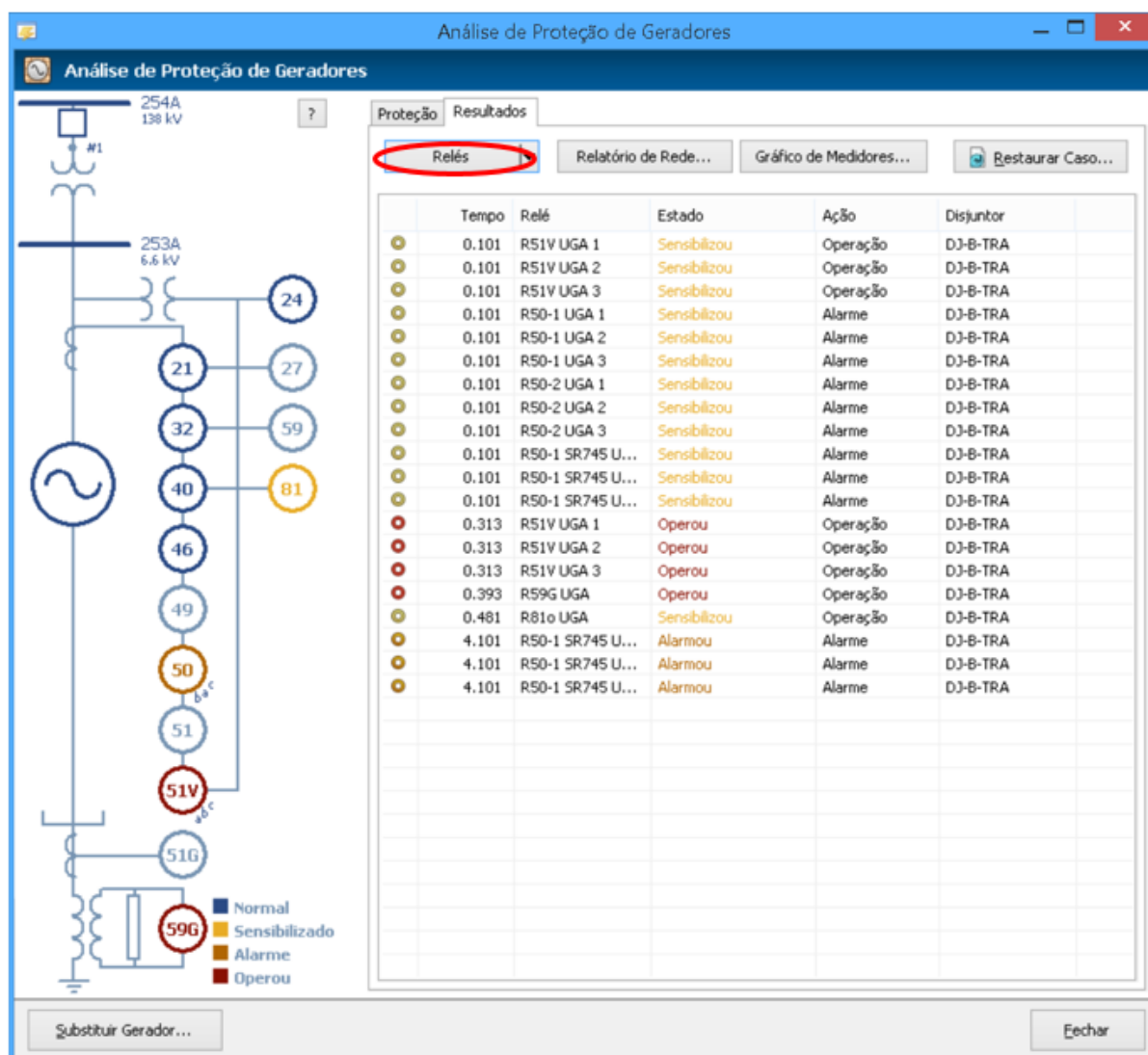


Figura 9.52 Lista de relés que foram sensibilizados, alarmados ou atuados.

A Figura 9.53 mostra a lista total de eventos durante a simulação no caso do curto-circuito trifásico simulado. Nesta lista podem ser observados os eventos desde o instante do curto-circuito, os relés sensibilizados, a formação de ilhas pela abertura de disjuntores e o fim da simulação.

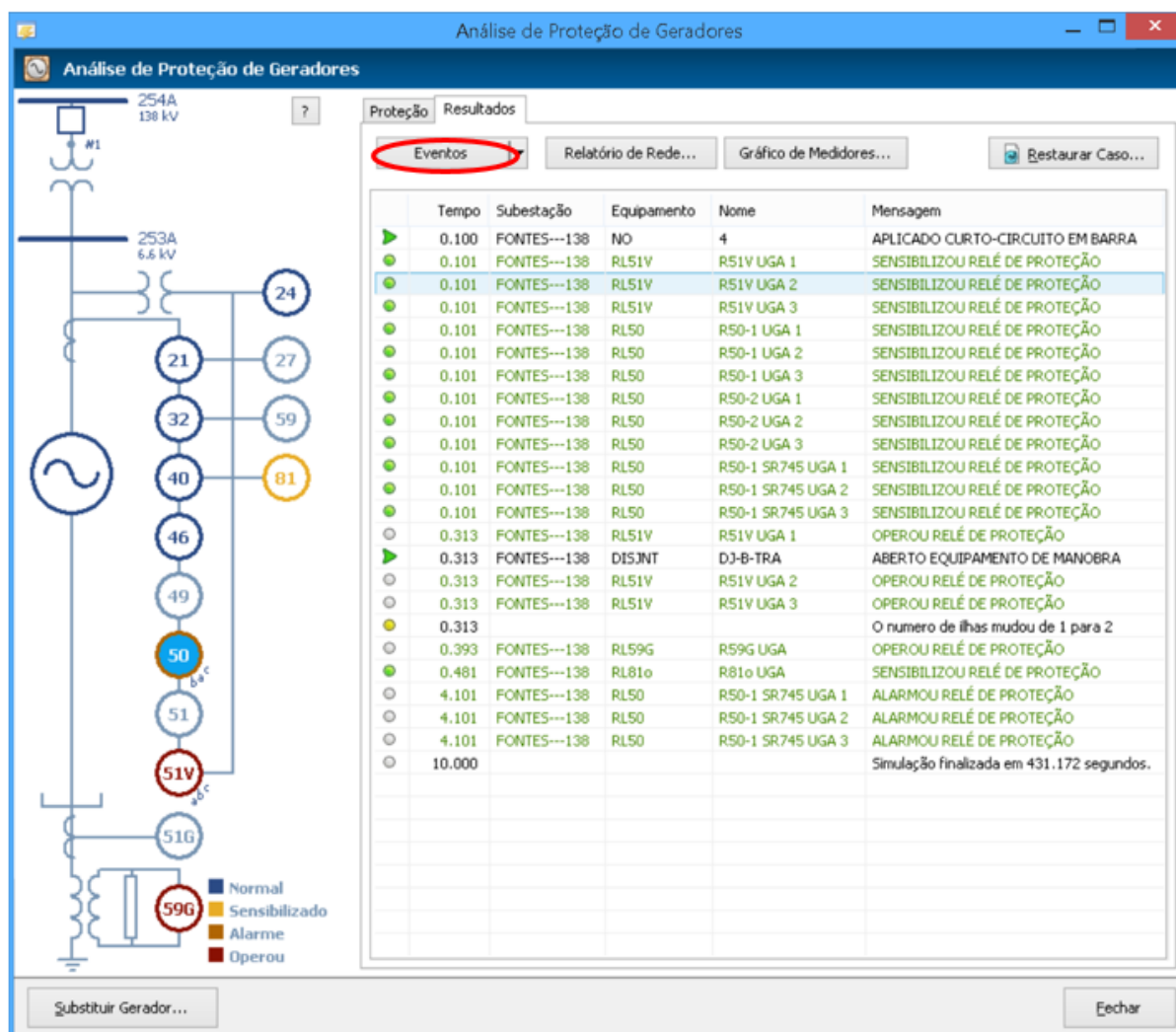


Figura 9.53 LOG de eventos da simulação aplicada (evento de curto-circuito).

A Figura 9.54 mostra o instante onde o relé de sobrecorrente instantâneo “R50-1 UGA 1” foi sensibilizado, assim como o instante onde ele atuaria (lado direito da figura). Este evento é similar para os relés “R50-1 UGA 2” e “R50-1 UGA 3”.

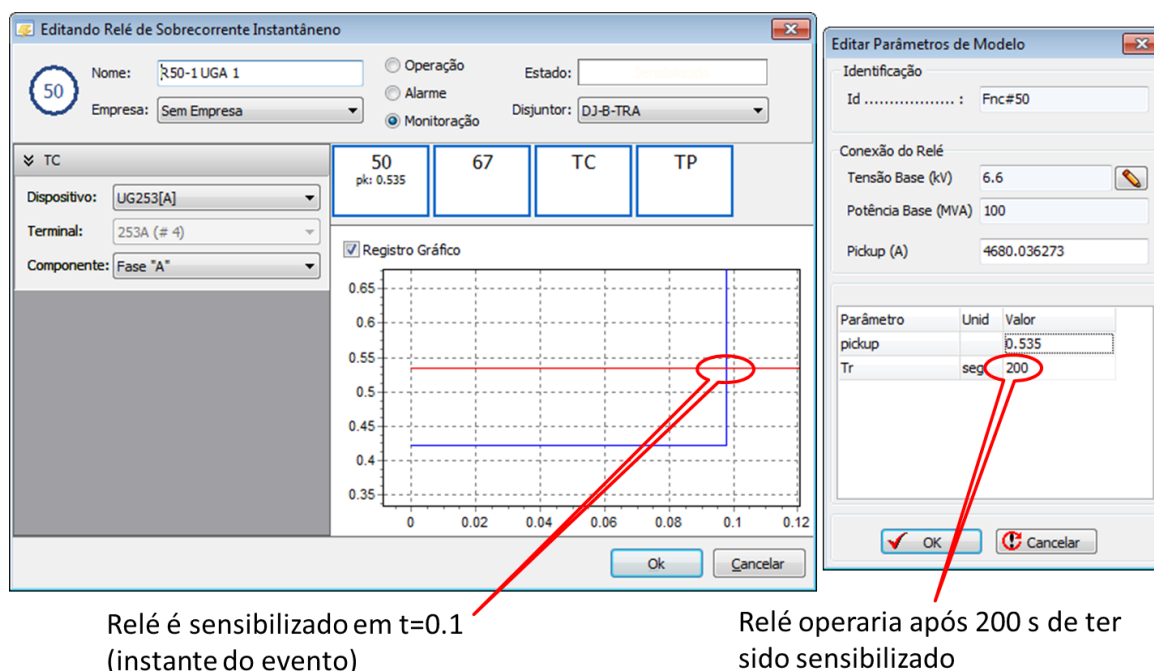


Figura 9.54 Relé de Sobrecorrente instantâneo da usina UGA 1.

A Figura 9.55 mostra o instante onde o relé de sobrecorrente instantâneo “R50-1 SR745 UGA 1” foi sensibilizado, assim como quando ele alarma (lado direito da figura). Este evento é similar para os relés “R50-1 SR745 UGA 2” e “R50-1 SR745 UGA 3”.

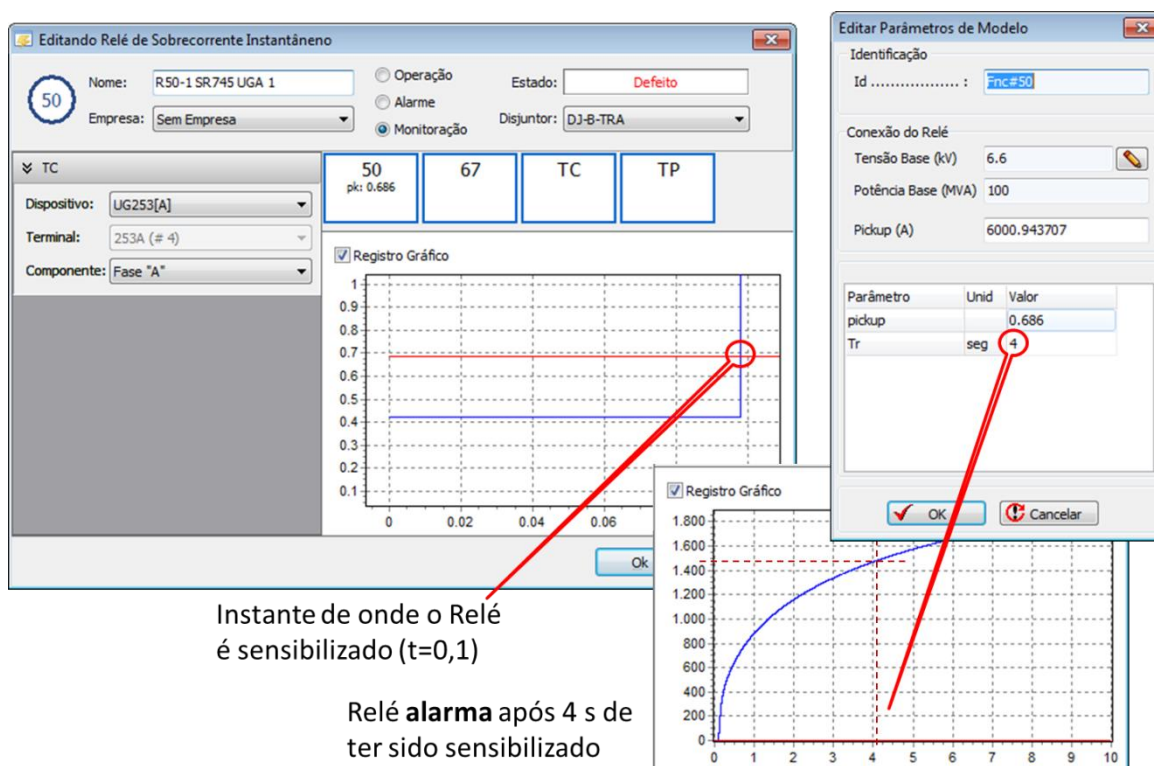


Figura 9.55 Relé de Sobrecorrente instantâneo SR745 da usina UGA 1.

A Figura 9.56 mostra o instante onde o relé de sobrecorrente instantâneo “R51V UGA 1” foi sensibilizado, assim como quando ele opera (lado direito da figura). Este evento é similar para os relés “R51V UGA 2” e “R51V UGA 3”.

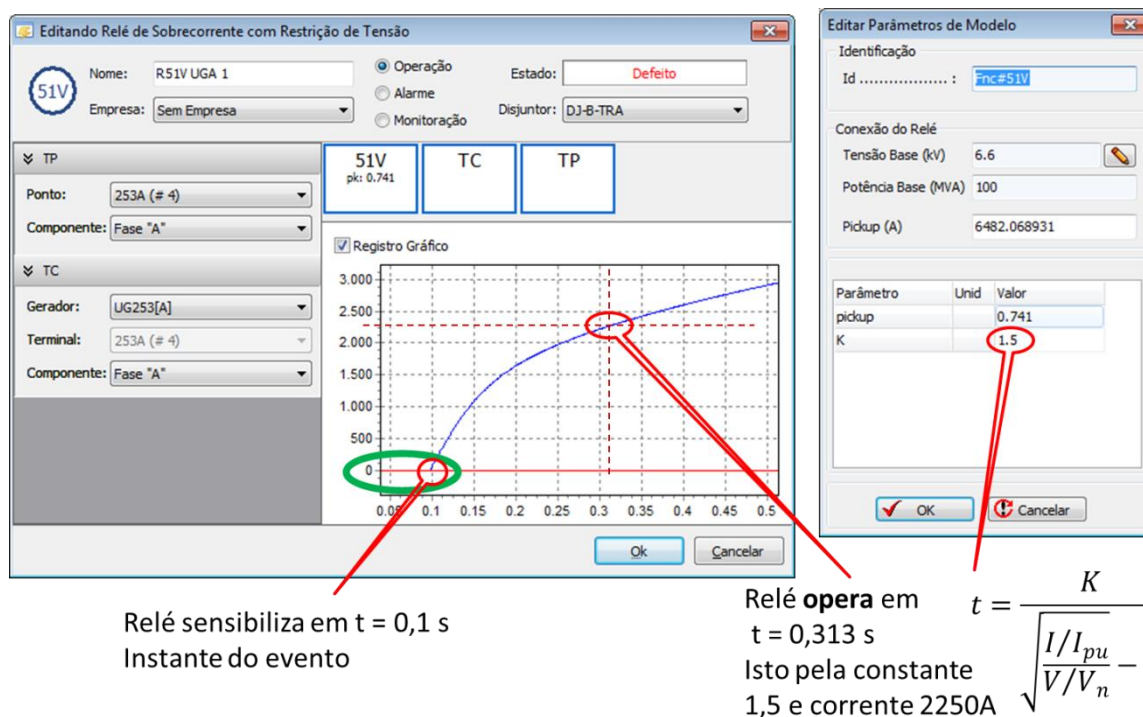


Figura 9.56 Relé de Sobrecorrente com restrição de tensão R51V da usina UGA 1.

A Figura 9.57 mostra o instante onde o relé de sobrefrequência “R81o UGA” foi sensibilizado, indicando também os limites de operação do relé 81.

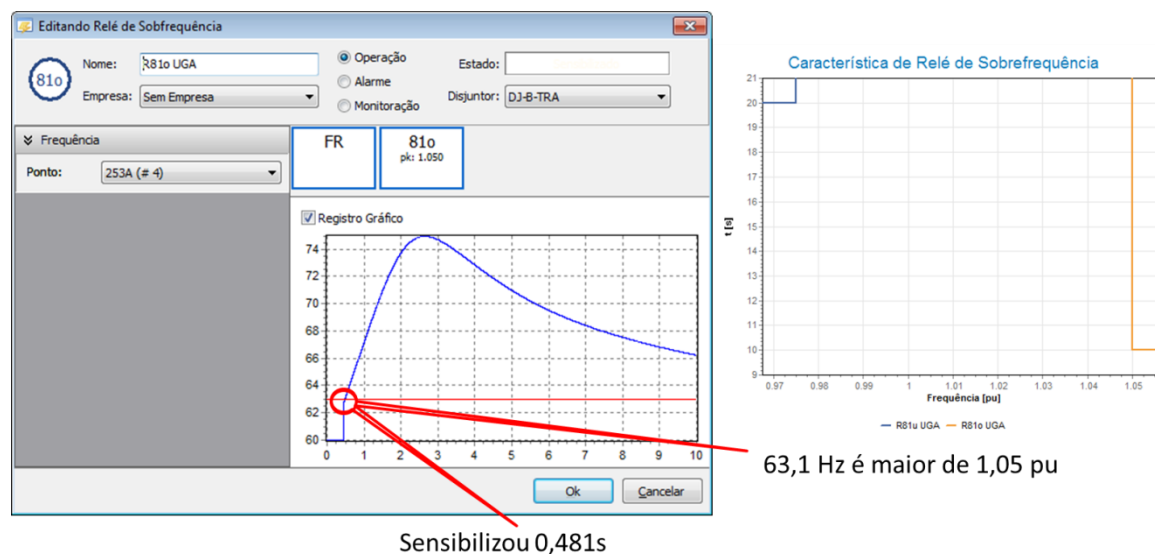


Figura 9.57 Relé de Sobrefrequência da usina UGA.

A Figura 9.58 mostra a velocidade angular do gerador de Fontes Nova e a Figura 9.59 apresenta o módulo da tensão de alguns barramentos do sistema equivalente.

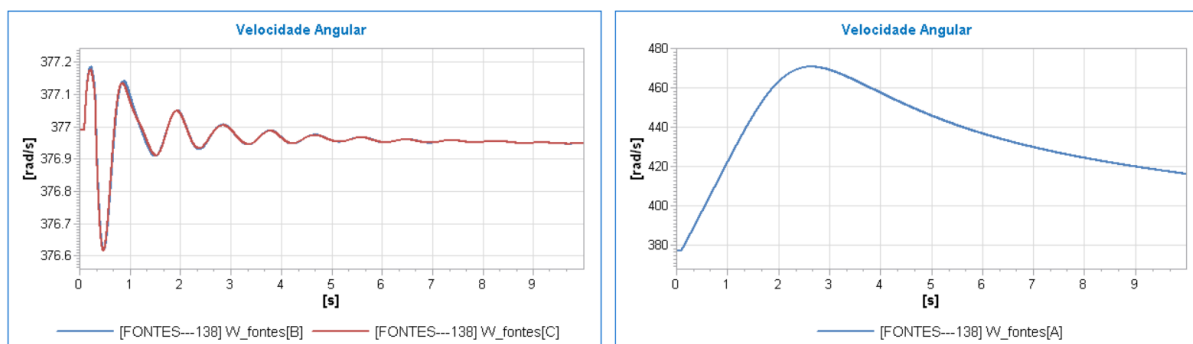


Figura 9.58 Velocidade angular de Fontes Nova.

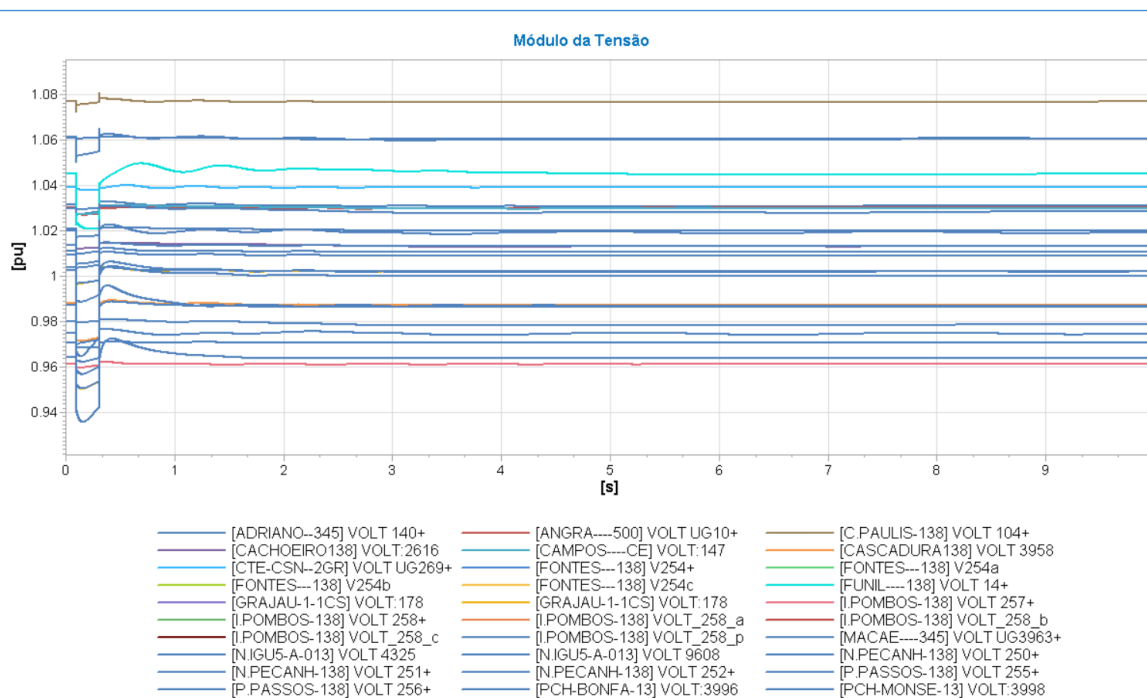


Figura 9.59 Módulo da Tensão em alguns barramentos do sistema equivalente.

