



Manual do Usuário

(versão do programa 3.00 – Inclui fluxo de potência e simulação trifásicos)



Conteúdo

1	Introdução	1-1
1.1	Visão Geral do Programa	1-1
1.2	Características do Simulight	1-2
1.3	Tipos de Estudos	1-2
1.4	Instalação	1-3
1.5	Informação e Suporte	1-6
2	Modelos dos Componentes	2-1
2.1	Modelos de Geradores	2-1
2.2	Modelos de Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão	2-3
2.3	Modelos de Reguladores de Velocidade	2-4
2.4	Modelos de Dispositivos de Proteção	2-5
3	Metodologias de Solução	3-1
3.1	Fluxo de Potência	3-1
3.1.1	Modelos dos Componentes	3-3
3.2	Solução do Problema de Fluxo de Potência	3-5
3.2.1	Método de Newton-Raphson	3-5
3.2.2	Fluxo de Potência pelo Método de Newton-Raphson	3-7
3.3	Simulação da Dinâmica para Estudos de Estabilidade Transitória	3-8
3.3.1	Modelo do Sistema de Potência	3-8
3.3.2	Representação da Máquina Síncrona e de seu Sistema de Excitação	3-9
3.3.3	Representação do Sistema de Transmissão e das Cargas	3-9
3.3.4	Formulação Geral do Problema	3-10
3.3.5	Método de Solução Numérica para as EDO's	3-10
3.3.6	Esquemas de Solução para as Equações do Simulador	3-11
3.3.7	Esquema geral do Método Alternado Implícito	3-13
3.3.8	O Esquema Alternado Entrelaçado Implícito	3-14
4	Iniciando o Simulight	4-16
4.1	Tela de Abertura	4-16
4.2	Menus do Simulight	4-17
	Menus 4-17	
	Localizar	4-18
4.3	Definir Topologia	4-18
4.4	Importar Dados do PRAO	4-21
4.5	Importar dados do ANAREDE:	4-24
4.6	Controle de Empresas	4-26
4.7	Salvar um Caso	4-27
5	Preparação de Dados	5-1
5.1	Painel Rede Elétrica	5-1
5.2	Representação das Áreas	5-2
5.3	Representação das Subestações	5-3
5.3.1	Barramentos	5-3
5.3.2	Dispositivos Shunts	5-4
5.3.3	Dispositivos Séries	5-6

	5.3.4	Dispositivos Lógicos	5-7
	5.3.5	Medidores	5-8
	5.3.6	Proteção	5-10
	5.3.7	Linhas de Conexão	5-12
	5.4	Dispositivos Definidos Pelo Usuário.....	5-13
	5.4.1	Introdução	5-13
	5.4.2	Meta – linguagem XML	5-14
	5.4.3	Formato de Entrada de Dados de um Novo Modelo	5-15
	5.4.4	Início de Definição	5-16
	5.4.5	Parâmetro.....	5-16
	5.4.6	Ponto de Entrada / Saída.....	5-16
	5.4.7	Medição de Tensão.....	5-17
	5.4.8	Blocos Elementares	5-17
	5.4.9	Exemplo da implementação de um modelo.....	5-20
6		Utilização do Programa	6-1
	6.1	Fluxo de Potência	6-1
	6.2	Controle de Eventos	6-3
	6.3	Simulação Completa.....	6-4
	6.4	Relatórios.....	6-7
	6.5	Ilhas Elétricas	6-8
7		Exemplos	7-9
	7.1	Exemplo 01: Sistema 9 barras	7-9
	7.1.1	Dados Fluxo de Potência	7-9
	7.1.2	Definindo uma topologia no Simulight	7-11
	7.1.3	Executando Fluxo de Potência	7-16
8		Sistemas Trifásicos	8-18
	8.1	Modelagem Trifásica.....	8-18
	8.1.1	Considerações sobre a Modelagem Trifásica	8-18
	8.1.2	Descrição Funcional do SEE	8-18
	8.1.3	Equações Funcionais	8-19
	8.1.4	Simulação Dinâmica Trifásicas	8-22
	8.1.5	Modelo de Gerador trifásico dinâmico:.....	8-30
	8.1.6	Modelo Dinâmico para a Máquina de Indução Trifásica	8-32
	8.1.7	Forma Geral de Dispositivos Shunt.....	8-32
	8.1.8	Forma Geral de Dispositivos Série.....	8-33
	8.2	Interface de Rede Trifásica x Monofásica Equivalente.....	8-34
	8.3	Interface gráfica no Simulight 3 ϕ	8-35
9		Referências Bibliográficas.....	9-45
10		ANEXOS	10-1
	A.	Blocos em XML do Simulight.....	10-1
	B.	Modelos Dinâmicos [1][2].....	10-8
	C.	Edição de dados no Simulight	10-11
		Esforços Torcionais na GD.....	10-13
	D.	Edição de Medidores no Simulight	10-24
	E.	Edição da Proteção no Simulight.....	10-32

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, sub-transmissão e distribuição, com a presença de geração distribuída conectada aos segmentos de sub-transmissão ou distribuição. O programa é particularmente adequado ao estudo da resposta dos sistemas a grandes perturbações (curto-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 em redes de distribuição.

O crescente número de PIEs interessados na venda de energia ao mercado atacadista, bem como de Autoprodutores e Co-geradores interessados em gerar a própria energia, requer 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 e não regulamentado, 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 [1] e continuou a ser aperfeiçoado também na modalidade de projetos P&D nos ciclos 2005/2006 e 2009/2010. O período de desenvolvimento do Simulight ultrapassa 10 anos, fazendo com que a ferramenta esteja em um avançado estágio de maturação.

Em 2010 o Simulight foi adquirido pela concessionária Ampla onde sofreu uma customização para integração ao novo ambiente computacional corporativo.

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) e com o sistema corporativo da Ampla (GEDIS), possibilitando, por exemplo, que parâmetros elétricos de alimentadores que estejam no SGD/GEDIS possam ser transferidos à base de dados do Simulight, via arquivo PRAO no caso da Light e via arquivo Adept no caso da Ampla. 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 ou no modo Ativo. Como o próprio nome sugere, no modo Monitoração 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, 25, 27, 50/51, 59, 67 e 81O/U.

1.3 Tipos de Estudos

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

- Fluxo de potência;
- Estabilidade transitória em geral;
- Rejeição de carga;
- Esforço torsional nos geradores;
- Ilhamento de áreas do sistema;
- Desempenho dinâmico da geração distribuída;
- Ajuste da proteção;
- Etc.

1.4 Instalação

Neste capítulo se descrevem os passos necessários para instalar o programa Simulight.

Passo 1: Antes da Instalação

Deve-se verificar que os seguintes requerimentos sejam cumpridos:

- Ter disponível uma conta de administrador.
- Não existir alguma instalação existente do programa Simulight.
- Verificar que o computador satisfaz os seguintes requerimentos do programa:

Sistema Operacional	Processador	Espaço em Disco	Memória RAM
Windows 98	Pentium III	30 MB	256 MB
Windows 2000 (SP3 ou 4)	Pentium IV	(incluindo os	(512 MB
Windows XP (SP1 ou 2)	Pentium Xeon	exemplos)	recomendado)
Windows Server 2003	Pentium M		
Windows Vista / 7	AMD Athlon		
	AMD Athlon MP		
	AMD Athlon XP		
	AMD Athlon 64		
	AMD Opteron		
	Intel Core Duo		
	Intel Core 2 Duo		

Passo 2: Efetuando a Instalação

Inserir o cd de instalação na leitora de cd. Localizar o arquivo “setup.exe”. O arquivo encontra-se na pasta “Instalador \ Disk 1\”, conforme mostrado na Figura 1.1.

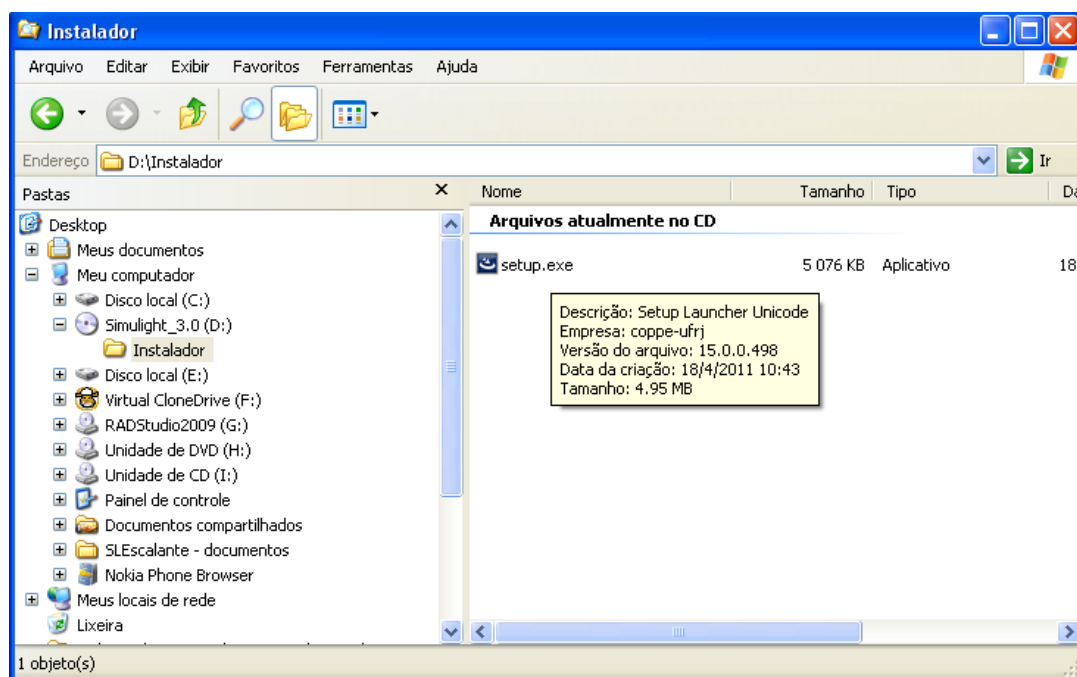


Figura 1.1 Instalador do programa Simulight.

Fazer dois cliques no arquivo “setup.exe” para iniciar a instalação. A primeira tela mostrada corresponde a responsável pela seleção do idioma. Por defeito o idioma selecionado é o português, caso não aparecer o idioma de instalação é português (Brasil).

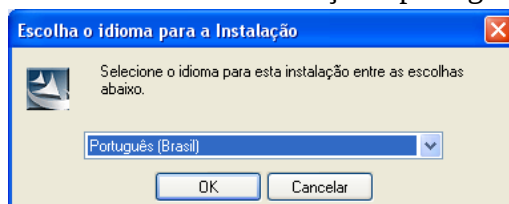


Figura 1.2 Iniciando o Assistente de Instalação.

Uma vez selecionado o idioma inicia-se automaticamente o Assistente (Wizard) de Instalação. Na Figura 1.3 pode-se observar a primeira tela do Assistente.

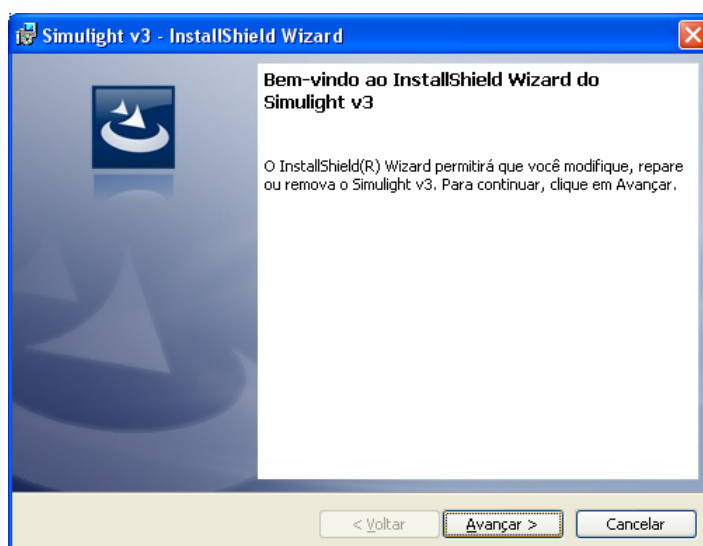


Figura 1.3 Iniciando o Assistente de Instalação.

Para uma instalação básica é suficiente ir clicando no botão “Avançar” nas consecutivas telas que irão aparecendo. Na Figura 1.4 pode-se observar a última tela do Assistente. Clicar no botão “Concluir” para finalizar a instalação.

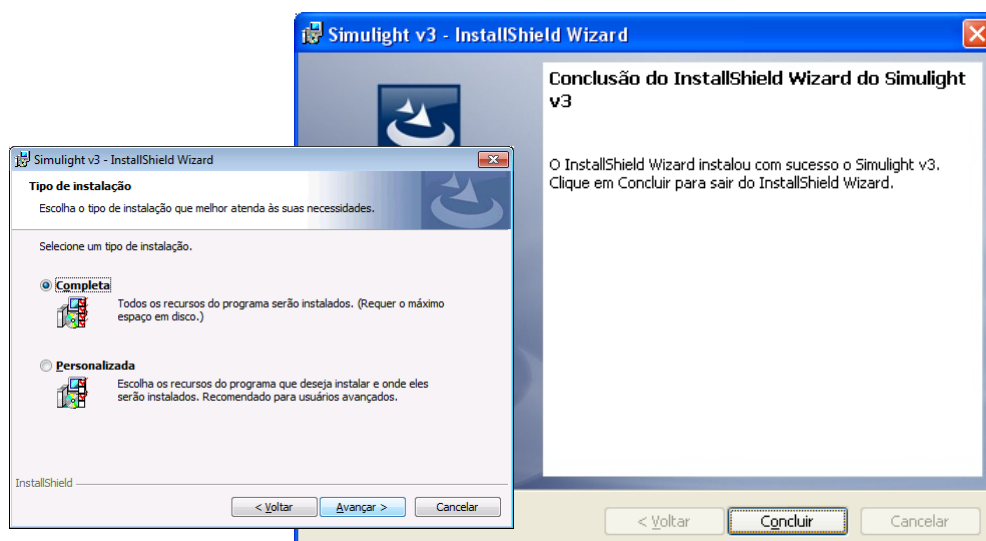


Figura 1.4 Finalizando o Assistente de Instalação.

Passo 3: Verificando a Instalação

Na Figura 1.5 pode-se observar a estrutura de pastas e arquivos criados depois de uma satisfatória instalação. Por defeito (no Windows XP em português) o programa é instalado na pasta “C: \Arquivos de programas \ COPPE – UFRJ \ Simulight \”.

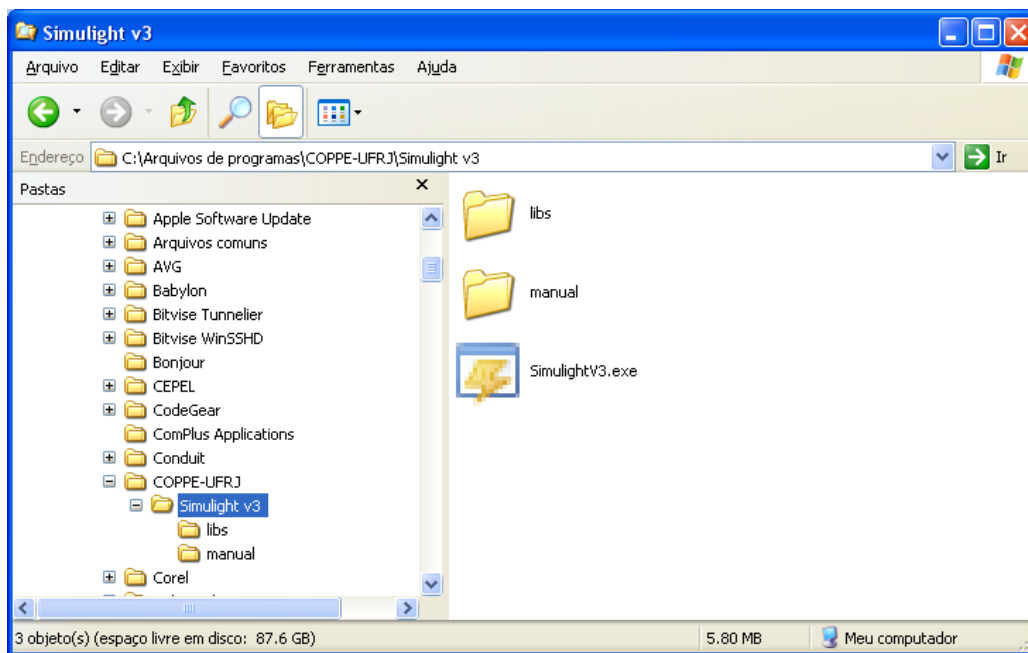


Figura 1.5 Estrutura de pastas e arquivos do Simulight.

Uma descrição da recentemente mencionada estrutura é detalhada a seguir.

Pasta de Instalação – Arquivo e sub pastas	
Simulight v3.0.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”, “LIBGRAPHS.xml” e “LIBMODELS.xml”.
Manual	Pasta que contém o Manual de Usuário.
Sistemas Teste	Pasta que contém os exemplos inclusos na instalação.

Passo 4: Instalação de Aplicativos Adicionais

Adicionalmente, no cd de instalação encontram-se os instaladores de dois programas (de uso livre) que auxiliam ao programa Simulight.

- Adobe Reader (Arquivo: AReader V9.0.Setup.exe). Programa para a leitura de arquivos com extensão “pdf”. Necessário para a leitura do Manual de Usuário.

- XML Pad (Arquivo: XmlPad V3.02.Setup.exe). Programa para a leitura, edição e formatação de arquivos XML. Necessário para a edição dos casos sem a utilização da interface gráfica. Isto é somente recomendado para usuários muito avançados.

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 seguintes contatos:

Prof. Glauco Nery Taranto
Programa de Engenharia Elétrica
COPPE/UFRJ
Caixa Postal 68504
Rio de Janeiro RJ CEP: 21941-972
Tel.: 21-2562-8615 Fax: 21-2562-8627
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 [2,3]. 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 representadas por três modelos:

- Modelo clássico, constituído por uma fonte de tensão constante atrás da reatância transitória de eixo direto;
- Modelo para geradores de pólos 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 sub-transitória do eixo d;

LI : indutância de dispersão de armadura;

E_{fd} : tensão de campo;

E'_q : constante proporcional de tensão;

I_d : corrente no eixo d.

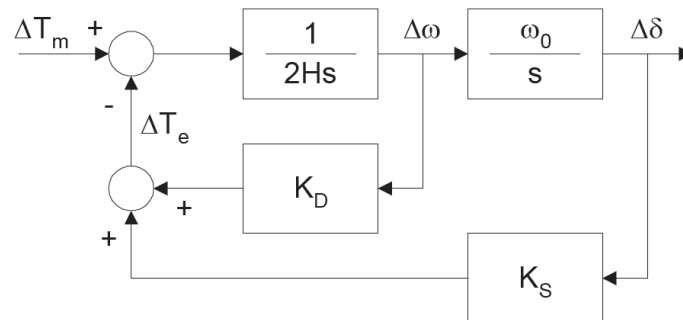


Figura 2.1 Representação do modelo mecânico das máquinas síncronas.

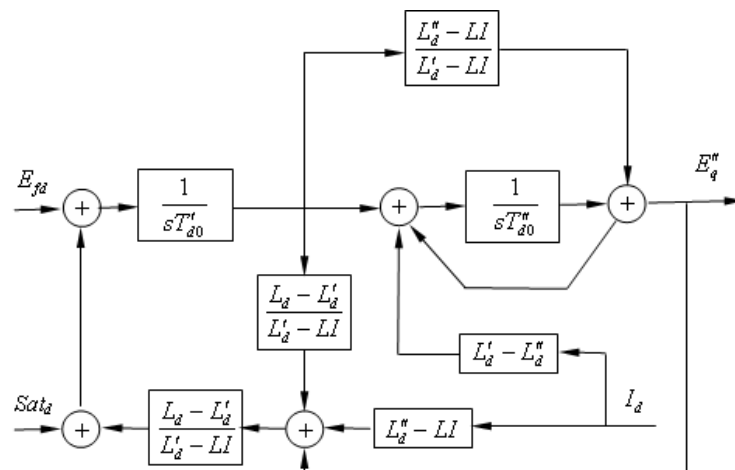


Figura 2.2 Representação do modelo de eixo direto das máquinas síncronas.

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.

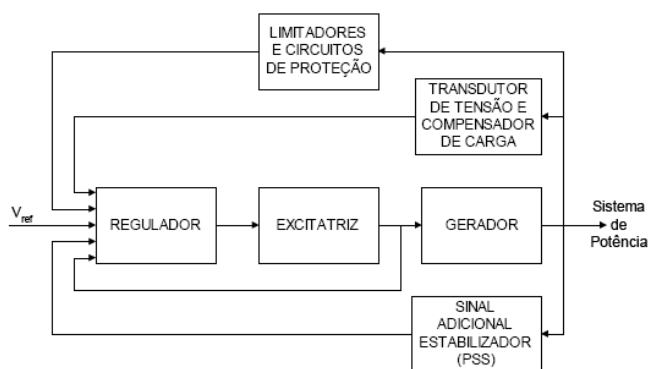


Figura 2.3 Diagrama de blocos das funções básicas de um sistema de excitação

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.

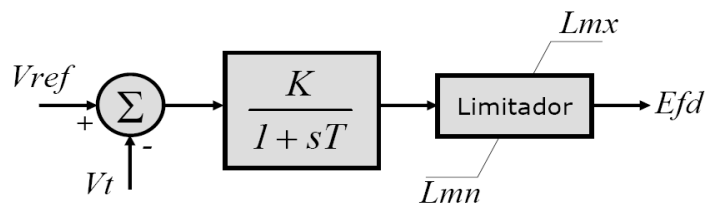


Figura 2.4 Diagrama de blocos de um regulador de tensão de primeira ordem.

Modelos mais elaborados de reguladores de tensão podem ser encontrados nas referências [2,3,9].

2.3 Modelos de Reguladores de Velocidade

O controle carga-freqüência em um sistema de potência é subdividido em regulação primária e regulação secundária. A regulação primária tem como objetivo manter os desvios de freqüência 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 freqüência se afasta da freqüência nominal (60 Hz no caso brasileiro). A regulação secundária do controle carga-freqüência 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 freqüência, por ventura 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 : freqüência;

f_{ref} : freqüência 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.

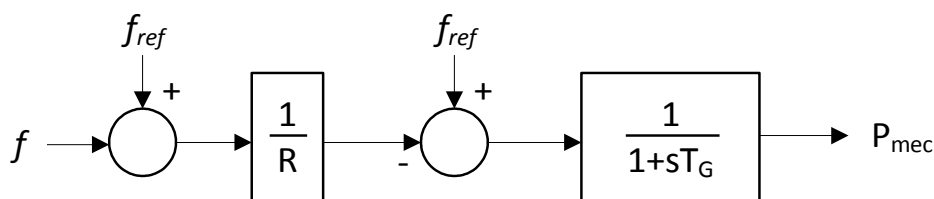


Figura 2.5 Regulador de velocidade com regulação secundária.

2.4 Modelos de Dispositivos de Proteção

A implementação dos relés de proteção no programa Simulight foi orientada pelo Relatório de Informação Técnica DAP – 001/04 de Junho de 2004 “Interligação de Autoprodutores de Energia Elétrica em Paralelo com o Sistema da Light SESA, em Baixa e Média Tensão” [6], fornecido pela Light. Neste relatório o item 4.3 trata das Condições da Proteção, sendo definidos nos itens 4.3.14 e 4.3.17 as funções mínimas de proteção para um gerador conectado à rede de distribuição da Light. A saber:

Item 4.3.14 – “A proteção de interligação inerente ao disjuntor de acoplamento, deverá ser independente da proteção do gerador e possuir, no mínimo, as seguintes funções de proteção:”

Função 50/51 – Proteção para sobrecorrente instantânea e de tempo inverso.

Função 67 – Proteção para sobrecorrente direcional de fases, tempo inverso

Função 59g – Proteção para sobretensão residual, temporizada.

Função 27 – Proteção para subtensão de fases, temporizada.

Função 59 – Proteção para sobretensão de fases, temporizada.

Função 32 – Proteção para reversão de potência de fases, temporizada.

Função 81 – Proteção para sobre e subfrequência.

Função 25 – Proteção de verificação de sincronismo.

Item 4.3.17 – “Nos casos de interligação de Autoprodutor em regime de paralelo permanente, com venda de energia excedente e que não sejam atendidos por alimentador de MT exclusivo, dependendo dos estudos de fluxo de potência realizados pela Light, relativos ao impacto causado ao sistema elétrico pelo Autoprodutor em termos de confiabilidade e segurança, o Autoprodutor deverá disponibilizar um sistema de transferência de disparo (**transfer-trip**) a fim de permitir o imediato desligamento do disjuntor de acoplamento, quando da abertura do disjuntor do alimentador de interligação localizado na subestação da Light.”

Com base nas recomendações deste relatório a estrutura computacional base do relé foi implementada conforme mostra a Figura 2.6, onde cada relé de proteção possui três comandos básicos: dois comandos de disparo do disjuntor (*trip* e *transfer-trip*) e um comando de bloqueio da atuação do relé.

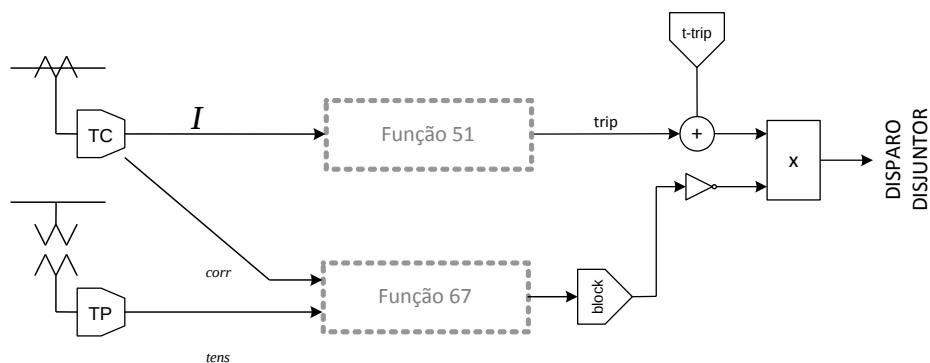


Figura 2.6 Estrutura computacional base de um relé.

A partir desta estrutura base podem ser adicionadas as funções particulares de cada relé descrito anteriormente (Funções 50, 51, 27, 59, etc.). Cada função específica pode ser conectada a um dos comandos básicos do relé de acordo com a sua característica (atuação ou bloqueio).

As Figura 2.7 até Figura 2.10 mostram a implementação, e sua inserção na estrutura base do relé, das funções de sobrecorrente (instantânea e com característica de tempo inverso), sobretensão e subtensão. Onde, pickup é o ajuste de sensibilização do relé, Tr é o tempo de retardo (delay) de atuação do relé, e K1 e K2 as constantes de ajuste da curva de tempo inverso para o relé de sobrecorrente. TC e TP são as unidades de aquisição de corrente e tensão dos elementos monitorados (corrente em um ramal, por exemplo) calculadas pelo Simulight no decorrer da simulação.

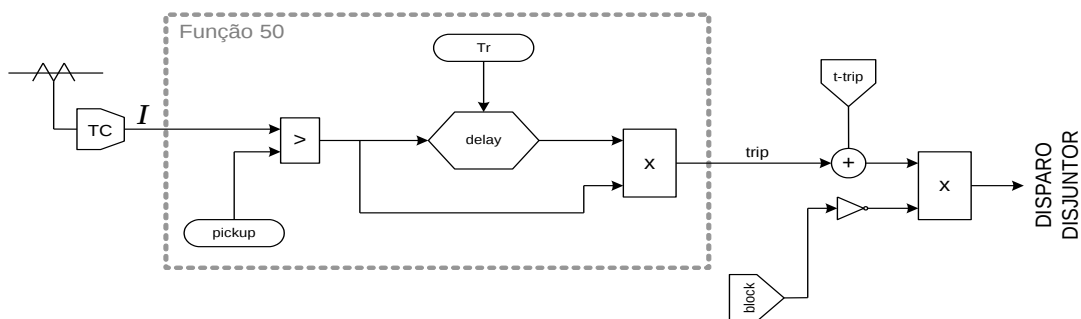


Figura 2.7 Relé de Sobrecorrente Instantâneo (ou com temporização fixa).

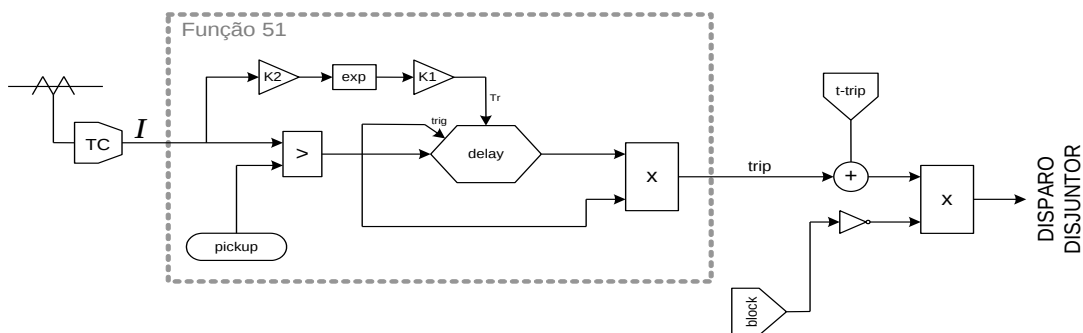


Figura 2.8 Relé de Sobrecorrente Temporizado (curva de tempo inverso).

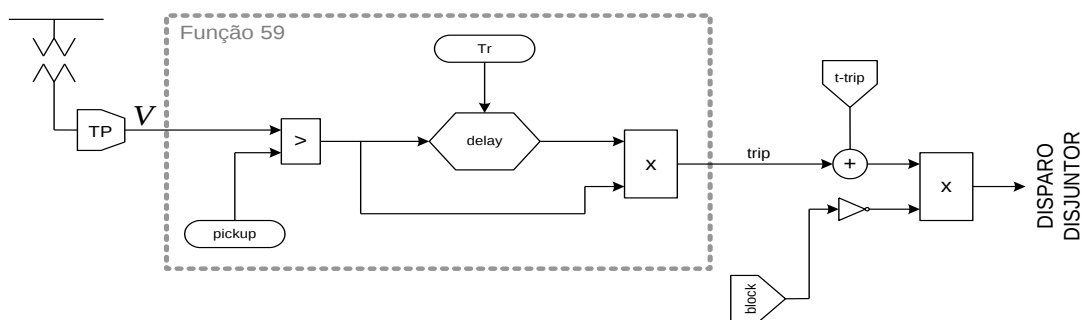


Figura 2.9 Relé de Sobre-tensão (instantâneo ou com temporização fixa).

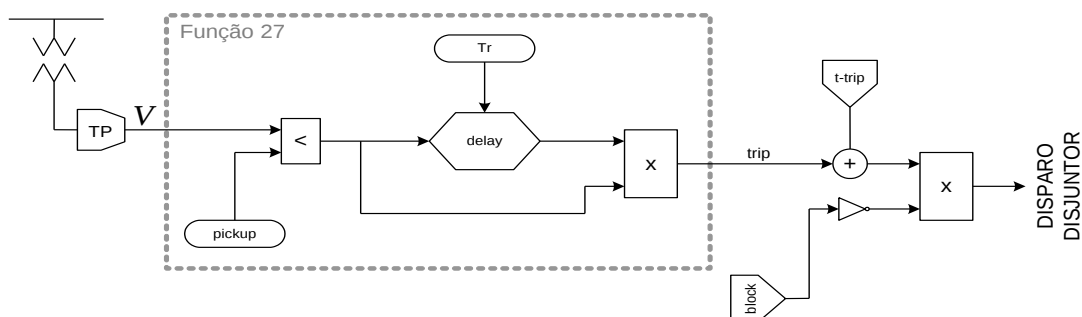


Figura 2.10 Relé de Subtensão (instantâneo ou com temporização fixa).

A característica direcional para a proteção é obtida através de uma função de detecção de direcionalidade, implementada conforme mostra a Figura 2.11. Esta função define uma região de disparo e uma região de bloqueio, onde as constantes Teta e $R90^\circ$ permitem o ajuste do relé. A função 67 pode ser melhor entendida graficamente através da Figura 2.12, onde estão representadas as duas regiões definidas pelo relé. Assim correntes na região de disparo do relé “ I_1 ” permitem a atuação de uma determinada função (sobrecorrente, por exemplo) enquanto correntes na região de bloqueio do relé “ I_2 ” inibem a atuação da função.

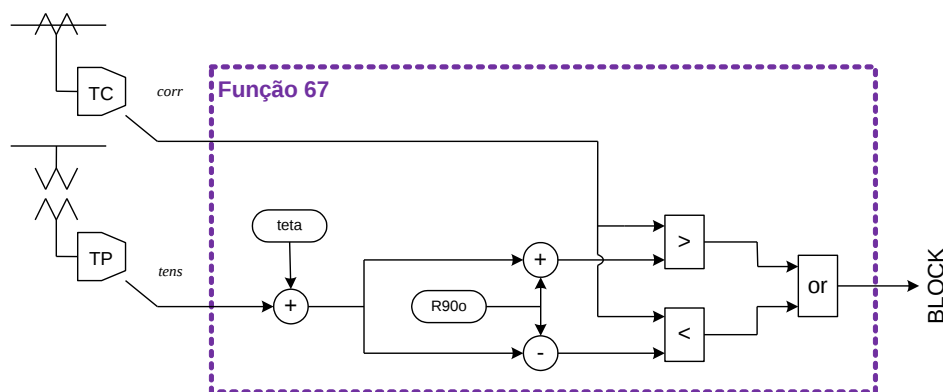


Figura 2.11 Função Direcional.

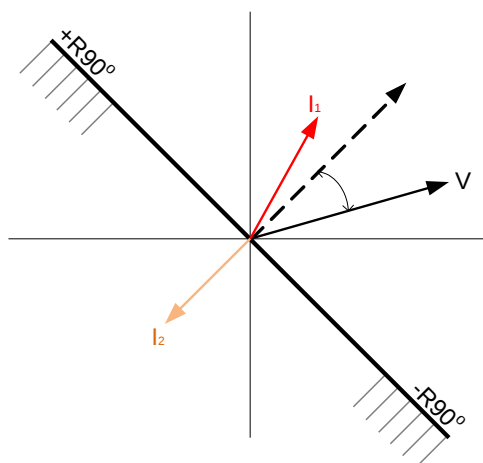


Figura 2.12 Interpretação Gráfica da Função Direcional.

A Função 67, diferentemente das demais, atua no bloqueio do disparo do relé. Assim, sempre está associada a uma função de disparo que efetivamente comandará a atuação do disjuntor. A Figura 2.13 mostra um relé de sobre-corrente com característica de tempo inverso e função direcional, construído através da combinação de duas funções já descritas neste relatório. A função 67 pode ser combinada a qualquer função de atuação implementada.

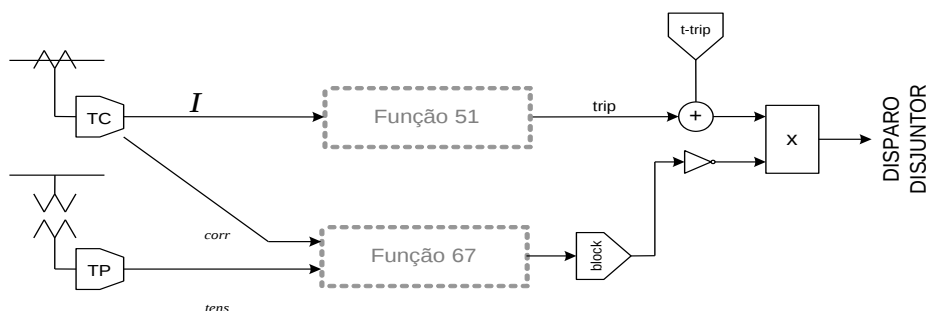


Figura 2.13 Relé de Sobrecorrente Temporizado com Função Direcional

A Figura 2.14 ilustra a lógica de operação do relé de sincronismo, função 25. O relé recebe as tensões de ambos os pontos onde será feita a conexão. Uma das tensões serve como referência (Fig.2.14). 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 passagem da tensão muito rapidamente pela área hachurada significa que a diferença entre as frequências das ilhas está muito grande. Nesse caso, o balanço carga/geração em uma ou nas duas ilhas deve ser alterado.

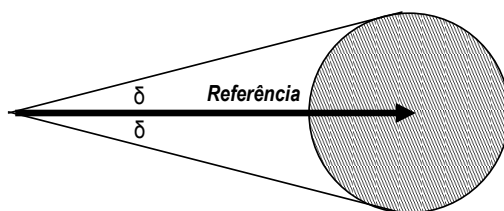


Figura 2.14 Relé de Sincronismo: Função 25

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 [2-5,9,10]. 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. Conseqüentemente, 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 .

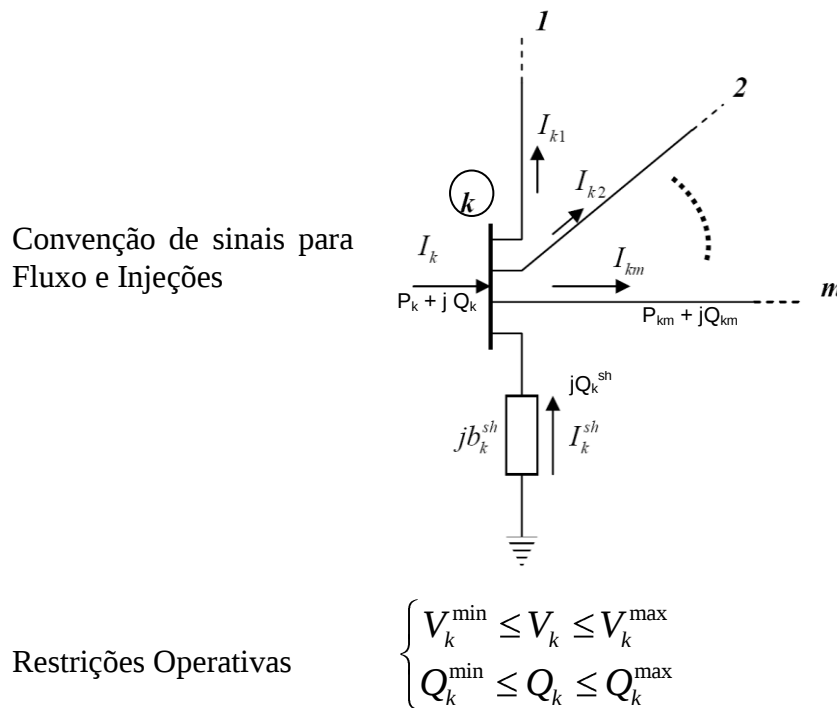


Figura 3.1 Convenção de sinais e restrições operativas das variáveis nodais.

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.

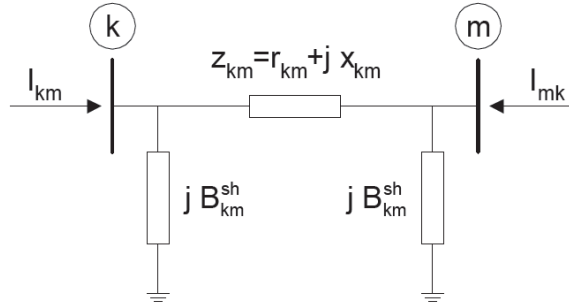


Figura 3.2 Modelo de linha de transmissão.

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

$$\begin{aligned} P_{km} &= V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \\ Q_{km} &= -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \\ P_{mk} &= V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \\ Q_{mk} &= -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \end{aligned} \quad (3.6)$$

e as respectivas perdas ativas e reativas

$$\begin{aligned} P_{km} + P_{mk} &= g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) = g_{km} |E_k - E_m|^2 \\ Q_{km} + Q_{mk} &= -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) = \\ &= -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} |E_k - E_m|^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

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

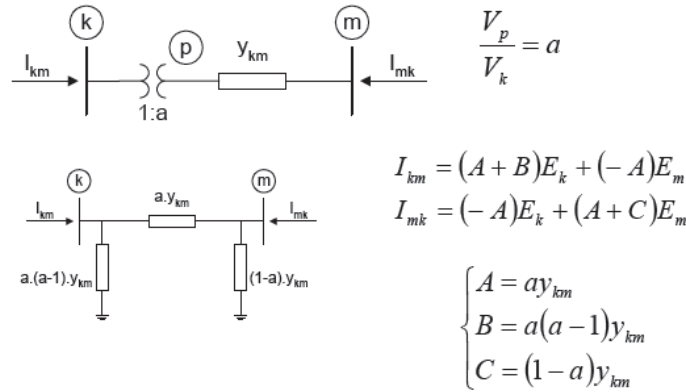


Figura 3.3 Modelo de transformadores em fase.

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.

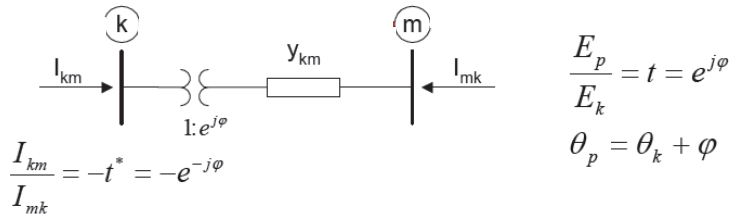


Figura 3.4 Modelo de transformadores em defasador.

As correntes e potência injetadas no transformador são dadas por:

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

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

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 definidos 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.

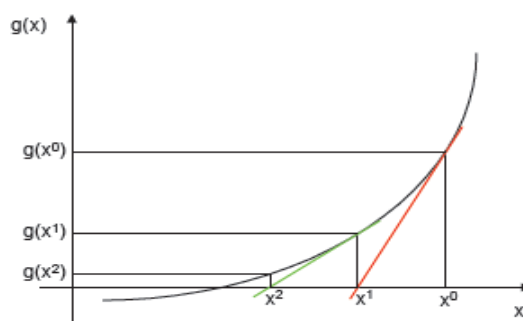


Figura 3.5 Ilustração do método de Newton-Raphson para o caso de uma variável.

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:

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

$$\mathbf{x}^{(h+1)} = \mathbf{x}^{(h)} + \Delta \mathbf{x}^{(h)} \quad (\text{II.18})$$

sendo

$$\Delta \mathbf{x}^{(h)} = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(h)})]^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{x}^{(h)}) \quad (\text{II.19})$$
- vi) Fazer $h=h+1$ e voltar para o passo (ii).

onde

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

é a matriz Jacobiana.

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.

i) 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 barras PQ ($v = v^{(0)}$).

ii) Calcular $P_k(\theta^{(h)}, v^{(h)})$ para as barras PQ e PV, e $Q_k(\theta^{(h)}, v^{(h)})$ para as barras PQ, e determinar os resíduos $\Delta P_k^{(h)}$ e $\Delta Q_k^{(h)}$.

iii) Testar convergência: $\max \{|\Delta P_k^{(h)}|\} \leq \varepsilon_p$ e $\max \{|\Delta Q_k^{(h)}|\} \leq \varepsilon_q$, o processo iterativo convergiu para a solução $(\theta^{(h)}, v^{(h)})$; caso contrário, continuar no passo (iv).

iv) Calcular a matriz jacobiana

$$J(\theta^{(h)}, v^{(h)}) = \begin{bmatrix} H(\theta^{(h)}, v^{(h)}) & N(\theta^{(h)}, v^{(h)}) \\ M(\theta^{(h)}, v^{(h)}) & L(\theta^{(h)}, v^{(h)}) \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

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

$$\theta^{(h+1)} = \theta^{(h)} + \Delta \theta^{(h)} \quad (II.35)$$

$$v^{(h+1)} = v^{(h)} + \Delta v^{(h)} \quad (II.36)$$

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

$$\begin{bmatrix} \Delta p(\theta^{(h)}, v^{(h)}) \\ \Delta q(\theta^{(h)}, v^{(h)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(\theta^{(h)}, v^{(h)}) & N(\theta^{(h)}, v^{(h)}) \\ M(\theta^{(h)}, v^{(h)}) & L(\theta^{(h)}, v^{(h)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(h)} \\ \Delta v^{(h)} \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

vi) Fazer $h=h+1$ e voltar para o passo (ii).

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

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

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

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

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

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 [2,9].

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 descontinuidades devidas, principalmente a faltas e chaveamentos, adicionadas a pequenas descontinuidades 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.

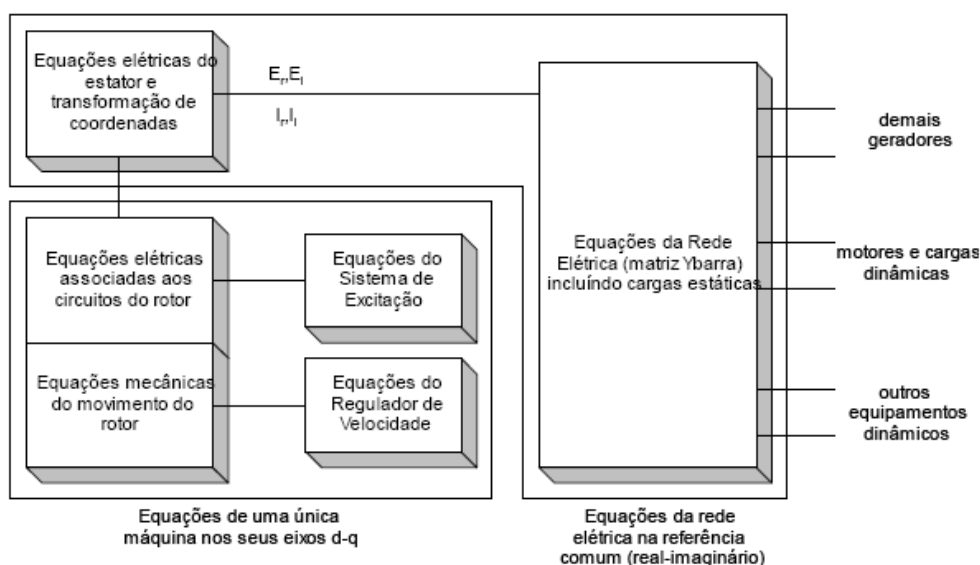


Figura 3.6 Estrutura completa do modelo para análise de estabilidade transitória.

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 [1].

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:

$$F(\mathbb{C}, V^e) = 0 \quad (3.24)$$

$$G(\mathbb{C}, V^e) = 0 \quad (3.25)$$

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:

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

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 [4] 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 $u_{\mathbf{C}}^* x_{\mathbf{C}}^*$ *(por extrapolação)*

Calcule $x_{\mathbf{C}}^0 = F \left[\mathbf{C}^* u_{\mathbf{C}}^* x_{\mathbf{C}-\Delta t}^* u_{\mathbf{C}-\Delta t}^* \right]$

Enquanto $\|\Delta x\|_2^2 > \varepsilon_0$, *faça*

faça $l = 0$

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

Calcule $V_{\mathbf{C}}^{l+1} = \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{I}(\mathbf{C}_{\mathbf{C}} V_{\mathbf{C}}^l)$ *(calcule* $\mathbf{Y}^{-1}$ *por fatoração LU)*

Calcule $\Delta V = V_{\mathbf{C}}^{l+1} - V_{\mathbf{C}}^l$

Faça $l = l + 1$

Fim Enquanto

Calcule $u_{\mathbf{C}}^k = h(\mathbf{C}_{\mathbf{C}} V_{\mathbf{C}}^k)$

$$\text{Calcule } x_{\mathbf{C}}^{k+1} = F \left[x_{\mathbf{C}}^k, u_{\mathbf{C}}^k, x_{\mathbf{C}}^{k-\Delta t}, u_{\mathbf{C}}^{k-\Delta t} \right]$$

$$\text{Calcule } \Delta x = x_{\mathbf{C}}^{k+1} - x_{\mathbf{C}}^k$$

$$\text{Faça } k = k + 1$$

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 $u_C^* x_C^*$ *(por extrapolação)*

Calcule $x_C^o = F \left[\begin{matrix} u_C^* \\ x_{C-\Delta t}^* \end{matrix} \right]$

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

Calcule $V_C = [Y]^{-1} \cdot I(E_C V_C)$ *(calcule* Y^{-1} *por fatoração LU)*

Calcule $u_C^k = h(E_C V_C)$

Calcule $x_C^{k+1} = F \left[\begin{matrix} u_C^k \\ x_{C-\Delta t}^k \end{matrix} \right]$

Calcule $\Delta x = x_C^{k+1} - x_C^k$

Faça $k = k + 1$

Fim Enquanto

Fim Para

4 Iniciando o Simulight

4.1 Tela de Abertura

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

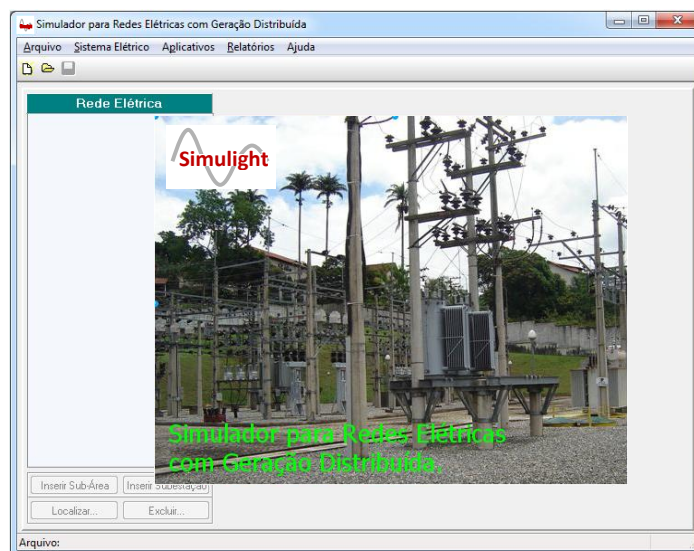


Figura 4.1 Tela de Abertura.

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 ou Adept;
- 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 cinco menus assim como ícones que ajudam na edição/execução de casos ao usuário. Figura 4.2

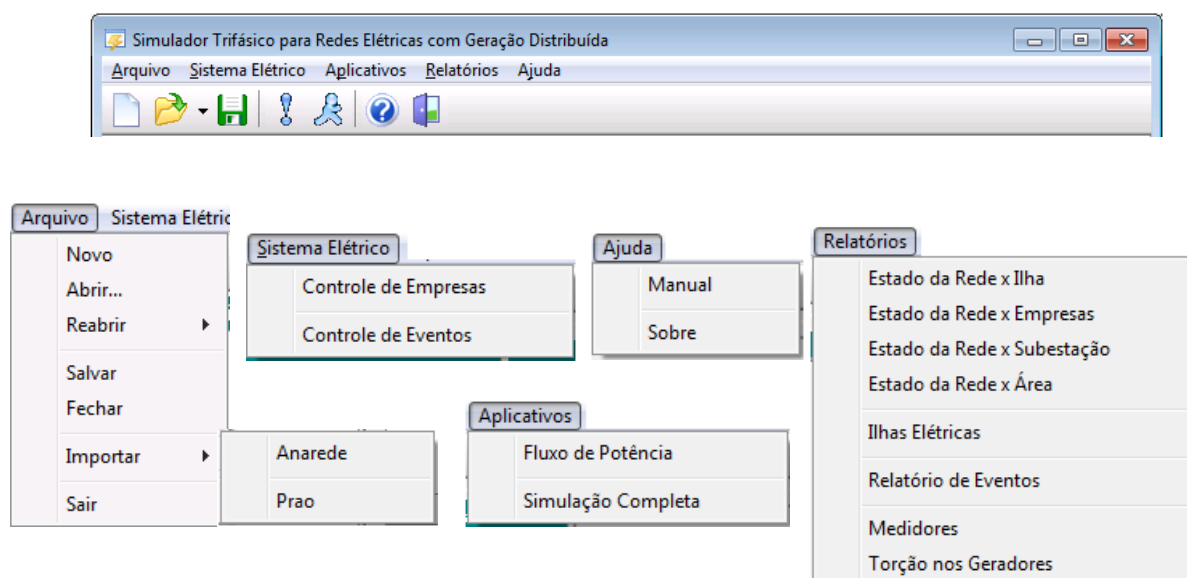


Figura 4.2 Menus e ícones do Simulight.

Menus

- Menu Arquivo: Aqui temos seis opções:
 - Novo: Criar uma nova topologia.
 - Abrir: Abre uma caso existente em formato *.FDX.
 - Reabrir: Mostra uma lista dos últimos arquivos abertos.
 - Gravar¹: Guarda uma topologia criada ou já aberta anteriormente.
 - Importar: Importa arquivos com formato *.PWF e formato PRAO (*.ASC).
 - Sair: Fecha o programa.
- Menu Sistema Elétrico: Aqui temos duas opções:
 - Controle de Empresas: Para adicionar nome de empresas que o sistema ou topologia vai ter.
 - Controle de Eventos: Para adicionar eventos de simulação como abertura de disjuntores, curto circuito, modifica parâmetro etc.
- Menu Aplicativo: Aqui temos duas opções:
 - Fluxo de Potência: Para executar o fluxo de potência do sistema/topologia criada ou aberta. 
 - Simulação Completa: Para executar a simulação dinâmica, respostas das grandezas elétricas versus o tempo. 
- Menu Relatórios: Aqui temos oito opções:
 - Estado da Rede x Ilha: Mostra o estado (barras e linhas) do sistema ou topologia por ilhas elétricas.
 - Estado da Rede x Empresas: Mostra o estado do sistema ou topologia por empresas.

¹ Permite ao usuário modificar o nome de arquivo.

- Estado da Rede x Subestação: Mostra o estado do sistema ou topologia por subestação.
 - Estado da Rede x Área: Mostra o estado do sistema ou topologia por área.
 - Ilhas Elétricas: Mostra o sistema ou topologia, o numero de dispositivos existentes por ilhas elétricas tanto ativas como inativas.
 - Relatório de Eventos: Mostra o LOG de eventos que foram realizados durante a simulação dinâmica.
 - Medidores: Mostra os medidores existentes no sistema ou topologia, curvas dos medidores depois da simulação dinâmica.
 - Torção nos Geradores: Mostra as curvas do esforço torcional dos geradores com seus limites máximos e mínimos permitidos.
- Ícones: Temos três ícones sendo o primeiro para criar (📄) uma nova topologia, abrir (📁) uma topologia existente, guardar (💾) uma topologia aberta, depois de ser modificada ou criada.

Localizar

O Simulight conta com a opção de procura generalizada em todos os campos das telas, a qual pode ser usada em qualquer momento que o usuário precise, tal como mostra a Figura 4.3. Este comando pode localizar qualquer elemento existente, seja por tipo, por Número, Nome ou Status.

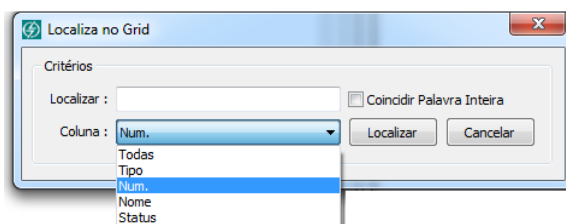


Figura 4.3 Tela Localizar do Simulight.

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 **Arquivos** → **Novo Caso** o usuário poderá começar a criação de uma nova topologia, conforme 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. Muito útil para usuários avançados que geram novos modelos de reguladores, estabilizadores etc..

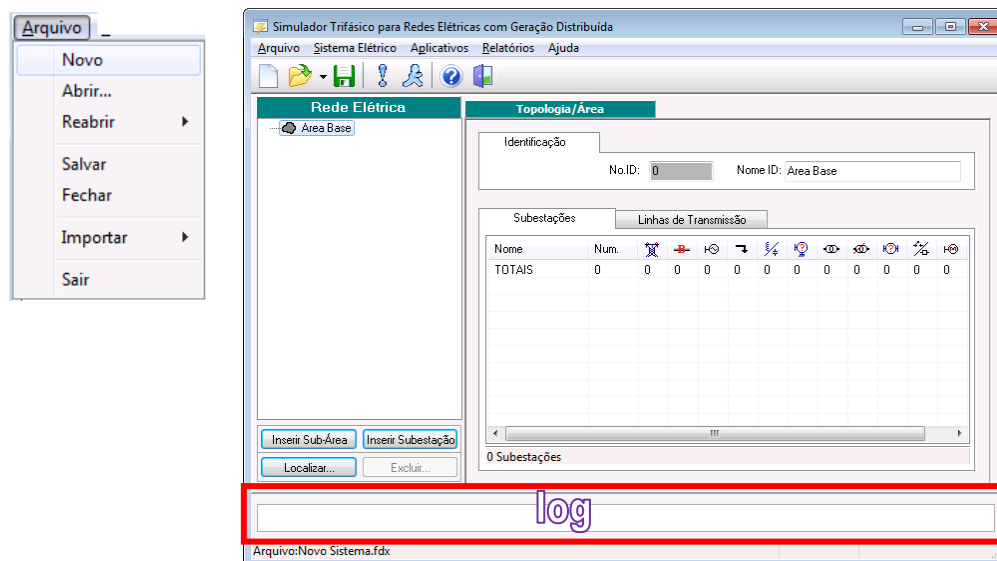


Figura 4.4 Arquivos / Novo Caso.

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

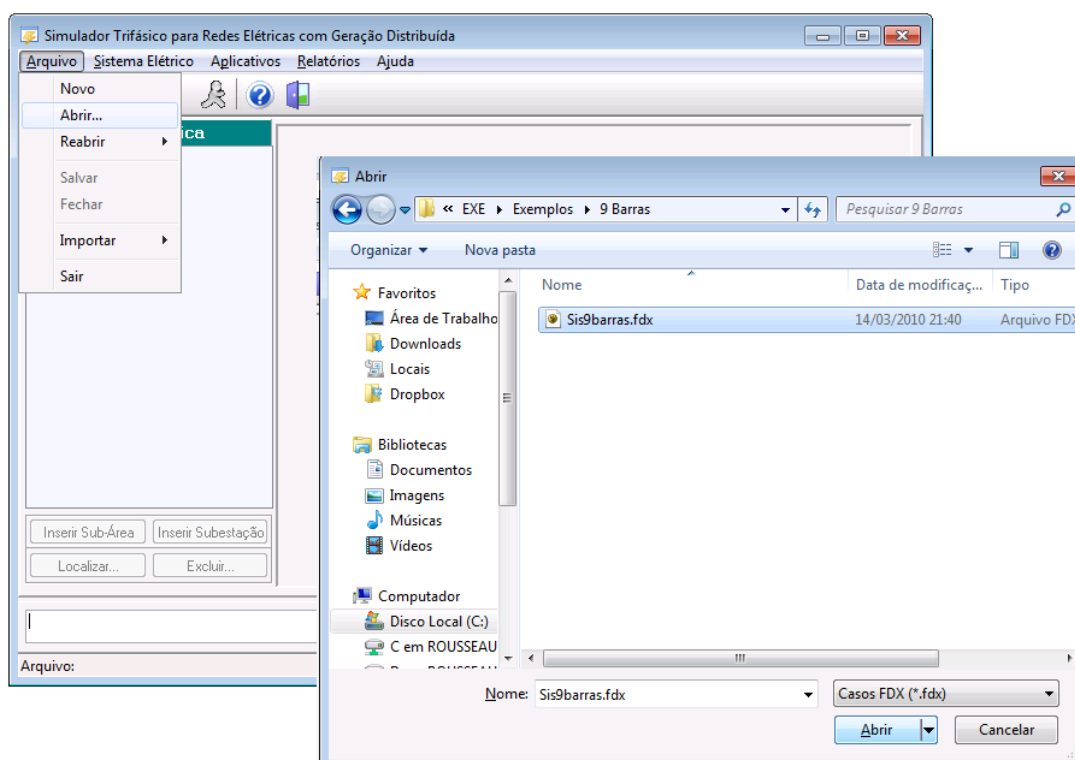


Figura 4.5 Arquivos / Abrir.

O arquivo texto aberto representa um sistema elétrico com duas áreas, 3 empresas e 5 subestações, conforme 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.

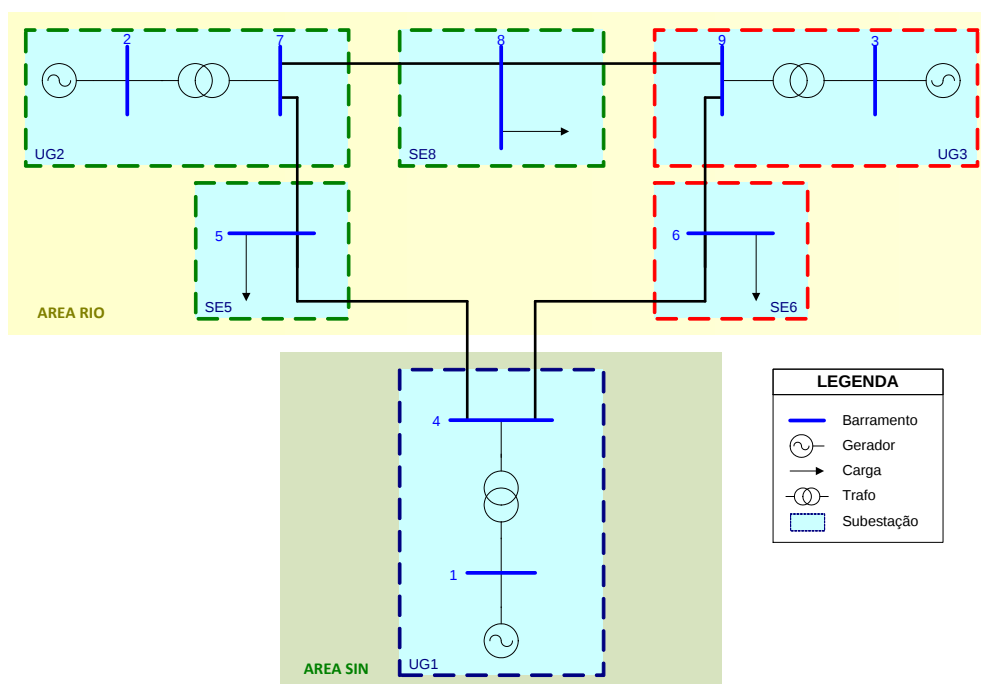
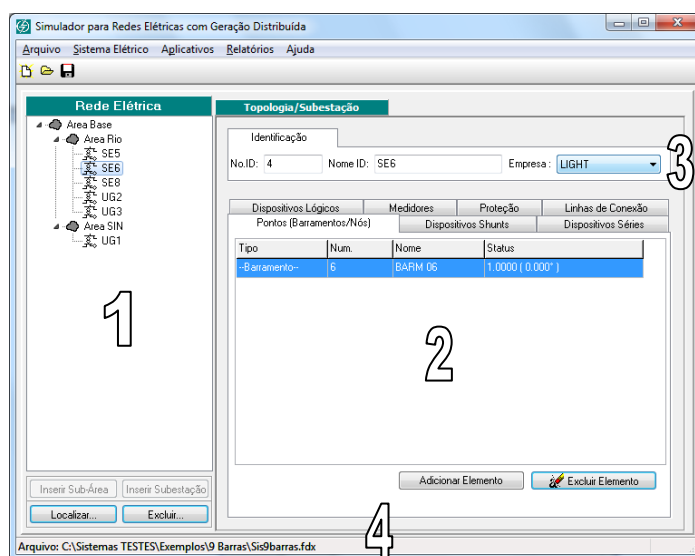


Figura 4.6 Topologia do Sistema 9 Barras.

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 à qual a subestação escolhida pertence.
- 4.- O nome do arquivo carregado

Figura 4.7 Caso carregado desde um arquivo texto.

4.4 Importar Dados do PRAO²

A partir do menu **Arquivos** → **Importar PRAO** o usuário poderá importar dados topológicos da base de dados PRAO, conforme 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.