A ferramenta de análise de proteção de geradores funcionou de acordo com os valores de ajuste pré-definidos nos relés de proteção, ajustes estes que foram informados pela Light.

Com as respostas dadas pela ferramenta, pode-se realizar a verificação dos ajustes dos relés off-line, sem interferir a operação real do sistema de geração. Desta maneira, o especialista poderá reajustar os parâmetros dos relés na procura de otimizar a operação das unidades geradoras. Após o reajuste off-line, e após ter realizado testes com várias condições de operação, o novo ajuste poderá ser levado ao campo.

10 Referências Bibliográficas

- [1] P. Kundur et al., "Definition and Classification of Power System Stability", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, May 2004.
- [2] G. N. Taranto, A. Manzoni, D. M. Falcão T. M. L. Assis, et.al, "Simulador para Análise das Dinâmicas de Curto e Longo Prazo em Redes de Subtransmissão e Distribuição com Geração Distribuída," Relatório Final Projeto P&D ANEEL, LIGHT S.E.S.A., Setembro, 2004.
- [3] G. N. Taranto, A. Manzoni, D. M. Falcão, J. I. R. Rodriguez, S. L. Escalante & T. M. L. Assis, "Desempenho Dinâmico da Geração Distribuída Frente a Perturbações no SIN e de Manobras na Rede de Distribuição," Relatório Final Projeto P&D ANEEL, LIGHT S.E.S.A., Dezembro 2008.
- [4] G. N. Taranto, D. M. Falcão, J. M. T. Marinho, T. M. L. Assis, J. I. R. Rodriguez & S. L. Escalante, "Pesquisa e Implementação de Simulação Dinâmica Trifásica nas Redes de Distribuição com Geração Distribuída", Relatório Final Projeto P&D ANEEL, LIGHT S.E.S.A, Março 2011.
- [5] J. M. T. Marinho, "Simulação em Sistemas de Energia Elétrica com Modelagem Flexível – Monofásica e Trifásica," Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Março 2008.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [7] J. Arrillaga, C. P. Arnold, and B. J. Harker, *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1983.
- [8] G.N. Taranto, COE 754 - Dinâmica e Controle de Sistemas de Potência, COPPE/UFRJ, 2008.
- [9] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgar Blücher, 1983.
- [10] D.M. Falcão, *Notas de Aula de Análise de Redes Elétricas*, COPPE/UFRJ, 2006.
- [11] P.M. Anderson, *Power System protection*, McGraw Hill & IEEE-Press, 1999.
- [12] B. Stott, "Power System Dynamic Response Calculations", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 2, February 1979, pg. 219-241.
- [13] IEEE Working Group Report, "IEEE Screening Guide for Planned Steady-State Switching Operations to Minimize Harmful Effects on Steam Turbine-Generators," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1519-1521, July/August 1980.
- [14] P. Pourbeik, D. G. Ramey, N. Abi-Samra, D. Brooks & A. Gaikwad, "Vulnerability of Large Steam Turbine Generators to Torcional Interactions During Electrical Grid Disturbances," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1250-1258, August 2007.
- [15] ONS, "Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos," *Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3*.
- [16] J. M. T. Marinho, G. N. Taranto, "A Hybrid Three-Phase Single-Phase Power Flow Formulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 3, pp.1063-1070, August 2008.
- [17] M. Chen, W. E. Dillon, "Power System Modelling", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 7, July 1974, pp. 901-915.
- [18] T. H. Chen, M. S. Chen, T. Inoue, et al., "Three-Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, October 1991, pp. 1671-1681.
- [19] M. J. Gorman, J. J. Grainger, "Transformer Modelling for Distribution System Studies - Part II: Addition of Models to Ybus and Zbus", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 575-580.

- [20] S. S. Moorthy, D. Hoadley, "A New Phase-Coordinate Transformer Model for Ybus Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 4, November 2002, pp. 951-956.
- [21] M. R. Irving, A. K. Al-Othman, "Admittance Matrix Models of Three-Phase Transformers With Various Neutral Grounding Configurations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, August 2003, pp. 1210-1212.
- [22] B.-K. Chen, M.-S. Chen, R. R. Shoults, et al., "Hybrid three phase load flow", IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, Vol. 137, Pt. C, No. 3, May 1990, pp. 177-185.
- [23] X.-P. Zhang, P. Ju, E. Handschin, "Continuation Three-Phase Power Flow: A Tool for Voltage Stability Analysis of Unbalanced Three-Phase Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005, pp. 1320-1329.
- [24] [referencia do projeto simprot]
- [25] IEC 60255-151 Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under current protection, aug/2009
- [26] IEEE Std C37.112-1996 Standard Inverse – Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays, 1996.
- [27] DGP - Digital Generator Protection Relay™ – Instruction Manual, Manual P/N: GEK-100666F, GE Multilin, 2003.
- [28] D. Reimert, Protective Relaying for Power Generation Systems, Taylor & Francis, Florida, USA, 2006.
- [29] IEC 60255-149 Measuring relays and protection equipment – Part 149: Functional requirements for thermal electrical relays, jul/2013.

ANEXOS

A. Modelos dos Dispositivos

Dispositivo	Modelos Estáticos			
	Sequência Positiva		Trifásico	
	ID	Descrição	ID	Descrição
Carga	CARGA#pcte	Modelo P Constante	CARGA3ph#Mdl:Pcte:Yg	Modelo P Constante Yg
	CARGA#zcte	Modelo Z Constante	CARGA3ph#Mdl:Pcte:D	Modelo P Constante Delta
	CARGA#zip	Modelo ZIP	CARGA3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante Yg
			CARGA3ph#Mdl:Zcte:D	Modelo Z Constante Delta
			CARGA3ph#Mdl:ZIP:Yg	Modelo ZIP Yg
			CARGA3ph#Mdl:ZIP:D	Modelo ZIP Delta
Reator	REATOR#zcte	Modelo Z Constante	REATOR3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante Yg
			REATOR3ph#Mdl:Zcte:D	Modelo Z Constante Delta
Capacitor	CAPACTR#zcte	Modelo Z Constante	CAPACTR3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante Yg
			CAPACTR3ph#Mdl:Zcte:D	Modelo Z Constante Delta
Shunt Genérico	CARGA#pcte	Modelo P Constante	CARGA#pcte	Modelo P Constante
	EQUIVREDE#Mdl:Zcte	Equivalente Z Constante	EQUIVREDE3ph#Mdl:Zcte:Yg	Equivalente Z Constante
	SVC#ANAREDE-P	SVC Anarede	SVC3ph#ANAREDE-P	SVC ANAREDE 3ph
			TRANSF3ph#Mdl:Gnd	Transf. de Aterramento
Transformador	TRANSF#pi	Modelo Pi	TRANSF3ph#Mdl:Pi:Yg-Yg	Modelo Pi Yg-Yg
	TRANSF#Mdl:PhShifter	Modelo Pi Defasador	TRANSF3ph#Mdl:Pi:Y-Y	Modelo Pi Y-Y
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:D-D	Modelo Pi D-D
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:Yg-D	Modelo Pi Yg-D
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:D-Yg	Modelo Pi D-Yg
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:Y-D	Modelo Pi Y-D
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:D-Y	Modelo Pi D-Y
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:Y-Yg	Modelo Pi Y-Yg
			TRANSF3ph#Mdl:Pi:Yg-Y	Modelo Pi Yg-Y
			TRANSF3ph#Mdl:PhShifter	Modelo Pi Defasador
OLTC	OLTC#Mdl:Pi	Modelo Pi Convencional	OLTC3ph#Mdl:Pi:Yg	Modelo Pi Yg Convencional
	OLTC#Mdl:Tau	Modelo Tau Injeção de Corrente	OLTC3ph#Mdl:II:Pi:Yg	Modelo II Pi Yg Ctrl. Tap. Independente por Fase
Linha de Transmissão	LT#Mdl:Pi	Modelo Pi	LT3ph#Mdl:Pi	Modelo Pi Geral Desbalanceado em Componentes de Fase
			LT3ph#Mdl:Pi:Seq	Modelo Balanceado com Impedâncias em Componentes de Sequência
Ramal	RAMAL#pi	Modelo Pi	RAMAL3ph#Mdl:Pi	Modelo Pi Geral Desbalanceado em Componentes de Fase
			RAMAL3ph#Mdl:Pi:Seq	Modelo Pi Balanceado com Impedâncias em Componentes de Sequência
Série Genérico	TCSC#ANATEM MD01	TCSC Anatem MD01	TCSC#ANATEM MD01	TCSC Anatem MD01
Gerador	GERADOR#MDL:V0	V0 Controle Tensão/Ângulo	GERADOR3ph#Mdl:V0+	V0+ Controle Tensão/Ângulo
	GERADOR#MDL:PV	PV Controle Tensão	GERADOR3ph#Mdl:PV+	PV+ Controle Tensão
	GERADOR#MDL:PQ	PQ Sem Controle	GERADOR3ph#Mdl:PQ+	PQ+ Sem controle

Dispositivos	Modelos Dinâmicos			
	Sequência Positiva		Trifásicos	
	ID	Descrição	ID	Descrição
Carga	CARGA#Mdl:Zcte	Modelo Z Constante	CARGA3ph#Mdl:Zcte:Yg/D	Modelo Z Constante

Manual da Versão 4.0

	CARGA#Mdl:ZIP	Modelo ZIP	CARGA3ph#Mdl:ZIP:Yg/D	Modelo ZIP
Reator	REATOR#Mdl:Zcte	Modelo Z Constante	REATOR3ph#Mdl:Zcte:Yg/D	Modelo Z Constante
Capacitor	CAPACTR#Mdl:Zcte	Modelo Z Constante	CAPACTR3ph#Mdl:Zcte:Yg/D	Modelo Z Constante
Gerador	GERADOR#GRP	Dinâmico Síncrono	GERADOR#GRP	Dinâmico Síncrono
	GERADOR.PV#GRP	Fotovoltaico	GERADOR.PV#GRP	Fotovoltaico
	GERADOR#Mdl:Zcte	Modelo Z Constante	GERADOR3ph#Mdl:Zcte	Modelo Z Constante 3ph
Máquina Síncrona	MaqSincr#Mdl:I	Modelo I	MaqSincr3ph#Mdl:I	Modelo I 3ph
	MaqSincr#Mdl:II	Modelo II	MaqSincr3ph #Mdl:II	Modelo II 3ph
	MaqSincr#Mdl:III	Modelo III	MaqSincr3ph #Mdl:III	Modelo III 3ph
	MaqSincr#Mdl:IV	Modelo IV	MaqSincr3ph #Mdl:IV	Modelo IV 3ph
	MaqSincr#Mdl:V	Modelo V	MaqSincr3ph #Mdl:V	Modelo V 3ph
	MaqSincr#ANATEM MD02	Modelo ANATEM MD02	MaqSincr3ph#ANATEM MD02	Modelo ANATEM MD02 3ph
	MaqSincr#ANATEM MD03	Modelo ANATEM MD03	MaqSincr3ph#ANATEM MD03	Modelo ANATEM MD03 3ph
	DDU	Disp. Def. pelo Usuário	DDU	Disp. Def. pelo Usuário
Regulador de Tensão	RegTensao#REF	Sem Reg. Tensão	RegTensao#REF	Sem Reg. Tensão
	RegTensao#Mdl:Ka	Modelo Ka	RegTensao#Mdl:Ka	Modelo Ka
	RegTensao#Mdl:1oORD	Modelo 1oORD	RegTensao#Mdl:1oORD	Modelo 1oORD
	RegTensao#Mdl:1oORDe	Modelo 1oORDe	RegTensao#Mdl:1oORDe	Modelo 1oORDe
Regulador de Velocidade	CtrlVeloc#REF	Sem Reg. Veloc.	CtrlVeloc#REF	Sem Reg. Veloc.
	CtrlVeloc#Mdl:Termo	Modelo Turbina RV_01	DDU	Disp. Def. pelo Usuário
Regulador Estabilizador	PSS#Mdl:w	Modelo PSS_w	DDU	Disp. Def. pelo Usuário

B. Blocos em XML do Simulight

Tabela A.1 Lista de blocos para a formação de novos modelos

GRUPO	Ind.	TIPO	No SAÍDAS	No ENTRADAS	PARÂMETROS
MATEMATIC	1	SOMAD	1	N	
	2	MULT	1	N	
	3	DIVS	1	2	
	4	GANHO	1	1	K
	5	MENOS	1	1	
	6	ABS	1	1	
	7	MOD	1	2	
	8	MOD2	1	2	
	9	INVRs	1	1	
	10	SQR	1	1	
	11	SQRT	1	1	
	12	EXP	1	1	
	13	POW	1	2	
	14	LOG	1	1	
	15	SIGMD	1	1	T
TRIGONOM	16	SIN	1	1	
	17	COS	1	1	
	18	TAN	1	1	
	19	ASIN	1	1	
	20	ACOS	1	1	
	21	ATAN	1	1	
	22	ATAN2	1	2	
COMPLEX	23	DQ2CMLX	2	3	
	24	CMLX2DQ	2	3	
	25	CMULT	2	4	
	26	CDIVS	2	4	
NLINEAR	27	LIMIT	1	1	Lmin, Lmax
	28	DEADBAND	1	1	Umin, Umax
	29	SELECT	1	3	
	30	MAX	1	N	
	31	MIN	1	N	
	32	DELAY	1	3	T
BOOLEAN	33	EQUAL	1	2	
	34	NEQUAL	1	2	
	35	GREATER	1	2	
	36	GREATEREQ	1	2	
	37	LESS	1	2	
	38	LESSEQ	1	2	
	39	OR	1	2	
	40	AND	1	2	

GRUPO	Ind.	TIPO	No SAÍDAS	No ENTRADAS	PARÂMETROS
DISCRET	41	XOR	1	2	
	42	NOT	1	1	
	43	zINTEGRD	1	1	K, T, To, Lmin, Lmax
	44	PTOS	1	1	Ui, Yi
DISTURB	45	CTE	1	-	cte
	46	STEP	1	1	K, T
	47	CURV	1	1	Ki, Ti
CINI	48	CINI	-	-	Var, val(str)
DINAMIC	49	INTEGRD	1	1	K
	50	DERIVD	1	1	K
	51	LAG	1	1	K, P, T
	52	WASHOUT	1	1	K, P, T
	53	LEADLAG	1	1	P1, T1, P2, T2
	54	BLC2ORD	1	1	K, A, B, C
OUTPUT	55	oSHUNT	-	4	[P/Ire,Q/lim,G,B]
	56	oSERIE	-	10	[Gs,Bs,(P/Ire,Q/lim,G,B),(P/Ire,Q/lim,G,B)]
	57	oLOGICO	-	2	[open/close]
	58	oRELE	-	3	[trip/close/tempz]
	59	oOTHERS	-	-	
INPUT	60	iTENS	2	-	
	61	iFREQ	1	-	
	62	iPOTE	2	-	
	63	iCORR	2	-	
	64	iLOGI	1	-	
	65	iMODEL	1	-	string

Tabela A.2 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → MATEMATIC

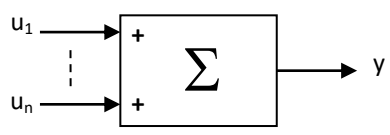
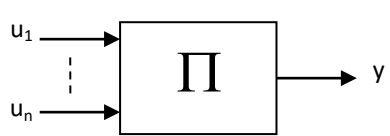
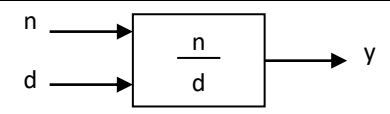
Diagrama		Estrutura no XML
1		<pre><SOMD id="xxx" out=" y " stt="NO"> <ADD sgnl="+"> u1 </ADD> : <ADD sgnl="-"> un </ADD> </SOMD></pre>
2		<pre><MULT id="xxx" out=" y " stt="NO"> <ADD> u1 </ADD> : <ADD> un </ADD> </MULT></pre>
3		<pre><DIVS id="xxx" num=" n " den=" d " out=" y " stt="NO"/></pre>
4		<pre><GANH id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO" K=" K "/></pre>

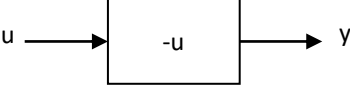
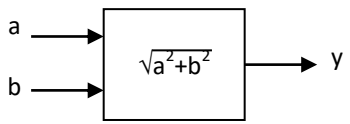
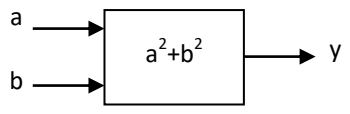
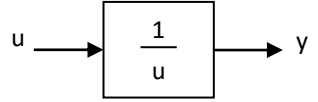
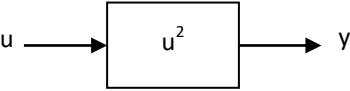
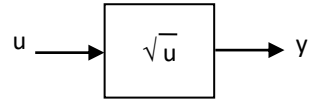
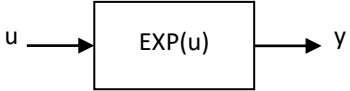
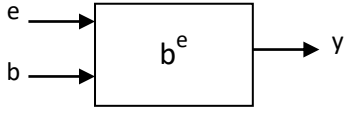
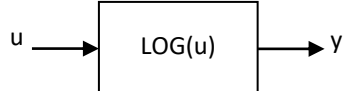
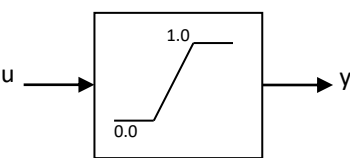
	Diagrama	Estrutura no XML
		
5		<code><NEGV id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
6		<code><ABSL id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
7		<code><MOD id="xxx" in1=" a " in2=" b " out=" y " stt="NO"/></code>
8		<code><MOD2 id="xxx" in1=" a " in2=" b " out=" y " stt="NO"/></code>
9		<code><INVS id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
10		<code><SQR id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
11		<code><SQRT id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
12		<code><EXPN id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
13		<code><POW id="xxx" bas=" b " exp=" e " out=" y " stt="NO"/></code>
14		<code><LOGT id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
15		<code><SIGN id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO" T="xxx"/></code>

Tabela A.3 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → TRIGONOM

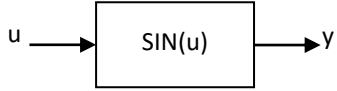
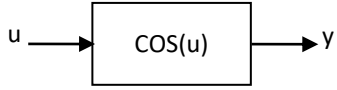
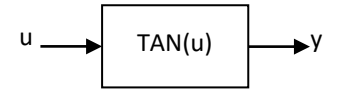
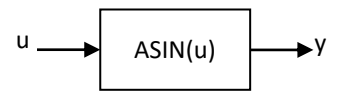
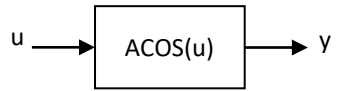
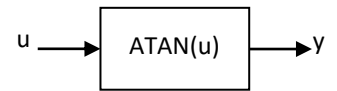
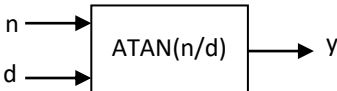
Diagrama		Estrutura no XML
16		<code><SENO id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
17		<code><COSS id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
18		<code><TANG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
Diagrama		Estrutura no XML
19		<code><ASEN id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
20		<code><ACOS id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
21		<code><ATAN id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
22		<code><ATAN2 id="xxx" num=" n " den=" d " out=" y " stt="NO"/></code>

Tabela A.4 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → COMPLEX

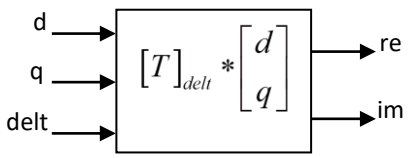
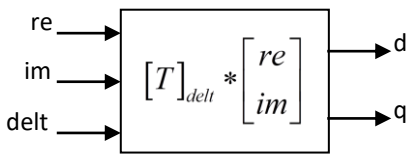
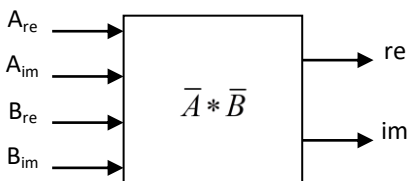
Diagrama		Estrutura no XML
23		<pre><DQ-C id="xxx"> <RE stt="NO"> re </RE> <IM stt="NO"> im </IM> <D> d </D> <Q> q </Q> <DELT> delt </DELT> </DQ-C></pre>
24		<pre><C-DQ id="xxx"> <D stt="NO"> d </D> <Q stt="NO"> q </Q> <RE> re </RE> <IM> im </IM> <DELT> delt </DELT> </C-DQ></pre>
25		<pre><CMUL id="xxx"> <RE stt="NO"> re </RE> <IM stt="NO"> im </IM> <A_RE> Are </A_RE> <A_IM> Aim </A_IM> <B_RE> Bre </B_RE> <B_IM> Bim </B_IM> </CMUL></pre>

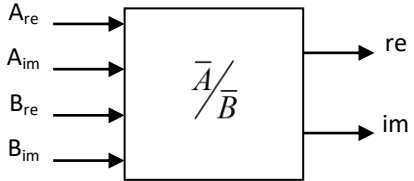
Diagrama		Estrutura no XML
26		<pre> <CDIV id="xxx"> <RE stt="NO"> re </RE> <IM stt="NO"> im </IM> <A_RE> A_re </A_RE> <A_IM> A_im </A_IM> <B_RE> B_re </B_RE> <B_IM> B_im </B_IM> </CDIV> </pre>