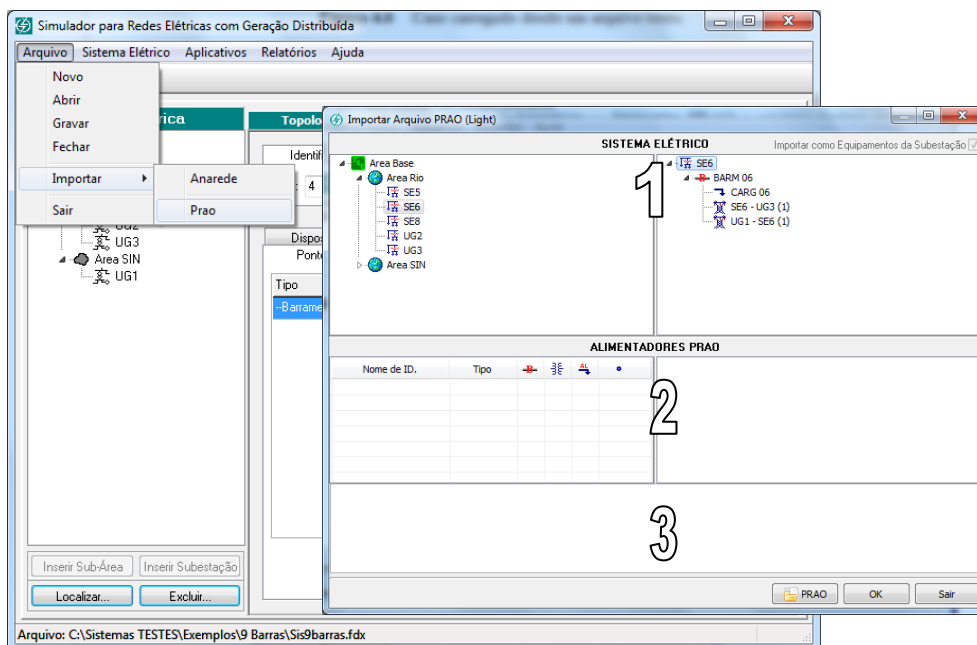


Figura 4.8 Arquivos / Importar PRAO.

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

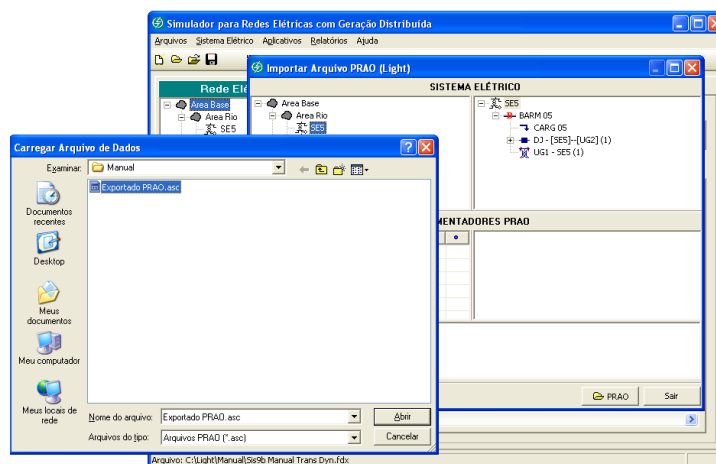
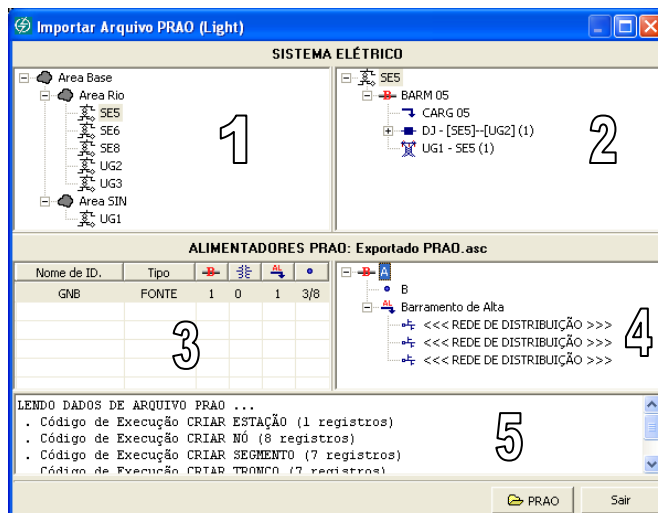


Figura 4.9 Arquivos / Importar PRAO / Botão PRAO.

² No caso da concessionária AMPLA há um procedimento semelhante para a importação do arquivo Adept.

Uma vez selecionado um “arquivo PRAO”, a topologia do mesmo é carregado no painel “Alimentadores PRAO”, conforme 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”.



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

Figura 4.10 Arquivo PRAO carregado.

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 assumirá o valor do limite superado ou atingido³. Nos casos em que o comprimento dos segmentos/troncos do PRAO estejam com valores menores a 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:

Uma vez carregado um “arquivo PRAO” o usuário poderá escolher os alimentadores (ou redes de distribuição) a serem importados 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 botão do 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

³ Caso o usuário deseje realizar algum tipo de modificação, devesse fazê-lo via interface do Simulight.

processo o importador⁴ criou automaticamente o disjuntor “DJ-PRAO” para conectar dito alimentador no mencionado barramento.

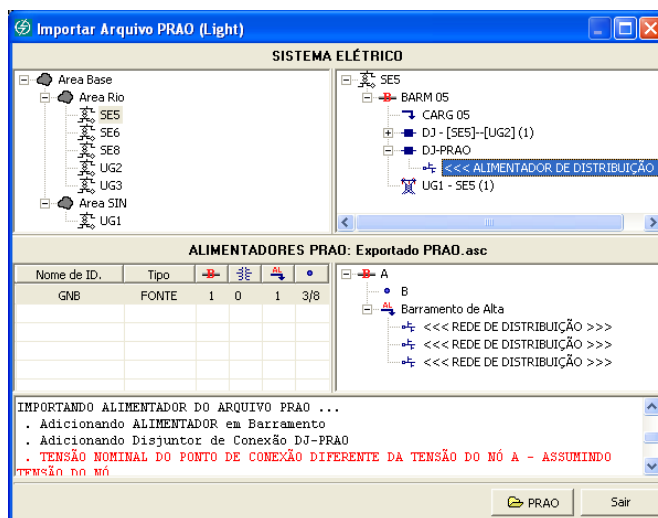


Figura 4.11 Importando dados PRAO para a Interface principal.

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 través da interface principal⁵.

Exemplo do LOG:

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

```

LENDENDO 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

```

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 Caso o usuário erre na escolha do alimentador, ele terá que realizar todo o procedimento novamente.

⁵ O Simulight somente importa dados estáticos. Na simulação no tempo as cargas têm como default modelo ZCTE.

4.5 Importação de dados do Anarede

Os dados do sistema são atualizados pelo ONS para diferentes horizontes como novas obras, novas topologia de carga, manutenção programadas 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 4.12.



Figura 4.12 Sequência da importação do de dados do Anarede.

No Programa Simulight, o usuário poderá importar dados topológicos da base de dados de ANAREDE que são convertidos para o formato XML (*.fdx) utilizado pelo Simulight, conforme mostrado na Figura 4.13. Nesta Figura observa-se a tela principal de importação na qual o usuário escolhe se o arquivo PWF é de 4 ou de 5 dígitos (futuramente esta escolha será automática). Basta clicar no botão [Arquivo] para depois selecionar o arquivo *.PWF.

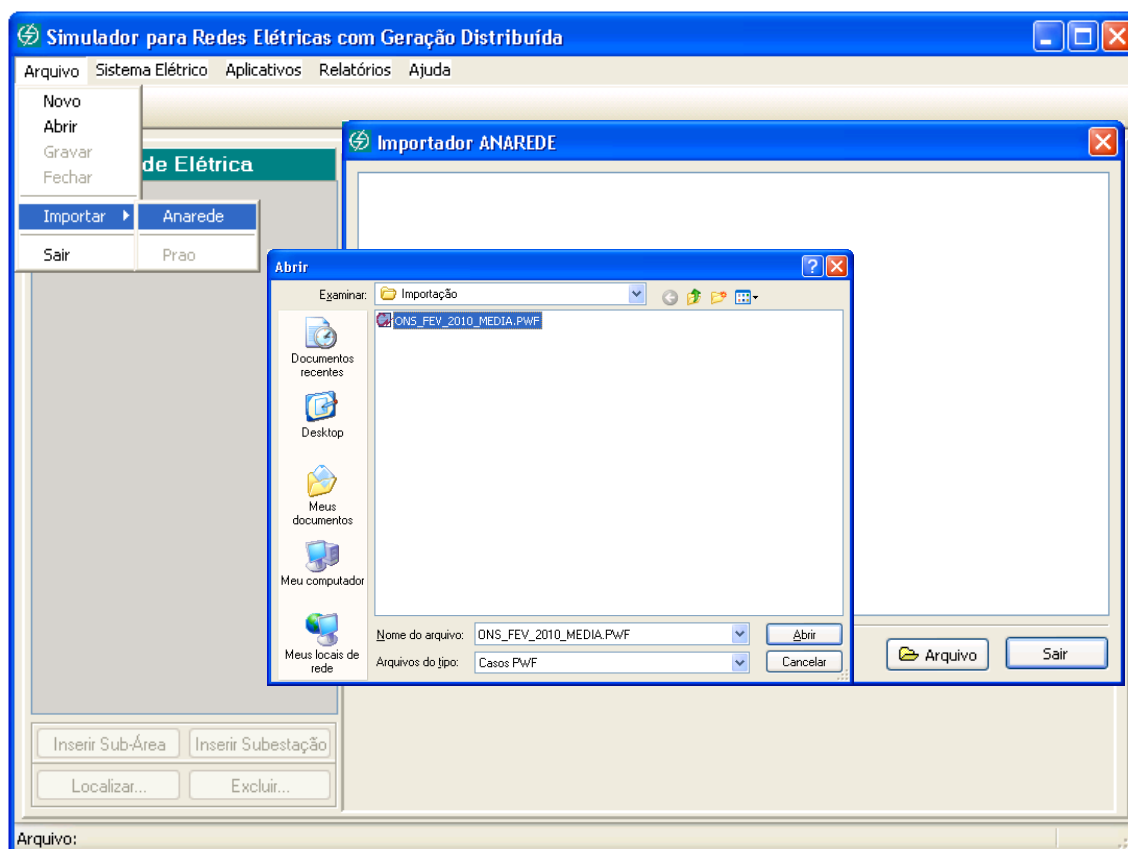


Figura 4.13 Importação de arquivos ANAREDE.

Ao mandar abrir o arquivo, automaticamente é gerado um LOG de crítica da importação do arquivo PWF, onde se indica os CART carregados do ANAREDE, conforme mostrado na Figura 4.14.

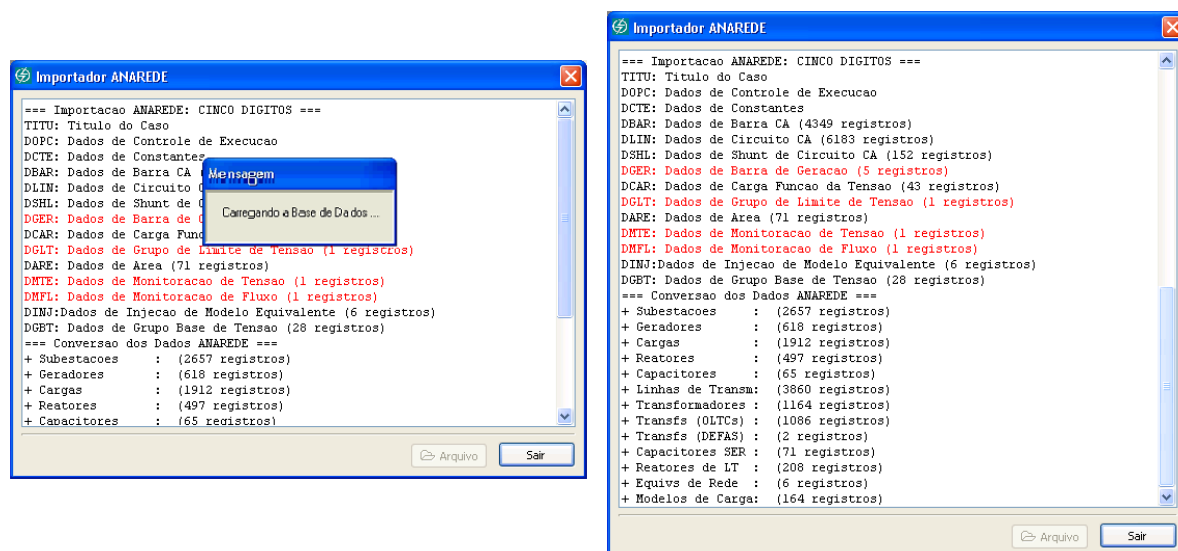


Figura 4.14 Carregamento do Arquivo *.PWF.

Dificuldades da Importação:

- Mudança dos arquivos PWF: Uma das principais dificuldades da Importação do arquivo ANAREDE é devido às mudanças dos arquivos *.PWF, como por exemplo, arquivos de 4 dígitos para 5 dígitos, alteração de CART como a introdução do código DSHL, adesão de novos CART como do DBSH, assim como a precisão dos CARTs como a do ângulo no DBAR.

Futuras mudanças nos arquivos *.PWF poderão levar a algumas dificuldades de importações, criando assim arquivos *.FDX incompletos ou não equivalentes ao *.PWF original. Uma forma de se precaver é a observação do LOG gerado durante a importação (Figura 4.14), verificando se todos os CARTs existentes no arquivo *.PWF foram carregados.

- ELO de corrente contínua: O Simulight ainda não conta com o modelo do ELO de corrente contínua. Nesse caso se recomenda realizar um equivalente em injeção de potência (“Remoção de Elo/Polo⁶” do ANAREDE) antes da importação.

⁶ Dados/RedeCC/[Remoção de Elo/Polo] → Criar Injeções de Potência Equivalentes (PCTE)

4.6 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, conforme mostrado na Figura 4.15.

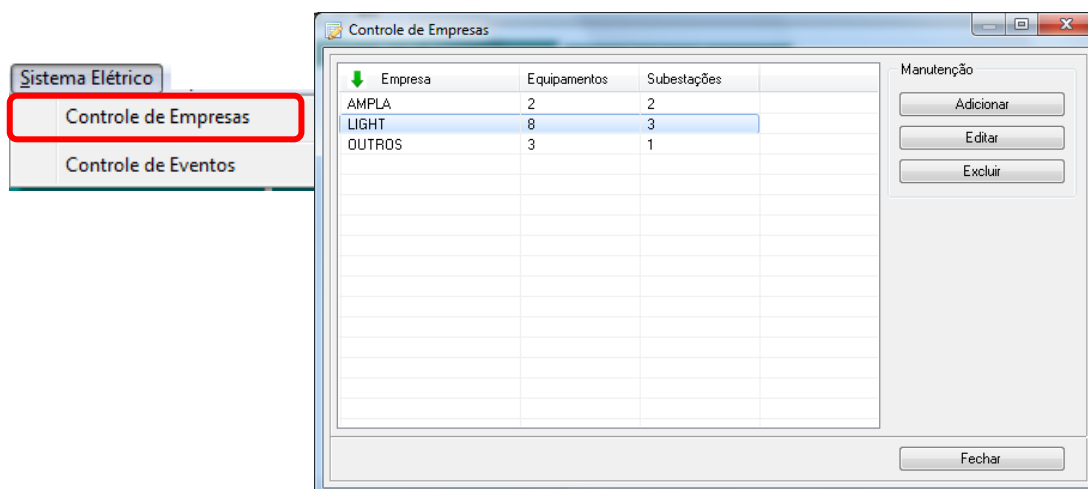


Figura 4.15 Sistema Elétrico / Controle de Empresas.

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

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

Fazendo dois cliques numa das empresas listadas, o usuário acessa uma janela para visualizar e/ou editar as informações básicas da mesma, conforme mostrado na Figura 4.16. 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).

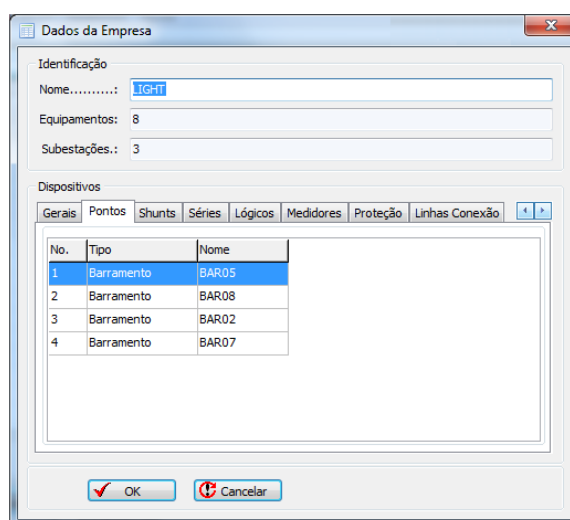


Figura 4.16 Sistema Elétrico / Controle de Empresas / Botão Editar.

4.7 Salvar um Caso

A partir do menu **Arquivos** → **Gravar** o usuário poderá salvar o caso de estudo com um nome diferente do arquivo inicialmente carregado. Caso o nome a ser guardado seja o mesmo, é só dar um clique em salvar, conforme mostrado na Figura 4.17. Caso o usuário deseje gravar com o mesmo nome do arquivo inicialmente carregado, basta clicar no menu **Arquivos** → **Gravar**.

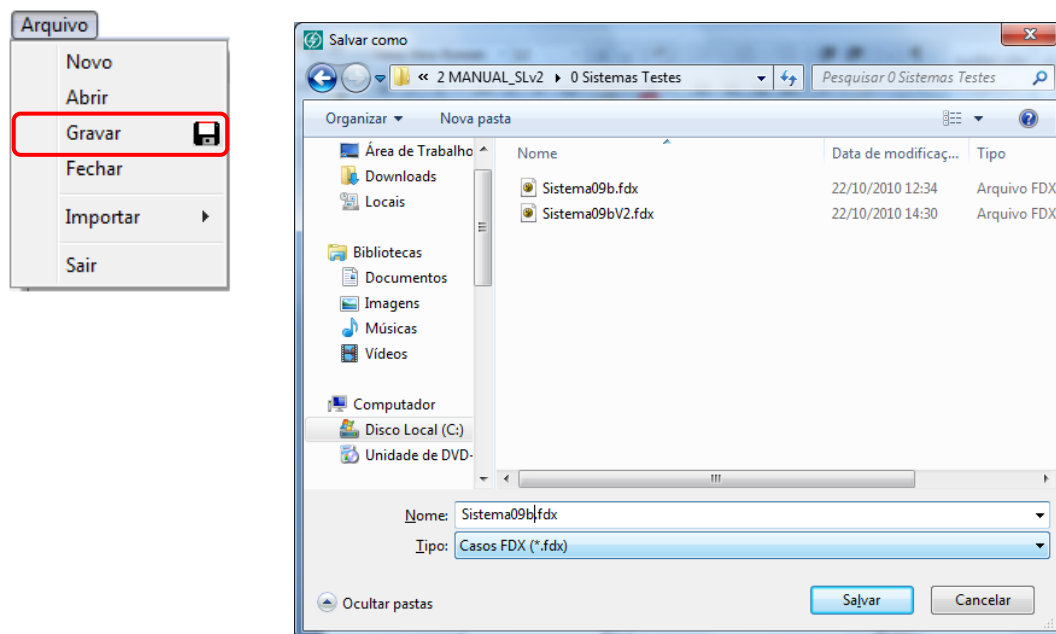


Figura 4.17 Arquivos / Salvar Como...

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 janela principal, conforme 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.

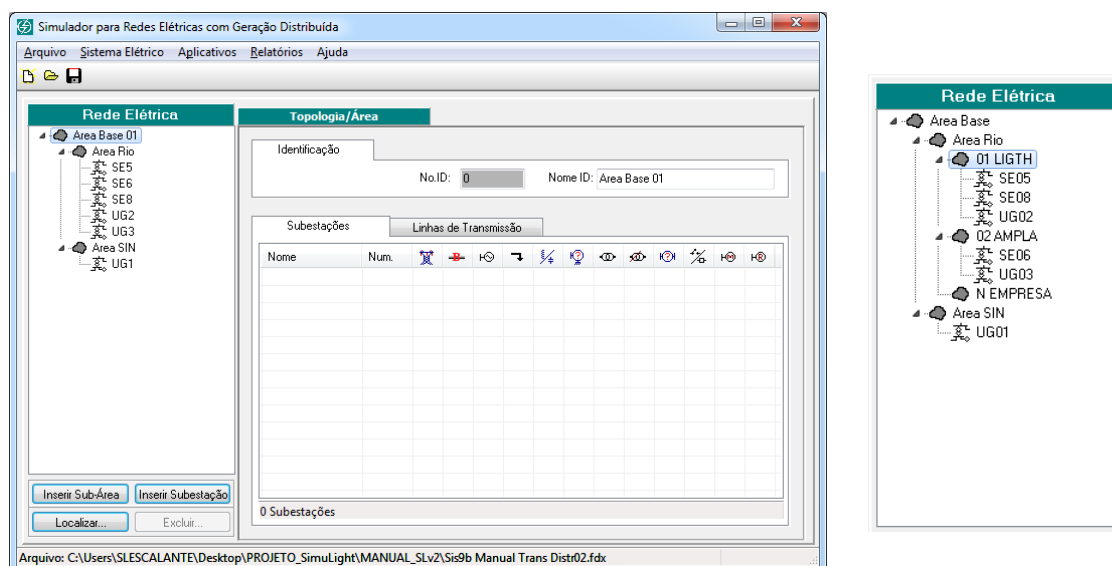
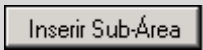
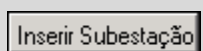
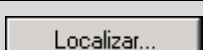
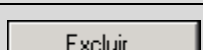


Figura 5.1 Painel Rede Elétrica.

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:

	Inserir uma Sub-Área dentro da Área selecionada.
	Inserir uma Subestação dentro da Área selecionada.
	Localiza algum dispositivo presente na topologia
	Exclui o elemento selecionado da topologia.

Com estes botões o usuário é livre para fazer uma ordenação ou separação do sistema seja este 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) que descreve 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 2 (que aparece na figura) significa que esta foi a segunda área criada pelo usuário. No campo [Nome ID] se insere o nome da área criada pelo usuário.

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

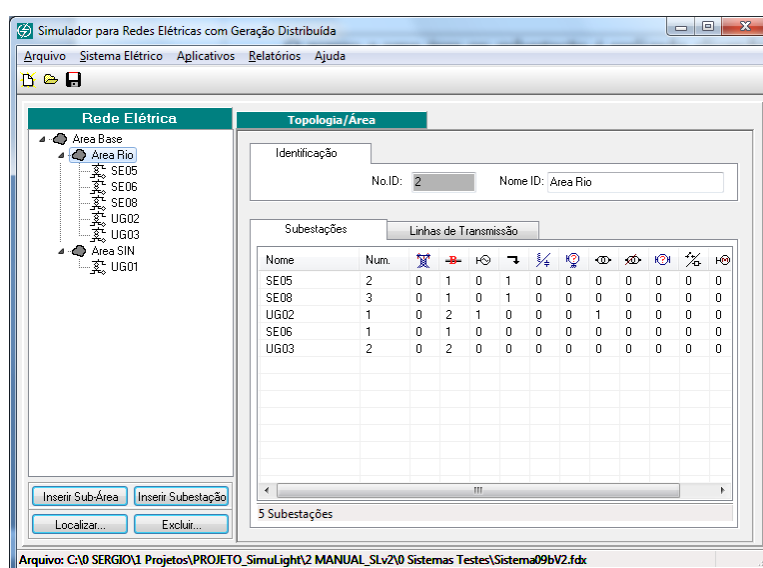


Figura 5.2 Área/Subestações.

A aba [Linhas de Transmissão] mostra algumas informações básicas das linhas instaladas na área (conexão entre duas subestações), conforme mostrado na Figura 5.3.

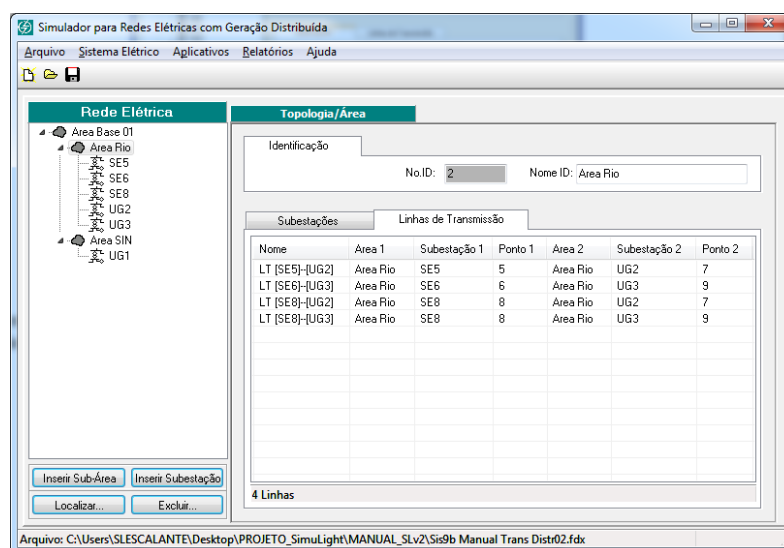


Figura 5.3 Área/ Linhas de Transmissão.

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: Barramentos, Dispositivos Shunts, Dispositivos Séries, Dispositivos Lógicos, Medidores, Proteção e Linhas de Conexão.

5.3.1 Barramentos

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 *popup menu* que permite ao usuário filtrar a informação mostrada, assim como localizar informação relevante.

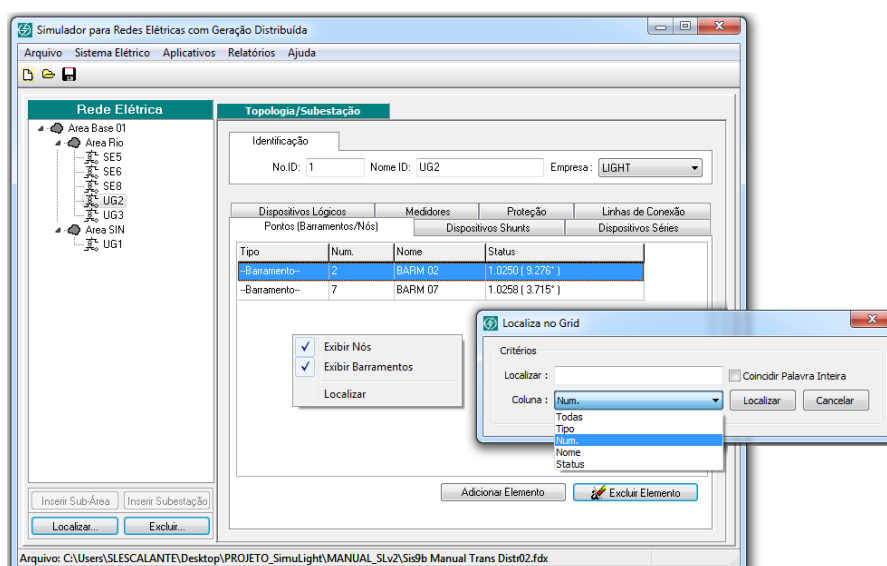


Figura 5.4 Subestação / Aba Pontos.

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

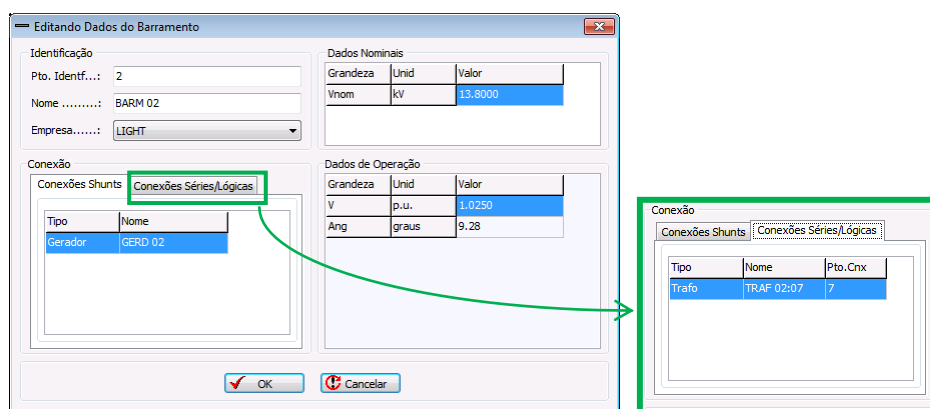


Figura 5.5 Subestação / Aba Pontos / Edição do Barramento.

5.3.2 Dispositivos Shunts

Na Figura 5.6 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* ou *reator*.

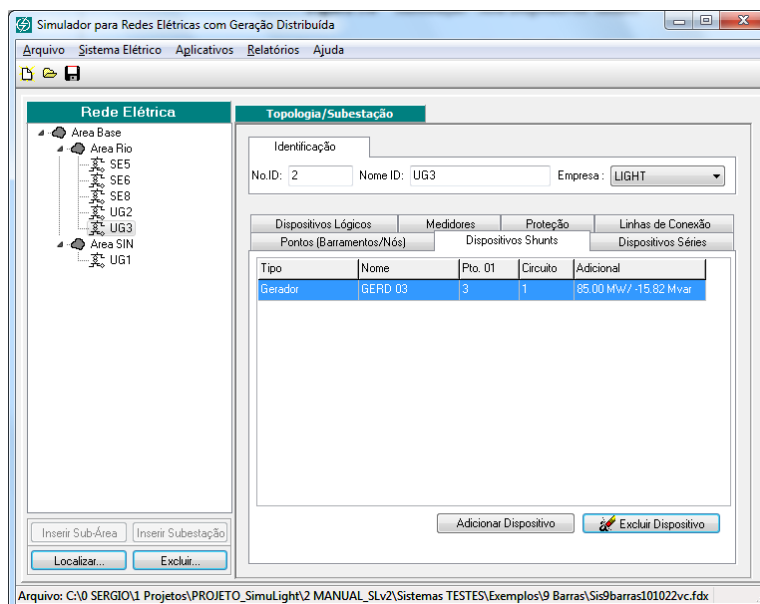


Figura 5.6 Subestação / Aba Dispositivos Shunts.

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de dispositivos shunts, aparecerá um *popup menu*, conforme mostrado na Figura 5.7. Este menu permite ao usuário filtrar a informação mostrada, localizar informação relevante, assim como inserir um disjuntor no 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.

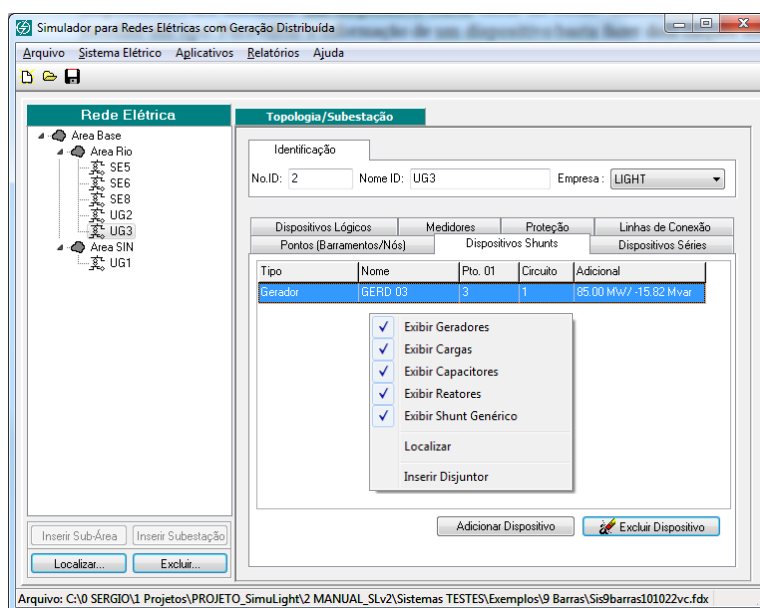
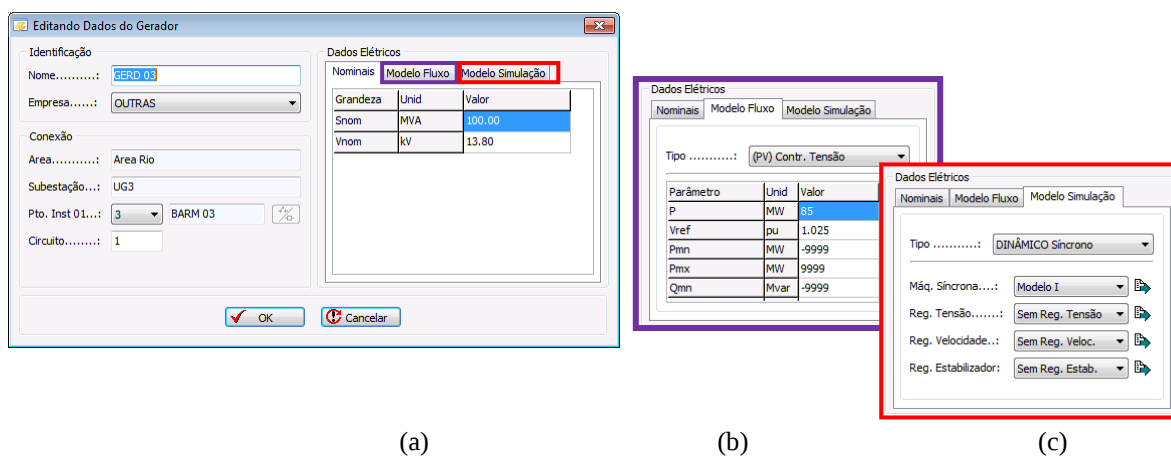


Figura 5.7 Subestação / Aba Dispositivos Shunts / Popup Menu.