Tabela A.5 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → NLINEAR

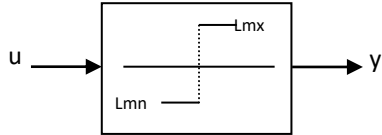
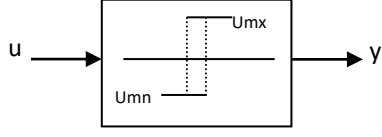
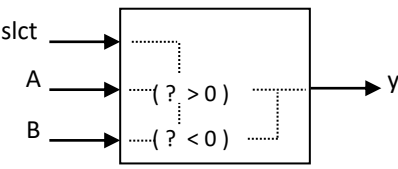
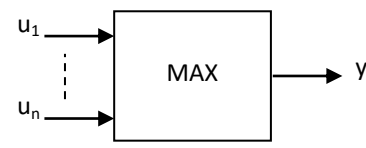
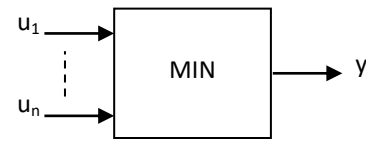
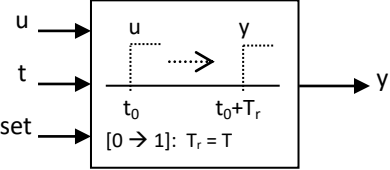
Diagrama		Estrutura no XML
27		<pre> <LIMT id="xxx" inp=" u " out=" y " lmax=" Lmx " lmin=" Lmn "/> </pre> OU <pre> <LIMT id="xxx" inp=" u " out=" y " > <LMIN> Lmn </LMIN> <LMAX> Lmx </LMAX> </LIMT> </pre> Limites máximo e mínimo definidos por função ou por variável interna do modelo.
28		<pre> <DEAD id="xxx" inp=" u " out=" y " umax=" Umx " umin=" Umn "/> </pre> OU <pre> <DEAD id="xxx" inp=" u " out=" y " > <UMIN> Umn </UMIN> <UMAX> Umx </UMAX> </DEAD> </pre> Limites máximo e mínimo definidos por função ou por variável interna do modelo.
29		<pre> <SLCT id="xxx" slct=" slct " sgn1=" A " sgn2=" B " out=" y "/> </pre>
30		<pre> <MAXM id="xxx" out=" y "> <ADD> u1 </ADD> : <ADD> un </ADD> </MAXM> </pre>
31		<pre> <MINM id="xxx" out=" y "> <ADD> u1 </ADD> : <ADD> un </ADD> </MINM> </pre>
32		<pre> <DELA id="xxx" inp=" u " out=" y " To="t0" T="T" set="set"/> </pre>

Tabela A.6 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → BOOLEAN

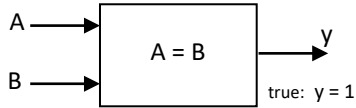
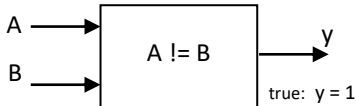
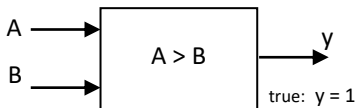
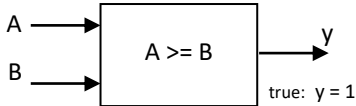
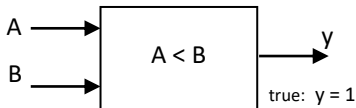
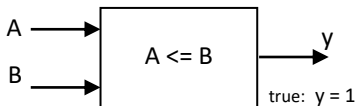
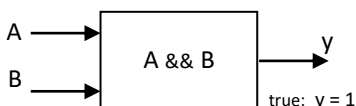
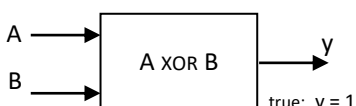
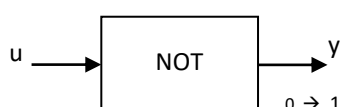
Diagrama		Estrutura no XML
33		<code><EQ id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
34		<code><NE id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
35		<code><GT id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
Diagrama		Estrutura no XML
36		<code><GE id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
37		<code><LT id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
38		<code><LE id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
39		<code><OR id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
40		<code><AND id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
41		<code><XOR id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></code>
42		<code><NOT id="xxx" inp=" u " out=" y "/></code>

Tabela A.7 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → DISCRET

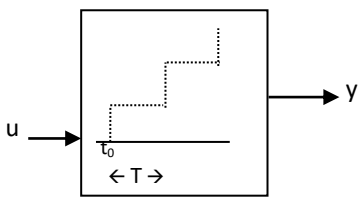
Diagrama		Estrutura no XML
43		<pre><zINT id="xxx" inp=" u " out=" y " ampl="xxx" K="xxx" T=" T " To=" t0 " lmax="xxx" lmin="xxx"/></pre>

Tabela A.8 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → DISTURB

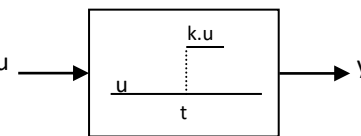
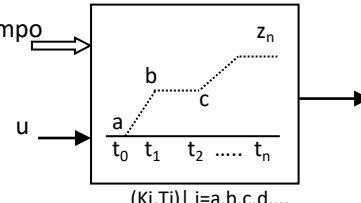
Diagrama		Estrutura no XML
46		<pre><STEP id="xxx" inp=" u " out=" y " K=" k " T=" t "/></pre>
47		<pre><CURV id="xxx" inp=" u " out=" y "> <ADD t=" t0 " k=" a "/> <ADD t=" t1 " k=" b "/> <ADD t=" t2 " k=" c "/> : <ADD t=" tn " k=" zn "/> </CURV></pre>

Tabela A.9 Tabela de diagramas dos blocos: GROUP_NLIN → DISCRET

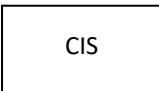
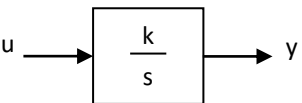
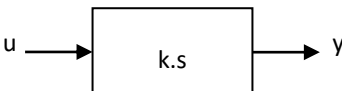
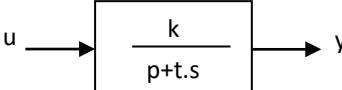
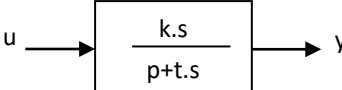
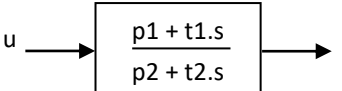
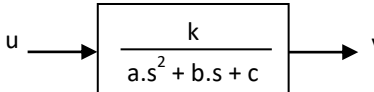
Diagrama		Estrutura no XML
48		<pre><CINI id="xxx" vars="xxx" expr="xxx"/></pre>

Tabela A.10 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → DISCRET

Diagrama		Estrutura no XML
49		<code><INTG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " /></code>
50		<code><DERV id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " /></code>
51		<code><LAG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " P=" p " T=" t " /></code>
52		<code><WSHT id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " P=" p " T=" t " /></code>
53		<code><LDLG id="xxx" inp="u" out="y" stt="0" P1="p1" T1="t1" P2="p2" T2="t2"/></code>
54		<code><BLC2 id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K="k" A="a" B="b" C="c"/></code>

C. Modelos Dinâmicos [2] [7]

B.1 Equações da Máquina Síncrona:

Modelo Clássico:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt})$$

$$p\omega = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e - D(\omega - 2\pi f_0))$$

$$p\delta = \omega - 2\pi f_0$$

Para os outros modelos recomendasse [2] [7]

B.2 Parâmetros da Máquina Síncrona:

Circuitos equivalentes para o eixo direto e em quadratura, considerando dois circuitos amortecedores para o eixo Q (1q e 2q) e um circuito para o eixo D (1d). Valores em p.u.

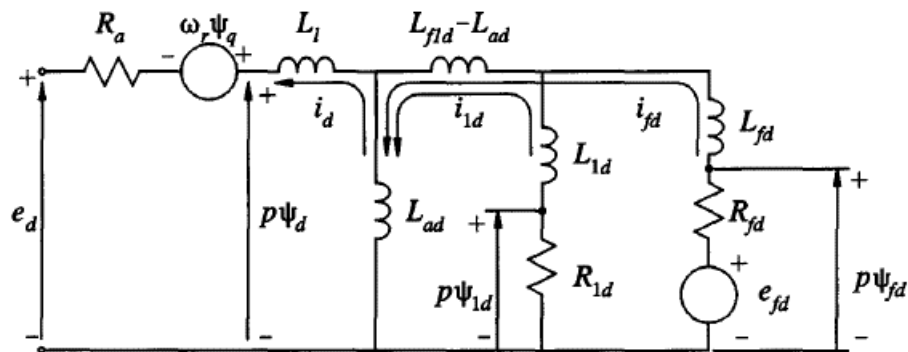


Figura B.1 – Circuito equivalente no eixo-d.

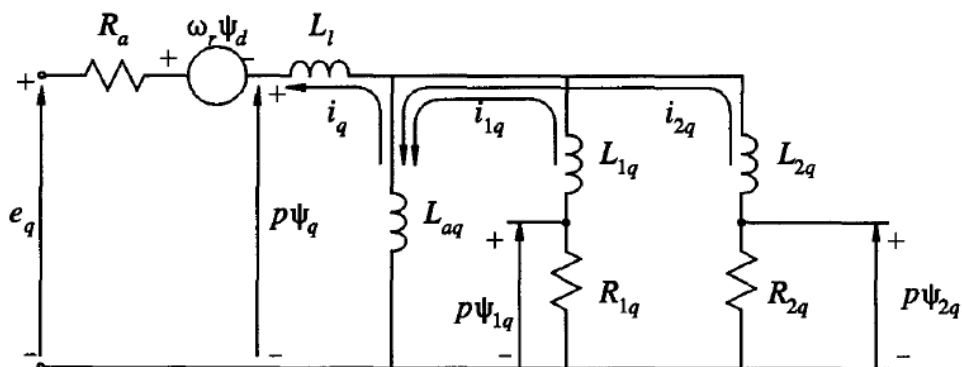


Figura B.2 – Circuito equivalente no eixo-q.

Parâmetros da Máquina Síncrona:

$$L'_d = L_l + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}}, \quad L''_d = L_l + \frac{L_{ad}L_{fd}L_{1d}}{L_{ad}L_{fd} + L_{ad}L_{1d} + L_{fd}L_{1d}}$$

$$L'_q = L_l + \frac{L_{aq}L_{1q}}{L_{ad} + L_{fd}}, \quad L''_q = L_l + \frac{L_{aq}L_{1q}L_{2q}}{L_{aq}L_{1q} + L_{aq}L_{2q} + L_{1q}L_{2q}}$$

Tabela B.1 Expressões clássica e exata dos parâmetros da máquina Síncrona

Parâmetro	Expressão clássica	Expressão Exata
T'_{d0}	T_1	$T_1 + T_2$
T'_d	T_4	$T_4 + T_5$
T''_{d0}	T_3	$T_3[T_1 / (T_1 + T_2)]$
T''_d	T_6	$T_6[T_4 / (T_4 + T_5)]$
L'_d	$L_d(T_4 / T_1)$	$L_d(T_4 + T_5) / (T_1 + T_2)$
L''_d	$L_d(T_4T_6) / (T_1T_3)$	$L_d(T_4T_6) / (T_1T_3)$

OBS: Por serem valores em p.u. a indutância em p.u. é igual à reatância em p.u. (100%).

Onde:

$$T_1 = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}}, \quad T_2 = \frac{L_{ad} + L_{1d}}{R_{1d}}$$

$$T_3 = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right), \quad T_4 = \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} \right)$$

$$T_5 = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} \right), \quad T_6 = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_lL_{fd}}{L_{ad}L_l + L_{ad}L_{fd} + L_{fd}L_l} \right)$$

$$T'_{q0} = \frac{L_{aq} + L_{1q}}{R_{1q}}, \quad T''_{q0} = \frac{1}{R_{2q}} \left(L_{2q} + \frac{L_{aq}L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}} \right)$$

Para máquinas de pólos salientes os parâmetros no eixo-q são:

$$L_q = L_l + L_{aq}, \quad L''_q = L_l + \frac{L_{aq}L_{1q}}{L_{aq} + L_{1q}}, \quad T''_{q0} = \frac{L_{aq} + L_{1q}}{R_{1q}}$$

- OBS: 1. Parâmetros transitórios como L'_q e T'_{q0} não são aplicáveis neste caso.
2. No eixo-d, é apropriado considerar dois circuitos do rotor (campo e amortecimento) e as expressões anteriores é aplicável para máquinas de pólos salientes.

De acordo com valores reais e padrões das máquinas síncronas, a variação dos parâmetros das reatâncias e do tempo, em regime, transitório e subtransitório se tem:

$$X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d$$

$$T'_{d0} > T'_d > T''_{d0} > T''_d > T_{kd}$$

$$T'_{q0} > T'_q > T''_{q0} > T''_q$$

Tabela B.2 Faixas padrão de variação dos parâmetros de uma máquina síncrona

Parâmetros		Hidráulica	Térmica
Reatância Síncrona	X_d	0.6 – 1.5	1.0 – 2.3
	X_q	0.4 – 1.0	1.0 – 2.3
Reatância Transitória	X'_d	0.2 – 0.5	0.15 – 0.4
	X'_q	-	0.3 – 1.0
Reatância Subtransitória	X''_d	0.15 – 0.35	0.12 - 0.25
	X''_q	0.2 – 0.45	0.12 - 0.25
Constante de tempo Transitório (circ. aberto)	T'_{d0}	1.5 – 9.0	3.0 – 10.0
	T'_{q0}	-	0.5 – 2.0
Constante de tempo Subtransitória (circ. aberto)	T''_{d0}	0.01 – 0.05	0.02 – 0.05
	T''_{q0}	0.01 – 0.09	0.02 – 0.05
Indutância do Estator	X_l	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2
Resistência do Estator	R_a	0.002 – 0.02	0.0015 – 0.005

- Notas:
1. Expressões similares são aplicados para os parâmetros do eixo- q
 2. Todos os parâmetros estão em p.u. (para o SimuLigth em %)
 3. Constantes de tempos em segundo (similar ao SimuLigth).
 4. Toda a indutância mutua do eixo- d são assumidos iguais.

Tabela B.3 Variação típica da inércia (H) de um gerador:

Tipo de geração		H
Termica:	2 pólos - 3600 r/min	2.5 a 6
	4 pólos - 1800 r/min	4.0 a 10.0
Hidráulica		2.0 a 4.0

D. Edição de dados no Simulight

Maquina Síncrona:

Modelo I



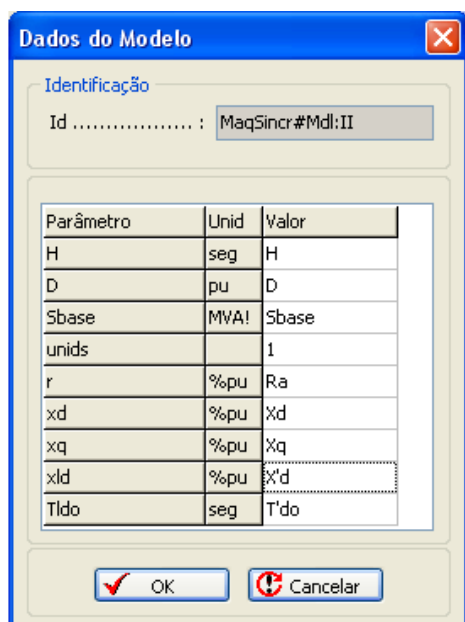
Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xld	%pu	X'd

Figura C.1 – Modelo I – Maq.

Parâmetros:

- H : Inércia do rotor em segundos
D : Coeficiente de amortecimento em pu/pu.
(relação: base-maquina/base-velocidade síncrona)
Sbase : Potência nominal em MVA
Unids: Nro de motores ligados no barramento
r : resistência do estator em % (Ra)
xld : reatância transitória no eixo-d em %

Modelo II

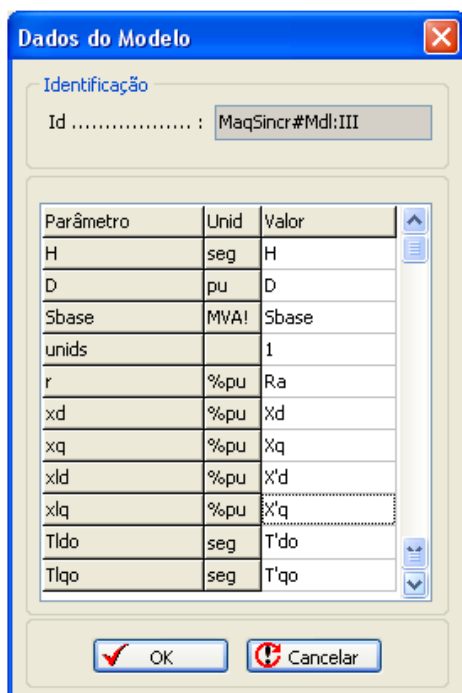


Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xd	%pu	Xd
xq	%pu	Xq
xld	%pu	X'd
Tldo	seg	T'do

Figura C.2 – Modelo II – Maq.

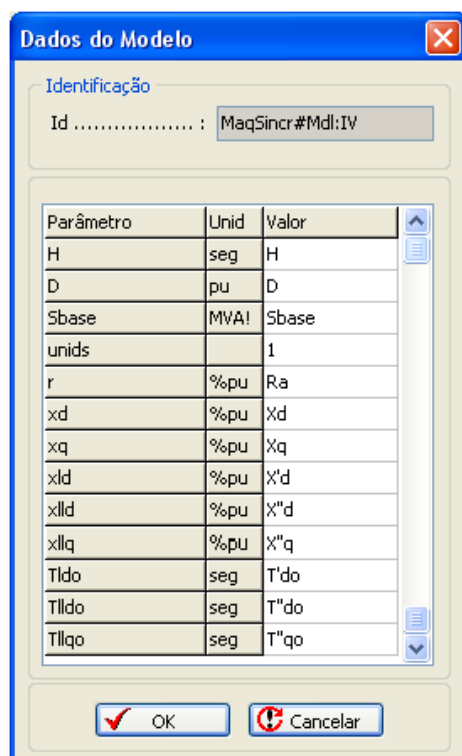
Parâmetros:

- H : Inércia do rotor em segundos
D : Coeficiente de amortecimento
Sbase : Potência nominal em MVA
Unids: Nro de motores ligados no barramento
r : resistência do estator em % (Ra)
xd : reatância síncrona no eixo-d em %
xq : reatância síncrona no eixo-q em %
xld : reatância transitória no eixo-d em %
Tldo : tempo transitório em circuito aberto no eixo-d em segundos.

Modelo III


Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xd	%pu	Xd
xq	%pu	Xq
xld	%pu	X'd
xlg	%pu	X"q
Tldo	seg	T'do
Tlqo	seg	T'qo

Figura C.3 – Modelo III – Maq.

Modelo IV


Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xd	%pu	Xd
xq	%pu	Xq
xld	%pu	X'd
xlld	%pu	X"q
xllq	%pu	X"q
Tldo	seg	T'do
Tlldo	seg	T"do
Tllqo	seg	T"qo

Figura C.4 – Modelo IV – Maq

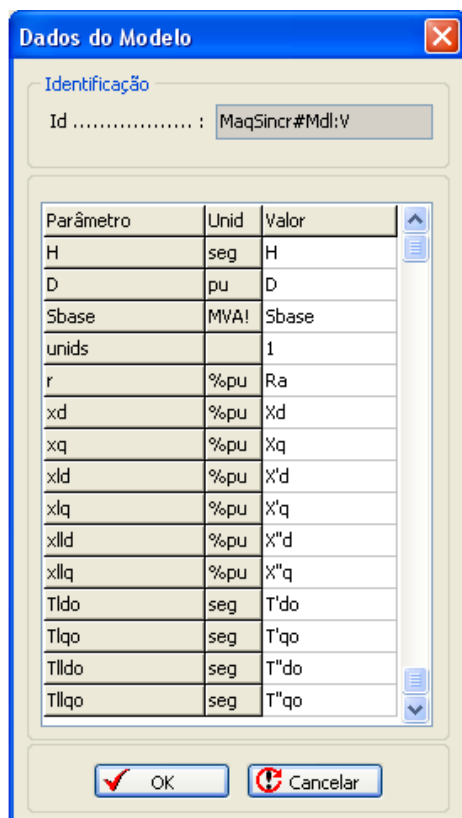
Parâmetros:

H : Inércia do rotor em segundos
 D : Coeficiente de amortecimento
 Sbase : Potência nominal em MVA
 Unids: Nro de motores ligados no barramento
 r : resistência do estator em % (R_a)
 xd : reatância síncrona no eixo-d em %
 xq : reatância síncrona no eixo-q em %
 xld : reatância transitória no eixo-d em %
 xlg : reatância transitória no eixo-q em %
 Tldo : tempo transitório em circuito aberto no eixo-d em segundos.
 Tlqo : tempo transitório em circuito aberto no eixo-q em segundos.

Parâmetros:

H : Inércia do rotor em segundos
 D : Coeficiente de amortecimento
 Sbase : Potência nominal em MVA
 Unids: Nro de motores ligados no barramento
 r : resistência do estator em % (R_a)
 xd : reatância síncrona no eixo-d em %
 xq : reatância síncrona no eixo-q em %
 xld : reatância transitória no eixo-d em %
 xlld : reatância subtransitória no eixo-d em %
 xllq : reatância subtransitória no eixo-q em %
 Tldo : tempo transitório em circuito aberto no eixo-d em segundos.
 Tlldo : tempo subtransitório em circuito aberto no eixo-d em segundos.
 Tllqo : tempo subtransitório em circuito aberto no eixo-q em segundos.

Modelo V



Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xd	%pu	Xd
xq	%pu	Xq
xld	%pu	X'd
xlq	%pu	X"q
xlld	%pu	X"d
xllq	%pu	X"q
Tldo	seg	T'do
Tlqo	seg	T"qo
Tlldo	seg	T"do
Tllqo	seg	T"qo

Figura C.5 – Modelo V – Maq.

Regulador de Tensão:

Modelo I



Parâmetro	Unid	Valor
Efd	pu	1

Figura C.9 – Modelo I – R. Tensão

Parâmetros:

H : Inercia do rotor em segundos
 D : Coeficiente de amortecimento
 Sbase : Potência nominal em MVA
 Unids: Nro de motores ligados no barramento
 r : resistência do estator em % (R_a)
 xd : reatância síncrona no eixo-d em %
 xq : reatância síncrona no eixo-q em %
 xld : reatância transitória no eixo-d em %
 xlq : reatância transitória no eixo-d em %
 xlld : reatância subtransitória no eixo-d em %
 xllq : reatância subtransitória no eixo-q em %
 Tldo : tempo transitório em circuito aberto no eixo-d em segundos.
 Tlqo : tempo transitório em circuito aberto no eixo-q em segundos.
 Tlldo : tempo subtransitório em circuito aberto no eixo-d em segundos.
 Tllqo : tempo subtransitório em circuito aberto no eixo-q em segundos.

Parâmetros:

Efd : Tensão de Campo em pu.

Modelo II


Parâmetro	Unid	Valor
K		Ka
Vref	pu	Vref
Lmn		Lim_min
Lmx		Lim_max

Parâmetros:

- K : Ganho do regulador de tensão. Em pu/pu adimensional.
- Vref : Tensão de referência em pu. (Para modificá-lo, recomenda-se usar o evento modifica parâmetro)
- Lmn : Limite inferior da tensão de saída do regulador de tensão em pu
- Lmx : Limite superior da tensão de saída do regulador de tensão em pu

Figura C.10 – Modelo II – Reg. Tensão.

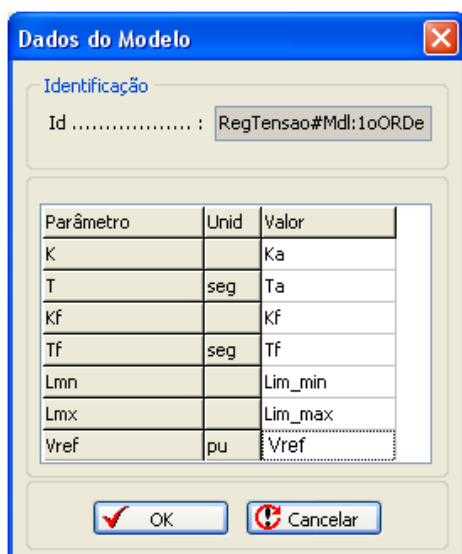
Modelo III


Parâmetro	Unid	Valor
K		Ka
T	seg	Ta
Lmn		Lim_min
Lmx		Lim_max
Vref	pu	Vref

Parâmetros:

- K : Ganho do regulador de tensão. Em pu/pu adimensional.
- T : Constante de tempo do regulador de tensão em segundos
- Lmn : Limite inferior da tensão de saída do regulador de tensão em pu
- Lmx : Limite superior da tensão de saída do regulador de tensão em pu
- Vref : Tensão de referência em pu. (Para modificá-lo, recomenda-se usar o evento modifica parâmetro)

Figura C.11 – Modelo III – Reg. Tensão.

Modelo IV


Parâmetro	Unid	Valor
K		Ka
T	seg	Ta
Kf		Kf
Tf	seg	Tf
Lmn		Lim_min
Lmx		Lim_max
Vref	pu	Vref

Parâmetros:

- K : Ganho do regulador de tensão. Em pu/pu (adimensional).
- T : Constante de tempo do regulador de tensão em segundos
- Kf : Ganho do circuito de realimentação derivativa em pu/pu (adimensional).
- Tf : Constante de tempo circuito de realimentação derivativa em segundos
- Lmn : Limite inferior da tensão de saída do regulador de tensão em pu
- Lmx : Limite superior da tensão de saída do regulador de tensão em pu
- Vref : Tensão de referência em pu. (Para modificá-lo,

Figura C.12 – Modelo IV – Reg. Tensão.

Regulador de Velocidade:**Modelo I**


Parâmetro	Unid	Valor
Pm	pu	1

Parâmetros:

- Pm : Potência mecânica em pu.

Figura C.13 – Modelo I – Reg. Velocidade.

Modelo II


Parâmetro	Unid	Valor
R	%	R
Tc	seg	Tc
Tr	seg	Tr
Pref	pu	Pref

Parâmetros:

- R : Estatismo permanente em %
- Tc : Constante de tempo do regulador em segundos.
- Tr : Constante de tempo de reaquecimento em segundos.
- Pref : Potência de referência em pu. (Para modificá-lo, recomenda-se usar o evento modifica parâmetro)

Figura C.14 – Modelo II – Reg. Velocdade.

Estabilizador de Potência:**Modelo I**


Parâmetro	Unid	Valor
Kw		Kw
Tw	seg	Tw
T1	seg	T1
T2	seg	T2

Parâmetros:

- Kw : Ganho do Wash-out em pu/pú (adimensional).
- Tw : Constante de tempo de Wash-out em segundos.
- T1 : Constante de tempo do primeiro Lead-Leg em segundos.
- T1 : Constante de tempo do segundo Lead-Leg em segundos.

Figura C.15 – Modelo I – Estabilizador.

Modelo de Carga

Modelo Z Constante



Figura C.16 – Modelo Z constante.

Modelo ZIP

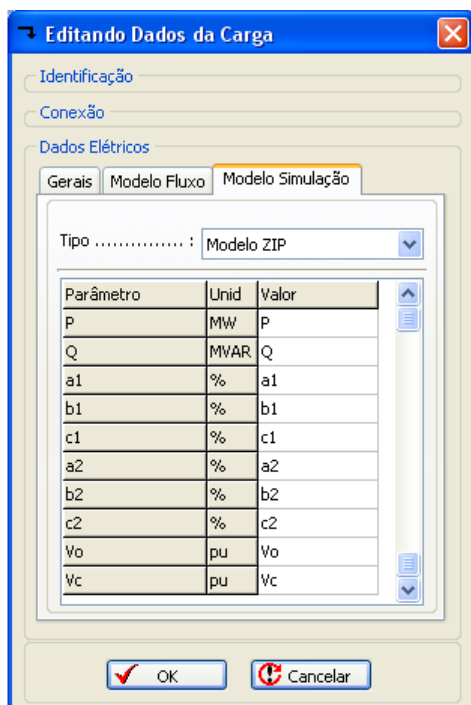


Figura C.17 – Modelo ZIP.

Parâmetros:

- P : Potência ativa da carga em MW.
- Q : Potência reativa da carga em MVAR.
- Vo : Tensão inicial da vindo do fluxo de potência em pu (calculo interno).
- Vc : Tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante em p.u.

Parâmetros:

- P : Potência ativa da carga em MW.
- Q : Potência reativa da carga em MVAR.
- a1,b1,c1 : constantes que definem as parcelas de carga ativa por corrente e impedâncias constantes (adimensionais).
- a2,b2,c2 : constantes que definem as parcelas de carga reativa por corrente e impedâncias constantes (adimensionais).
- Vo : Tensão inicial da vindo do fluxo de potência em pu (calculo interno).
- Vc : Tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante em p.u.

$$P_0 = \begin{cases} P[a_1 + b_1(V/V_0) + c_1(V/V_0)^2] & V \geq V_C \\ P[a_1(V/V_C)^2 + b_1(V/V_C)(V/V_0) + c_1(V/V_0)^2] & V < V_C \end{cases}$$

$$Q_0 = \begin{cases} Q[a_2 + b_2(V/V_0) + c_2(V/V_0)^2] & V \geq V_C \\ Q[a_2(V/V_C)^2 + b_2(V/V_C)(V/V_0) + c_2(V/V_0)^2] & V < V_C \end{cases}$$

Modelo de Motor de Indução

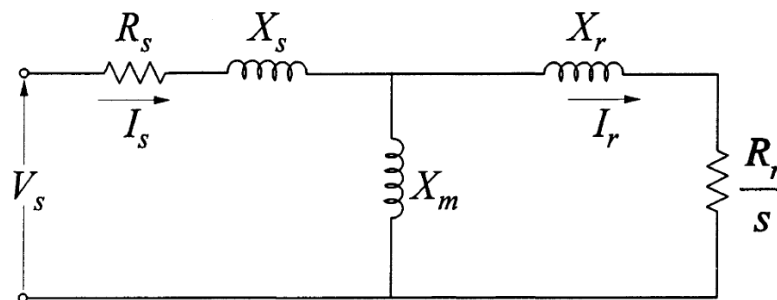


Figura C.19 – Modelo Motor de Indução.

Parâmetros:

- R_s : resistência do estator em %
- X_s : reatância do estator em %
- R_r : resistência do rotor em %
- X_r : reatância do rotor em %
- H : constante de inércia do rotor em segundos
- Shp : potência nominal em hp
- unids : número de motores ligados no barramento
- A,B,C : constantes da curva do torque mecânico da carga acionada ($A + B + C = 100\%$)
- T_{ref} : torque de referência da carga na velocidade síncrona em %

O torque mecânico imposto ao motor pela carga acionada é dado pela equação:

$$T_m = T_{ref}(A + B\omega + C\omega^2)$$

onde ω é a velocidade mecânica do motor.

Partida de Motor de Indução

O Simulight não conta com um módulo de partida de motor, mas este pode ser usado para tal fim. No entanto, deve ser lembrado que o modelo usado pelo Simulight é um modelo de motor de indução com gaiola simples, adequado para operação numa faixa estreita de valores de escorregamento. Devido ao efeito pelicular das correntes nas barras da gaiola do rotor e ao efeito da saturação com valores mais elevados de corrente na

- Modifica parâmetro do motor: Tref=1000% para Tref=100%, retirando a sobrecarga e pertindo o início da partida do motor)

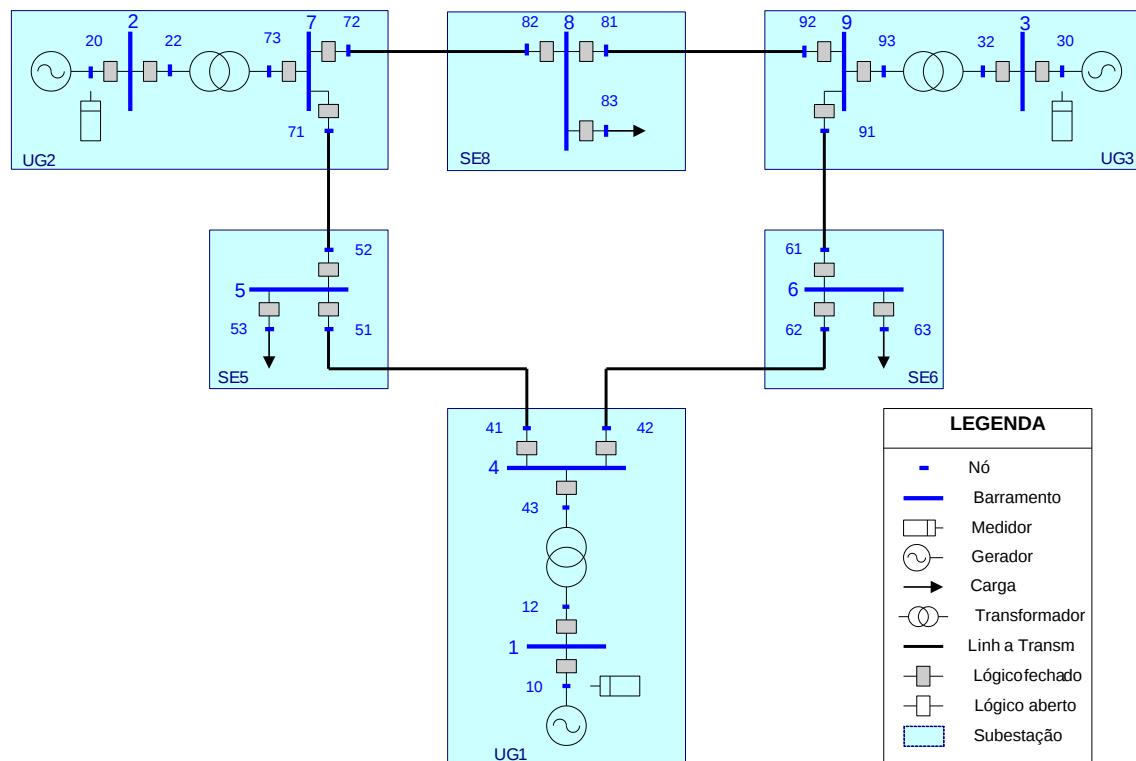


Figura C.21 – Sistema de 9 barras, a onde se conecta o motor de indução.

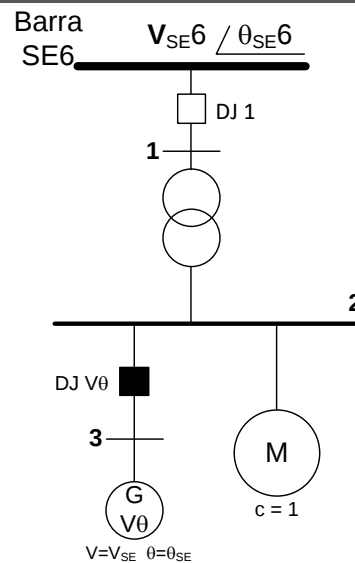


Figura C.22 – Esquema de como inserir o motor de Indução no barramento 6.

Alguns resultados da partida do Motor de Indução, utilizando o roteiro indicado:

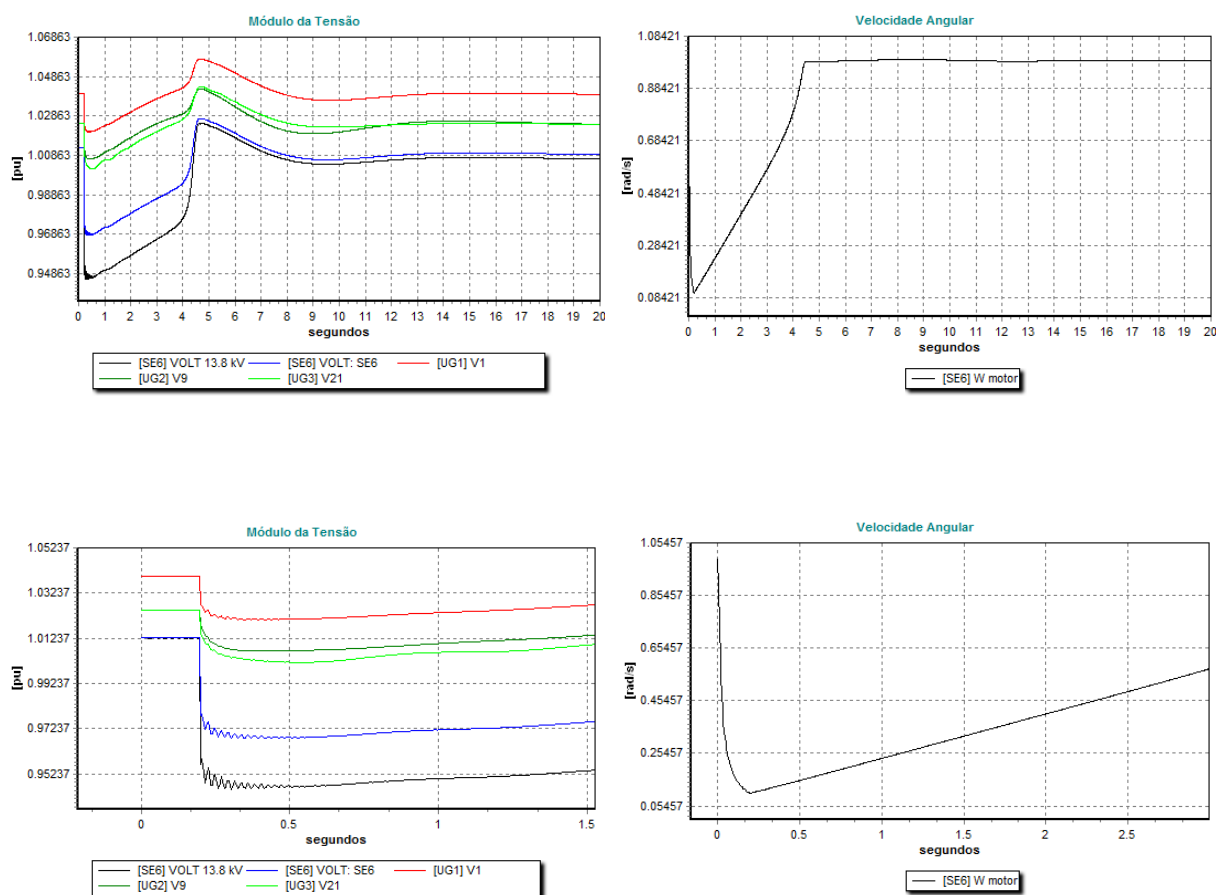


Figura C.23 – Algumas curvas representativas na partida do Motor de Indução (Cont...).

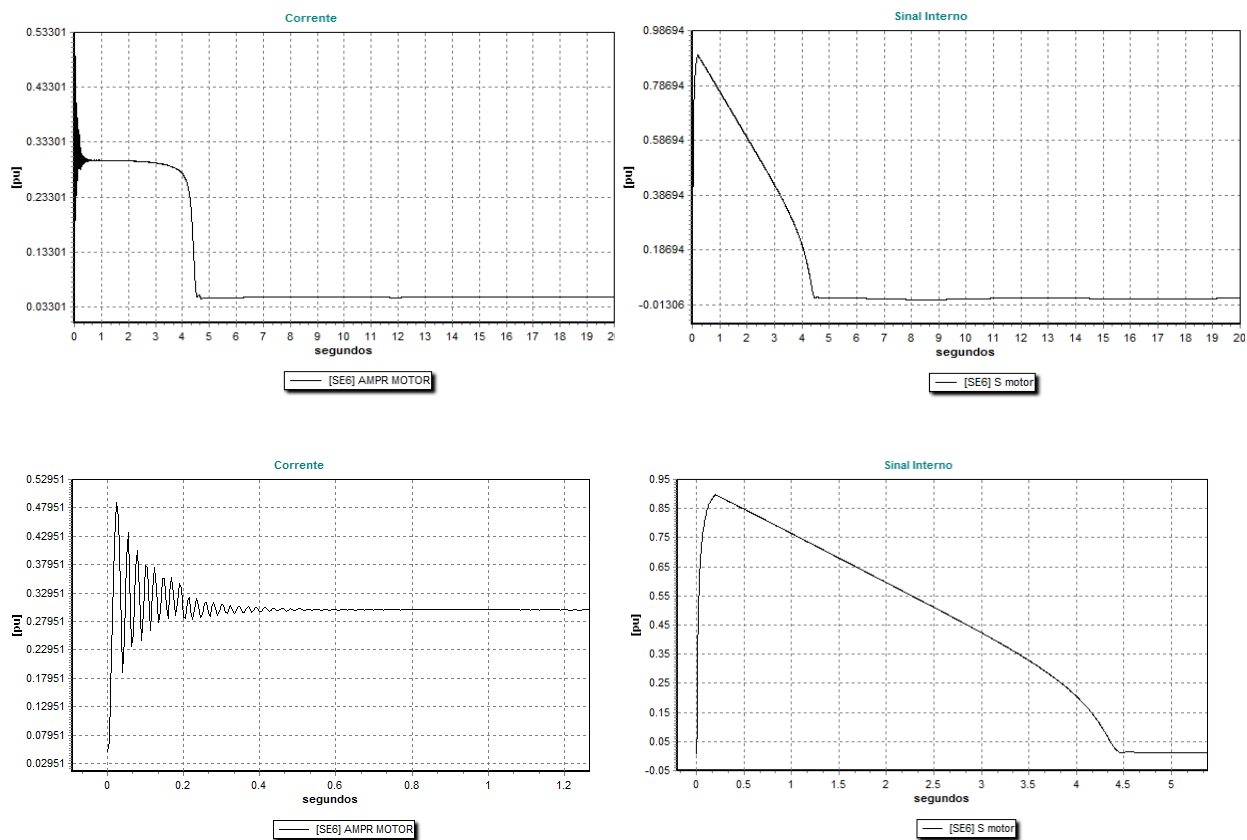


Figura C.24 – Algumas curvas representativas na partida do Motor de Indução.

E. Edição de Medidores no Simulight

Os medidores do Simulight, tem uma janela padrão que vai depender do tipo de medidor que o usuário escolha, Na Figura D.1 mostra os campos que todo medidor do Simulight tem, na mesma figura é mostrada um diagrama unifilar que representa a conexão do medidor.

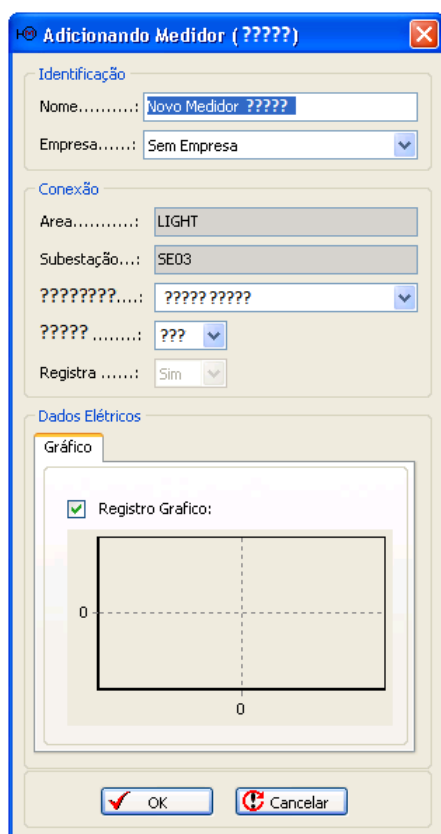
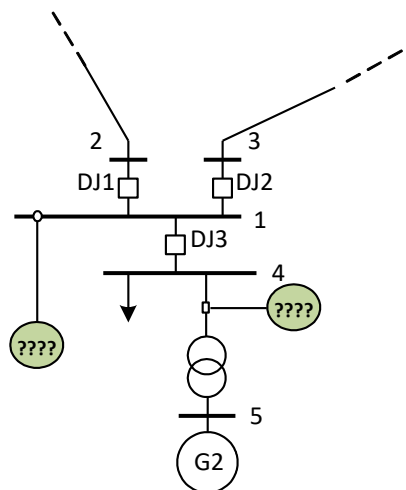



Figura D.1 – Janela padrão dos medidores do Simulight.

O significado dos campos comuns para os medidores são:

Identificação:

Nome: campo editável para que o usuário coloque qualquer nome, recomenda-se botar um nome que relacione o tipo de medidor inserido e o terminal ou dispositivo medido.

Empresa: nome da empresa a qual o medidor pertence, lista as empresas cadastradas.

Conexão:

Area: campos não editável, a informação indicada vem do [Nome] e [Area] da subestação em questão.

Subestação: campos não editável, a informação indicada vem da mesma forma que do campo *Area*.

Registra: campo não editável, muda Sim/Não dependendo do check no *Registro Gráfico*.

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: check (por default) para obter o registro do medidor.