Na Figura 5.8 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 5.8 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 à localização do dispositivo na topologia da subestação. Os dados elétricos são utilizados para cadastro (aba Nominiais), assim como para utilização dos aplicativos de fluxo de potência (aba Modelo Fluxo) e simulação no tempo (aba Modelo Simulação).

Na Figura 5.8 se detalha também, as abas correspondentes ao grupo denominado “Dados Elétricos”. Na Figura 5.8 (a) observa-se a aba Gerais selecionada. Nesta aba são mostradas algumas informações comuns a todos os modelos. Na Figura 5.8 (b) observa-se a aba Modelo 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 5.8 (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.



(a) (b) (c)
Figura 5.8 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. Os modelos disponíveis pelo simulador para os dispositivos shunt, via interface gráfica, são os seguintes:

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

5.3.3 Dispositivos Séries

Na Figura 5.9 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: *trecho*, *trafo* ou *LTC*.

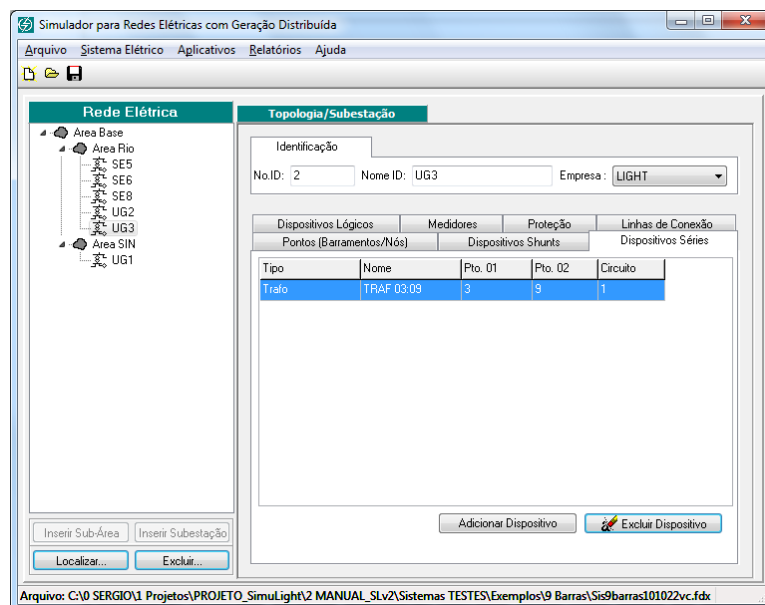


Figura 5.9 Subestação / Aba Dispositivos Séries.

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de dispositivos séries, aparecerá um *popup menu*, conforme mostrado na Figura 5.10. 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.

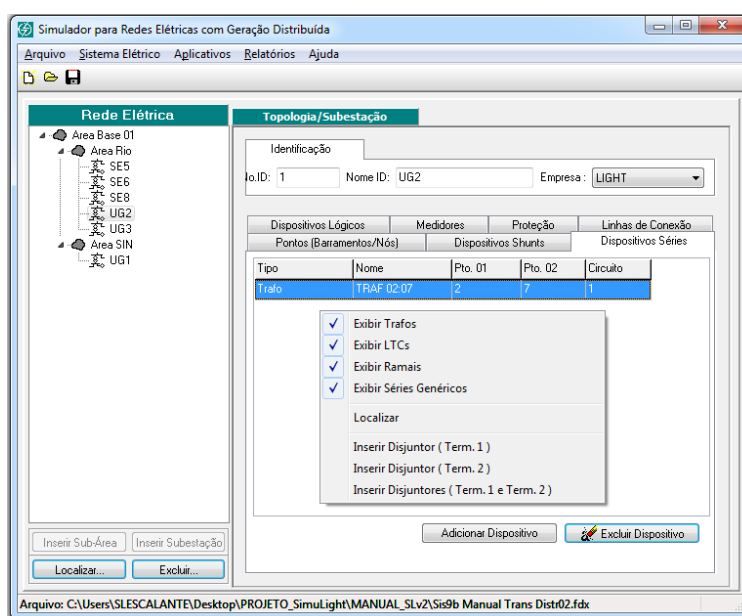


Figura 5.10 Subestação / Aba Dispositivos Séries / Popup Menu.

Na Figura 5.11 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.

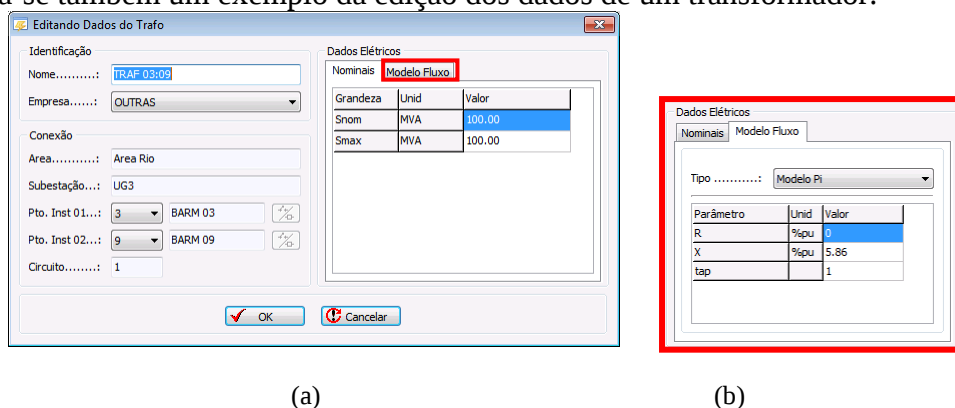


Figura 5.11 Subestação / Aba Dispositivos Séries / Edição do Transformador.

5.3.4 Dispositivos Lógicos

Na Figura 5.12 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*.

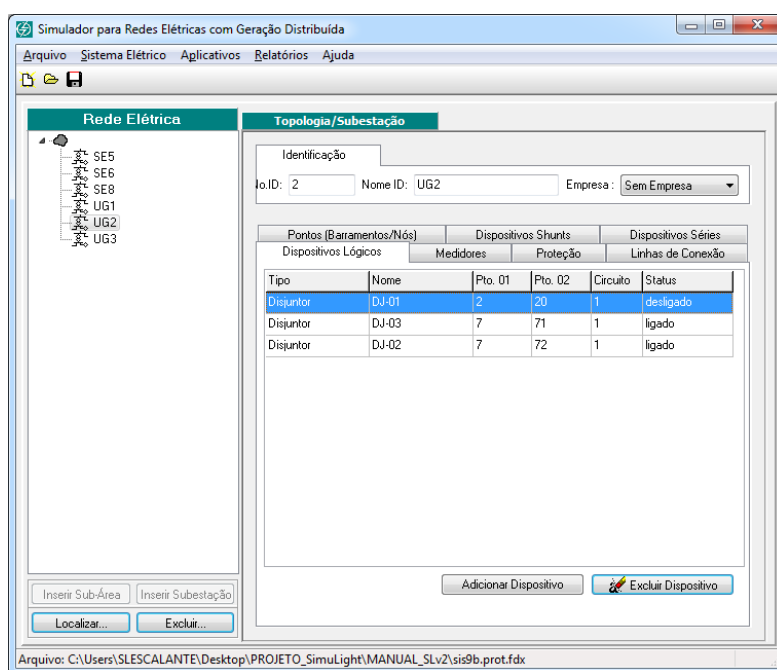


Figura 5.12 Subestação / Aba Dispositivos Lógicos.

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de dispositivos lógicos, aparecerá um *popup menu*, conforme mostrado na Figura 5.13. 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.

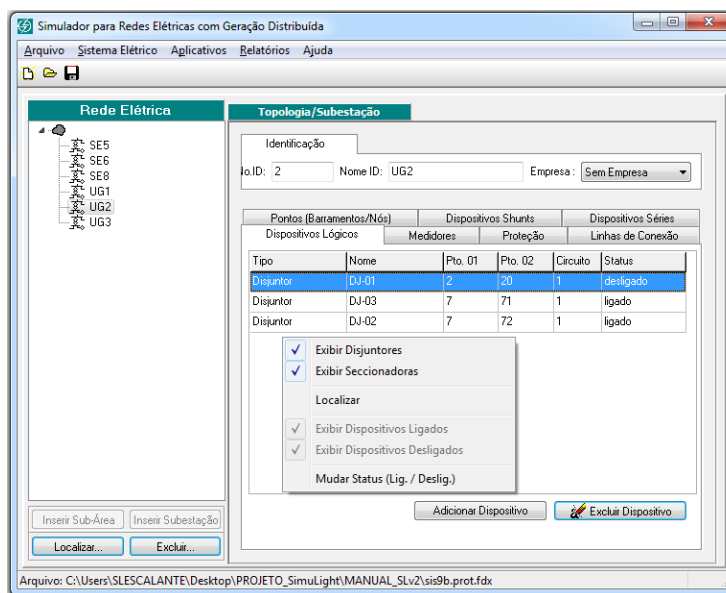


Figura 5.13 Subestação / Dispositivos Lógicos / Popup Menu.

Na Figura 5.14 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 5.14 observa-se também um exemplo da edição dos dados de um disjuntor.

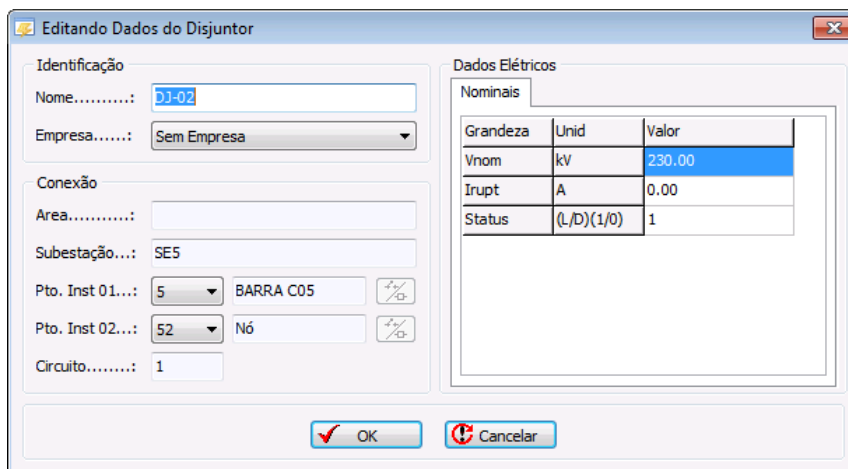


Figura 5.14 Subestação / Edição Dispositivos Lógicos.

5.3.5 Medidores

Na Figura 5.15 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* (módulo da tensão), *FREQ* (frequência), *MVA* (potência aparente), *MW* (potência ativa), *MVAR* (potência reativa), *AMP* (corrente) ou *senal* (sinal interno de algum modelo de um dispositivo).

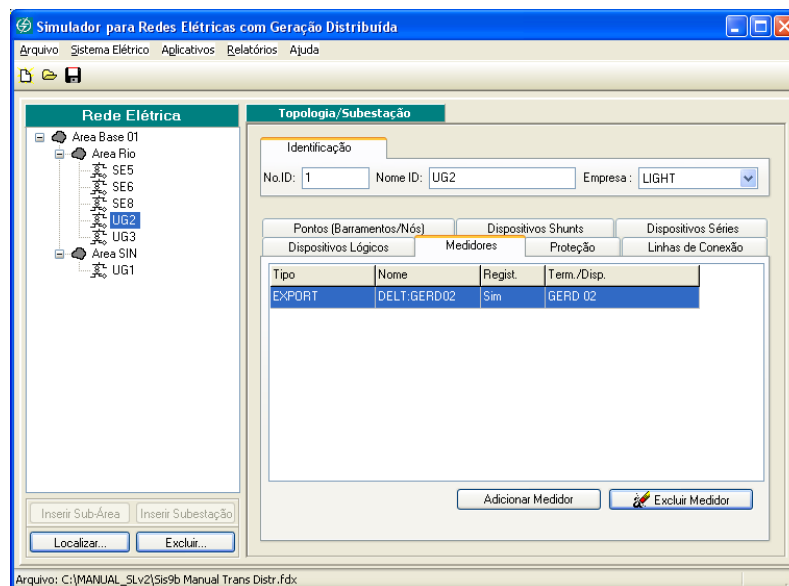


Figura 5.15 Subestação / Aba Medidores

Fazendo um clique direito com o mouse na lista dos medidores, aparecerá um *popup menu*, conforme mostrado na Figura 5.16. 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.

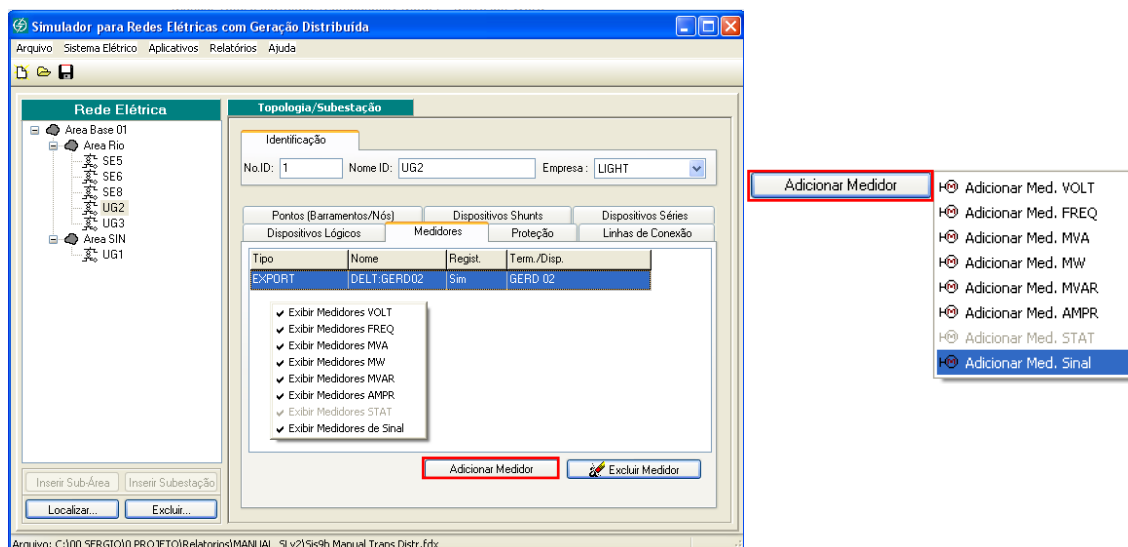


Figura 5.16 Subestação / Aba Medidores / Popup Menu.

Na Figura 5.17 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de um medidor, o exemplo da figura mostra a escolha da medida “delt” que é uma medida de sinal interno (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 5.17 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”.

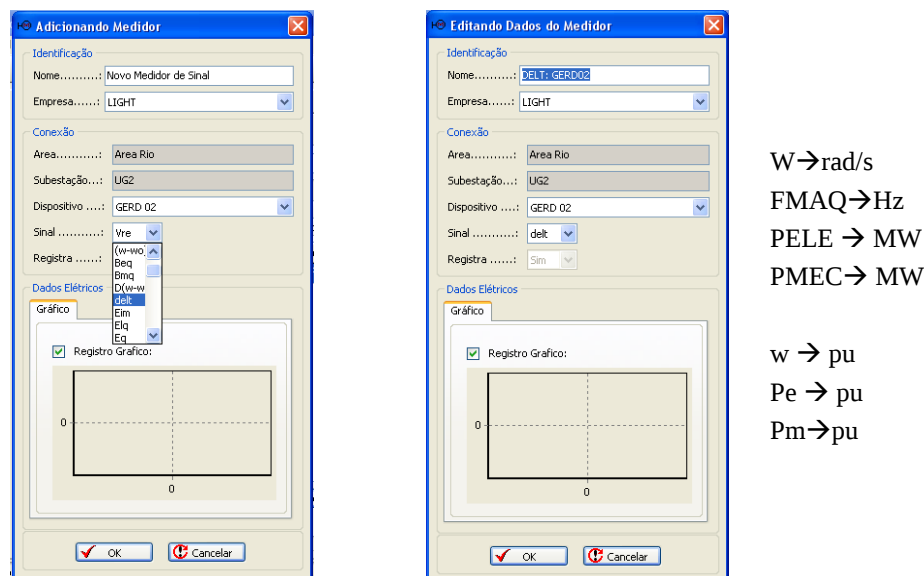


Figura 5.17 Subestação / Aba Medidores / Edição do medidor de sinal

5.3.6 Proteção

Na Figura 5.18 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. As proteções podem ser do tipo: *RL21* (distância), *RL25* (sincronismo), *RL27* (subtensão instantânea), *RL50* (sobrecorrente instantânea), *RL51* (sobrecorrente temporizada), *RL59* (sobretensão instantânea), *RL81O* (sobrefrequência) ou *RL81U* (sub-frequência).

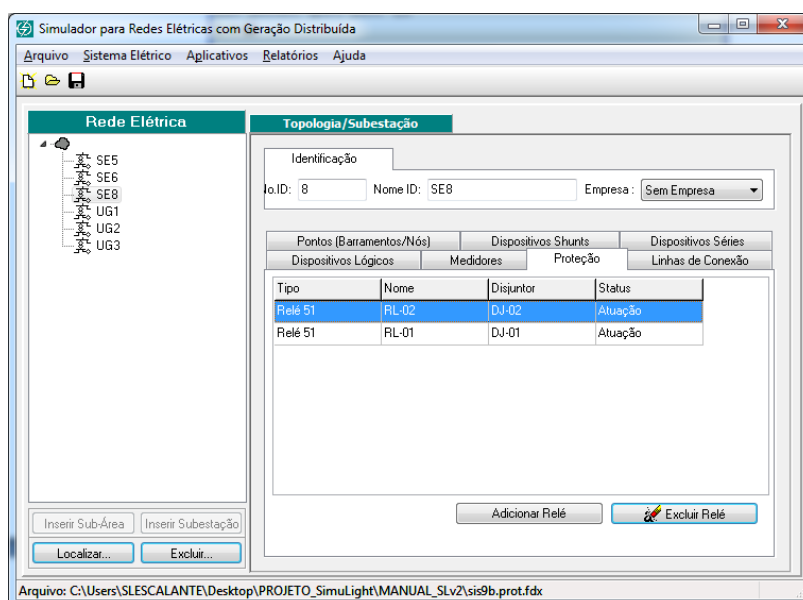


Figura 5.18 Subestação / Aba Proteção

Fazendo um clique direito com o mouse na lista dos relés, aparecerá um *popup menu*, conforme mostrado na Figura 5.19. Este menu permite ao usuário filtrar a informação

mostrada. 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.

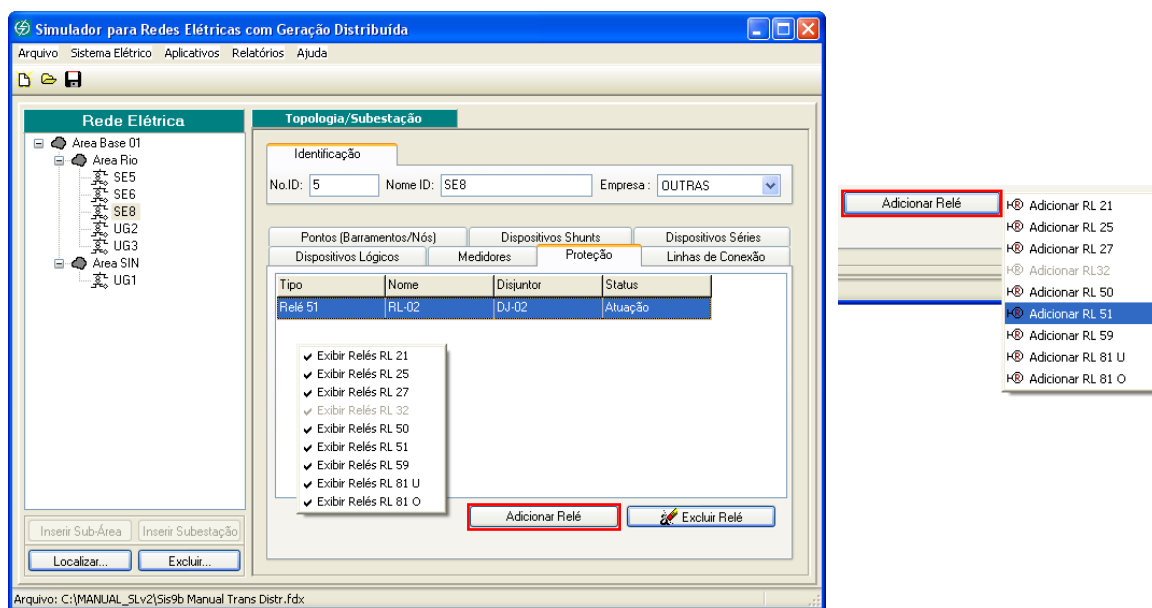


Figura 5.19 Subestação / Aba Proteção / Popup Menu.

Na Figura 5.20 (a) observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de um relé. A janela mostrada é padrão para todos os relés. Um exemplo da edição do relé de sobrecorrente temporizado é mostrado na Figura 5.20 e Figura 5.21, nesta última Figura, mostra-se a *aba Modelo*, e as funções que pertence ao relé 51

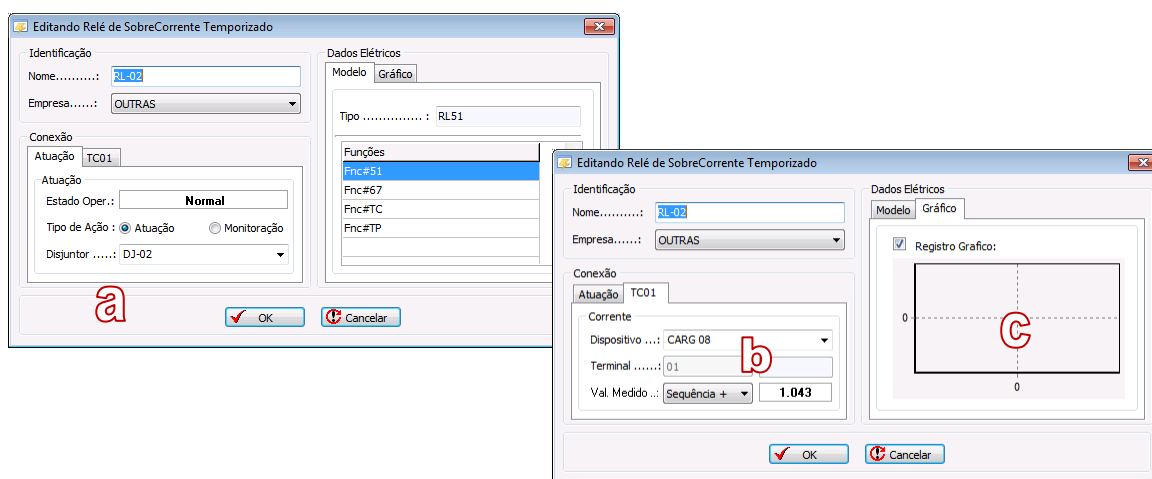


Figura 5.20 Subestação / Aba Proteção / Edição do relé de sobrecorrente.

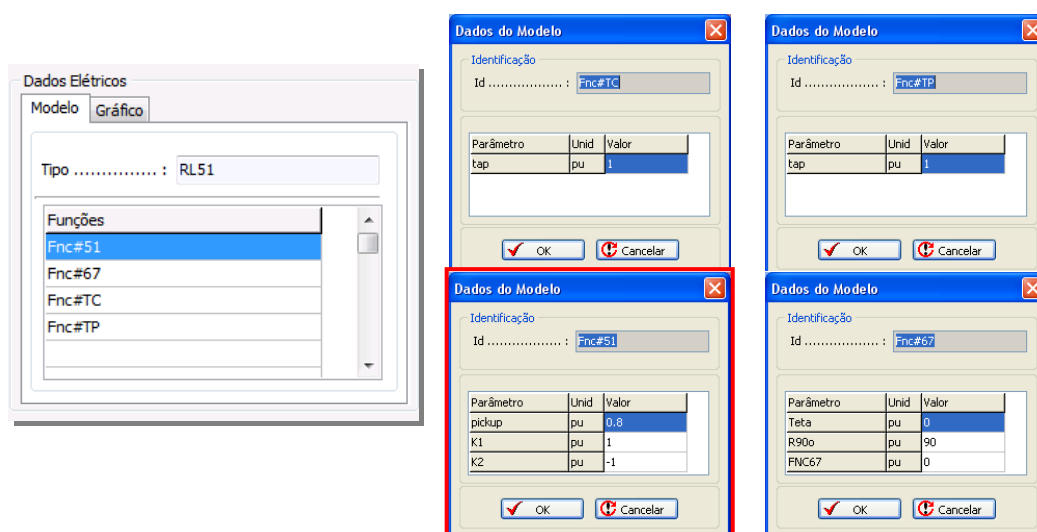


Figura 5.21 / Aba Modelo / Edição de Funções do relé 51.

5.3.7 Linhas de Conexão

Na Figura 5.22 observa-se a aba “Linhas de Conexão” selecionada. Nesta aba o usuário pode adicionar, editar ou excluir as linhas de transmissão que conectam uma subestação a outra subestação externa; além de visualizar uma lista das mesmas.

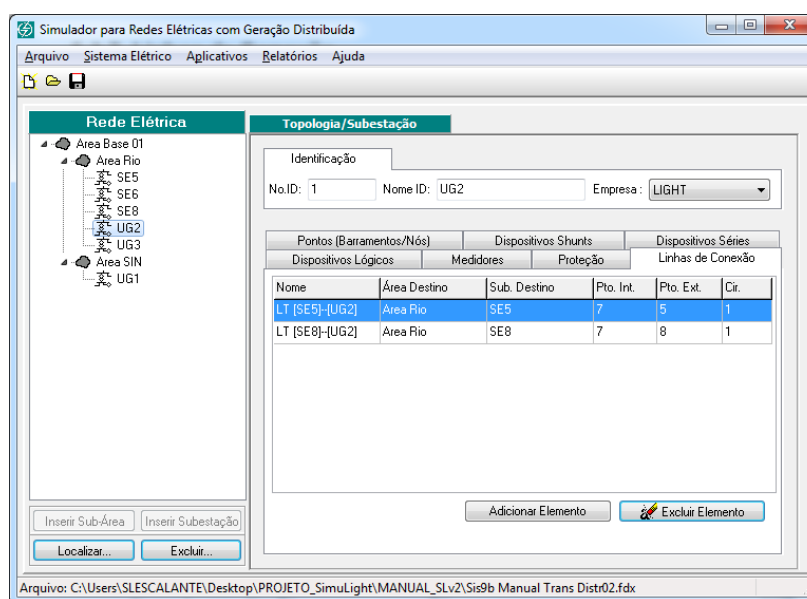


Figura 5.22 Subestação / Aba Linhas de Conexão

Fazendo um clique direito com o mouse na lista de linhas de conexão, aparecerá um *popup menu*, conforme mostrado na Figura 5.23. 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.

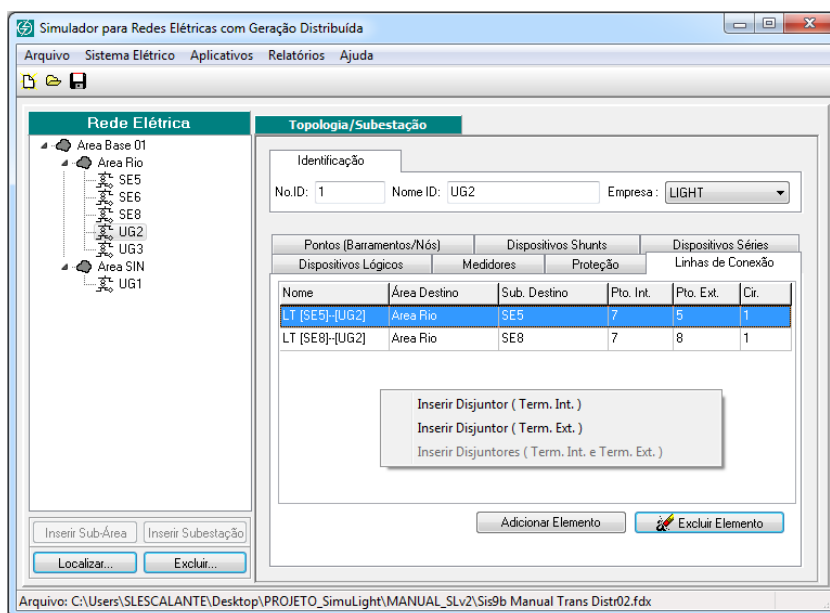


Figura 5.23 Subestação / Linhas de Conexão Popup Menu.

Na Figura 5.24 observa-se a janela utilizada para a adição ou edição dos dados de uma linha de conexão. Na Figura 5.24 observa-se também um exemplo da edição dos dados de uma linha de transmissão.

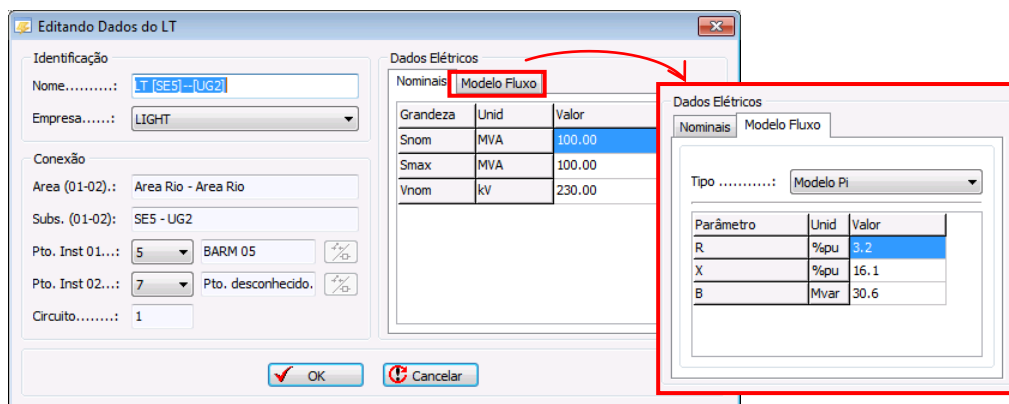


Figura 5.24 Subestação / Edição das Linhas de Conexão

5.4 Dispositivos Definidos Pelo Usuário

5.4.1 Introdução

A versão atual do Simulight limita o número de modelos dos dispositivos que podem ser utilizados via interface gráfica. Entretanto, o usuário não tem limitação de modelos se utilizar o arquivo *.fdx na linguagem XML, no qual ele passa a ter a liberdade de criar seus próprios dispositivos. Os dispositivos que podem ser definidos pelo usuário no Simulight são: máquinas síncronas e de indução, reguladores de tensão e de velocidade, estabilizadores de sistemas de potência, relés de proteção e esquemas especiais de proteção.