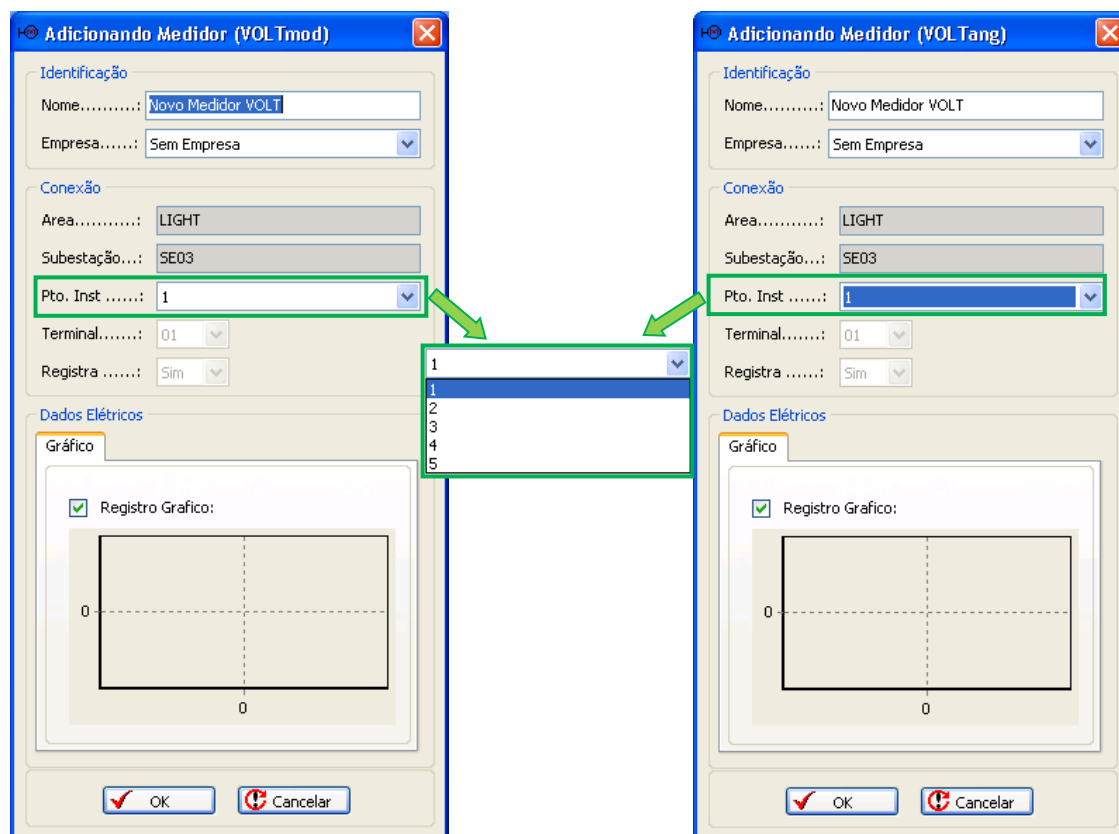
Medidor de Tensão:

Figura D.2 – Medidor do módulo da tensão (VOLTmod) e ângulo da tensão (VOLTang).

Identificação:

Nome e Empresa: explicados na Figura D.1.

Conexão:

Area e Subestação: explicados na Figura D.1.

Pto. Inst.: barramento na qual se deseja obter o módulo da tensão (da Figura D.3: barramento 1).

Terminal: campo não editável, disponível para medidores que vão medir dispositivos series da SE em questão.

Registra: explicado na Figura D.1..

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: explicado na Figura D.1.

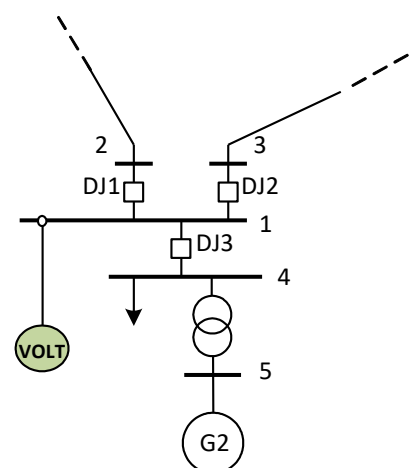


Figura D.3 – Diagrama de conexão

Medidor Frequência:

Na versão anterior do Simulight, o medidor de frequência registrava a frequência do centro de massa do sistema elétrico (por default nos arquivos *.fdx anteriores), nesta nova versão do Simulight, o medidor de frequência registra a frequência do barramento onde se encontra instalado.

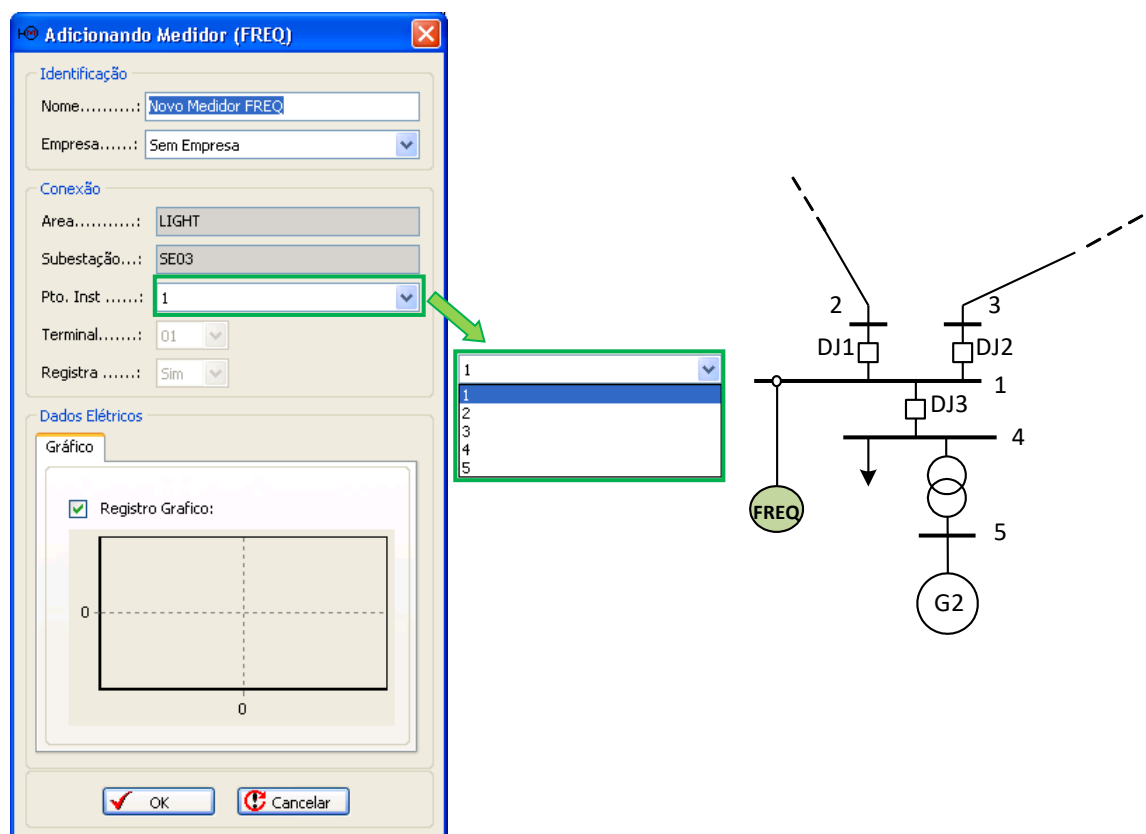


Figura D.4 – Medidor de Frequencia (FREQ) e diagrama de conexão

Identificação:

Nome e Empresa: explicados na Figura D.1.

Conexão:

Area e Subestação: explicados na Figura D.1.

Pto. Inst.: barramento na qual se deseja obter a frequência (da Figura D.4: barramento 1).

Terminal: campo não editável, disponível para medidores que vão medir dispositivos series da SE em questão.

Registra: explicado na Figura D.1..

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: explicado na Figura D.1.

Medidor de Potência Aparente (MVA)

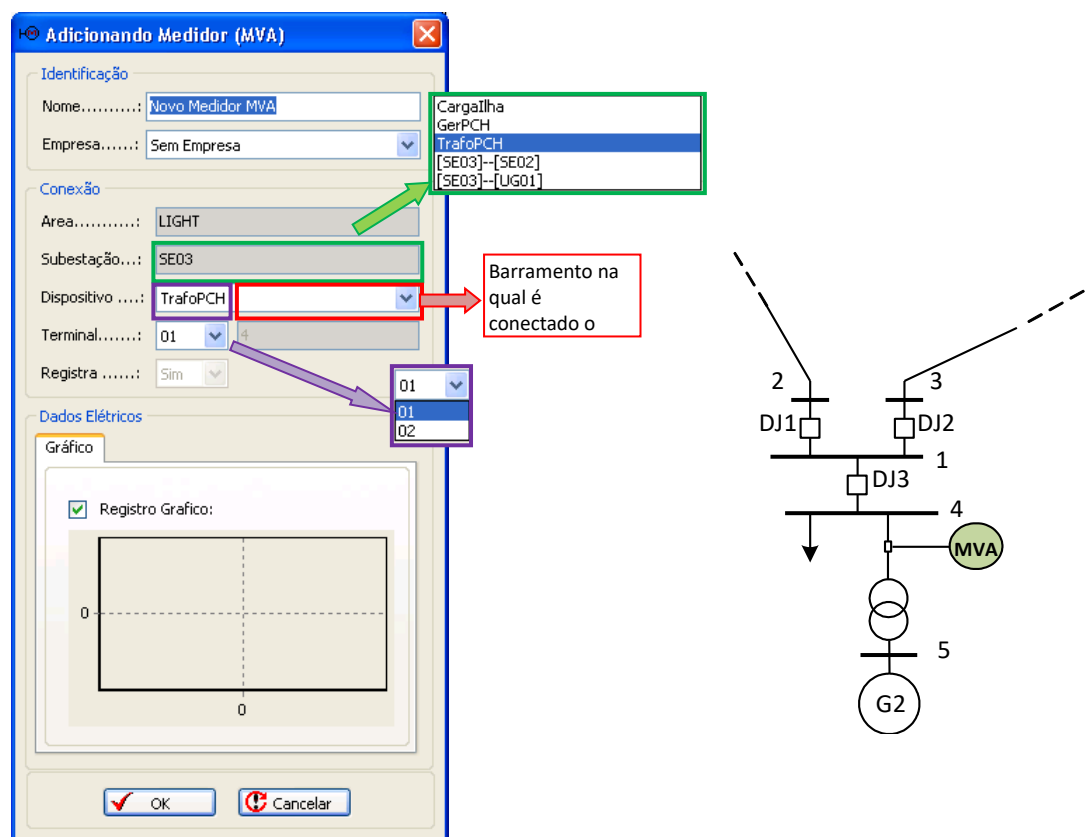


Figura D.5 – Medidor de Potência Aparente (MVA) e diagrama de conexão

Identificação:

Nome e Empresa: explicados na Figura D.1.

Conexão:

Area e Subestação: explicados na Figura D.1.

Dispositivo: lista os dispositivos serie ou shunt que pertencem à SE03, se for dispositivo serie ativara o campo *terminal*, caso seja shunt o bloqueara mas informará o barramento se esteja instalando o medidor (da Figura D.5: selecionou-se o transformador).

Terminal: se no **Dispositivo** foi selecionado um elemento serie, este campo listara os terminais de dito dispositivo, caso contrario indicara 01. O segundo campo do *terminal* (não editável) indica o barramento onde é conectado o medidor da potência aparente (da Figura D.5: o barramento 4 pertencente ao terminal 1 do transformador).

Registra: explicado na Figura D.1..

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: explicado na Figura D.1.

Medidor de Potência Ativa (MW)

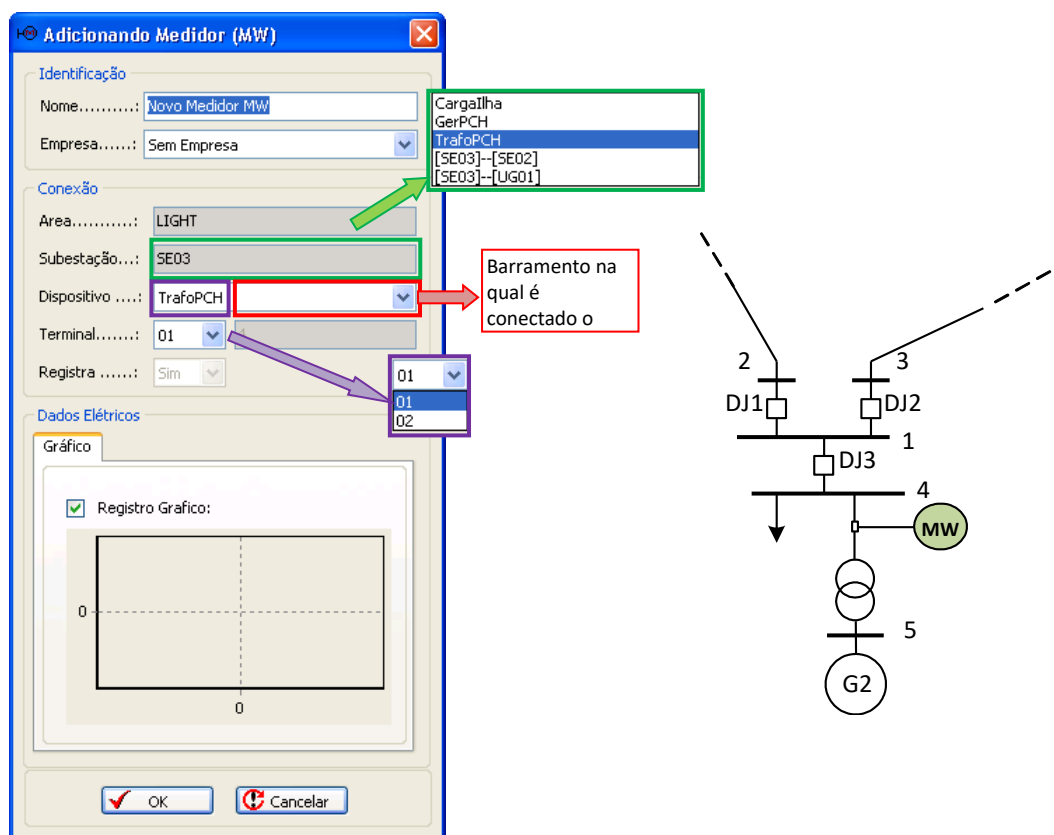


Figura D.6 – Medidor de Potência Ativa (MW) e diagrama de conexão

Identificação:

Nome e Empresa: explicados na Figura D.1.

Conexão:

Area e Subestação: explicados na Figura D.1.

Dispositivo: lista os dispositivos serie ou shunt que pertencem à SE03, se for dispositivo serie ativara o campo *terminal*, caso seja shunt o bloqueara mas informará o barramento se esteja instalando o medidor (da Figura D.6: selecionou-se o transformador).

Terminal: se no *Dispositivo* foi selecionado um elemento serie, este campo listara os terminais de dito dispositivo, caso contrario indicara 01. O segundo campo do *terminal* (não editável) indica o barramento onde é conectado o medidor de potência ativa (da Figura D.6: o barramento 4 pertencente ao terminal 1 do transformador).

Registra: explicado na Figura D.1..

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: explicado na Figura D.1.

Medidor de Potência Reativa (MVAR)

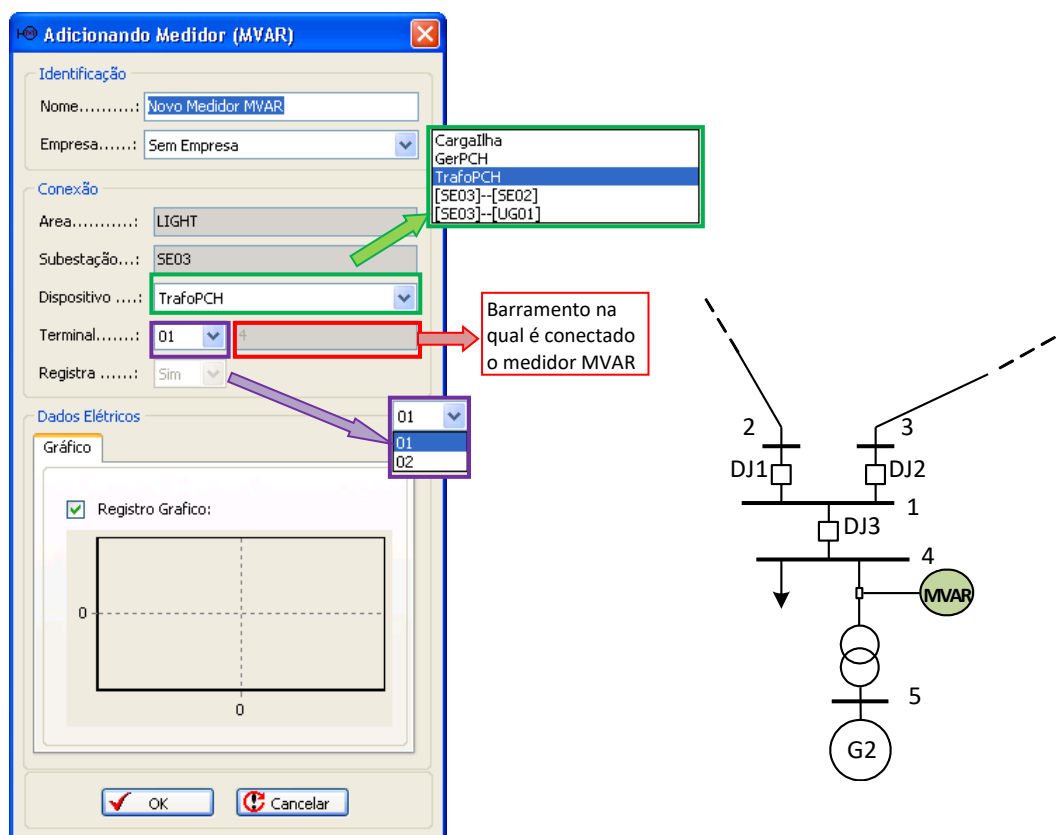


Figura D.7 – Medidor de Potência Reativa (MVAR) e diagrama de conexão

Identificação:

Nome e Empresa: explicados na Figura D.1.

Conexão:

Area e Subestação: explicados na Figura D.1.

Dispositivo: lista os dispositivos serie ou shunt que pertencem à SE03, se for dispositivo serie ativara o campo *terminal*, caso seja shunt o bloqueara mas informará o barramento se esteja instalando o medidor (da Figura D.7: selecionou-se o transformador).

Terminal: se no *Dispositivo* foi selecionado um elemento serie, este campo listara os terminais de dito dispositivo, caso contrario indicara 01. O segundo campo do *terminal* (não editável) indica o barramento onde é conectado o medidor de potência reativa (da Figura D.7: o barramento 4 pertencente ao terminal 1 do transformador).

Registra: explicado na Figura D.1.

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: explicado na Figura D.1.

Medidor de Corrente (AMPR)

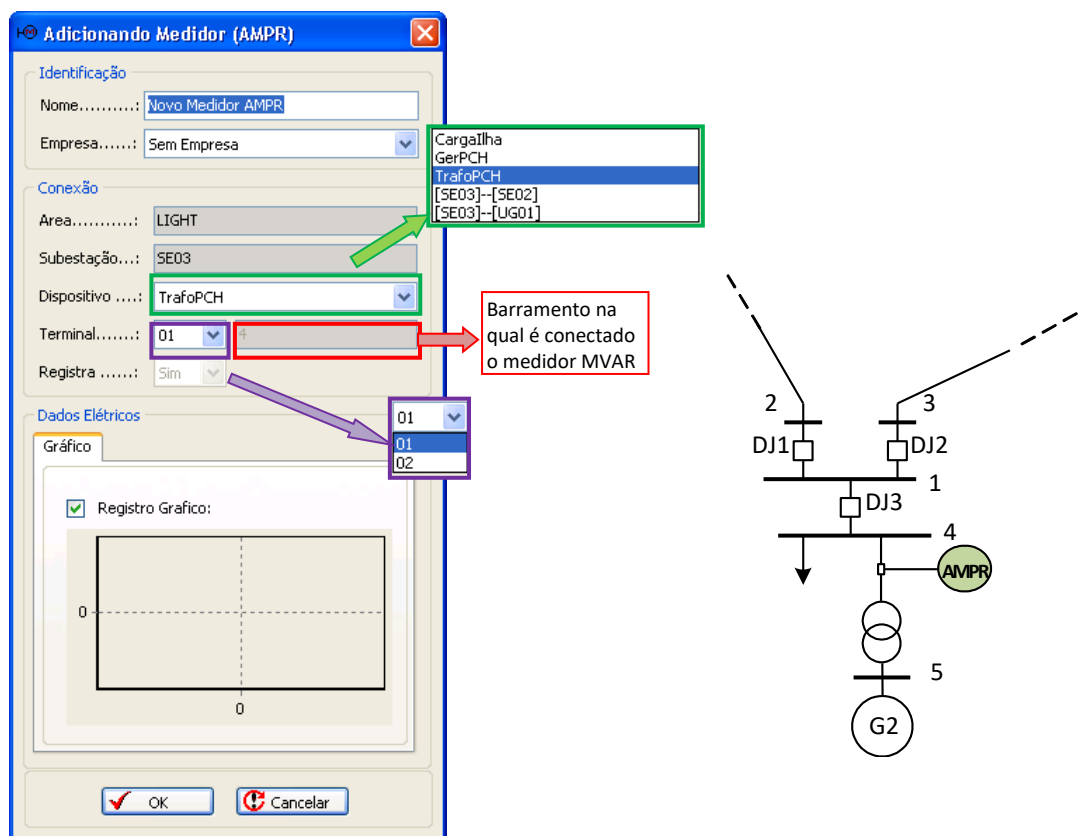


Figura D.8 – Medidor de Corrente (AMPR) e diagrama de conexão

Identificação:

Nome e Empresa: explicados na Figura D.1.

Conexão:

Area e Subestação: explicados na Figura D.1.

Dispositivo: lista os dispositivos serie ou shunt que pertencem à SE03, se for dispositivo serie ativara o campo terminal , caso seja shunt o bloqueara mas informará o barramento se esteja instalando o medidor (da Figura D.8: selecionou-se o transformador).

Terminal: se no **Dispositivo** foi selecionado um elemento serie, este campo listara os terminais de dito dispositivo, caso contrario indicara 01. O segundo campo do ***terminal*** (não editável) indica o barramento onde é conectado o medidor de corrente (da Figura D.8: o barramento 4 pertencente ao terminal 1 do transformador).

Registra: explicado na Figura D.1.

Dados Elétricos:

Registro Gráfico: explicado na Figura D.1.

Medidor de Sinal (EXPORT)

O medidor de sinal é um medidor que exporta as variáveis de estado dos dispositivos dinâmicos que pertencem à subestação em questão. Exemplos de dispositivos dinâmicos seriam os geradores e motores, ambas com seus respectivos reguladores (Figura D.9) e caso seja gerador também o estabilizador de potência

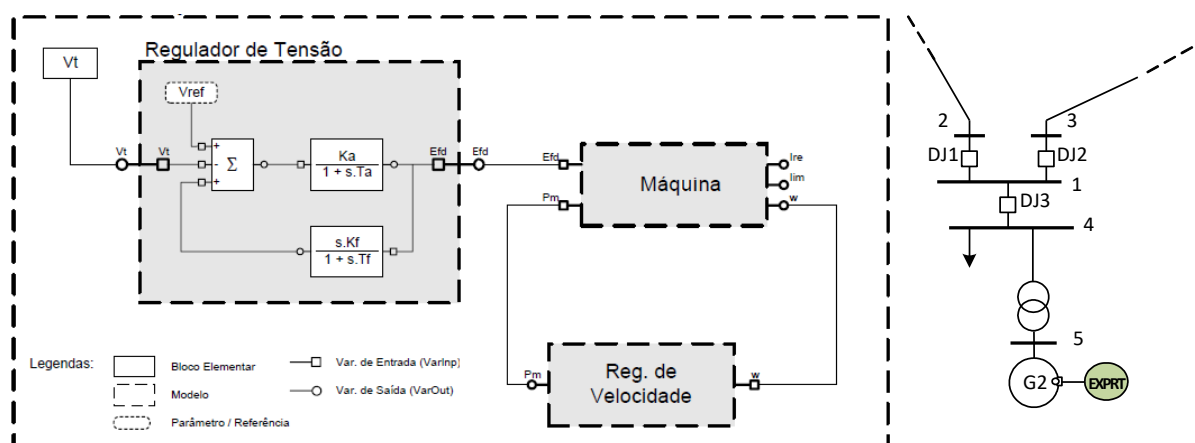


Figura D.9 – Representação esquemática do gerador/motor com seus reguladores e diagrama de conexão

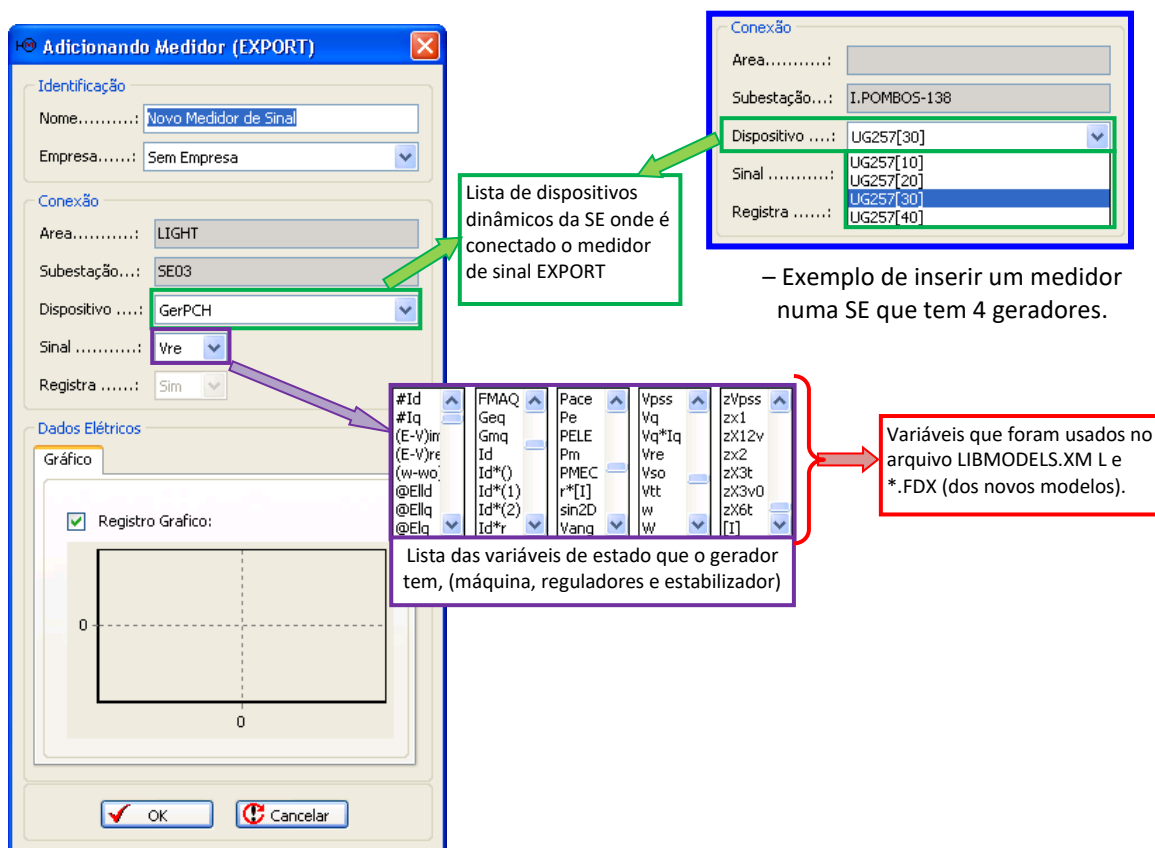


Figura D.10 – Medidor de Sinal (EXPORT) e um exemplo de ter mais de um gerador

Conexão:

Dispositivo: lista os dispositivos dinâmicos que pertencem à SE03, (da Figura D.10: só temos um gerador G2), no lado direito mostra um exemplo no caso de 4 geradores.

Sinal: listara todas as variáveis de estado que foram usadas nos modelos dinâmicos, geralmente da LIBMODELS.XML ou do próprio *.FDX dos novos modelos (dinâmicos) de inseridos (da Figura D.10: o sinal selecionado é o ângulo delta do gerador G2).

F. Edição da Proteção no Simulight

Relé de Distância (Relé 21):

Geralmente são classificados em três tipos básicos: Impedância; Mho ou admitância e Reatância. o tipo implementado no Simulight é de Impedância. O modelo básico mostra-se na Figura D.1. A função 67 ou diferencial pode ser adicionada no relé 21 para bloquear ou não o disparo do disjuntor (Fig. D.2).

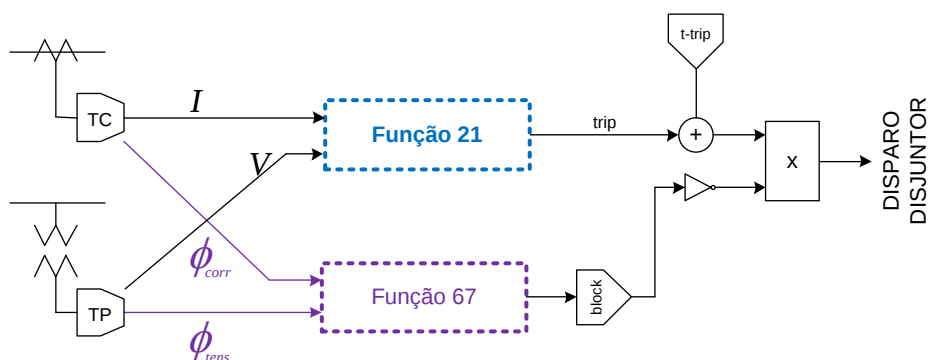


Figura E.1 – Modelo do Relé de Distância (Relé 21)

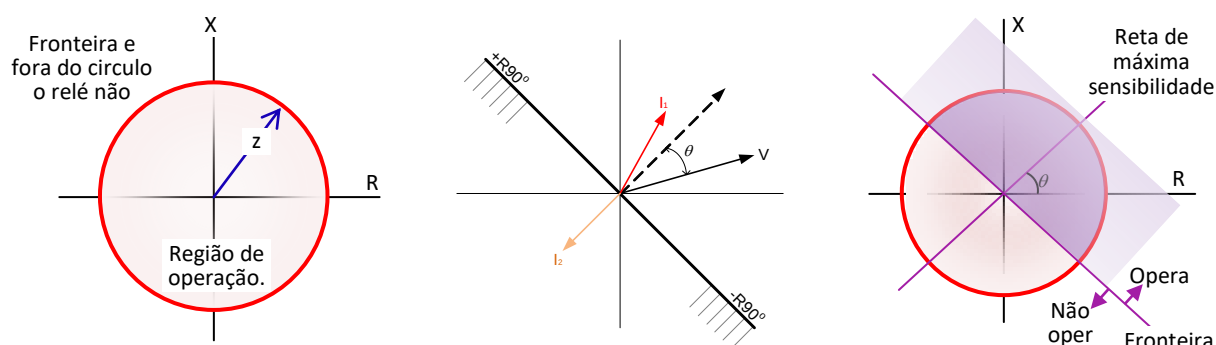


Figura E.2 – Região de operação, Função direcional e Relé 21 com diferencial

O relé de distância é alimentado por duas grandezas de entrada, tensão (V) e corrente (I), amostradas por TP e TC conectados ao sistema elétrico (Fig. D.3). A razão $V/I=Z$, é a impedância "vista" ou "medida" pelo relé.

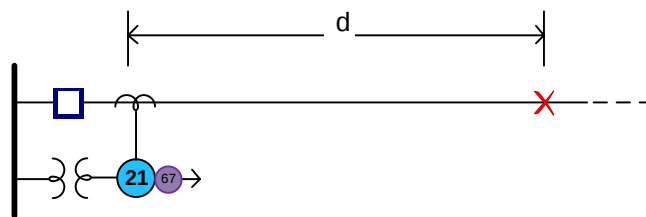


Figura E.3 – Relé de Distância no sistema de potência.

Quando ocorrer uma falta (curto-circuito), a tensão V e a corrente I serão a tensão de falta V_F e a corrente de falta I_F , respectivamente. Portanto, a impedância de falta medida ou vista pelo mesmo, é dada pela razão entre a tensão e a corrente de falta no seu ponto de instalação:

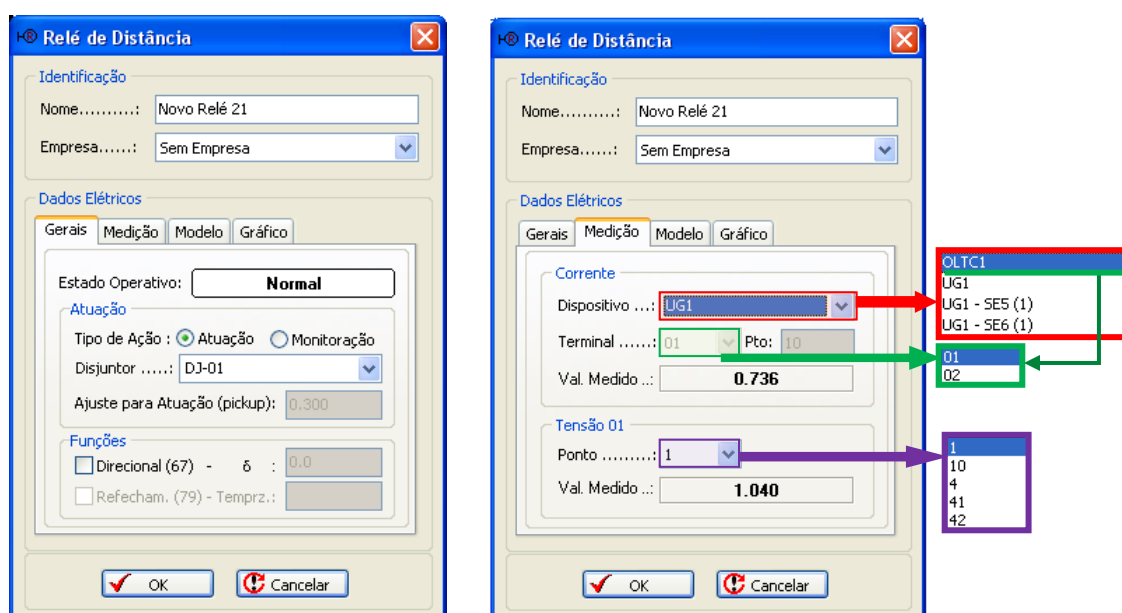
$$Z_F = V_F / I_F$$


Figura E.4 – Relé 21: Gerais e Medição

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.

Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.

Direcional (67): Adiciona a função direcional (Relé 67 – valores ingressados na Aba Modelo/Fun#67).

Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#21.

Medição:

Dispositivo: Onde se medirá a corrente.

Terminal: caso o dispositivo for transformador indicar em qual terminal será medido a corrente.

Ponto: Onde a Tensão será medida.

Valor medido: valores medidos nos pontos indicados de Corrente e Tensão.

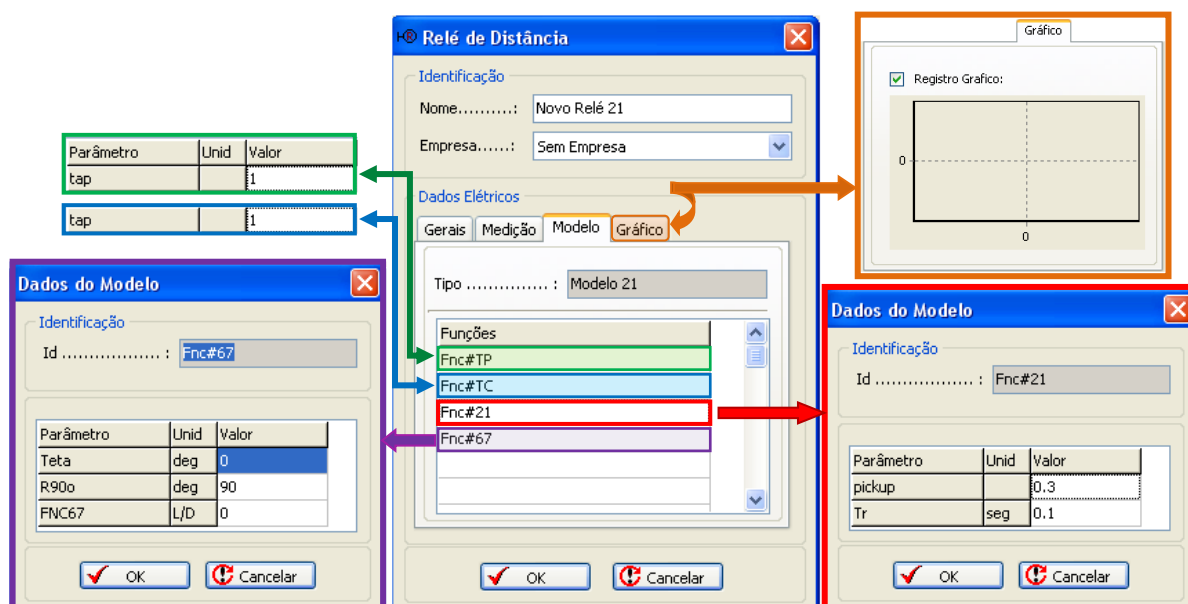


Figura E.5 – Relé 21: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#TC: [tap] do transformador de corrente

Fun#67: [Teta]: Ângulo de defasagem;

[R90°]: a rotação da linha de bloqueio.

[FNC67]: se o relé 67 atuar (1) ou não (0)

Fun#21: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup (% Z);

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Gráfico:

Para visualizar os valor de ajuste e valores medidos.

Relé de Sincronismo (Relé 25):

Relé de muita ajuda para a estabilidade do sistema, este relé é primordial na união de subsistemas ilhada. Permite o paralelismo entre Distribuidora e unidade consumidora, desde que a tensão, frequência e ângulo de fase de cada lado estiverem dentro dos limites pré-estabelecidos. A Figura E.6 mostra o modelo do relé 25.

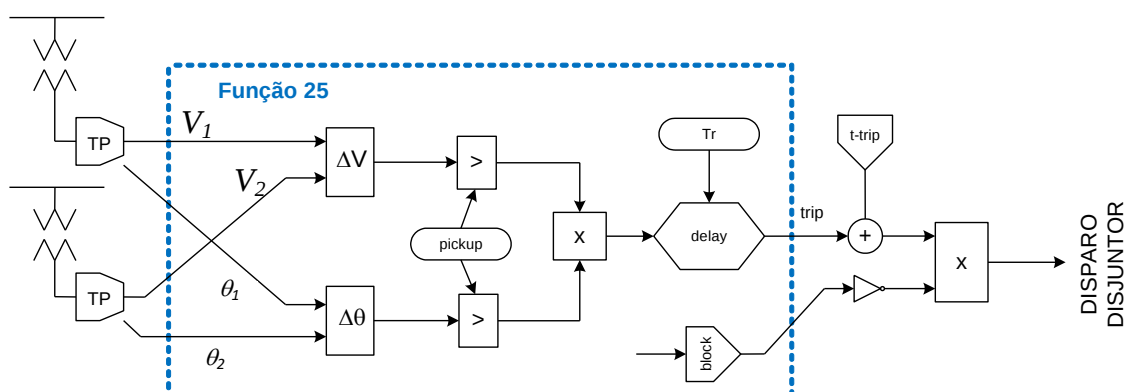
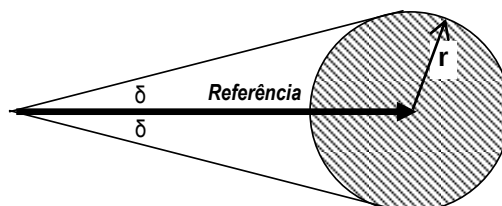
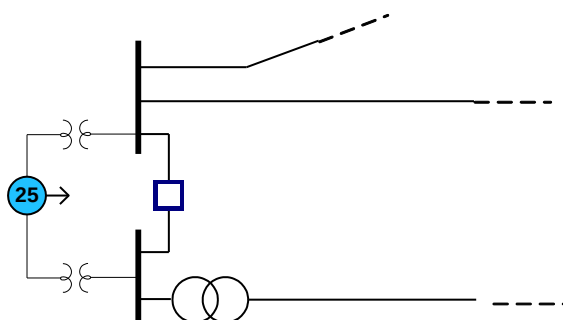


Figura E.6 – Modelo do Relé de Sincronismo (Relé 25)

A Fig. D.7 ilustra a lógica de operação, o relé recebe as tensões de ambos os pontos onde será feita a conexão. Uma das tensões serve como referência. Se a outra tensão fica na área hachurada, o fechamento do disjuntor é permitido, desde que as tensões permaneçam na região de atuação por um determinado período de tempo. A Figura E.8 mostra o relé 25 instalado no sistema de potência.

**Figura E.7** – Relé de Sincronismo: Função 25**Figura E.8** Relé de Sincronismo no sistema de potência.

Quando as diferenças das tensões dos barramentos assim como dos ângulos de defasagem estejam abaixo do valor pré-estabelecidos pelo pickup (r), o relé poderá operar, dependendo também do tempo de retardo (t_r) para a atuação do disjuntor.

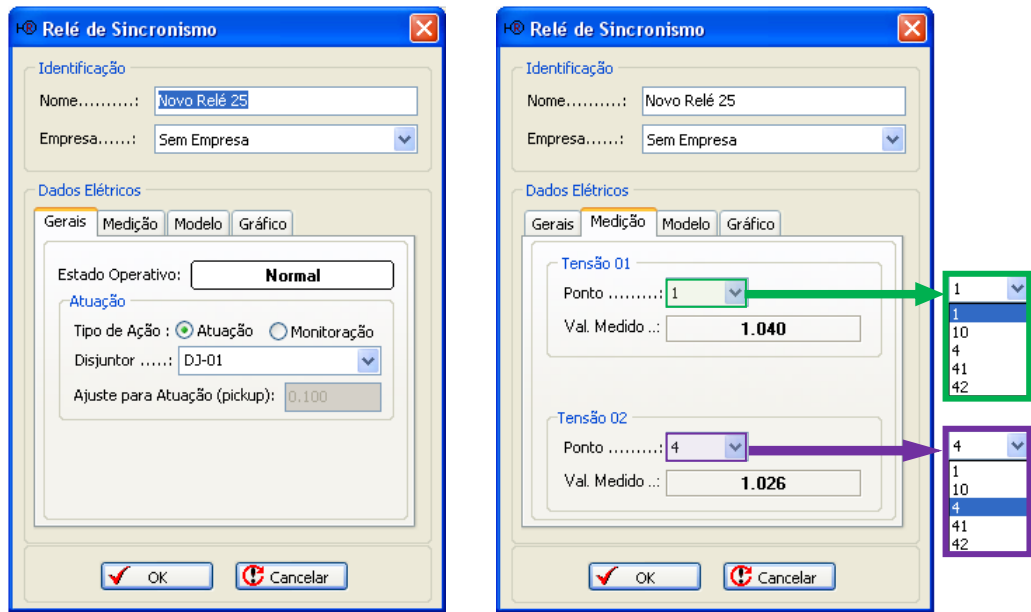


Figura E.9 – Relé 25: Gerais e Medição

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.
Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.
Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#25.

Medição:

Tensão 01/Ponto: Onde será medido a Tensão 1.
Tensão 02/Ponto: Onde será medido a Tensão 2.
Valor medido: valores medidos nos pontos indicados em Corrente e Tensão.