Uma ampla biblioteca de modelos se encontra no arquivo chamado “LIBMODELS.xml”. Este arquivo é 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 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 que visualize arquivos 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 deste manual fornecer um tutorial da meta-linguagem XML, é bom apontar algumas características desta meta-linguagem. Para facilitar a compreensão será apresentado um exemplo para mostrar a representação de uma área utilizando XML. A área escolhida é a “Area 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. Este 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 está sendo descrito, as propriedades do tipo, assim como a finalização da descrição.

No nosso exemplo o elemento “Area Base” pertence ao tipo de elemento “area”. Este tipo utiliza as etiquetas “<AREA>” e “</AREA>” para definir o início e o fim da descrição. Entre as propriedades do tipo de elemento “area” 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 “Area Base” pode ser visualizado na Figura 5.25.

Na Figura 5.25, no lado direito, observa-se que a “Area Base” possui: id (“0”), nome (“Area Base”), descrição (“”), uma sub-área (“Area SIN”) e outra sub-área (“Area Rio”). A sub-área “Area Rio” pertence ao tipo “area”, pelo tanto na sua descrição temos: id (“2”), nome (“Area 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 5.25, 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”.

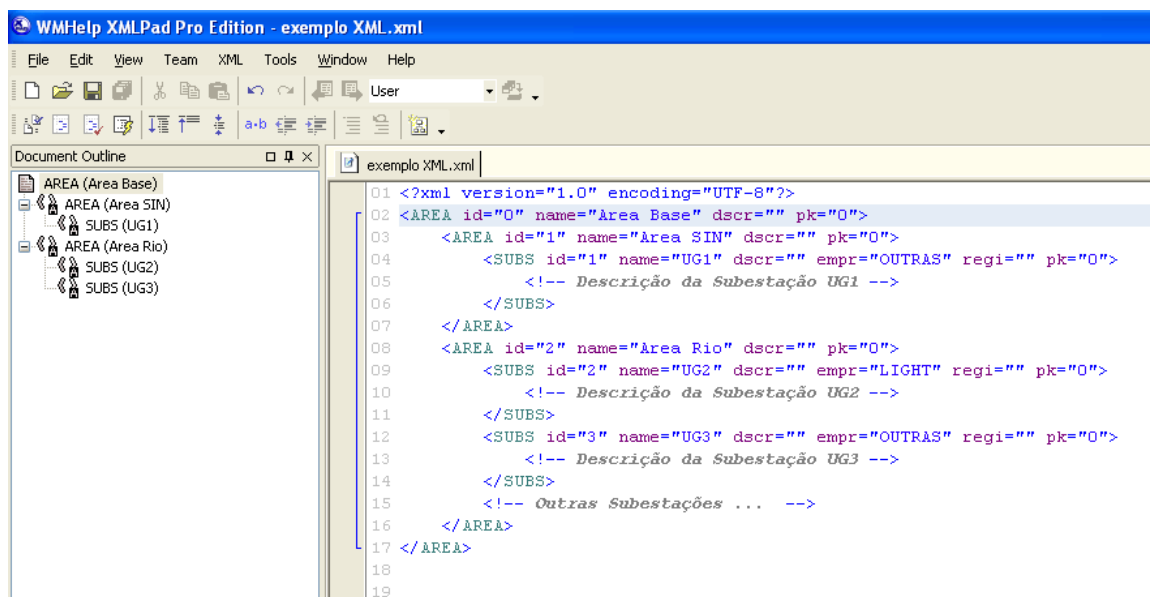


Figura 5.25 Exemplo XML.

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 5.26 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 5.26 Novo Modelo – Formato de Entrada.

Para facilitar a compreensão, na medida 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 5.27, para exemplificar a descrição dos ditos atributos.

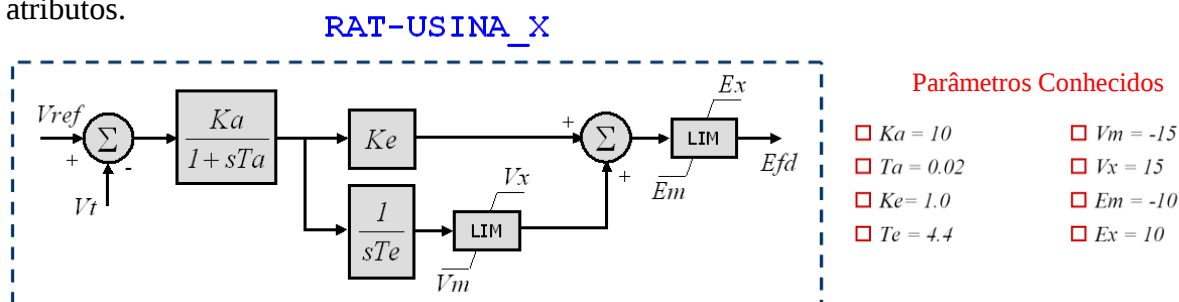


Figura 5.27 Regulador de Tensão - Diagrama de blocos e Parâmetros.

Na Figura 5.27 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 5.28.

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

Figura 5.28 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 5.29, 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="10.00" class="*" print="S" />
```

Figura 5.29 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 5.30, 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 5.30 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="" type="POLAR" term="1" out1="Vt" out2="Vang" />
```

Figura 5.31 Novo Modelo – Medição de Tensão.

5.4.8 Blocos Elementares

Entre 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 5.32 podem-se observar os formatos respectivos dos blocos. Na Figura 5.33 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"/>

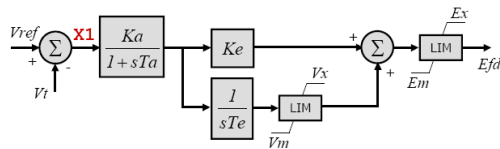
<!-- BLOCOS DINAMICOS -->
<INTG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx"/>
<DERV id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx"/>
<LAG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx" P="xxx" T="xxx"/>
<WSHT id="xxx" inp="xxx" out="xxx" stt="0" K="xxx" P="xxx" T="xxx"/>
<LDLG id="xxx" inp="xxx" out="xxx" 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 5.32 Novo Modelo – Blocos Elementares.

Bloco Somador

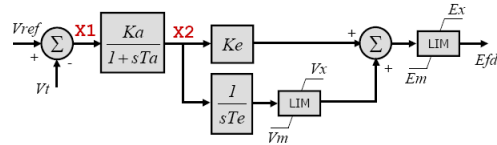
```
<SOMD id="" out="X1" stt="NO">
  <ADD sgn1="+">Vref</ADD>
  <ADD sgn1="-">Vt</ADD>
</SOMD>
```



Bloco Lag

```
<LAG id="" inp="X1" out="X2" stt="1" K="Ka" P="1.0" T="Ta"/>
```

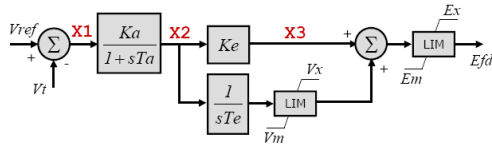
$$G(s) = \frac{K}{P + sT}$$



Bloco Ganho

```
<GANH id="" inp="X2" out="X3" stt="NO" K="Ke"/>
```

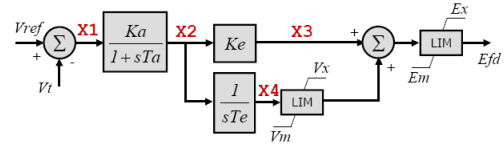
$$G(s) = K$$



Bloco Integrador

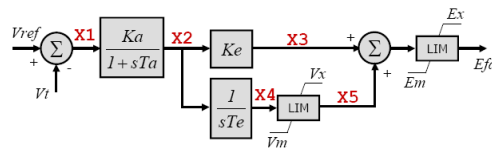
```
<INTG id="" inp="X2" out="X4" stt="1" K="1.0/Te"/>
```

$$G(s) = K \cdot \frac{1}{s}$$



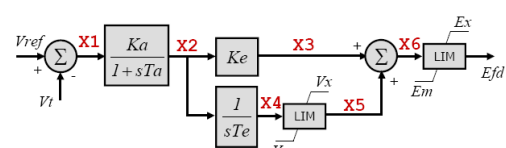
Bloco Limitador

```
<LIMT id="" inp="X4" out="X5" lmin="Vm" lmax="Vx" />
```



Bloco Somador

```
<SOMD id="" out="X6" stt="NO">
  <ADD sgn1="+">X3</ADD>
  <ADD sgn1="+">X5</ADD>
</SOMD>
```



Bloco Limitador

```
<LIMT id="" inp="X6" out="Efd" lmin="Em" lmax="Ex" />
```

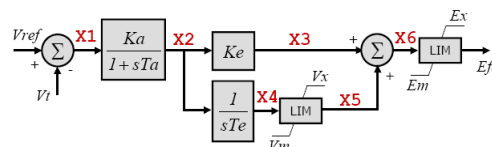


Figura 5.33 Novo Modelo – Exemplo dos blocos elementares.

5.4.9 Exemplo da implementação de um modelo

De acordo com o detalhado nas seções anteriores, o modelo inicialmente apresentado na Figura 5.25, possui a seguinte estrutura:

```
<MODEL id="RAT-USINA_X" source="USERS">
  <PARM id= "Ka" type="PARAMETER" value="10.00" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Ta" type="PARAMETER" value="0.020" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Ke" type="PARAMETER" value="1.000" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Te" type="PARAMETER" value="4.400" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Vm" type="PARAMETER" value="-15.0" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Vx" type="PARAMETER" value="15.00" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Em" type="PARAMETER" value="-10.0" class="*" print="S" />
  <PARM id= "Ex" type="PARAMETER" value="10.00" class="*" print="S" />
  <PARM id="Vref" type="REFERENCE" value="1" class="*" print="N" />
  <OUTP id="Efd" />
  <TENS id="" type="POLAR" term="1" out1="Vt" out2="Vang" />
  <SOMD id="" out="X1" stt="NO">
    <ADD sgn1="+">Vref</ADD>
    <ADD sgn1="-">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="X2" 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 sgn1="+">X3</ADD>
    <ADD sgn1="+">X5</ADD>
  </SOMD>
  <LIMT id="" inp="X6" out="Efd" lmin="Em" lmax="Ex" />
</MODEL>
```

Figura 5.34 Modelo do RAT-USINA_X (Figura 5.25).

Na seguinte Tabela mostram-se as variáveis que devem ser evitadas no momento de adicionar novos modelos dinâmicos via arquivo *.XML:

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	lang	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. Além do programa de simulação completa, um algoritmo para solução do fluxo de potência e um aplicativo para modificação da condição carga / geração no sistema também estão presentes. Os aplicativos podem ser acessados a partir do menu principal / Aplicativos.

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 ativa de maneira integrada e/ou independente por parte do aplicativo. Entende-se por ilha elétrica ativa, as ilhas que possuam no mínimo um gerador.

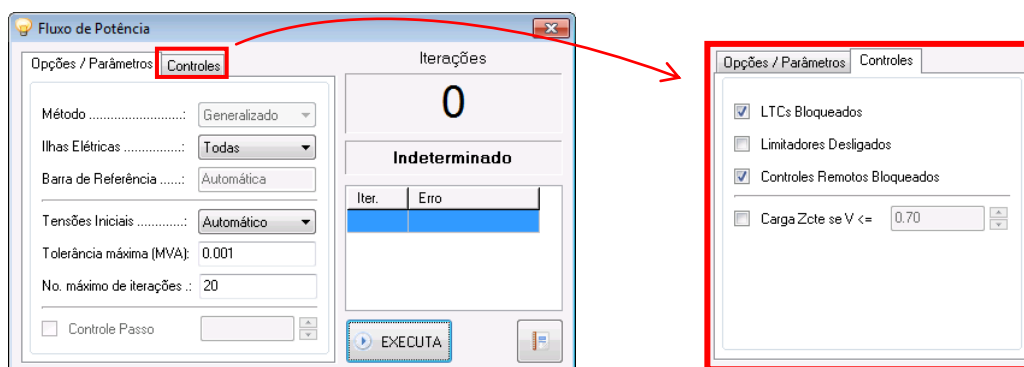
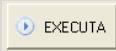


Figura 6.1 Aplicativo / Fluxo de Potência

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

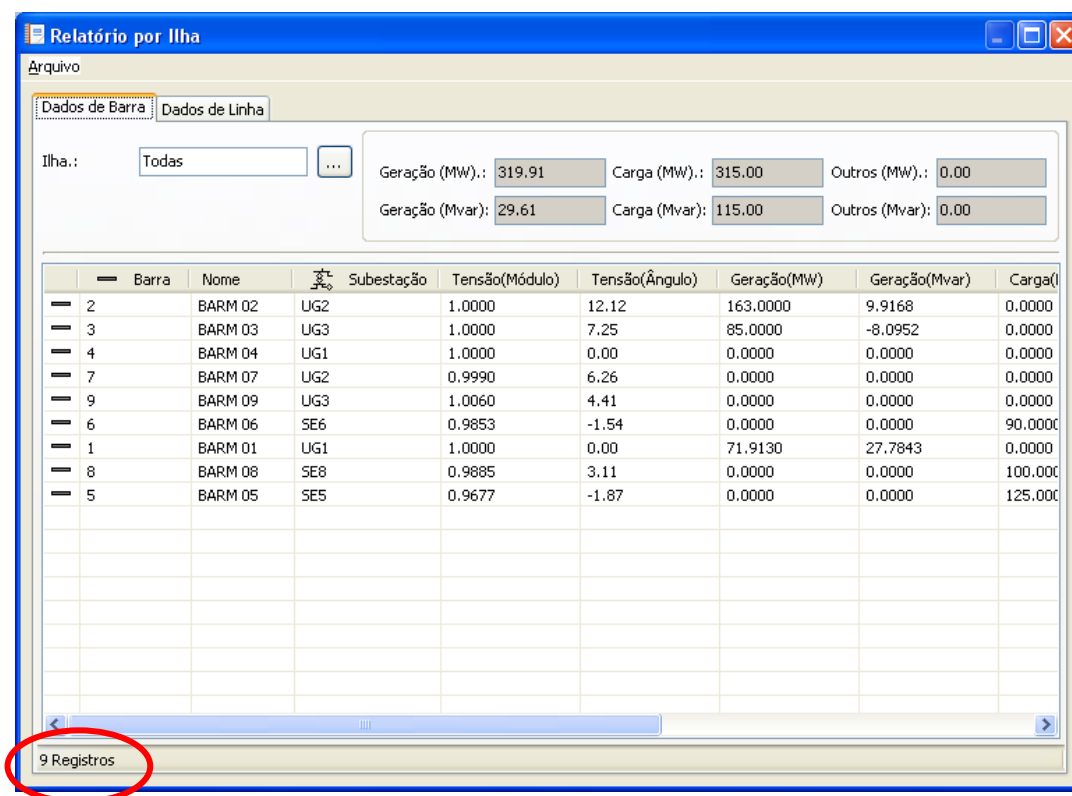
Os botões deste aplicativo possuem as seguintes funcionalidades:

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 numero de registros indicado no canto inferior esquerdo indica que para “Dados de Barra” este é o numero de barras, e para “Dados de Linha” é o numero de linhas (Figura 6.3).



Barra	Nome	Subestação	Tensão(Módulo)	Tensão(Ângulo)	Geração(MW)	Geração(Mvar)	Carga(l)
2	BARM 02	UG2	1.0000	12.12	163.0000	9.9168	0.0000
3	BARM 03	UG3	1.0000	7.25	85.0000	-8.0952	0.0000
4	BARM 04	UG1	1.0000	0.00	0.0000	0.0000	0.0000
7	BARM 07	UG2	0.9990	6.26	0.0000	0.0000	0.0000
9	BARM 09	UG3	1.0060	4.41	0.0000	0.0000	0.0000
6	BARM 06	SE6	0.9853	-1.54	0.0000	0.0000	90.0000
1	BARM 01	UG1	1.0000	0.00	71.9130	27.7843	0.0000
8	BARM 08	SE8	0.9885	3.11	0.0000	0.0000	100.0000
5	BARM 05	SE5	0.9677	-1.87	0.0000	0.0000	125.0000

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

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.

Fazendo dois cliques num dos eventos listados, o usuário acessa a uma janela para visualizar e/ou editar as informações básicas do mesmo. A janela mostrada é padrão para todos os eventos disponíveis. Na Figura 6.5 observa-se um exemplo da edição do evento aplicação de curto-circuito numa barra.

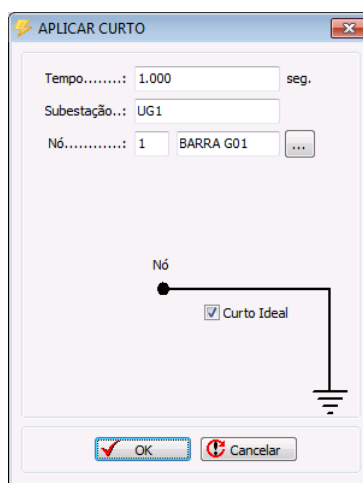


Figura 6.5 Sistema Elétrico / Controle de Eventos / Editando Evento

6.3 Simulação Completa

A partir do menu **Aplicativos** → **Simulação Completa** o usuário poderá ter acesso ao respectivo aplicativo. Na Figura 6.6 observa-se a tela correspondente ao aplicativo Simulação Completa. A Aba controles mostra alguns controles de fluxo de potência, assim como as tensões para

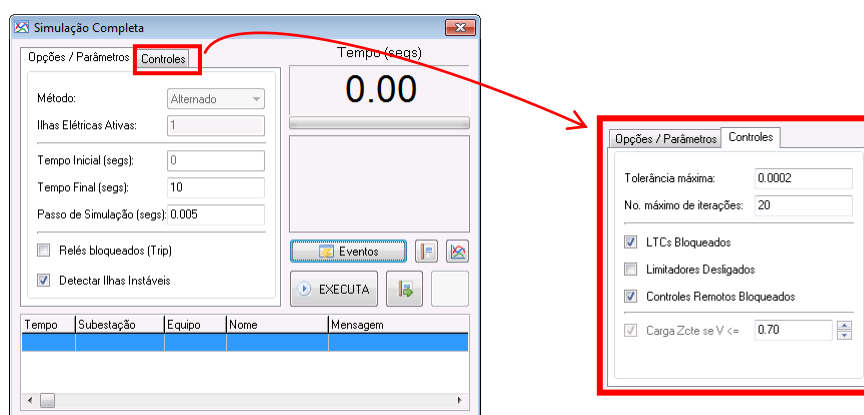
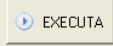
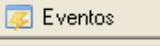


Figura 6.6 Aplicativo / Simulação Completa

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 medido de sinal PELE e Snominal)

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 6.7 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). 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 6.8. A tela mostrada na Figura 6.8 (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 6.8 (b) permite a eleição de uma curva que sirva como referência para a visualização das outras.

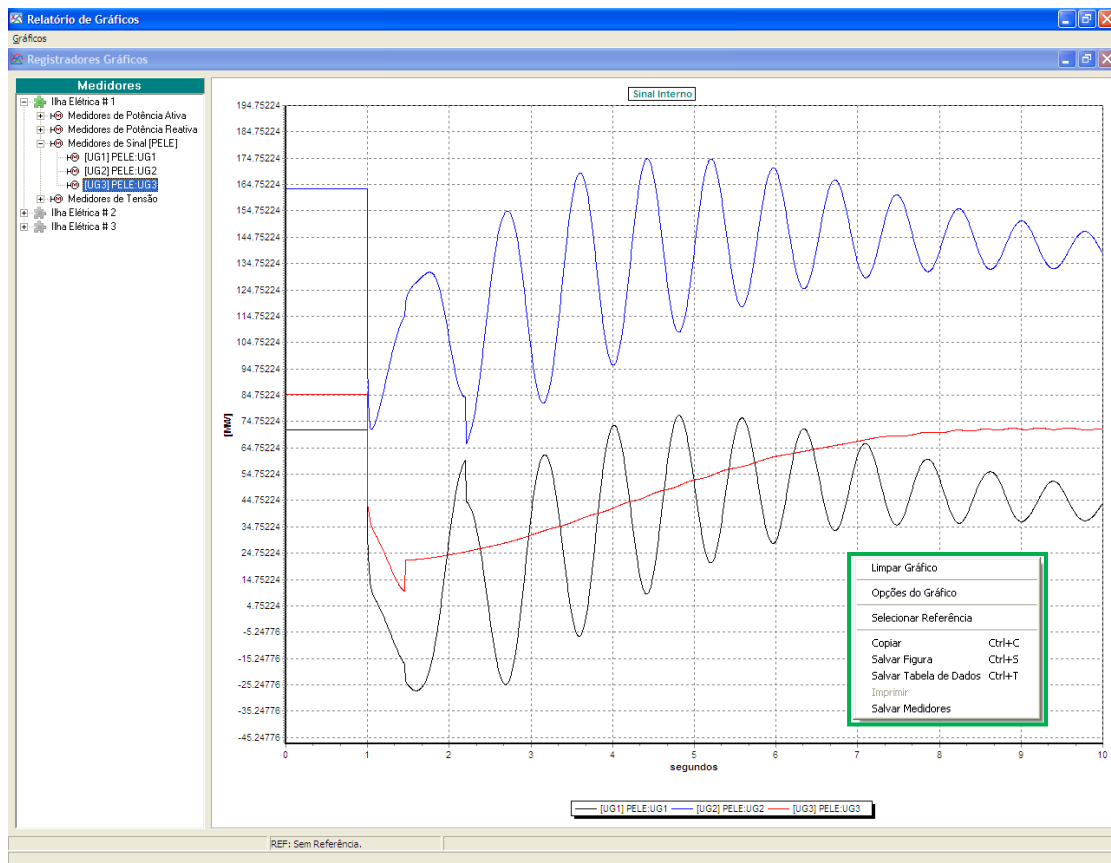
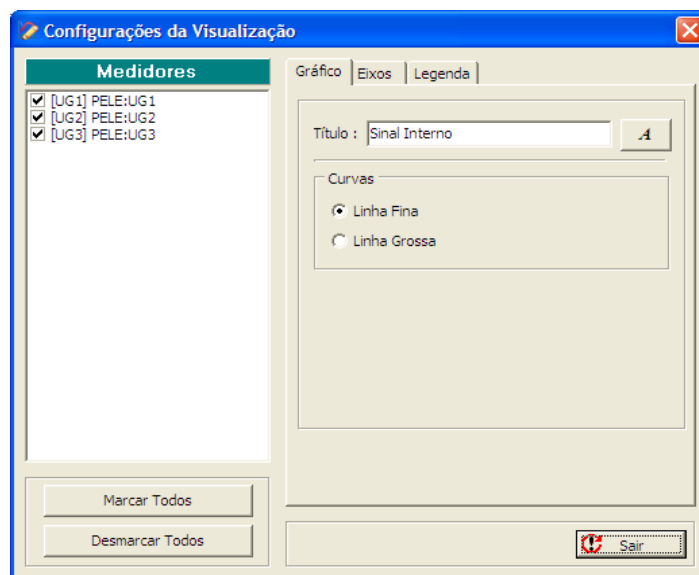
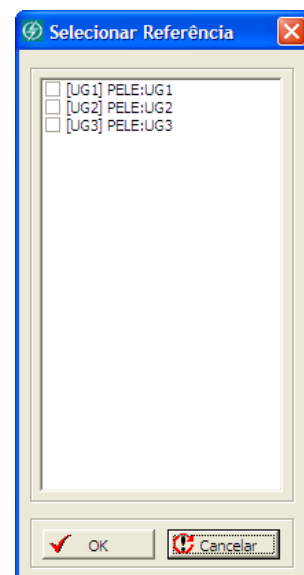


Figura 6.7 Aplicativo / Simulação Completa / Registradores Gráficos.



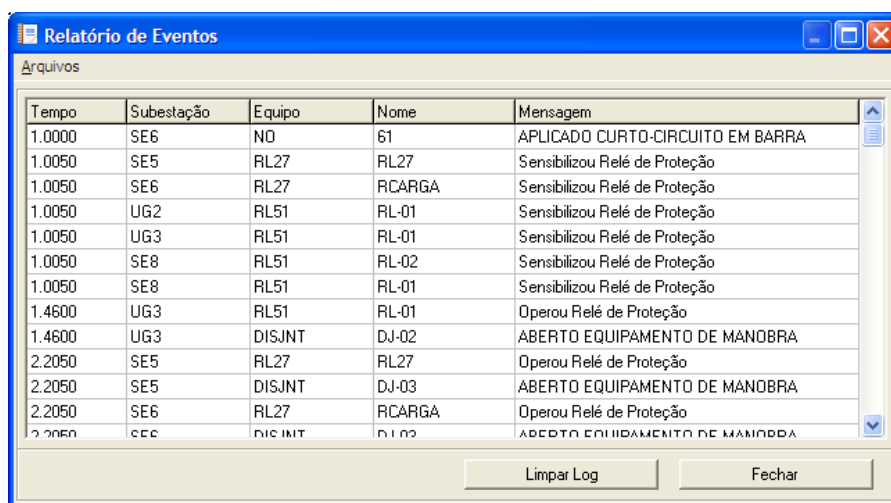
(a)



(b)

Figura 6.8 Aplicativo / Simulação Completa / Edição dos Registradores Gráficos.

Na Figura 6.9 observa-se a tela que exibe o LOG correspondente à Simulação Completa.



Tempo	Subestação	Equipamento	Nome	Mensagem
1.0000	SE6	N0	61	APLICADO CURTO-CIRCUITO EM BARRA
1.0050	SE5	RL27	RL27	Sensibilizou Relé de Proteção
1.0050	SE6	RL27	RCARGA	Sensibilizou Relé de Proteção
1.0050	UG2	RL51	RL-01	Sensibilizou Relé de Proteção
1.0050	UG3	RL51	RL-01	Sensibilizou Relé de Proteção
1.0050	SE8	RL51	RL-02	Sensibilizou Relé de Proteção
1.0050	SE8	RL51	RL-01	Sensibilizou Relé de Proteção
1.4600	UG3	RL51	RL-01	Operou Relé de Proteção
1.4600	UG3	DISJNT	DJ-02	ABERTO EQUIPAMENTO DE MANOBRA
2.2050	SE5	RL27	RL27	Operou Relé de Proteção
2.2050	SE5	DISJNT	DJ-03	ABERTO EQUIPAMENTO DE MANOBRA
2.2050	SE6	RL27	RCARGA	Operou Relé de Proteção
2.2050	SE6	DISJNT	DJ-02	ABERTO EQUIPAMENTO DE MANOBRA

Figura 6.9 Aplicativo/LOG da Simulação Completa

6.4 Relatórios

- O simulador possui vários relatórios que auxiliam ao usuário na análise do sistema de potência em estudo. Entre os relatórios disponíveis no aplicativo temos, tal como é mostrada na Figura 6.10.
- Estado da Rede;
- Ilhas Elétricas;
- Relatório de Eventos;
- Registradores Gráficos.

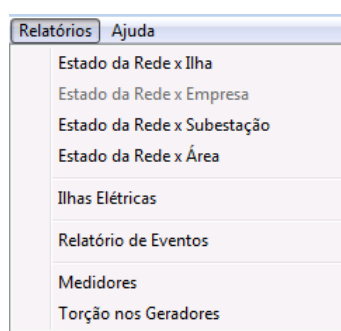


Figura 6.10 Aplicativo/Condição Carga / Geração

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 “Registadores Gráficos” mostra as curvas registradas nos medidores. Esta tela já foi apresentada e comentada anteriormente nas Figuras 6.7 e 6.8.

6.5 Ilhas Elétricas

Na Figura 6.11 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.

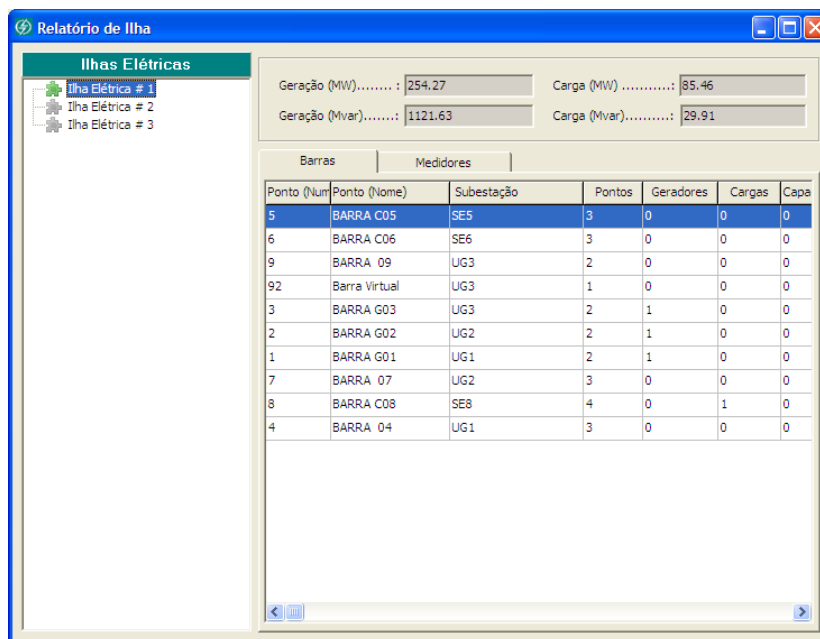


Figura 6.11 Relatório / Ilhas elétricas

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 nas Tabelas 7.1 e 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)
Tap	Tap 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	Tap
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 Tabelas 7.1 e 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), conforme mostrado na Figura 7.1.

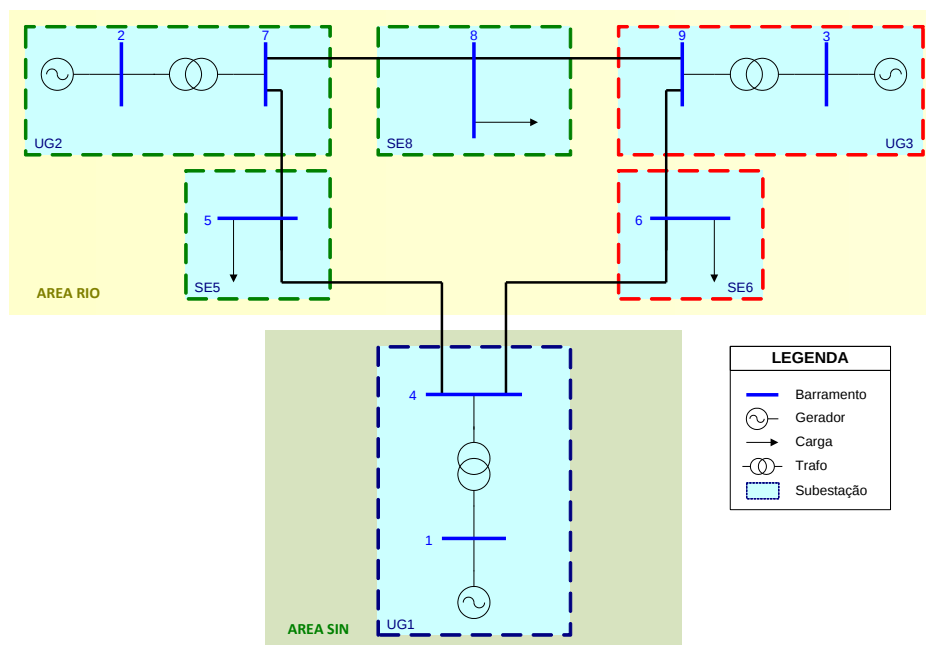


Figura 7.1 Topologia do Sistema 9 Barras.