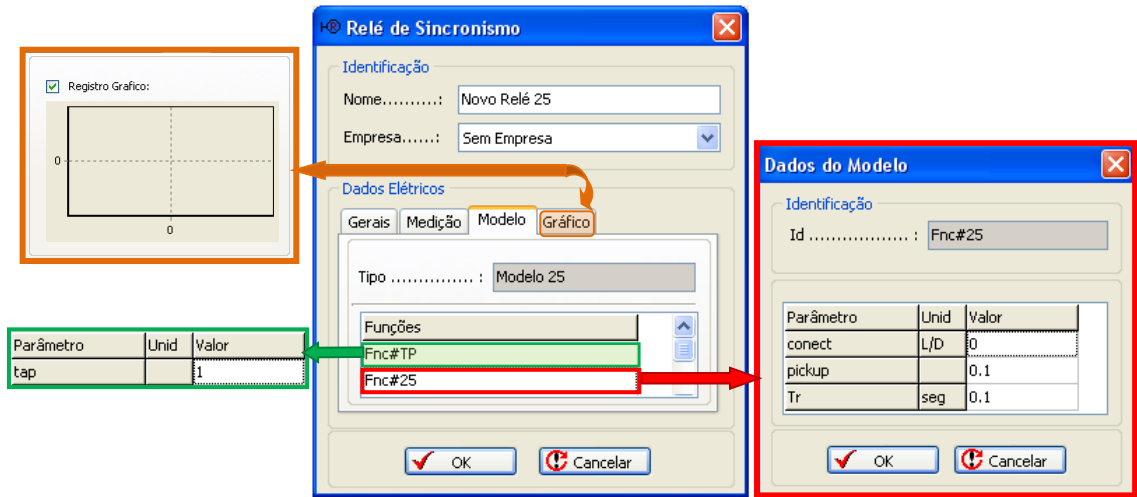


Figura E.10 – Relé 25: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência
Fun#25: [conect]: para o relé atuar (1) ou não (0)
[pickup]: ajuste do relé 25;

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Gráfico:

Para visualizar o valor de ajuste e valores medidos

Relé de Sub Tensão (Relé 27):

O relé de sub tensão é um dos relés mais utilizados, sua lógica de operação é simples, ele mede a tensão (V) no barramento logo a compara com um valor pré-estabelecido (pickup), se for menor então o relé atuará disparando o disjuntor. Na Fig. D.11 mostra-se o modelo do relé 27 e na Fig. D.12 a instalação deste num sistema de potência.

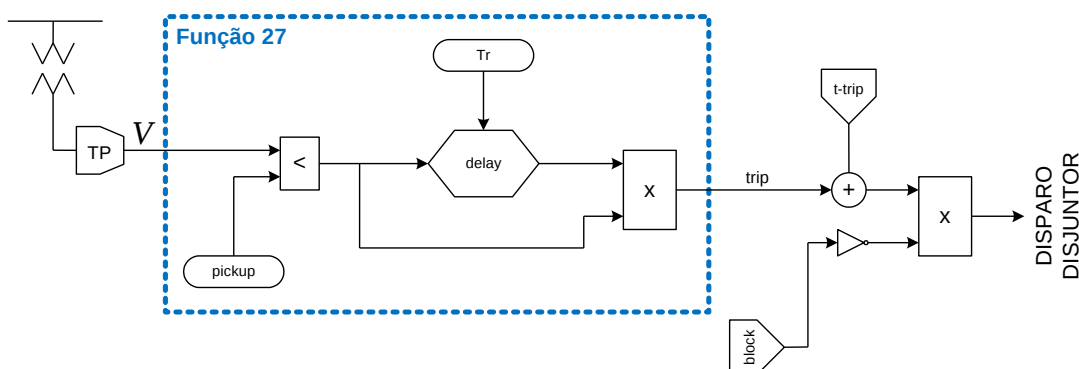


Figura E.11 – Modelo do Relé de Sub Tensão (Relé 27)



Figura E.12 – Relé de Sub Tensão no sistema de potência

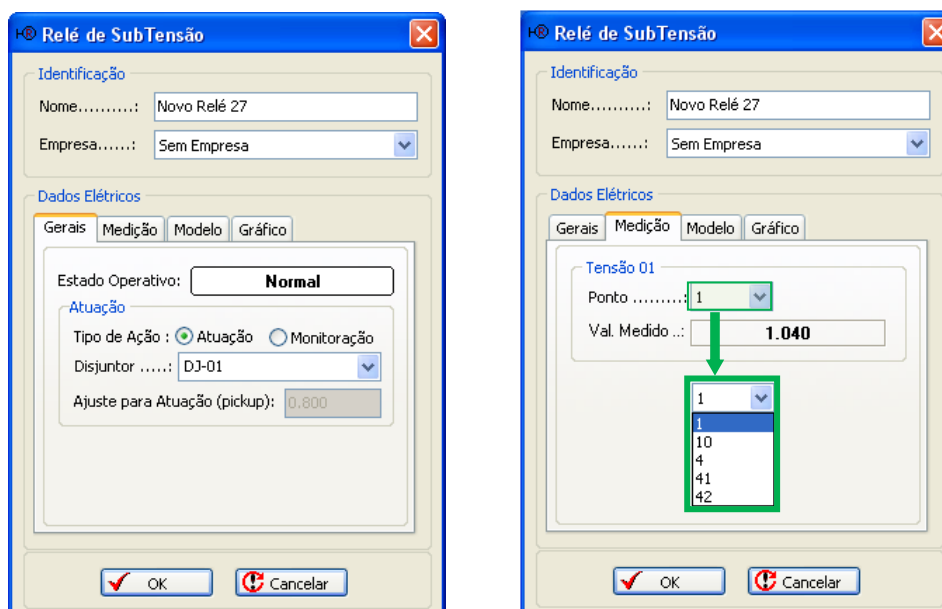


Figura E.13 – Relé 27: Gerais e Medição

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.

Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.

Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba **Ponto:** Onde a Tensão será medida.

Modelo/Fun#27.

Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

Medição:

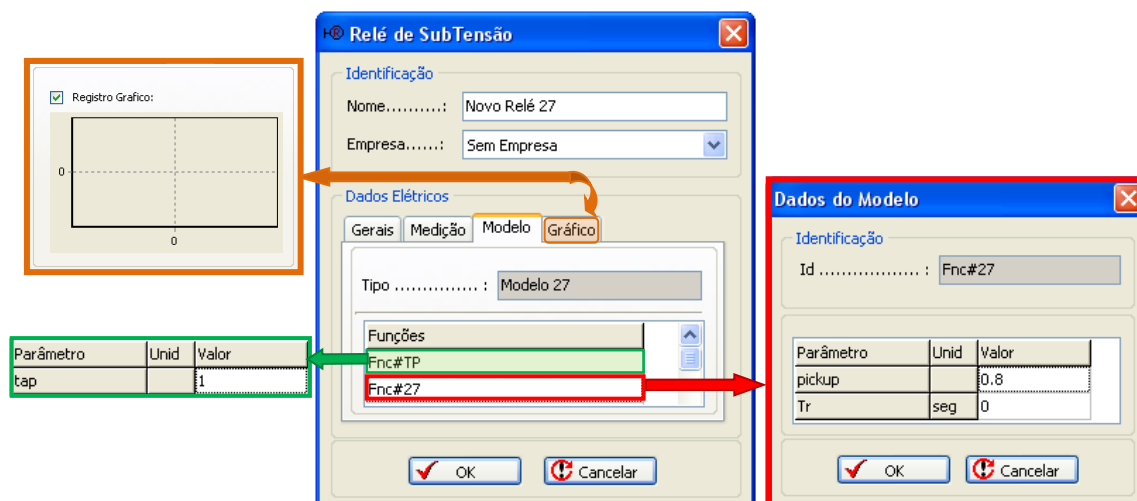


Figura E.14 – Relé 27: Modelo e Gráfico

Modelo:

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#27: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup;

Gráfico:

Para visualizar os valor de ajuste e valores medidos

Relé de Sobre Corrente Instantâneo (Relé 50):

A lógica de operação do Relé 50 é simples, ele mede a corrente (I) na linha logo a compara com um valor pré-estabelecido (pickup), se for menor então o relé atuará instantaneamente disparando o disjuntor ligado a este. Na Fig. D.15 mostra-se o modelo do relé 50, para ser instantâneo o valor de Tr = 0, caso se deseje o relé 50 com tempo de retardo, é só variar o valor de Tr. Na Fig. D.16 se mostra o relé 50 com função 67 e na Fig. D.17 a instalação deste relé num sistema de potência.

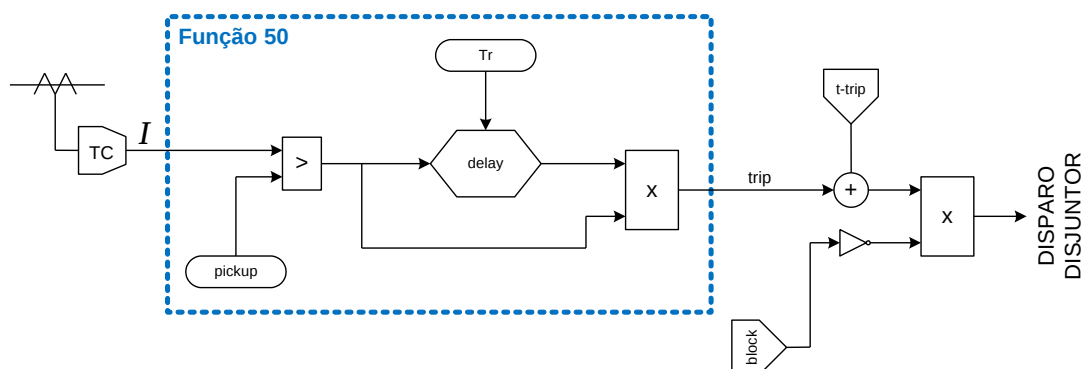


Figura E.15 – Modelo do Relé de Sobre Corrente Instantâneo (Relé 50)

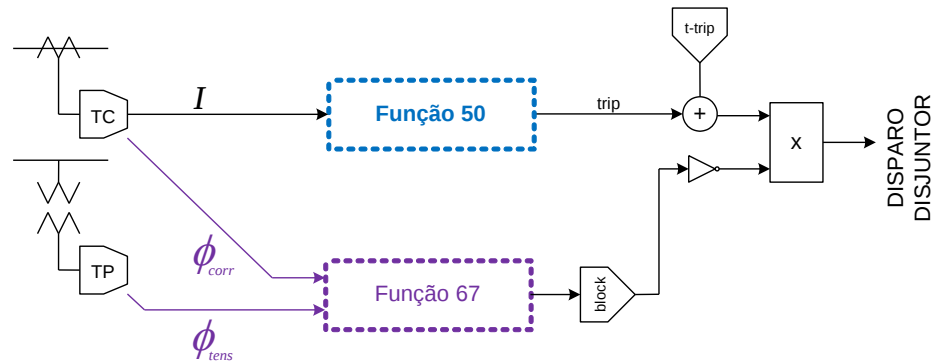


Figura E.16 – Relé de Sobre Corrente Instantâneo com a função diferencial

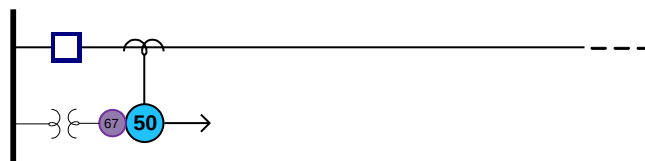


Figura E.17 – Relé de Sobre Corrente no sistema de potência

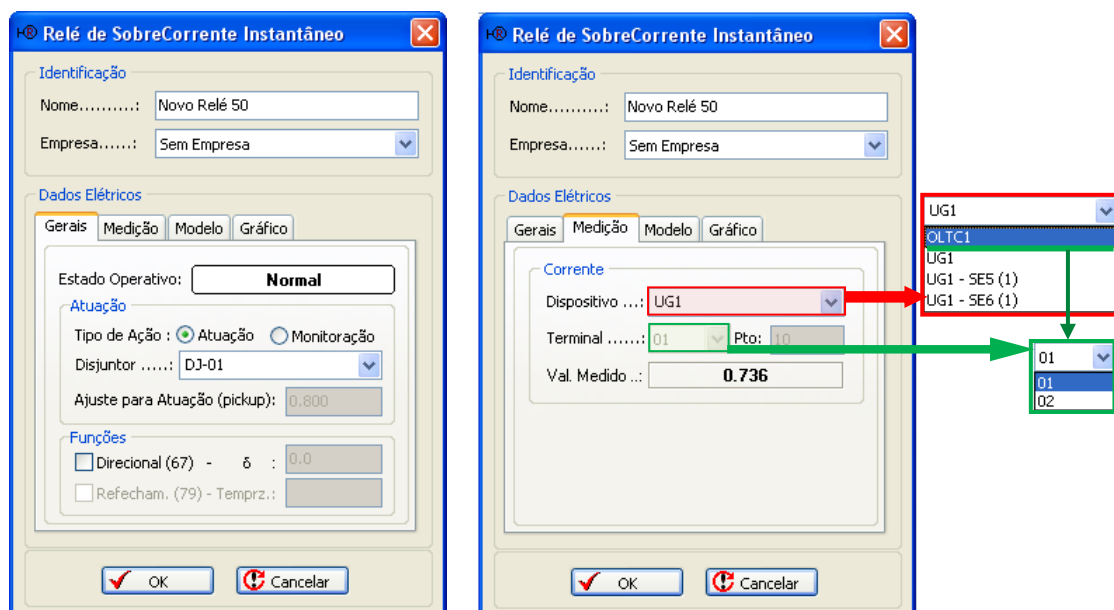


Figura E.18 – Relé 50: Gerais e Medição

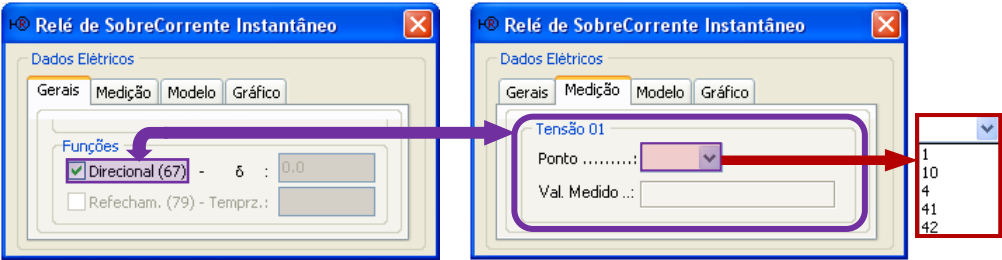


Figura E.19 – Relé 50: Ativando o modelo da Função 67

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.
Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.
Direcional (67): Adiciona a função direcional (valores ingressados na Aba Modelo/Fun#67).
Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#50.

Medição:

Dispositivo: Onde se medirá a corrente.
Terminal: caso o dispositivo for transformador indicar em qual terminal será medido a corrente.
Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

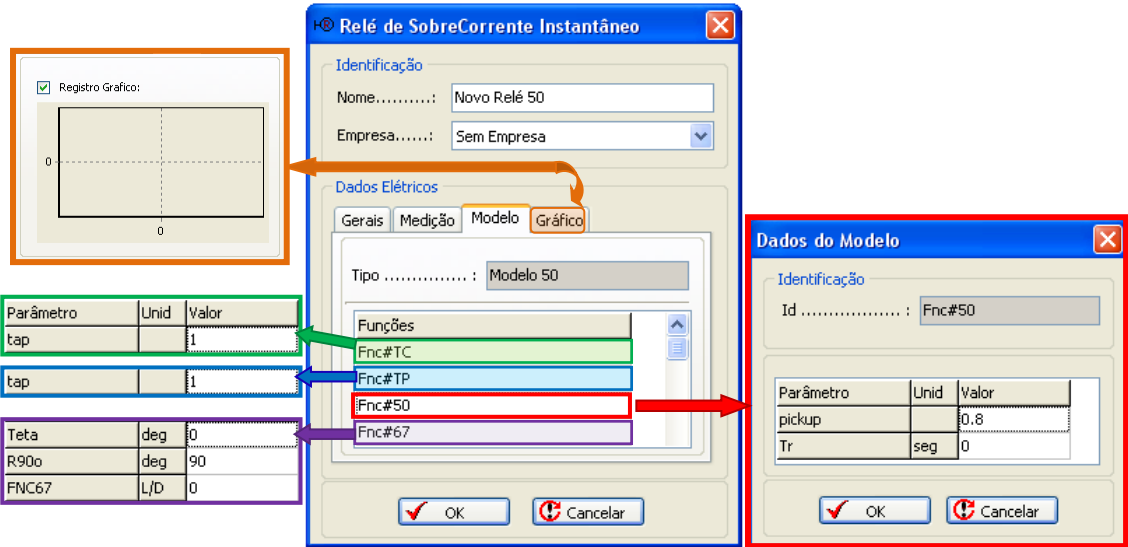


Figura E.20 – Relé 50: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TC: [tap] do transformador de corrente

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#67: [Teta]: Ângulo de defasagem;

[R90°]: a rotação da linha de bloqueio.

[FNC67]: se o relé 67 atuar (1) ou não (0)

Fun#50: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor. (0 para instantâneo)

Grafico:

Para visualizar o valor de ajuste e valor medido

Relé de SobreCorrente Temporizado (Relé 51):

A lógica de operação do Relé 51 é simples (Fig. D.21), ele mede a corrente (I) na linha logo a compara com um valor pré-estabelecido (pickup), se for menor então o relé atuará, mas este de forma temporizada, já que o tempo de retardo (Tr) depende dos parâmetros K1 e K2, tal como é mostrada na Figura E.22. Na Figura E.23 se mostra o relé 51 com função 67 e na Fig. D.24 a instalação deste relé num sistema de potência.

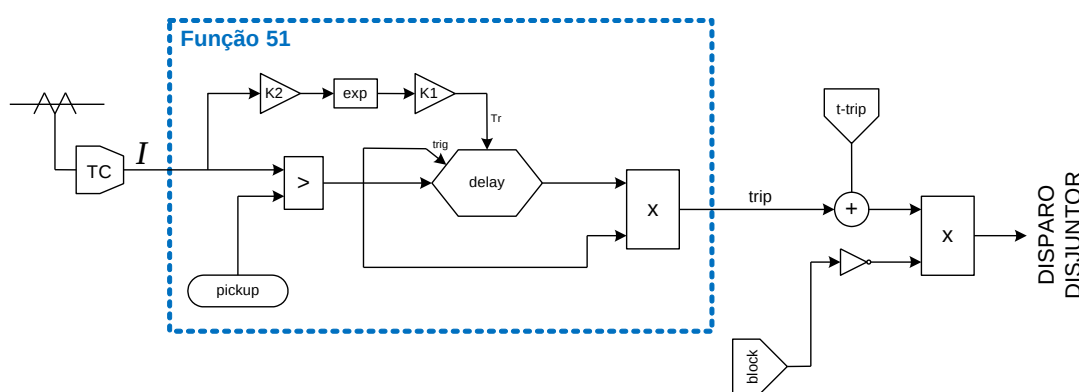


Figura E.21 – Modelo do Relé de Sobre Corrente Temporizado (Relé 51)

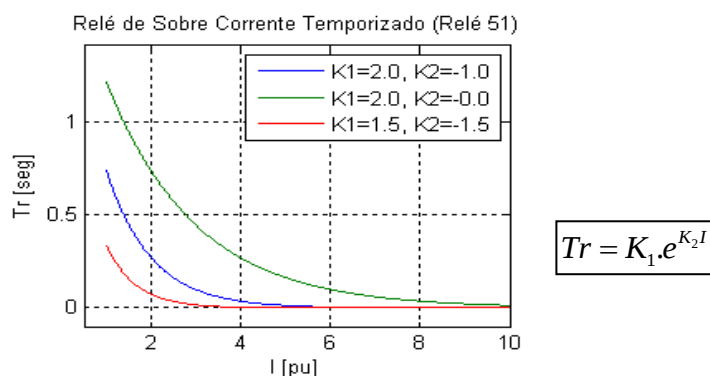


Figura E.22 – Temporização do Relé de Sobre Corrente (variação de K1 e K2)

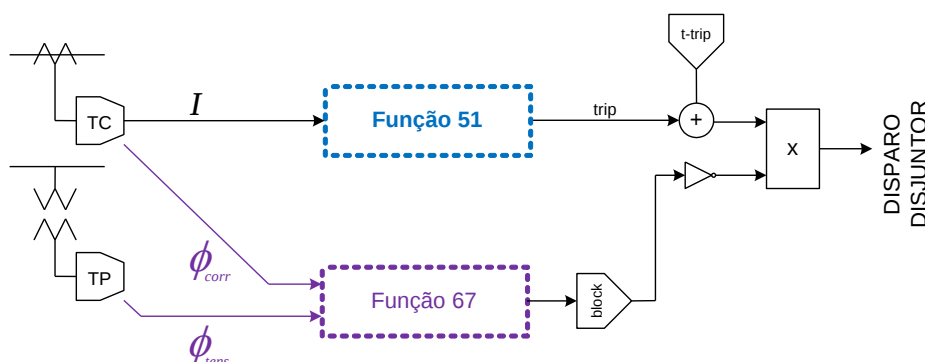


Figura E.23 – Relé de Sobre Corrente Temporizado com a função diferencial

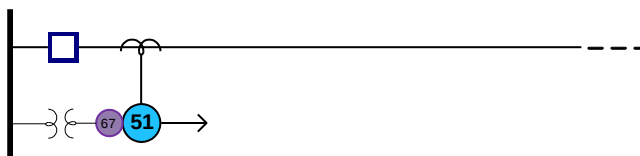


Figura E.24 – Relé de Sobre Corrente Temporizado no sistema de potência

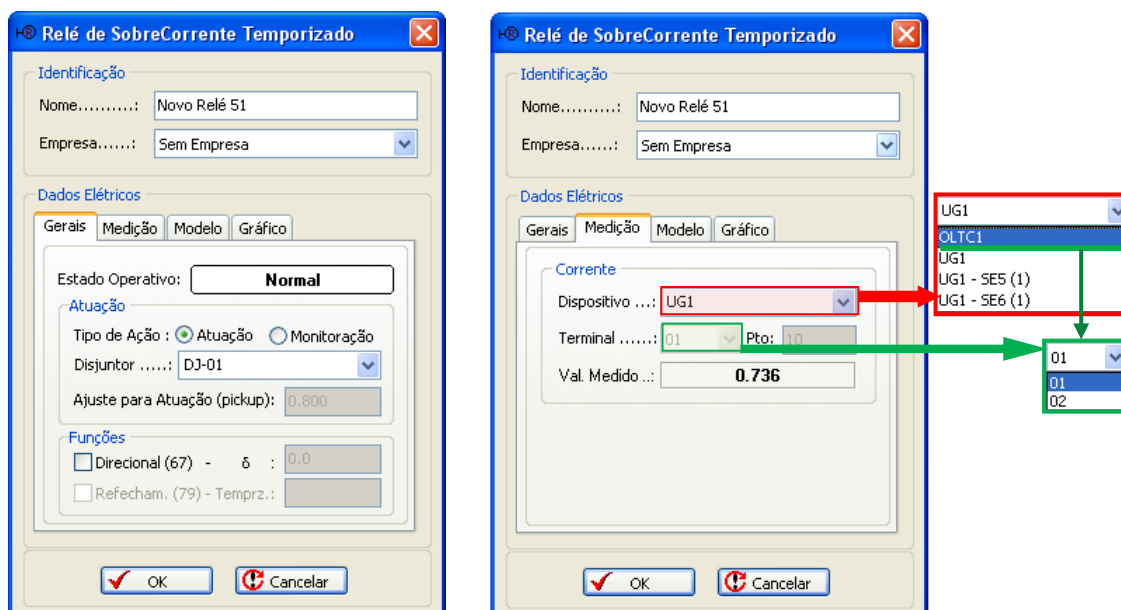


Figura E.25 – Relé 51: Geraís e Medição

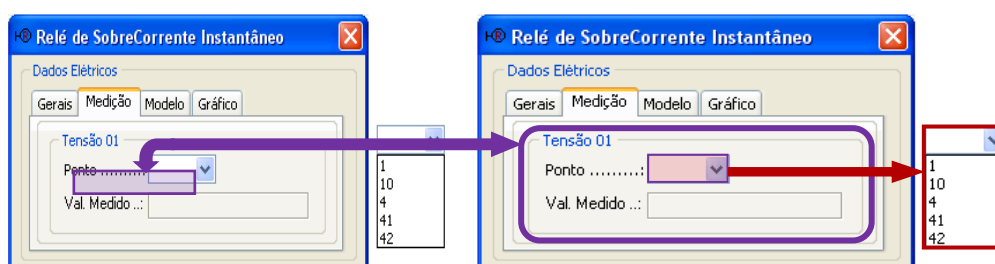


Figura E.26 – Relé 51: Ativando o modelo da Função 67

Geraís:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.

Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.

Direcional (67): Adiciona a função direcional (valores ingressados na Aba Modelo/Fun#67).

Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#51.

Medição:

Dispositivo: Onde se medirá a corrente.

Terminal: caso o dispositivo for transformador indicar em qual terminal será medido a corrente.

Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

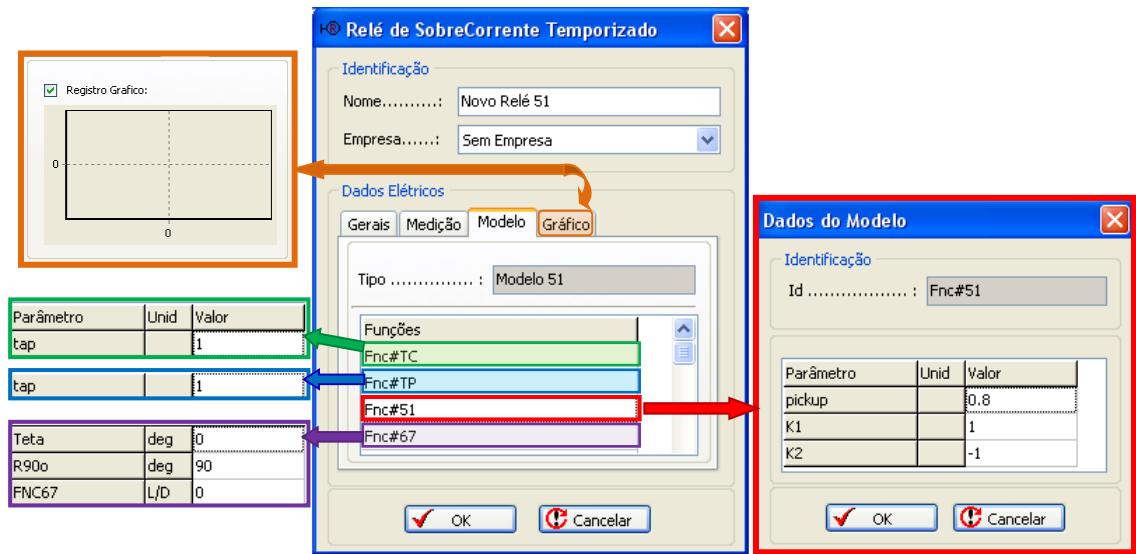


Figura E.27 – Relé 51: Modelo e Gráfico

Modelo:

- Fun#TC: [tap] do transformador de corrente
- Fun#TP: [tap] do transformador de potência
- Fun#67: [Teta]: Ângulo de defasagem;
[R90°]: a rotação da linha de bloqueio.
[FNC67]: se o relé 67 atuar (1) ou não (0)

- Fun#51: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup
[K1]: parâmetro da temporização (valor +)
[K2]: parâmetro da temporização (valor -)

- Gráfico:**
Para visualizar o valor de ajuste e valor medido

Relé de Sobre Tensão (Relé 59):

A lógica de operação do relé 59 é simples, similar ao relé 27, ele mede a tensão (V) no barramento logo a compara com um valor pré-estabelecido (pickup), se for maior então o relé atuará disparando o disjuntor. Na Fig. D.28 mostra-se o modelo do relé 59 e na Fig. D.29 a instalação deste num sistema de potência.

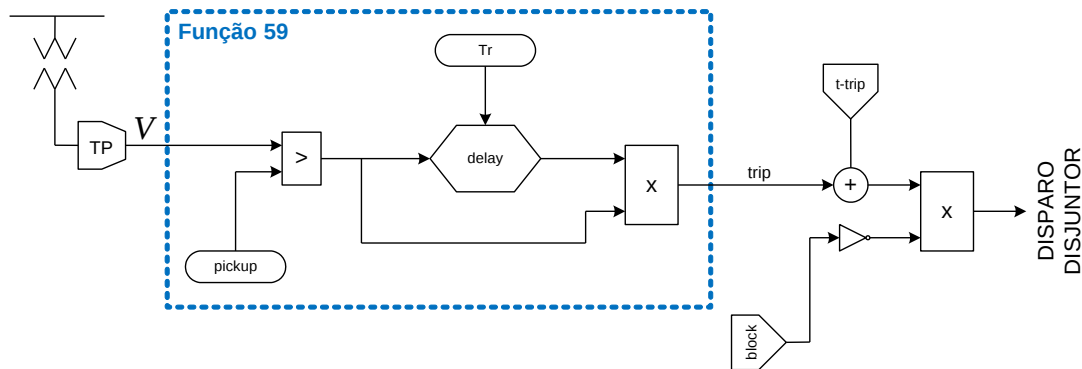


Figura E.28 – Modelo do Relé de Sobre Tensão (Relé 59)



Figura E.29 – Relé de Sobre Tensão no sistema de potência

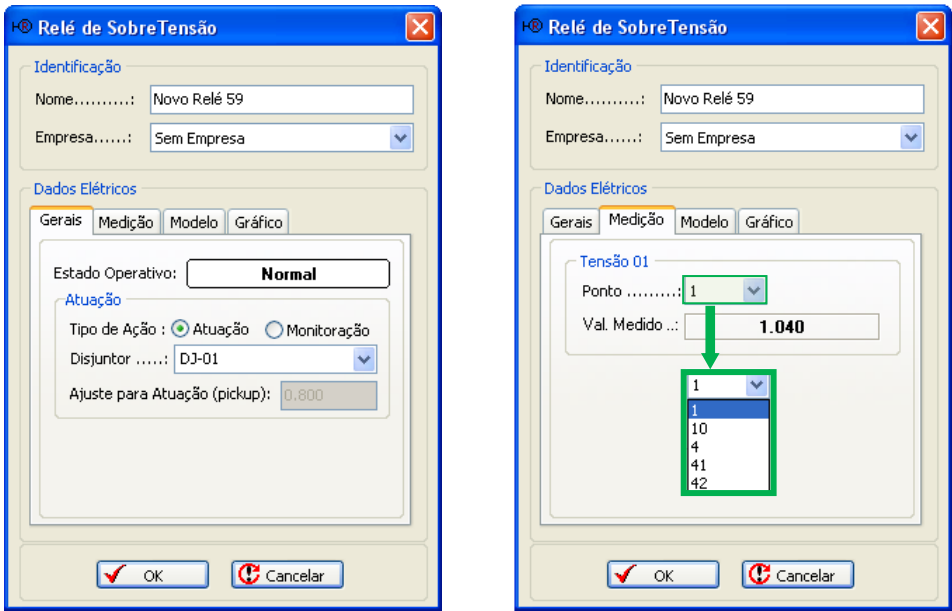


Figura E.30 – Relé 59: Gerais e Medição

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.
Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.
Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#59.

Medição:

Ponto: Onde a Tensão será medida.
Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

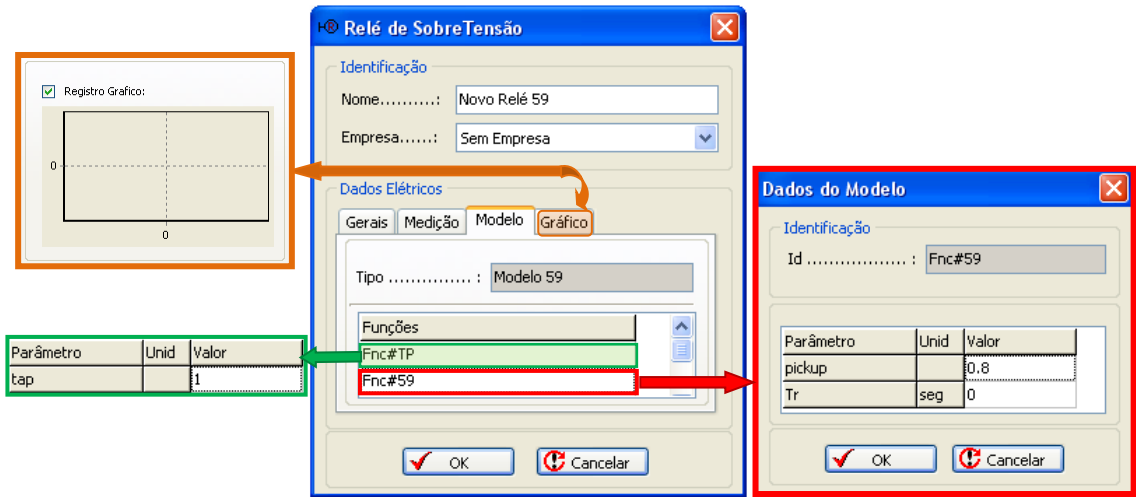


Figura E.31 – Relé 59: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#59: [pickup]: ajuste do relé para que este atue **Grafico:**

caso o valor medido atinge o pickup;

Para visualizar os valor de ajuste e valores medidos

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Relé de Sobre Frequência (Relé 81o):

Os relés de frequência monitoram e analisam o comportamento da frequência dos sinais de tensão no sistema de potência. Para um aumento da geração e/ou perda de carga, gera uma variação positiva da frequência, estes aumentos de frequência, dependendo do valor, são prejudiciais para o sistema assim como para os consumidores finais. O relé 81o vai medir a frequência do sistema e vai comparar com um valor pré-estabelecido (pickup) o qual se for maior este acionará o disparo do disjuntor. Na Figura E.32 mostra o modelo do relé 81o, e na Figura E.33 se mostra o relé 81o num sistema de potência.

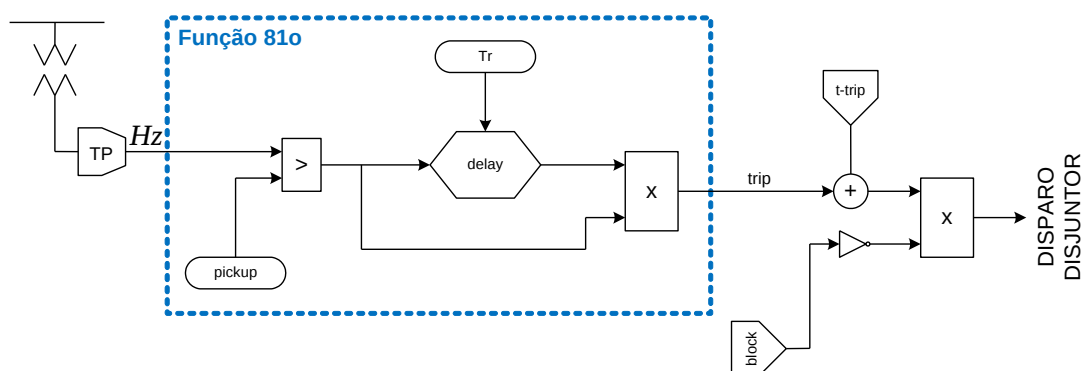


Figura E.32 – Modelo do Relé de Sobre Frequência (Relé 81o)

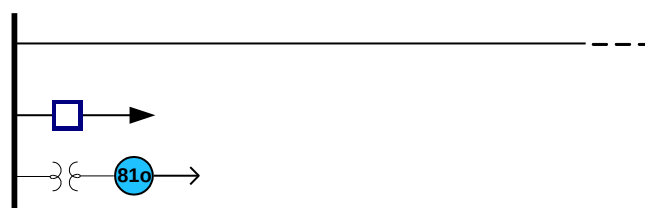


Figura E.33 – Relé de Sobre Frequência no sistema de potência

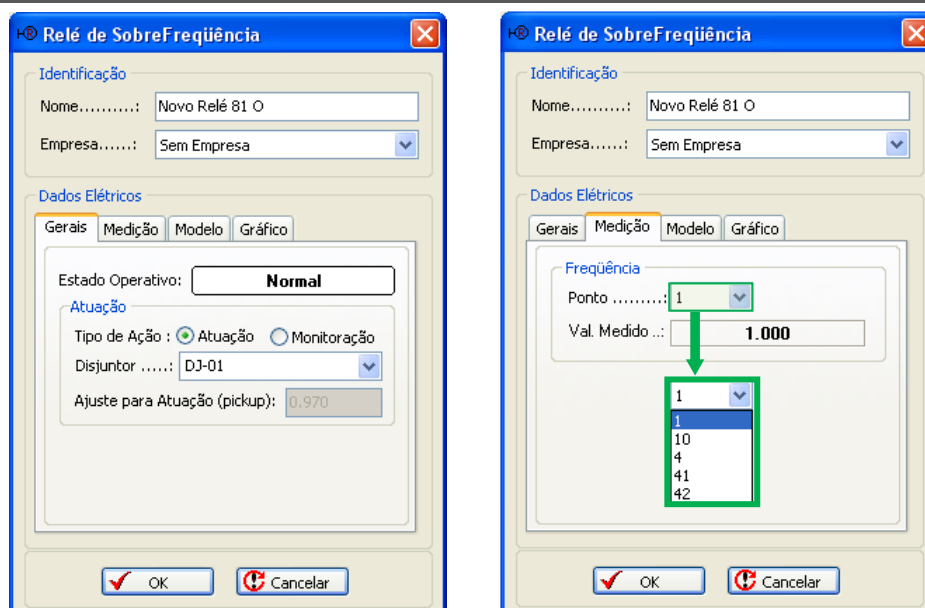


Figura E.34 – Relé 81o: Gerais e Medição

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.

Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.

Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#81o.

Medição:

Ponto: Onde a frequência será medida.

Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

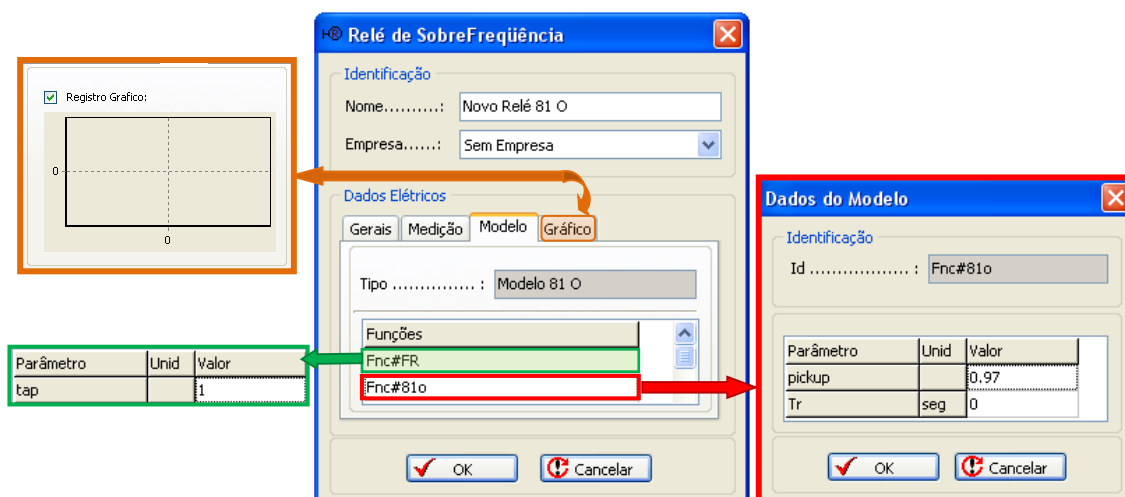


Figura E.35 – Relé 81o: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#59: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup;

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Gráfico:

Para visualizar os valores de ajuste e valores medidos

Relé de Sub Frequência (Relé 81 U):

As perdas de geração e/ou aumento da carga, gera uma variação negativa da frequência, esta queda de frequência não podem ser toleráveis por muito tempo, por exemplo, se cai mais do 5% da nominal, as palhetas das turbinas de geradores a vapor podem-se quebrar devido a que rotação esta na faixa da ressonância mecânica. Na Figura E.36 mostra o modelo do relé 81u, a operação é simples, vai medir a frequência do sistema e vai comparar com um valor pré-estabelecido (pickup) o qual se for menor este relé acionará o disparo do disjuntor. Na Figura E.37 se mostra o relé 81u num sistema de potência.

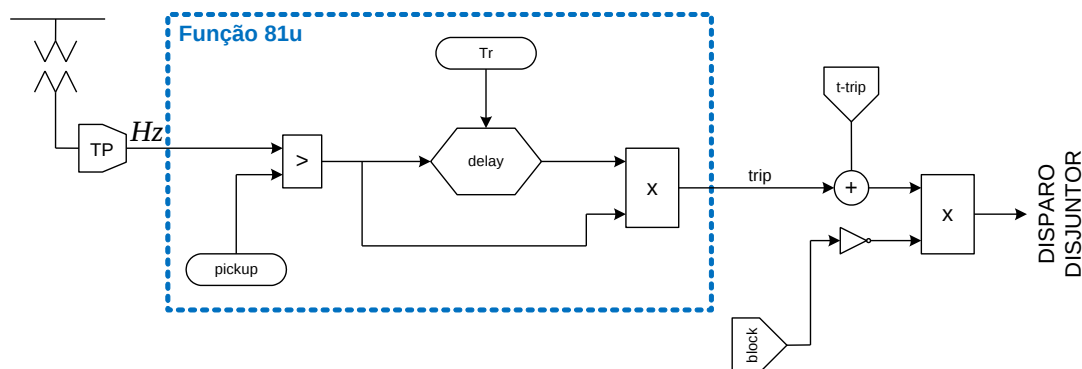


Figura E.36 – Modelo do Relé de Sub Frequência (Relé 81u)



Figura E.37 – Relé de Sub Frequência no sistema de potência

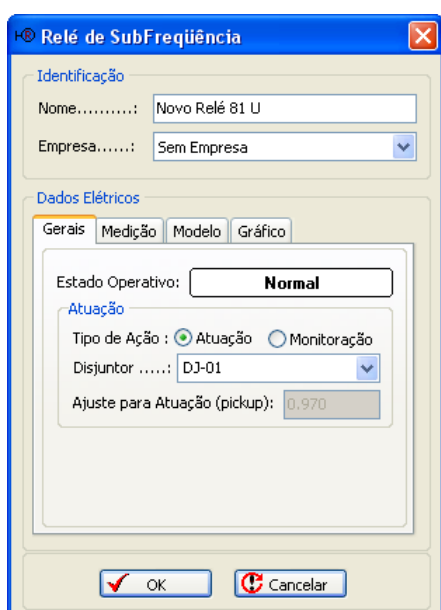
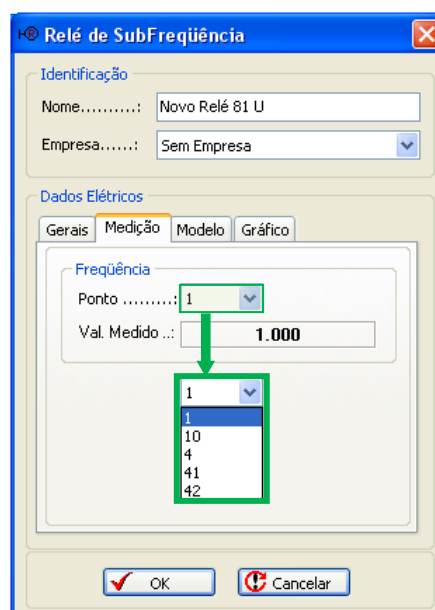



Figura E.38 – Relé 81o: Gerais e Medição

Gerais:

Tipo de Ação: Aciona o disjuntor ou Monitora.
Disjuntor: Escolhe o disjuntor que será ligado ao relé.
Ajuste para Atuação: valor ingressado na Aba Modelo/Fun#81u.

Medição:

Ponto: Onde a frequência será medida.
Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

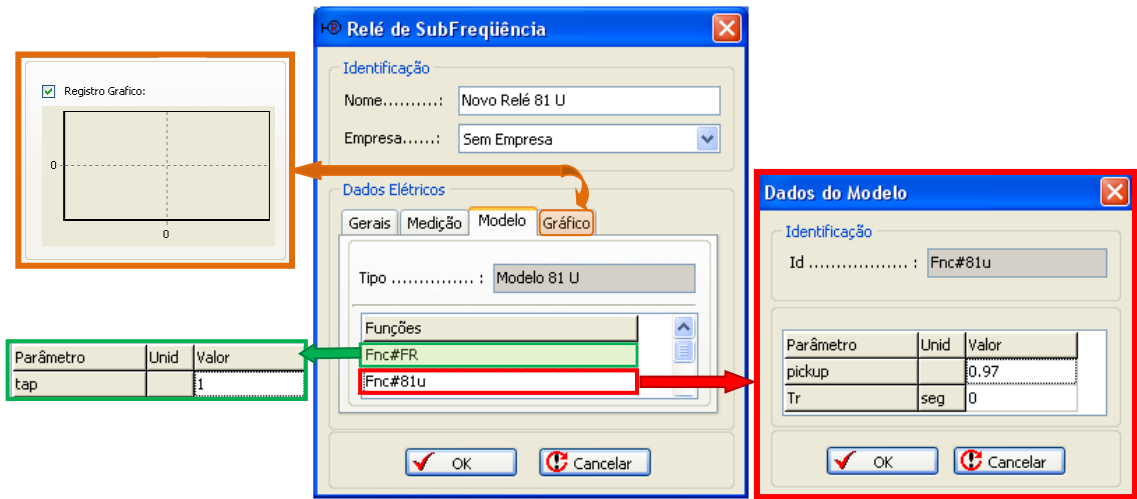


Figura E.39 – Relé 81u: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência
Fun#59: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup;

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Grafico:

Para visualizar os valor de ajuste e valores medidos