7.1.2 Definindo uma topologia no Simulight

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

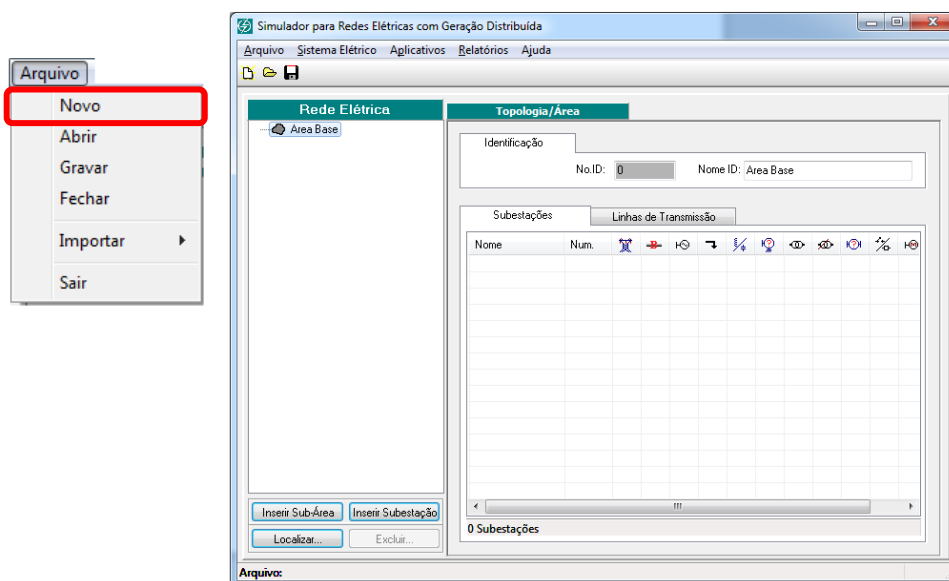


Figura 7.2 Arquivos / Novo Caso.

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 4.6)

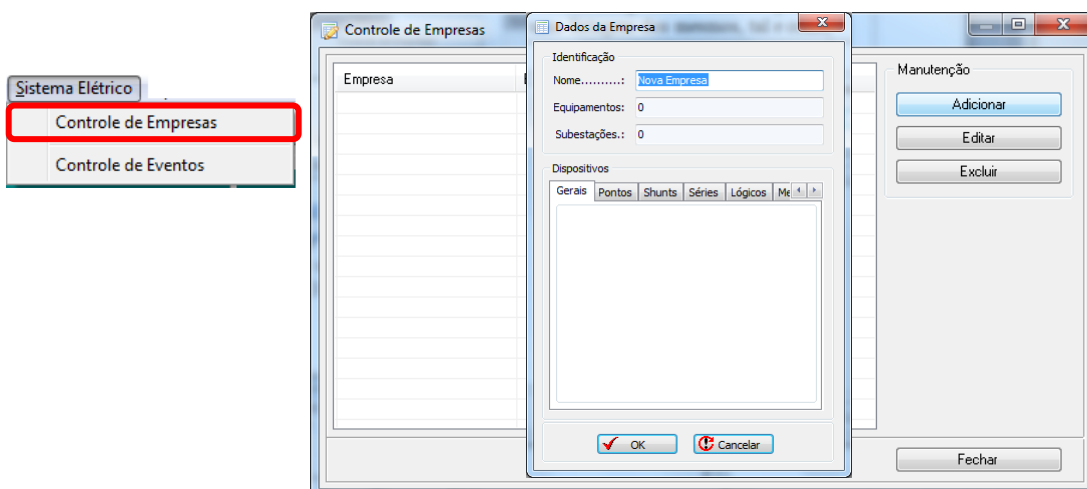


Figura 7.3 Sistema Elétrico / Controle de Empresas.

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.

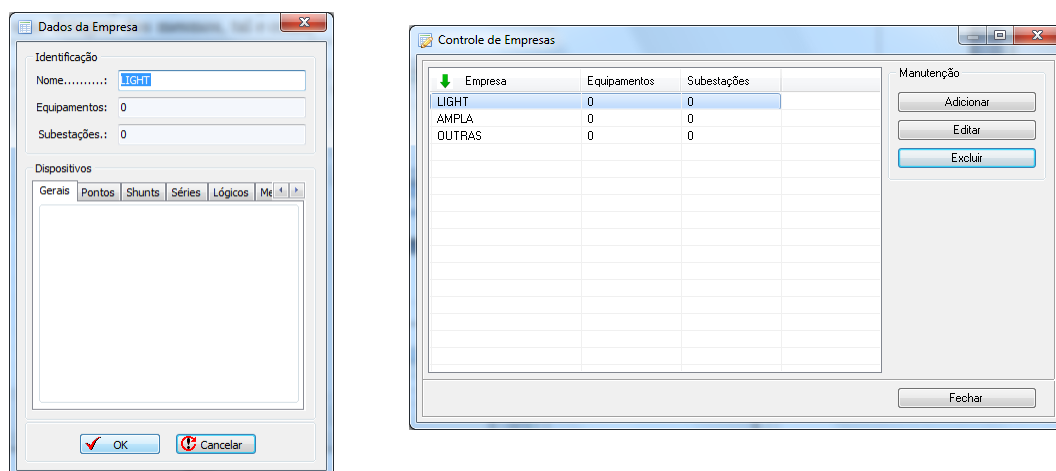


Figura 7.4 Controle de Empresas / Empresas adicionadas.

Inserção de Sub-Áreas

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

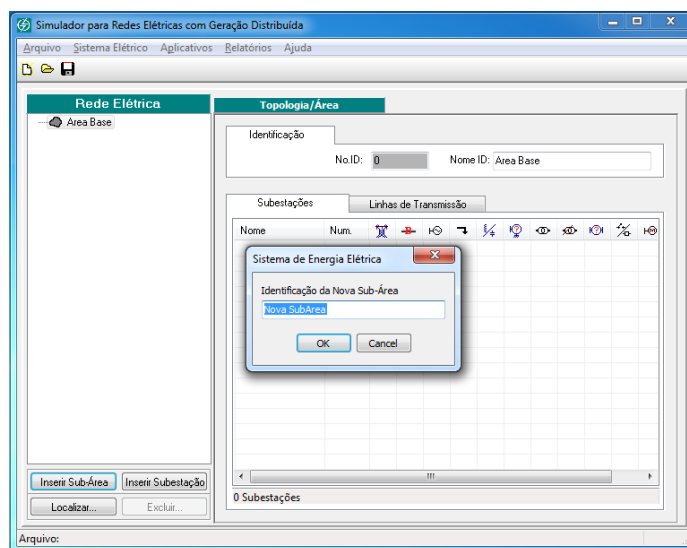


Figura 7.5 Sistema Elétrico / Adicionar Sub-Área.

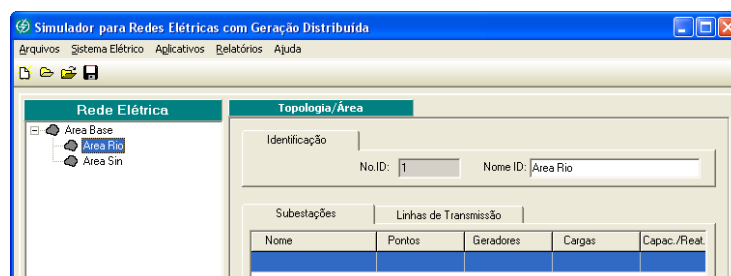


Figura 7.6 Sistema Elétrico / Sub-Áreas adicionadas.

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”, conforme 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).

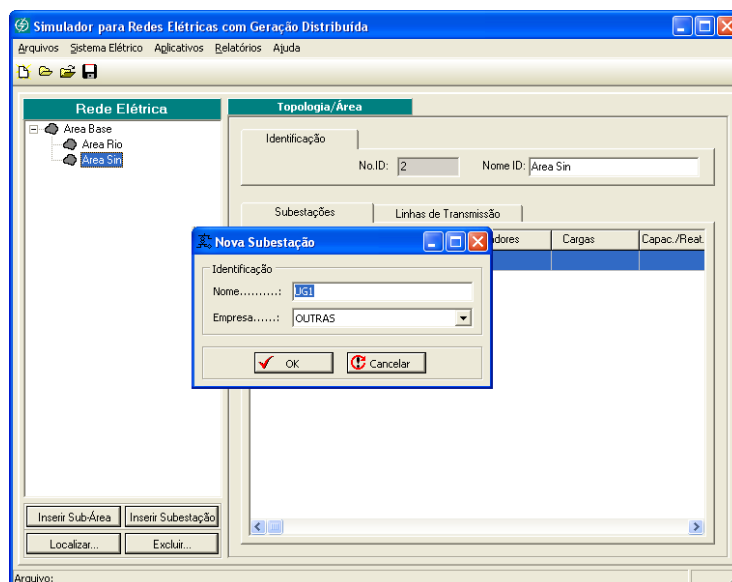


Figura 7.7 Sistema Elétrico / Adicionar Subestação.

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.

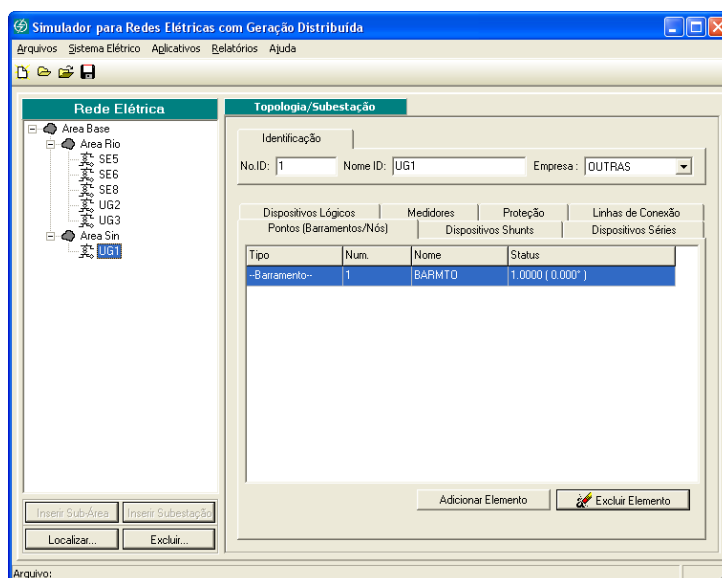


Figura 7.8 Sistema Elétrico / Subestações adicionadas.

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”, conforme mostrado na Figura 7.9.

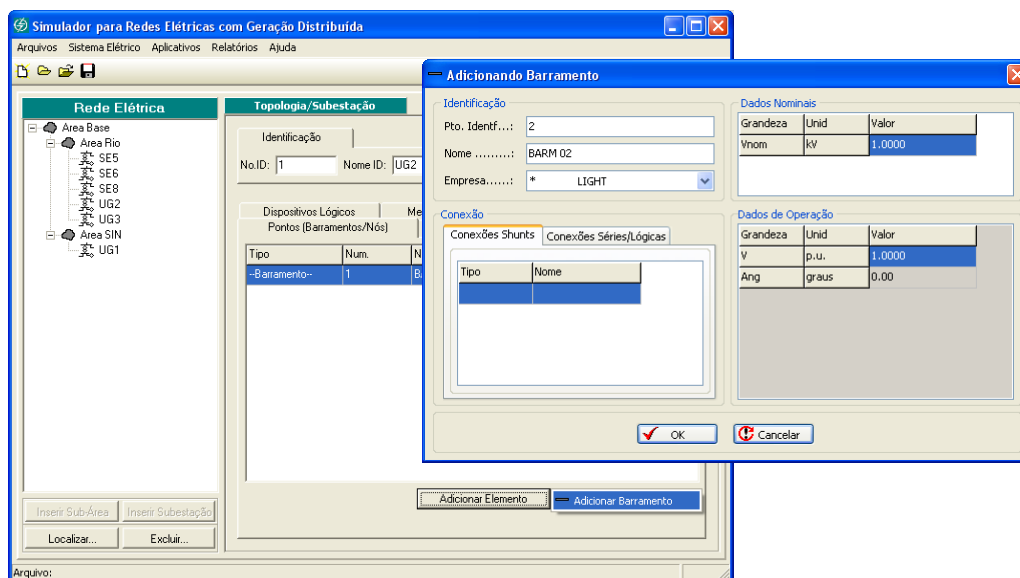


Figura 7.9 Sistema Elétrico / Adicionar Barramento.

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.

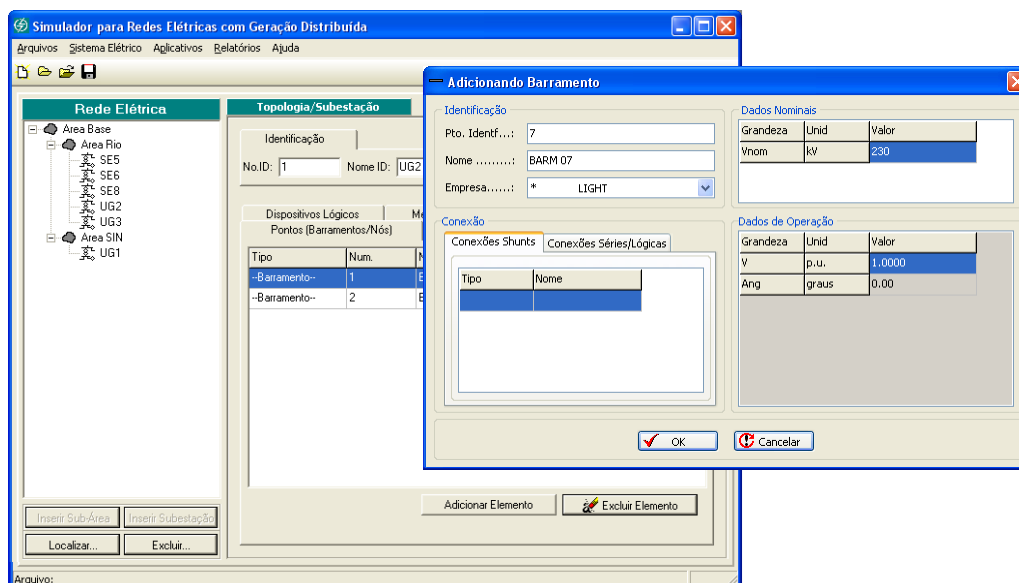


Figura 7.10 Sistema Elétrico / Editando Barramento.

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”, conforme mostrado na Figura 7.11. Clicando no botão “OK” na janela do gerador, o mesmo será inserido na subestação.

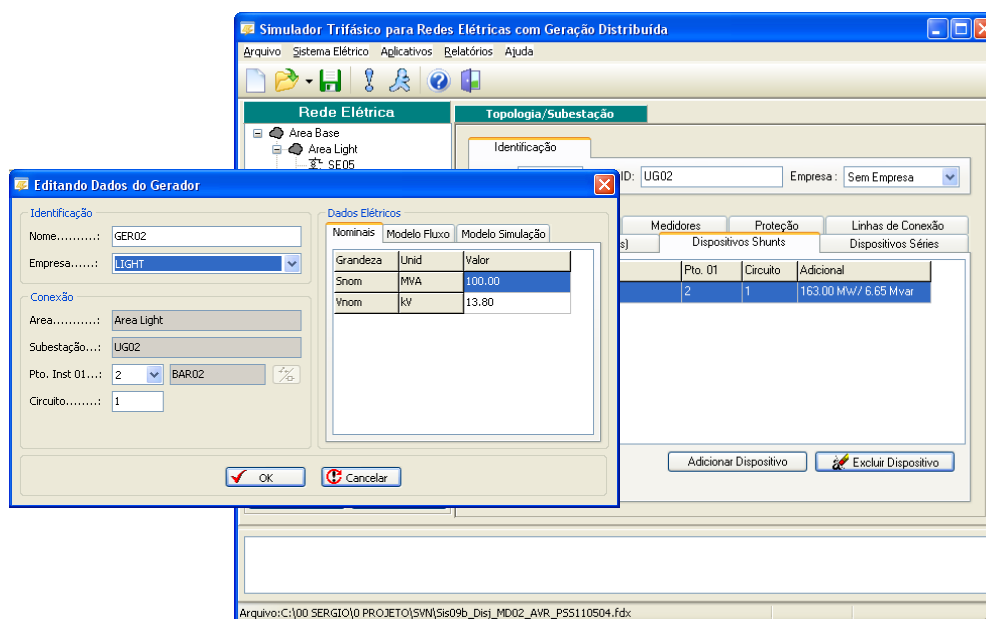


Figura 7.11 Sistema Elétrico / Adicionar Gerador.

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 1.

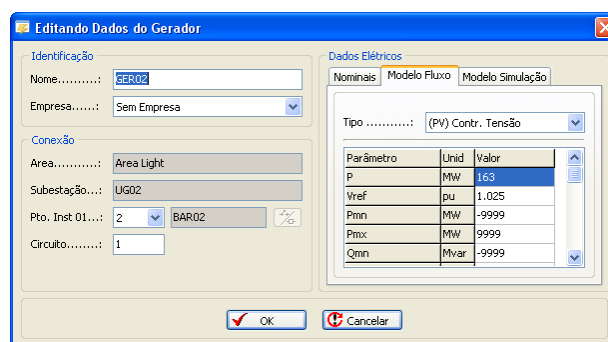


Figura 7.12 Sistema Elétrico / Editando Gerador.

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 **Arquivos** → **Salvar Caso** o usuário poderá salvar o caso de estudo, conforme mostrado na Figura 7.13.

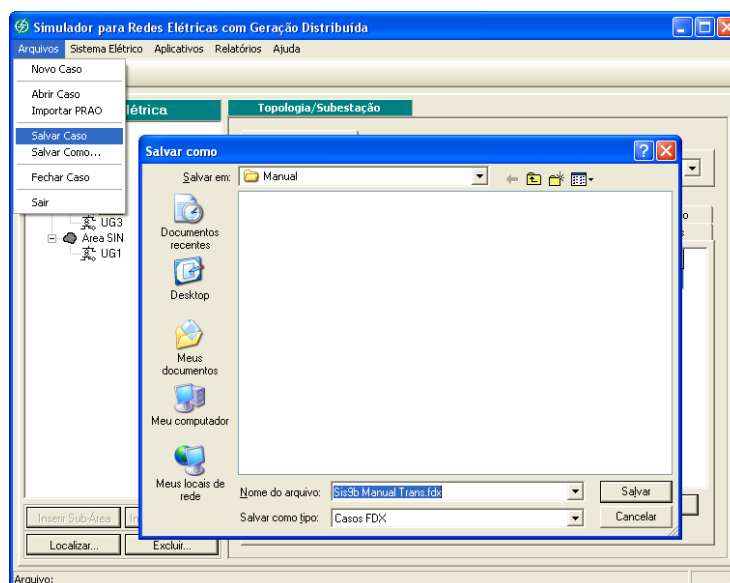


Figura 7.13 Arquivos / Salvar uma Topologia.

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.

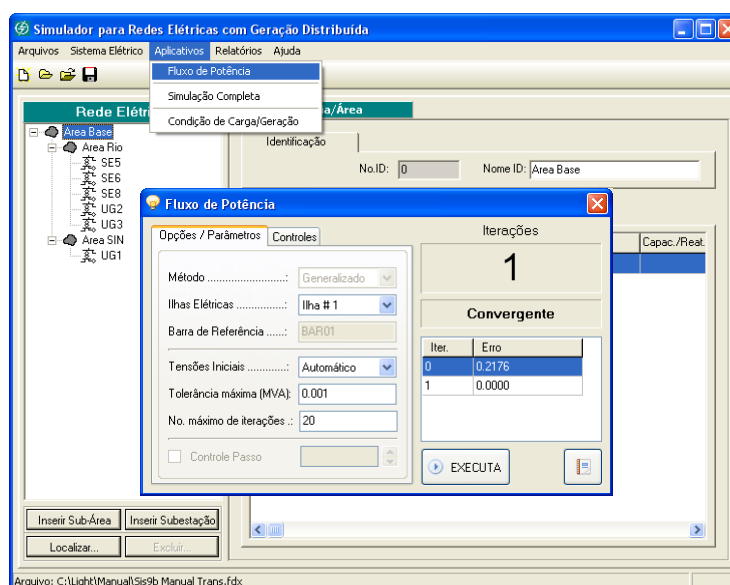


Figura 7.14 Aplicativos / Fluxo de Potência.

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.

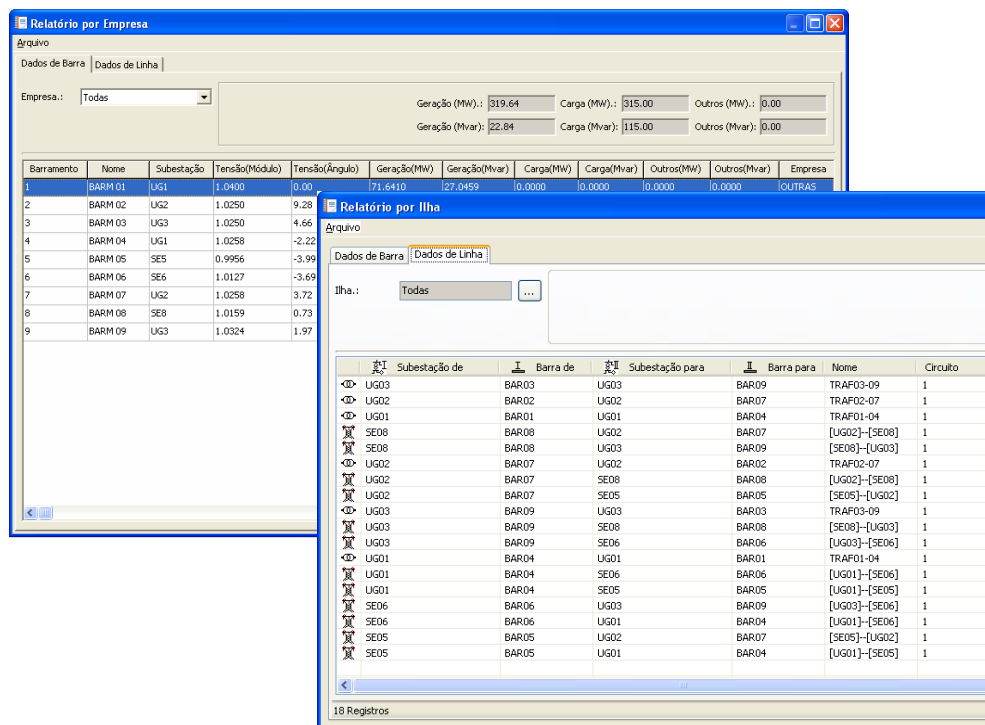


Figura 7.15 Aplicativos / Fluxo de Potência / Relatório por Empresa.

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.

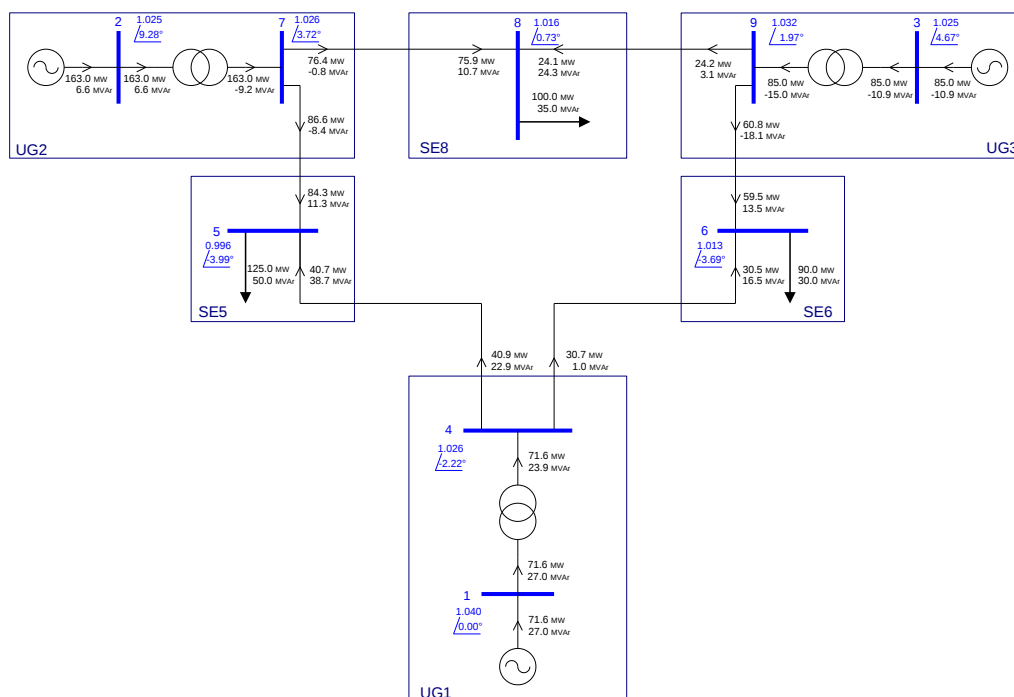


Figura 7.16 Aplicativos / Fluxo de Potência / Estado da Rede.

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. [1]

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 blocadas. 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 1.3. 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.

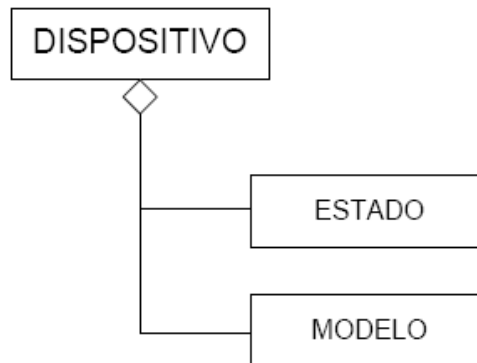


Figura 8.1 Composição da classe DISPOSITIVO

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 (1.1), (1.2) e (1.3) 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 (1.4) define a matriz jacobiana do sistema, apresentada em estrutura particionada. Nestas equações, as variáveis tem o significado descrito na Tabela 1.1.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{V} \\ \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{J} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \hline \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{V} \\ \hline \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x} & \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{V} \end{array} \right] \quad (1.4)$$

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 utilizadas no cálculo das injeções nodais do dispositivo. Os somatórios das injeções nodais dos dispositivos conectados em todas as barras do sistema formam implicitamente o conjunto g de equações algébricas da rede elétrica.

Tabela 1.1: Equações e variáveis da descrição funcional

Símbolo	Significado
$\mathbf{V}$	representa o vetor de tensões nodais, associadas às barras do SEE, e cujos componentes são variáveis algébricas.
$\mathbf{x}$	representa um vetor de variáveis diferenciais (que podem possuir componente não nulo de derivada em $\dot{\mathbf{x}}$) ou algébricas (cujo respectivo componente em $\dot{\mathbf{x}}$ 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.
J_1	representa a submatriz jacobiana dos dispositivos dinâmicos ou que possuem estados internos em seus modelos.
J_4	representa a submatriz jacobiana da rede elétrica.
J_2 e J_3	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 (1.1) 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.

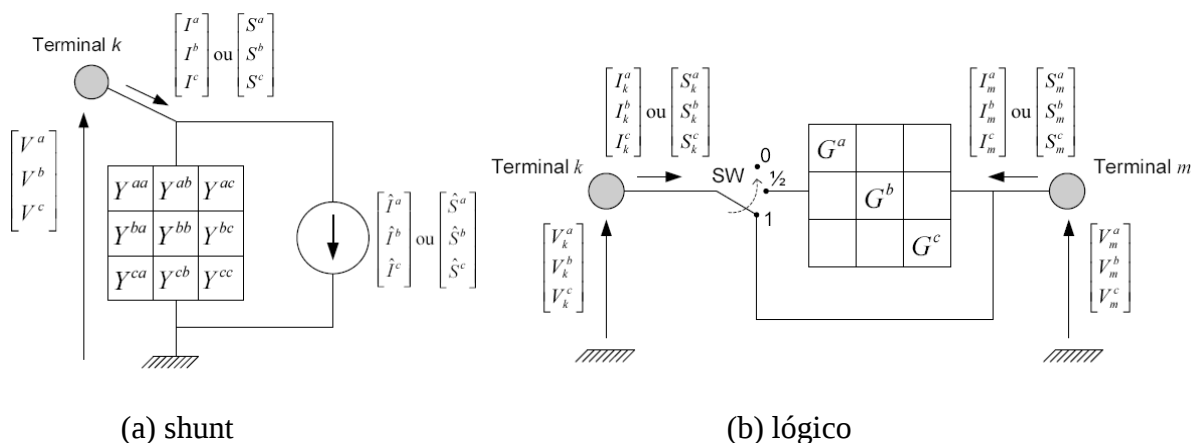
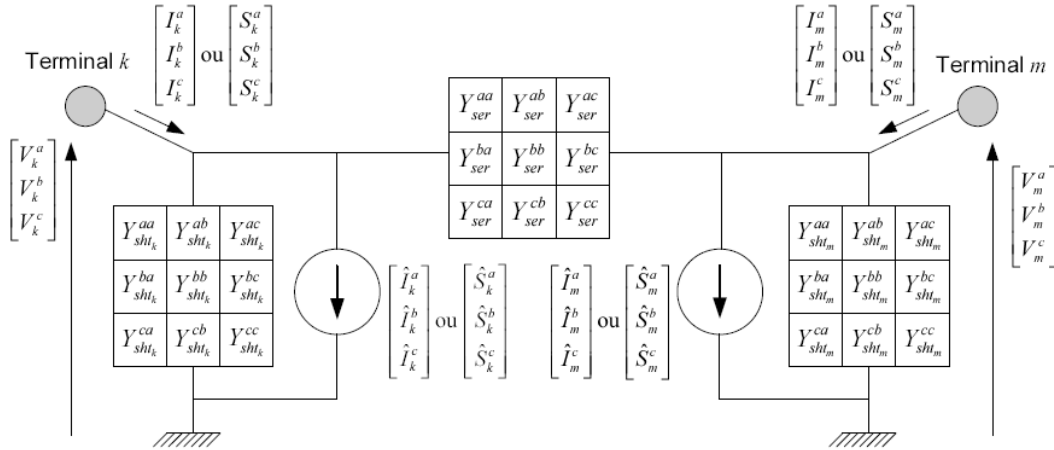


Figura 8.2 Estado do dispositivo trifásico SHUNT e LÓGICO**Figura 8.3** Estado do dispositivo trifásico SÉRIE**Estado Shunt**

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 (1.5) e (1.6), na forma complexa, são utilizadas pelo estado shunt no cálculo das injeções nodais de corrente ou potência, respectivamente:

$$I^s = \hat{I}^s + \sum_{t \in \alpha_p} Y^{st} V^t \quad (1.5)$$

$$S^s = \hat{S}^s + V^s \left(\sum_{t \in \alpha_p} Y^{st} V^t \right)^* \quad (1.6)$$

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_{shk}^{abc} , Y_{shm}^{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, $[Y_{ser}^{abc}]^T$.

As equações (1.7) e (1.8) são utilizadas pelo estado série no cálculo das injeções nodais de corrente ou potência no terminal k, respectivamente:

$$I_k^s = \hat{I}_k^s + \sum_{t \in \alpha_P} [(Y_{shk}^{st} + Y_{ser}^{st}) V_k^t - Y_{ser}^{st} V_m^t] \quad (1.7)$$

$$S_k^s = \hat{S}_k^s + V_k^s \left(\sum_{t \in \alpha_P} [(Y_{shk}^{st} + Y_{ser}^{st}) V_k^t - Y_{ser}^{st} V_m^t] \right)^* \quad (1.8)$$

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}^{st} .

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 (1.9) e (1.10) são utilizadas pelo estado lógico no cálculo das injeções nodais de corrente ou potência no terminal k , respectivamente:

$$I_k^s = G^s (V_k^s - V_m^s) \quad (1.9)$$

$$S_k^s = V_k^s [G^s (V_k^s - V_m^s)]^* \quad (1.10)$$

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.

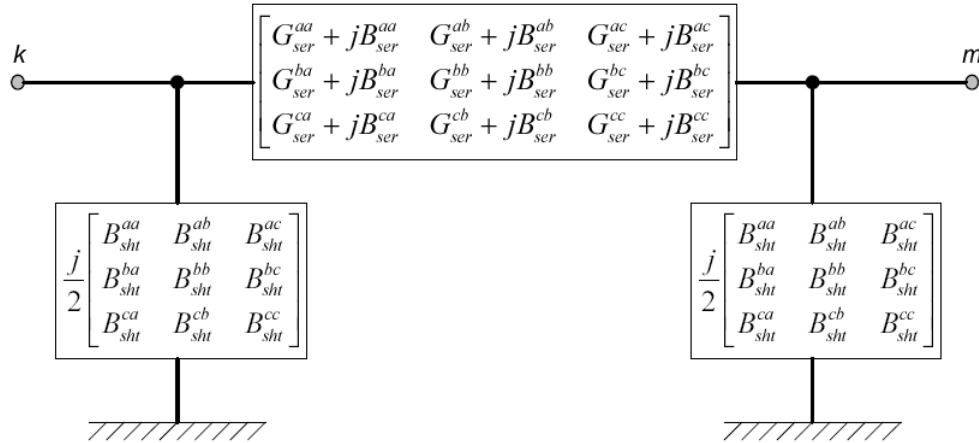


Figura 8.4 Modelo de linha de transmissão

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 ([2] a [7]). 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.

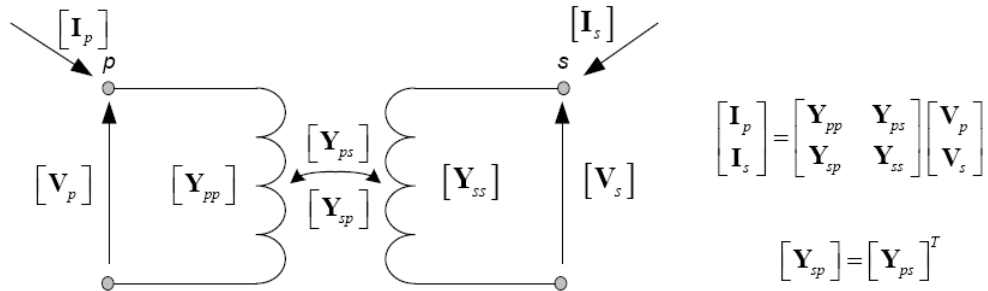


Figura 8.5 Representação de Transformador

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 1 de acordo com o seu tipo de conexão. As submatrizes Y_I , Y_{II} e Y_{III} são definidas por:

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_t & & \\ & y_t & \\ & & y_t \end{bmatrix} \quad Y_{II} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix} \quad Y_{III} = \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \\ & -y_t & y_t \\ y_t & & -y_t \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

Tabela 2: Submatrizes para transformadores trifásicos

conexão do transformador		admitância própria		admitância mútua
barra p	barra s	$\mathbf{Y}_{pp}$	$\mathbf{Y}_{ss}$	$\mathbf{Y}_{ps}, \mathbf{Y}_{sp}$
$\mathbf{Y}_{aterrado}$	$\mathbf{Y}_{aterrado}$	$\mathbf{Y}_I$	$\mathbf{Y}_I$	$-\mathbf{Y}_I$
$\mathbf{Y}_{aterrado}$	$\mathbf{Y}$	$\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$	$\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$	$-\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$
$\mathbf{Y}_{aterrado}$	Δ	$\mathbf{Y}_I$	$\mathbf{Y}_{II}$	$\mathbf{Y}_{III}$
$\mathbf{Y}$	$\mathbf{Y}$	$\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$	$\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$	$-\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$
$\mathbf{Y}$	Δ	$\frac{1}{3}\mathbf{Y}_{II}$	$\mathbf{Y}_{II}$	$\mathbf{Y}_{III}$
Δ	Δ	$\mathbf{Y}_{II}$	$\mathbf{Y}_{II}$	$-\mathbf{Y}_{II}$

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 ($\mathbf{Y}-\Delta$ ou $\Delta-\mathbf{Y}$), o elemento série deve empregar marcação de polaridade: no acesso pelo terminal primário é tomada a matriz $-\mathbf{Y}_{ps}$, enquanto que no acesso pelo terminal secundário é tomada a matriz $-\mathbf{Y}_{ps}^T$ ($= -\mathbf{Y}_{sp}$).

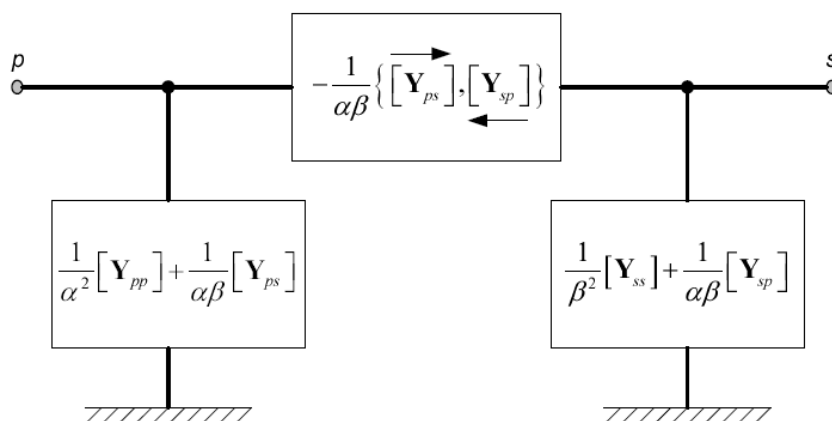


Figura 8.6 Representação π -equivalente do Transformador de dois enrolamentos.

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:

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

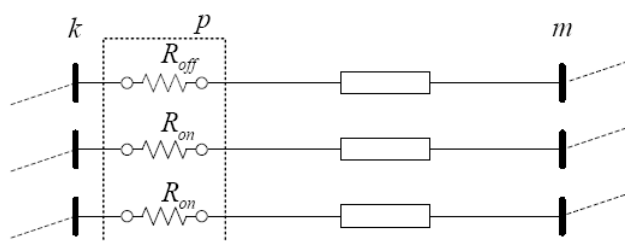


Figura 8.7 Representação de chave trifásica em estado não ideal

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 curto-circuitos é mostrado na Figura 8.8

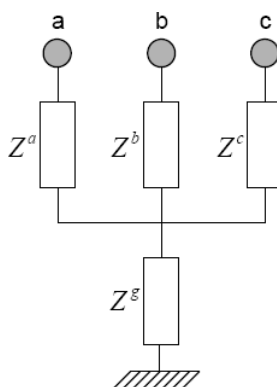


Figura 8.8 Modelo geral de defeito shunt

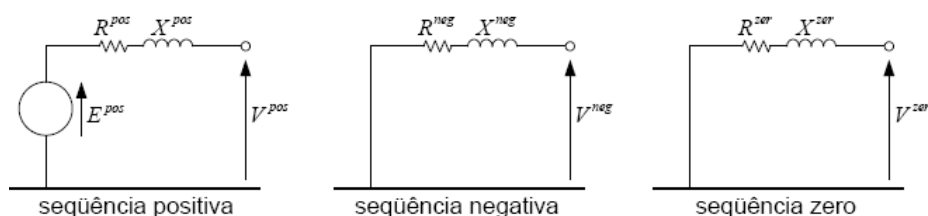
Defeitos Série

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.

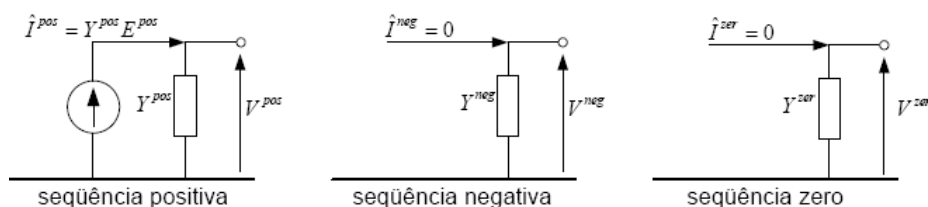
Máquina Síncrona

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.

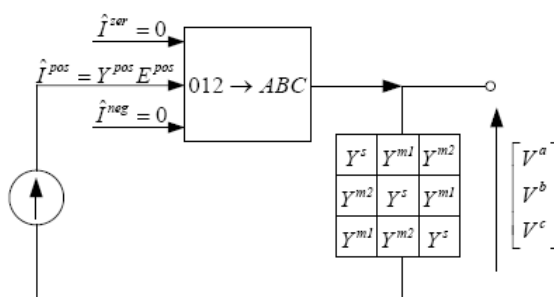
A utilização direta do modelo Thévenin requer a criação de novas barras internas aos geradores, sendo frequentemente utilizado na literatura, convertido para componentes de fase [2, 8, 9]. Para evitar a criação destas barras, um modelo Norton equivalente pode ser construído, em componentes simétricos ou em componentes de fase, conforme Figuras 8.9(b) e 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:

$$\mathbf{Z}^{012} = \begin{bmatrix} R^{zer} + jX^{zer} & & \\ & R^{pos} + jX^{pos} & \\ & & R^{neg} + jX^{neg} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{Y}^{012} = [\mathbf{Z}^{012}]^{-1} = \begin{bmatrix} G^{zer} + jB^{zer} & & \\ & G^{pos} + jB^{pos} & \\ & & G^{neg} + jB^{neg} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{Y}^{abc} = [\mathbf{T}^S] [\mathbf{Y}^{012}] [\mathbf{T}^S]^{-1} = \begin{bmatrix} Y^s & Y^{m1} & Y^{m2} \\ Y^{m2} & Y^s & Y^{m1} \\ Y^{m1} & Y^{m2} & Y^s \end{bmatrix} \quad (24)$$

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 [10].

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:

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

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

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.

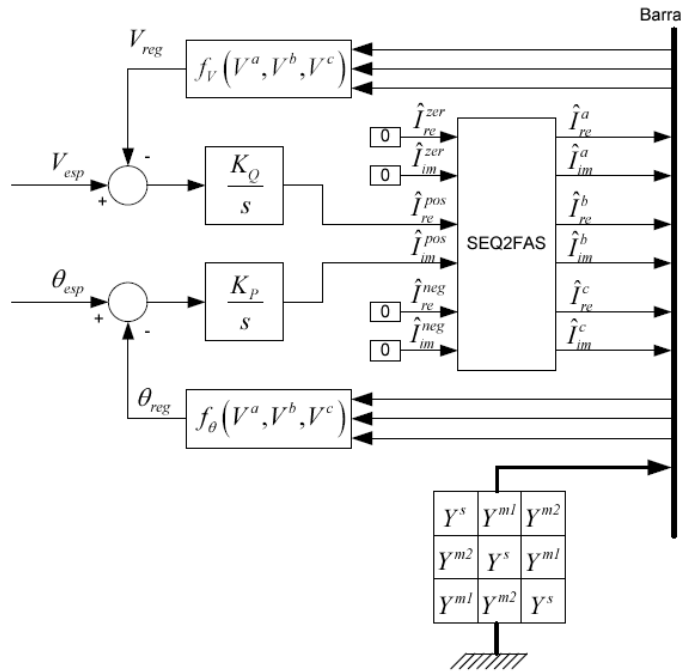


Figura 8.10 Modelo em regime permanente para o gerador V- θ trifásico.

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:

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

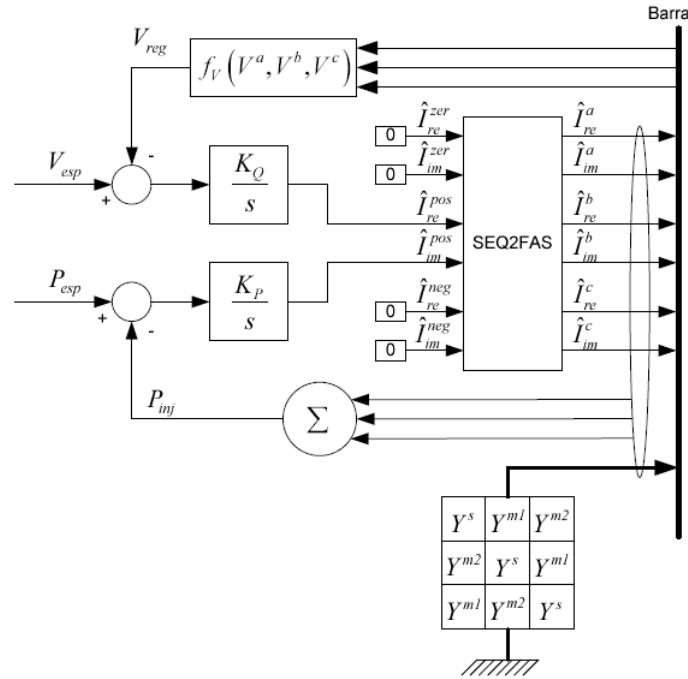


Figura 8.11 Modelo em regime permanente para o gerador P-V trifásico.

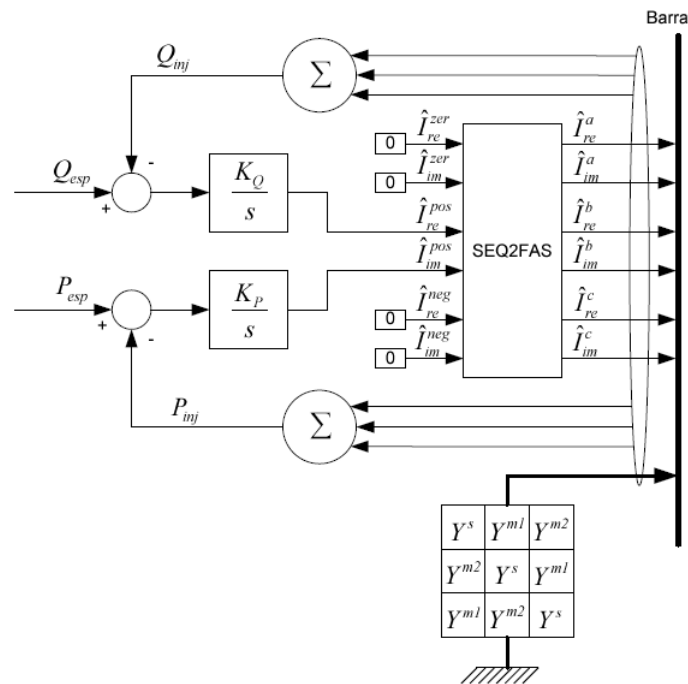


Figura 8.12 Modelo em regime permanente para o gerador P-Q trifásico.

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:

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

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 $\hat{I}_{im}^{pos}$ partes real e imaginária injeção de corrente de sequência positiva

POL2RET bloco de transformação de coordenadas polares para retangulares

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 $|R_r(1-s)=s|_{s=2} = -R_r/2$. Portanto, metade das perdas no rotor é fornecida pelo estator, e a outra metade é drenada do rotor, na forma de torque de frenagem.

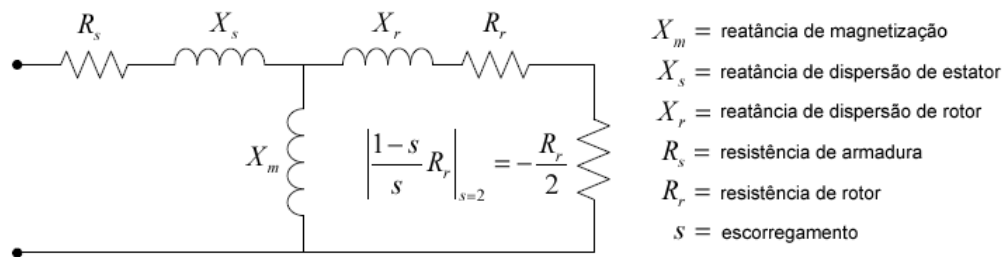


Figura 8.13 Circuito equivalente do motor de indução.

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 de sequência positiva, proveniente do modelo de Park aplicado à sequência positiva é dado por ($\omega=1.0$ pu)

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

$$R^{neg} = R_r/2 + R_a$$

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.

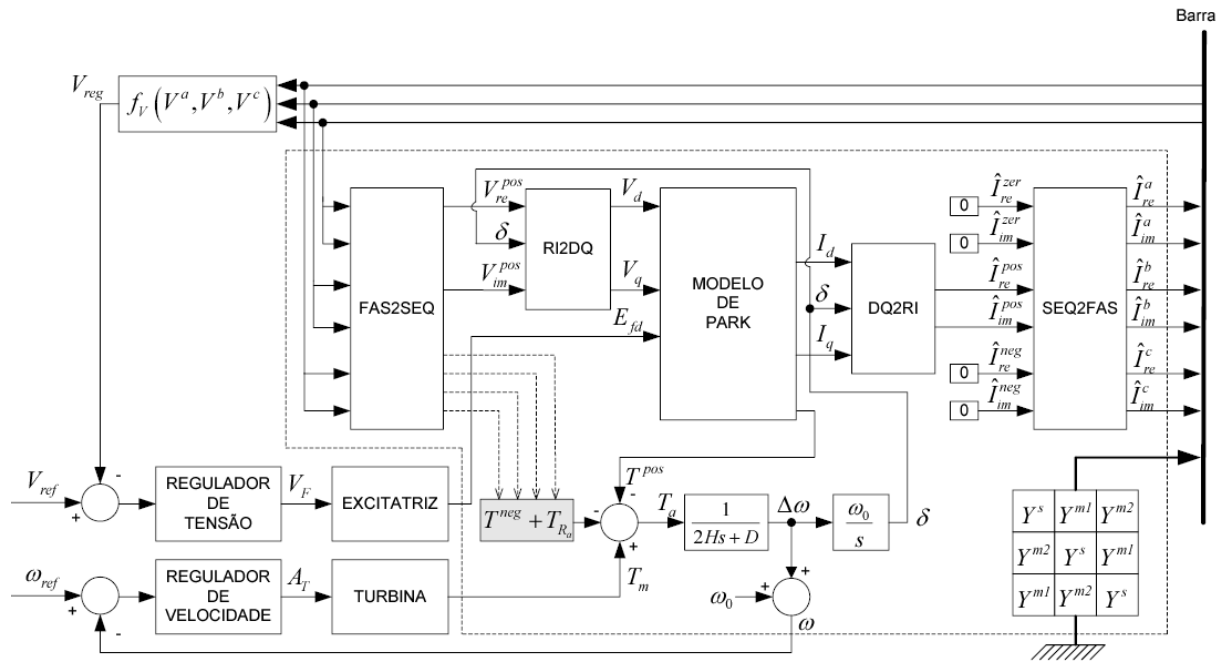


Figura 8.14 Modelo Dinâmico para a Máquina Síncrona trifásica.

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 desbalanceamento 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):

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

De $R^{neg}=R_r/2+R_a$ 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:

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

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.

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

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 ambigüidade com a variável s dos integradores. Como mencionado, o mesmo modelo é aplicado no cálculo do fluxo de potência.

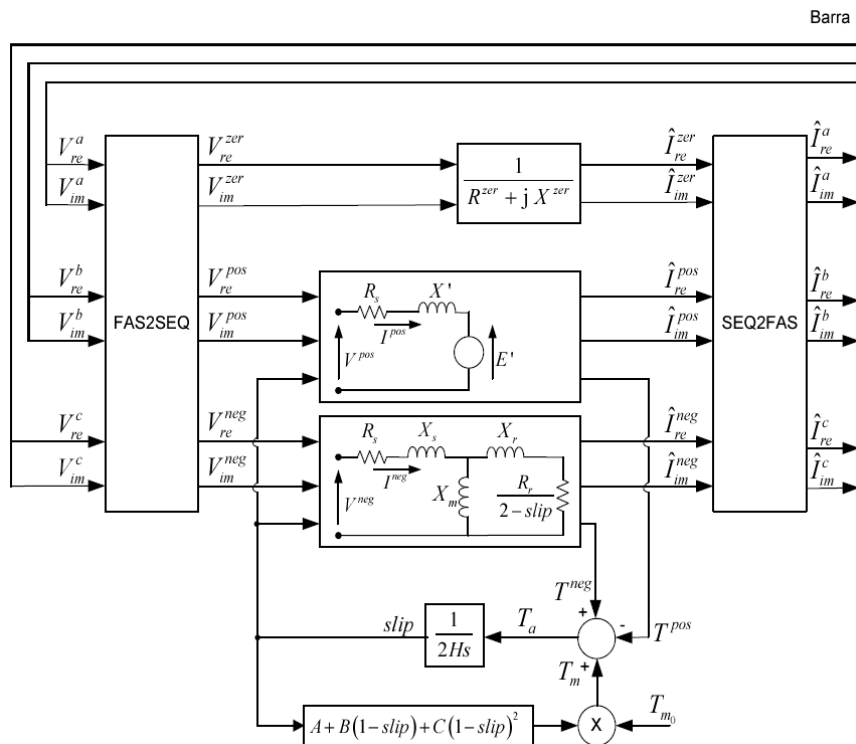


Figura 8.15 Modelo Dinâmico para a Máquina de Indução trifásica.

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.

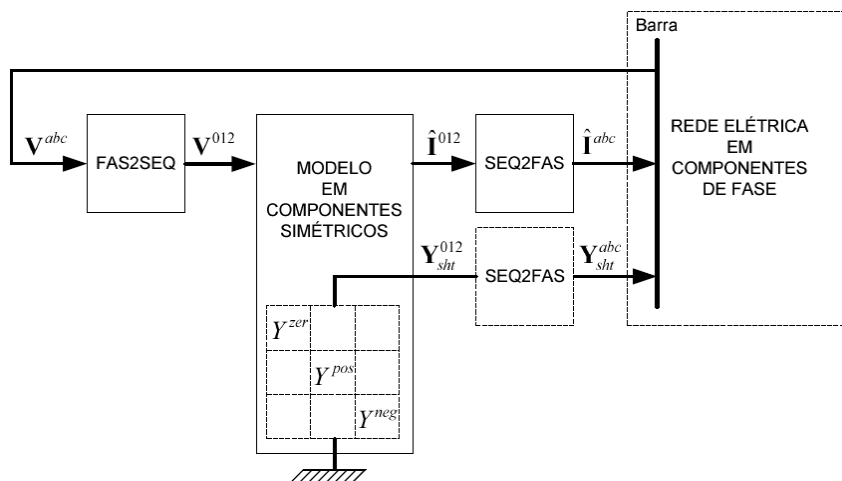


Figura 8.16 Forma geral para representação de dispositivo shunt.

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.

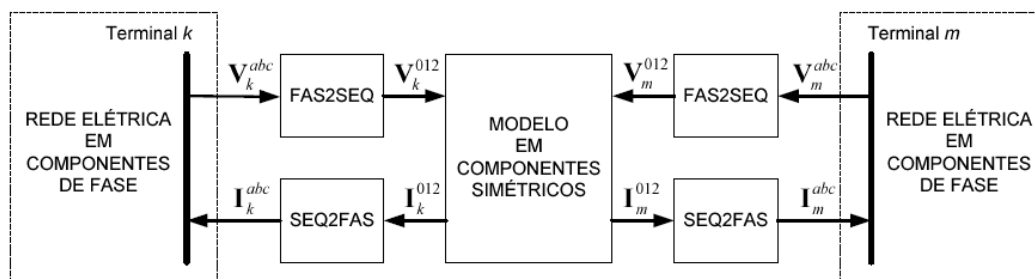


Figura 8.17 Forma geral para representação de dispositivo shunt.

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). Este 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.

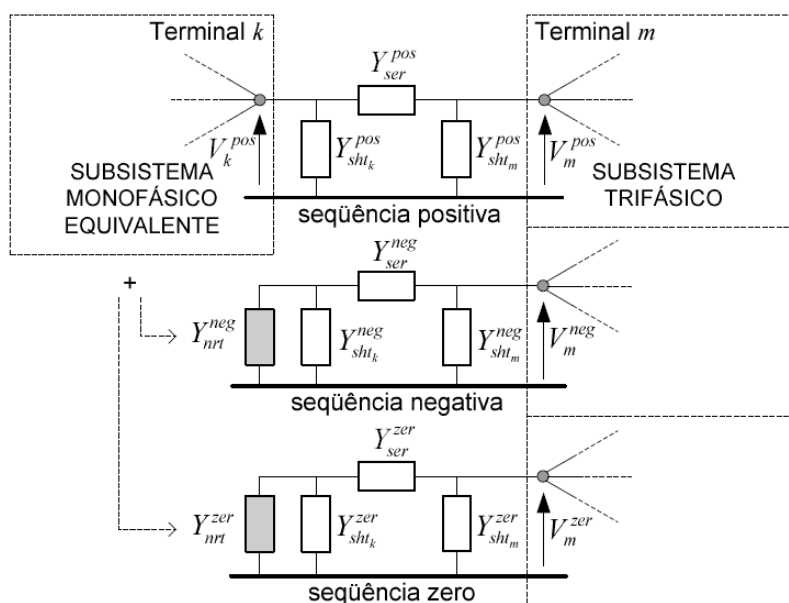


Figura 8.18 Forma geral para representação de dispositivo shunt.

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.

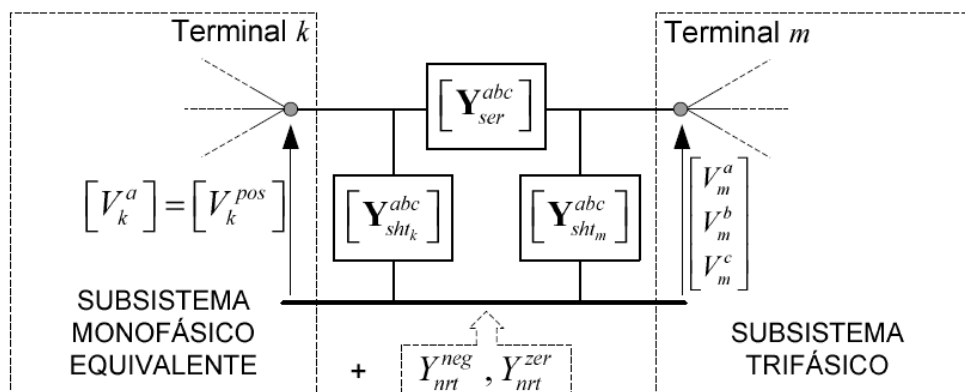


Figura 8.19 Interface de rede em componentes de fase.

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.

8.3 Interface gráfica no Simulight 3φ

Aqui veremos as novas telas referente ao Simulight 3φ.

Inserção de Dispositivos numa Subestação

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”, conforme mostrado na Figura 8.20. Nesta figura se observa as tensões de fase em modulo e ângulo (defasagem de ângulo 120°).

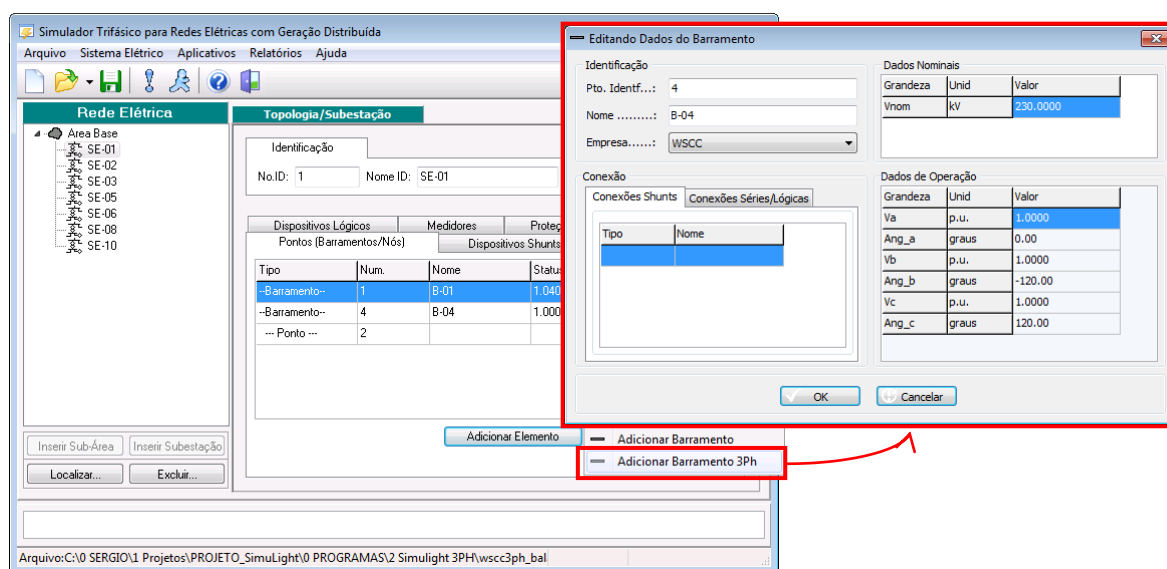


Figura 8.20 Sistema Elétrico / Adicionar Barramento.

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”, conforme mostrado na Figura 8.21. 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 máquinas vemos que aparece “3ph” já que são modelos de máquinas trifásicas.

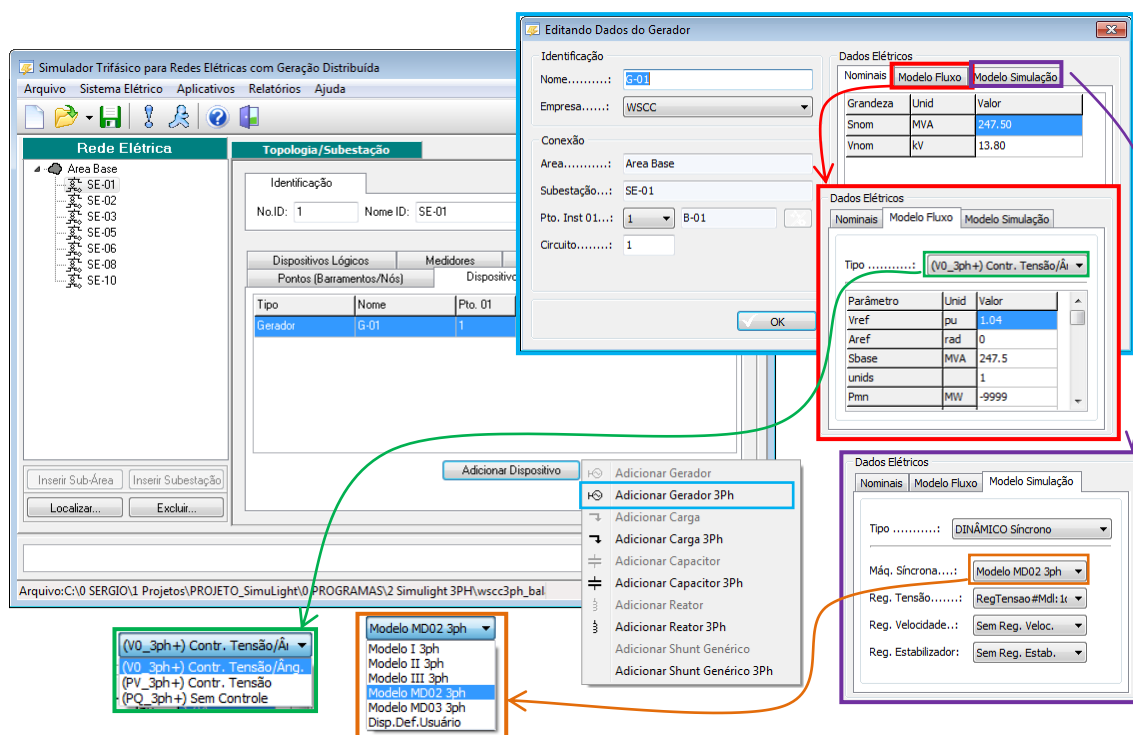


Figura 8.21 Sistema Elétrico / Adicionar Gerador.

A criação dos demais elementos (um transformador e duas linhas de transmissão) é apresentada da Figura 8.22 à Figura 8.24.

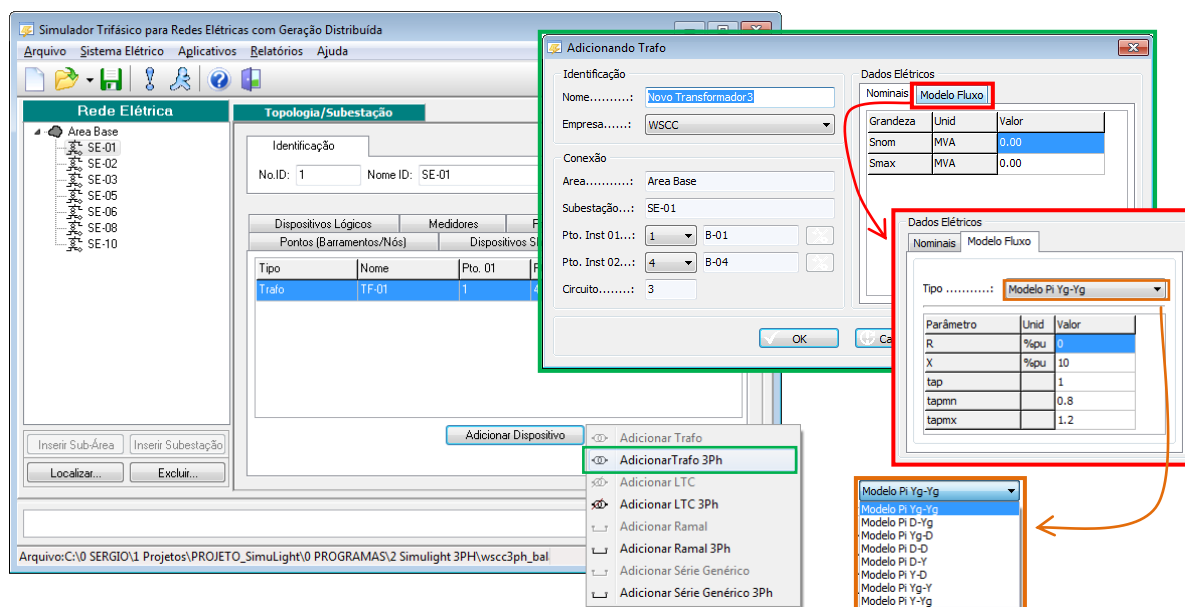


Figura 8.22 Sistema Elétrico / Adicionar Transformador.

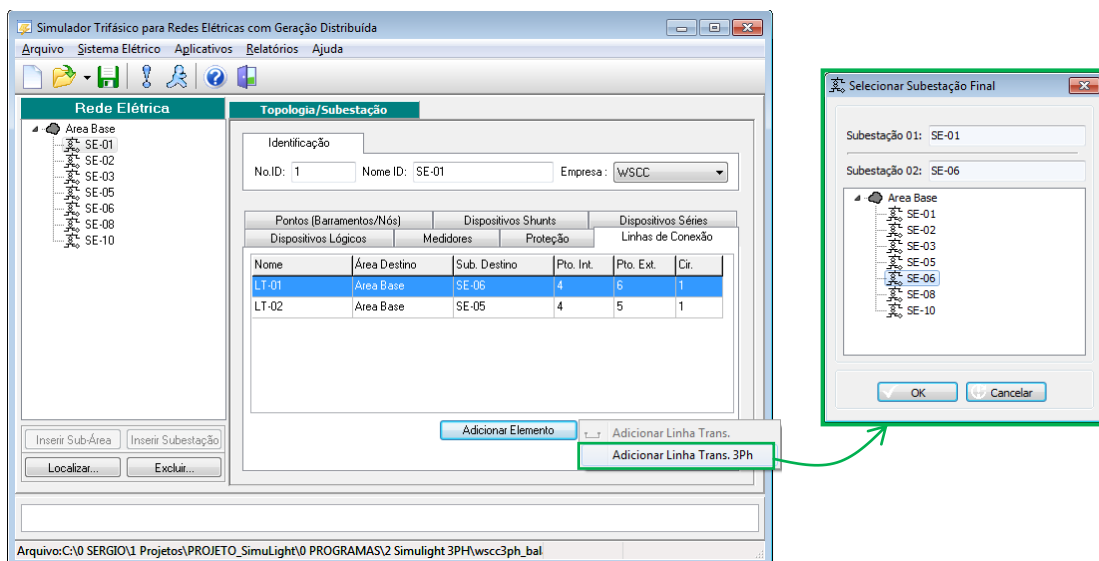


Figura 8.23 Sistema Elétrico / Adicionar Linha de Conexão.

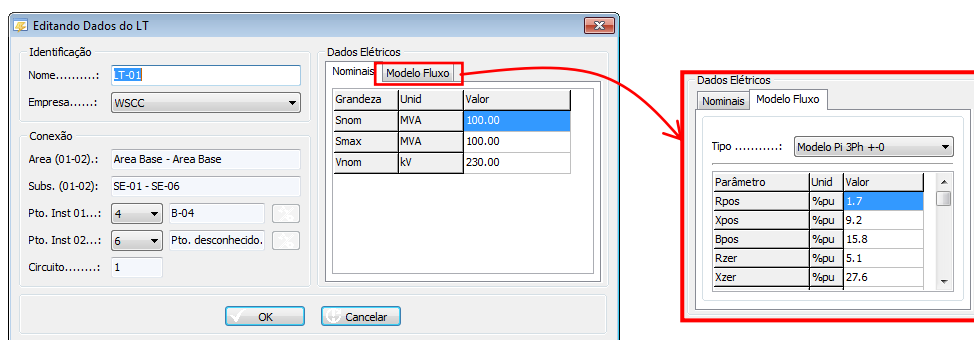


Figura 8.24 Sistema Elétrico / Adicionar Transformador.

Inserção de Medidores

Tensão:

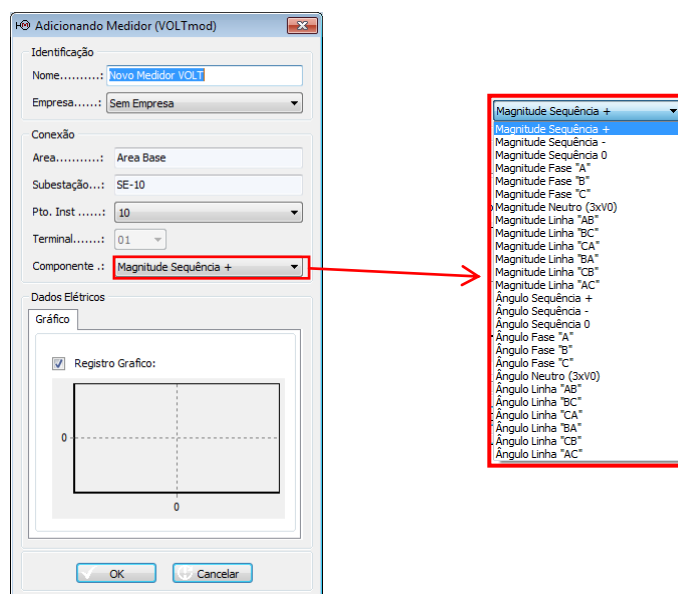


Figura 8.25 Medidores /Adicionar Medidores / Voltmod

Corrente:

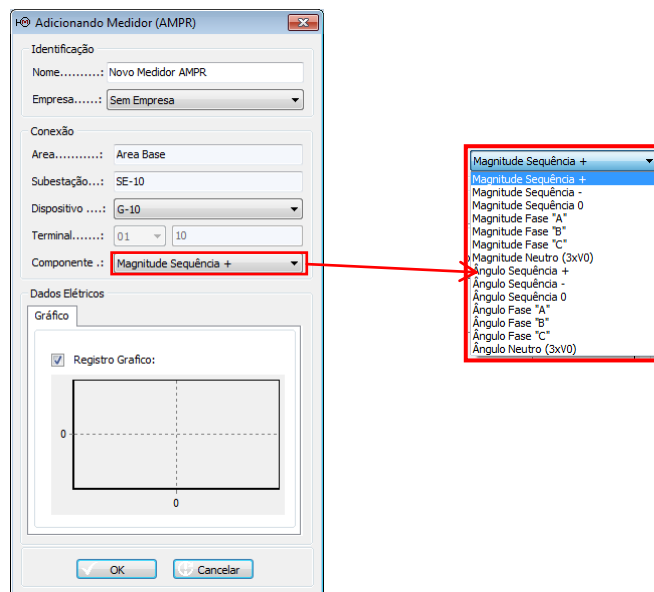


Figura 8.26 Medidores /Adicionar Medidores / Voltmod

Dispositivos Lógicos:

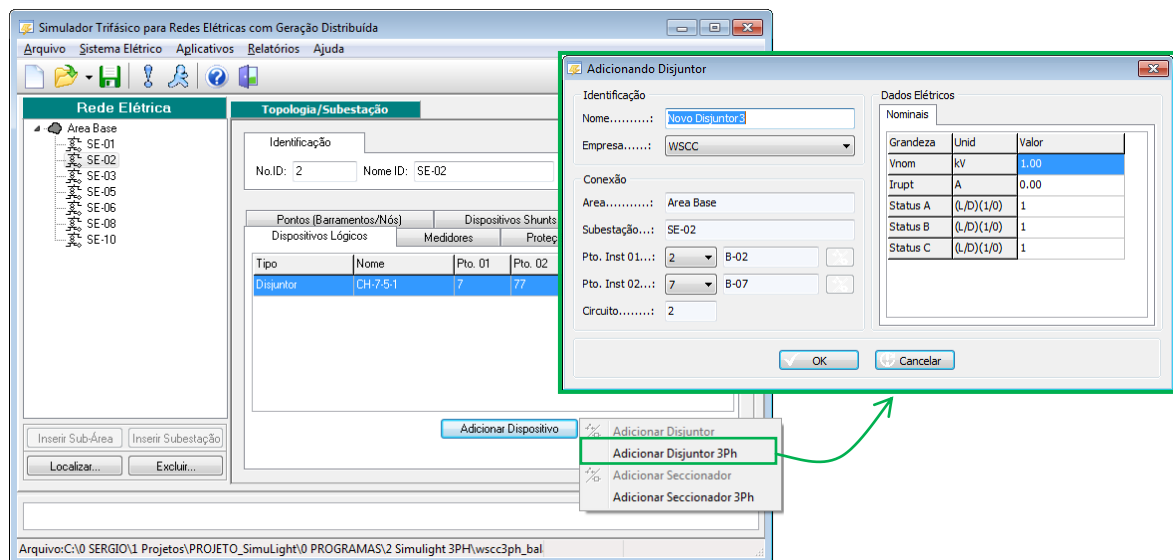


Figura 8.27 Dispositivos /Adicionar Dispositivo /

Proteção

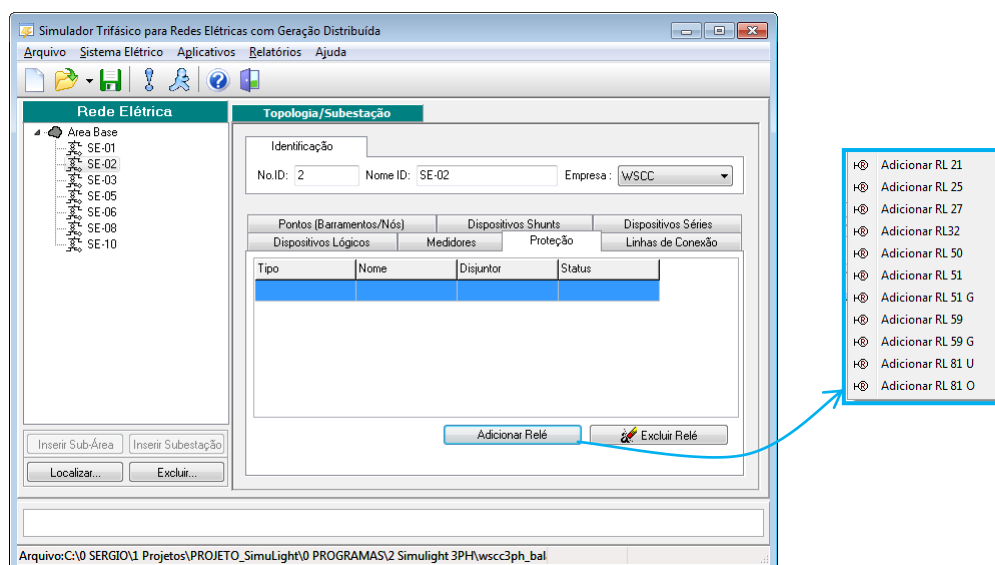


Figura 8.28 Proteção /Adicionar Relé /

Relé 21:

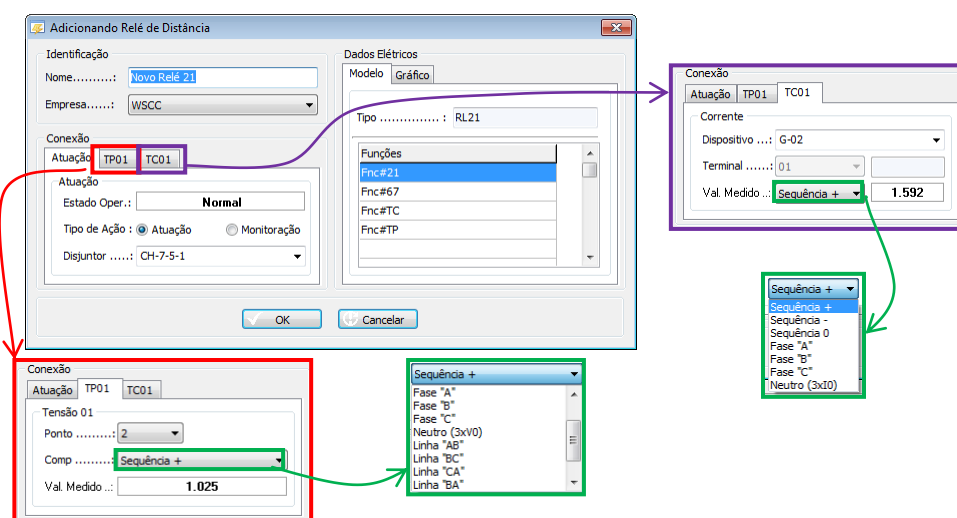


Figura 8.29 Proteção /Adicionar Relé / RL21

Relé 25

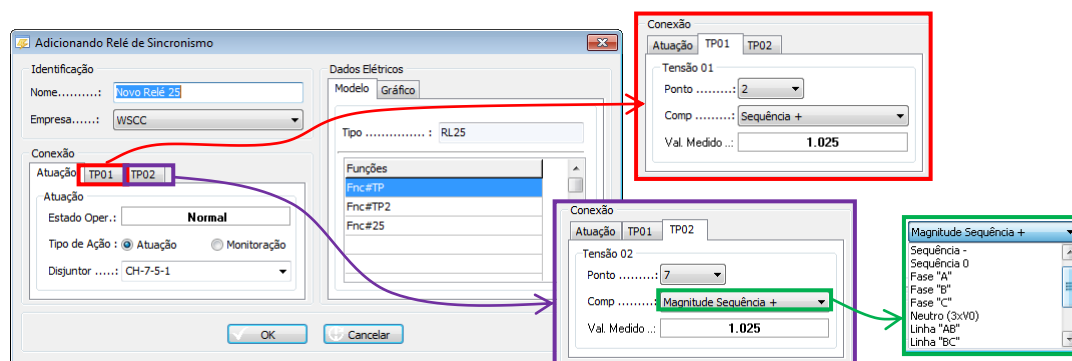


Figura 8.30 Proteção /Adicionar Relé / RL25

Relé 27

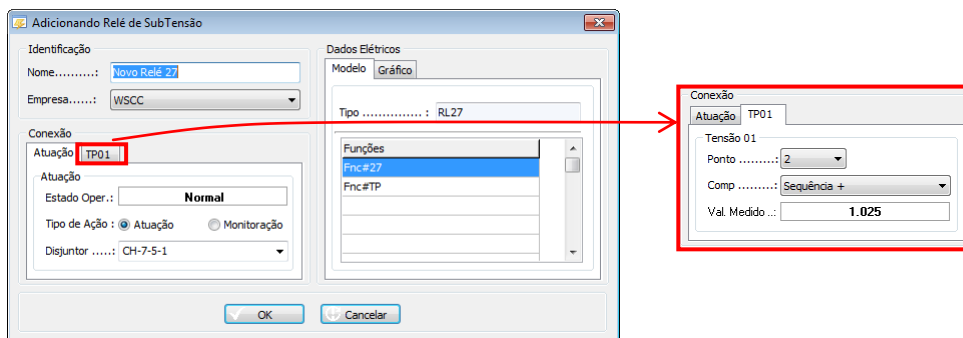


Figura 8.31 Proteção /Adicionar Relé / RL27

Relé 50

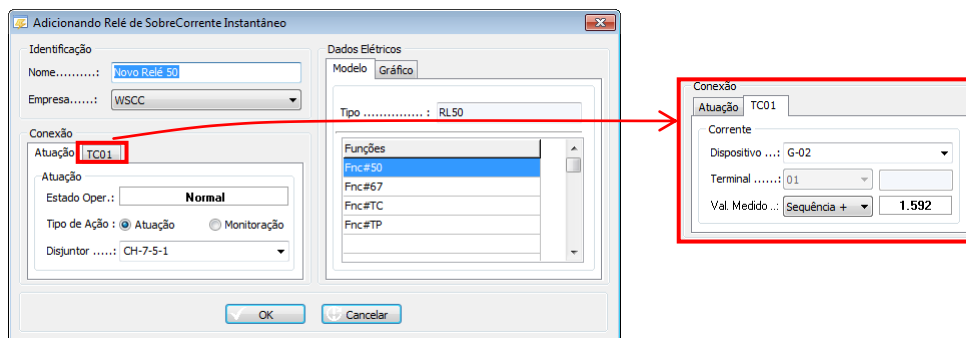


Figura 8.32 Proteção /Adicionar Relé / RL50

Relé 51

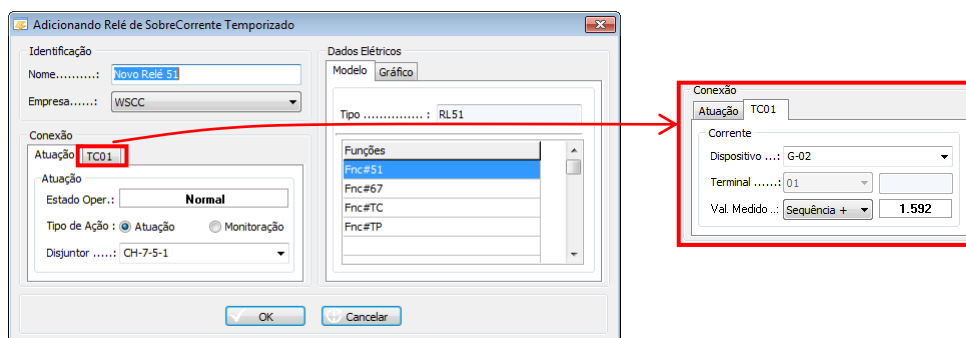


Figura 8.33 Proteção /Adicionar Relé / RL51

Relé 51G

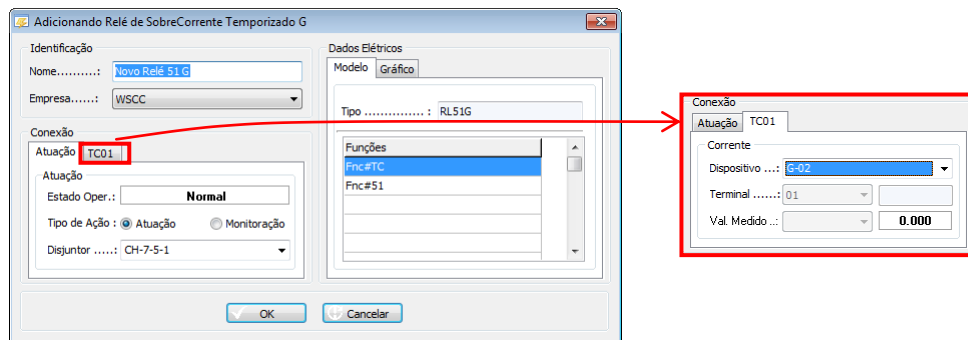


Figura 8.34 Proteção /Adicionar Relé / RL51G

Relé 59

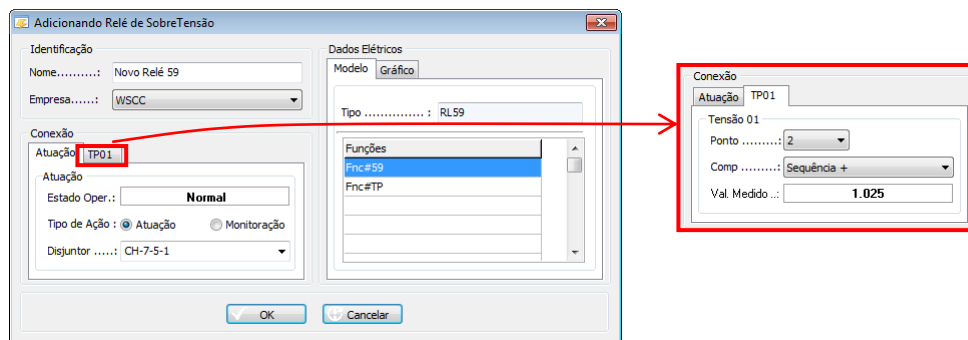


Figura 8.35 Proteção /Adicionar Relé / RL59

Relé 59G

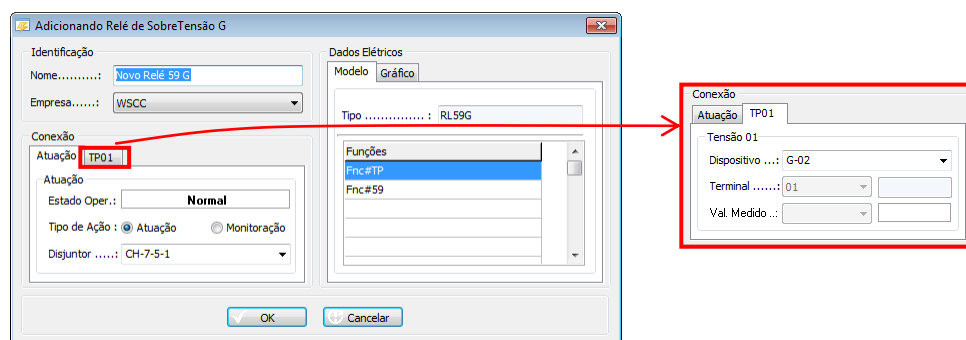


Figura 8.36 Proteção /Adicionar Relé / RL59G

Relé 81U

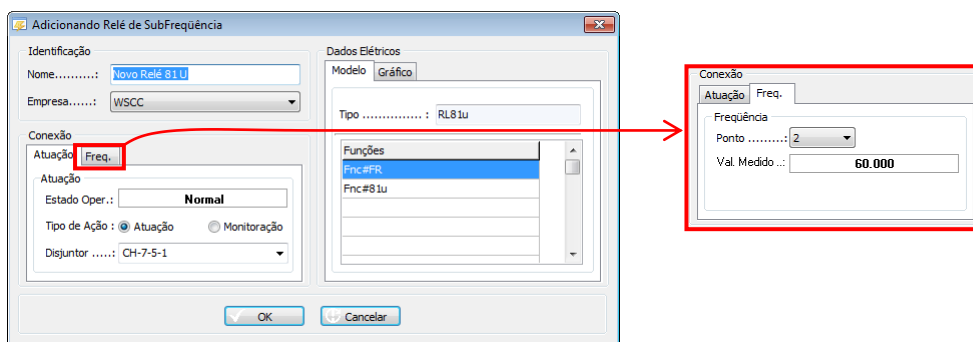


Figura 8.37 Proteção /Adicionar Relé / RL81U

Relé 81U

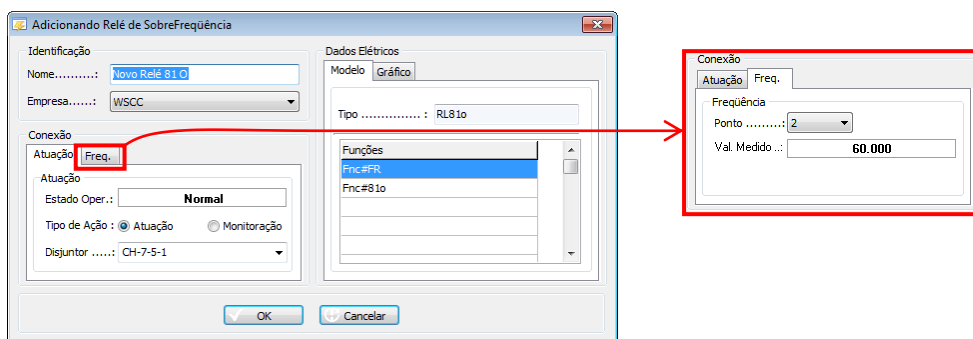


Figura 8.38 Proteção /Adicionar Relé / RL81O

Relatórios:

Relatório por Barra

Ilha.: Todas

Barra	Nome	SE
2 +	B-02	SE-02
2 a	"	"
2 b	"	"
2 c	"	"
10 +	B-10	SE-10
1; 2 +	B-01	SE-01
1; 2 a	"	"
1; 2 b	"	"
1; 2 c	"	"
50 +	B-50	SE-05
3 +	B-03	SE-03
3 a	"	"
3 b	"	"
3 c	"	"
7; 77 +	B-07	SE-02
7; 77 a	"	"
7; 77 b	"	"
7; 77 c	"	"

38 Registros

Relatório por circuitos
+ : seq. Positiva (soma das fases)
a: fase A
b: fase B
c: fase C

Perdas (MW): 4.6718
Perdas (Mvar): 138.5482

Circuito	MW	Mvar	Tap	Defa...	Potê...	Carr...	Emp...
1	163.00	6.14	1.00		100.00	163.12	WSC
1a	54.33	2.05			33.33	163.12	
1b	54.33	2.05			33.33	163.12	
1c	54.33	2.05			33.33	163.12	
3	0.00	3.14			0.00	0.00	
3a	0.00	1.05			0.00	0.00	
3b	0.00	1.05			0.00	0.00	
3c	0.00	1.05			0.00	0.00	
1	76.67	26.24	1.00		100.00	81.04	WSC
1a	25.56	8.75			33.33	81.04	
1b	25.56	8.75			33.33	81.04	
1c	25.56	8.75			33.33	81.04	
3	-5.00	-1.00	1.00		0.00	0.00	WSC
3a	-1.67	-0.33			0.00	0.00	
3b	-1.67	-0.33			0.00	0.00	
3c	-1.67	-0.33			0.00	0.00	
1	85.00	-11.14	1.00		100.00	85.73	WSC
1a	28.33	-3.71			33.33	85.73	
1b	28.33	-3.71			33.33	85.73	
1c	28.33	-3.71			33.33	85.73	
1	-163....	9.69	1.00		100.00	163.29	WSC
1a	-54.33	3.23			33.33	163.29	
1b	-54.33	3.23			33.33	163.29	

88 Registros

Lista de barras:
+ : seq. Positiva
a: fase A
b: fase B
c: fase C

Figura 8.39 Relatório após execução de Fluxo do potencia

Gráficos de Medidores:

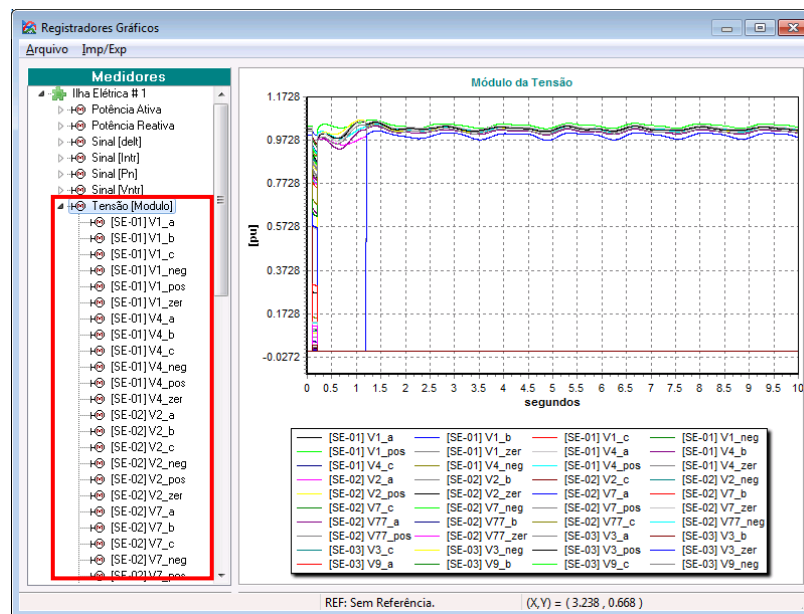


Figura 8.40 Gráfico após execução de um evento.

Referências Sistema Trifásica

- [1] 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.
- [2] J. Arrillaga, C. P. Arnold, B.J. Harker, *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, New Zealand, John Wiley & Sons Ltd., 1983.
- [3] M. Chen, W. E. Dillon, "Power System Modelling", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 7, July 1974, pp. 901-915.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, USA, McGraw-Hill, 1994.

9 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] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [3] J. Arrillaga, C. P. Arnold, and B. J. Harker , *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1983.
- [4] B. Stott, “Power System Dynamic Response Calculations”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 2, February 1979, pg. 219-241.
- [5] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgar Blücher, 1983.
- [6] Relatório de Informação Técnica DAP – 001/04, *Interligação de Autoprodutores de Energia Elétrica em Paralelo com o Sistema da Light SESA em Baixa e Média Tensão*, Light S.E.S.A, Junho de 2004.
- [7] Light S.E.S.A, “Requisitos Mínimos para Autoprodutor com Previsão de Instalação de Medidor de Qualidade,” Informação Técnica DTQ – 01 (Revisão 4), Novembro de 2004.
- [8] G.N. Taranto, *COE 754 - Dinâmica e Controle de Sistemas de Potência*, COPPE/UFRJ, 2008.
- [9] D.M. Falcão, *Notas de Aula de Análise de Redes Elétrica*, COPPE/UFRJ, 2006.
- [10] P.M. Anderson, *Power System protection*, McGraw Hill & IEEE-Press, 1999.

Device (DEVLIGHT)		Modelos (MDLLIGHT)							
		Seq Positiva				Trifasico			
		Estaticos		Dinamicos		Estaticos		Dinamicos	
ID	Descrição	ID	Descrição	ID	Descrição	ID	Descrição	ID	Descrição
stCARGA	Carga	CARGA#pcte CARGA#zcte CARGA#zip	Modelo P Constante Modelo Z Constante Modelo ZIP	CARGA#zcte CARGA#zip	Modelo Z Constante Modelo ZIP	CARGA3ph#Mdl:Pcte:Yg	Modelo P Constante 3ph	CARGA3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Zcte 3ph
stREATOR	Reator	REATOR#zcte	Modelo Z Constante	REATOR#zcte	Modelo Z Constante	REATOR3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante	REATOR3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante
stCAPACTR	Capacitor	CAPACTR#zcte	Modelo Z Constante	CAPACTR#zcte	Modelo Z Constante	CAPACTR3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante	CAPACTR3ph#Mdl:Zcte:Yg	Modelo Z Constante
stDSHT	Genérico	CARGA#pcte EQUIVREDE#Mdl:Zcte SVC#ANATEM MD01	Modelo P Constante Equivalente Z Constante SVC Anatem MD01	REATOR#zcte	Modelo Z Constante	CARGA#pcte EQUIVREDE#Mdl:Zcte SVC#ANATEM MD01	Modelo P Constante Equivalente Z Constante SVC Anatem MD01	REATOR#zcte	Modelo Z Constante
stTRAFO	Trafo	TRANSF#pi TRANSF#Mdl:PhShifter	Modelo Pi Modelo Pi Defasador			TRANSF3ph#Mdl:Pi:Yg-Yg TRANSF#Mdl:PhShifter	Modelo Pi Yg-Yg Modelo Pi Defasador		
stOLTC	OLTC	OLTC#Mdl:Pi	Modelo Pi			OLTC#Mdl:Pi	Modelo Pi		
stLT	Linha	LT#pi	Modelo Pi			LT#pi	Modelo Pi		
stRAMAL	Ramal	RAMAL#pi LT#pi	Modelo Pi Modelo Pi			RAMAL#pi LT#pi	Modelo Pi Modelo Pi		
stDSER	Genérico	TCSC#ANATEM MD01	TCSC Anatem MD01			TCSC#ANATEM MD01	TCSC Anatem MD01		
stGERADOR	Gerador	GERADOR#Mdl:V0 GERADOR#Mdl:PQ GERADOR#Mdl:PQ	V0) Contr. Tensão/Âng. PQ) Contr. Tensão PQ) Sem. Controle	GERADOR#GRP GERADOR#Mdl:Zcte	DINÂMICO Síncrono Modelo Z Constante	GERADOR3ph#Mdl:V0+ GERADOR3ph#Mdl:PV+	(V0_3ph+) Contr. Tensão/Âng. (PV_3ph+) Contr. Tensão	GERADOR#GRP GERADOR3ph#Mdl:Zcte	DINÂMICO Síncrono Modelo Z Constante 3ph
stMAQ_SINC	Máquina Síncrona			MaqSincr#Mdl:I MaqSincr#Mdl:II MaqSincr#Mdl:III MaqSincr#Mdl:IV MaqSincr#Mdl:V DDU	Modelo I Modelo II Modelo III Modelo MD02 Modelo MD03 Disp.Def.Usuário			MaqSincr3ph#Mdl:I MaqSincr3ph#Mdl:II MaqSincr3ph#Mdl:III MaqSincr3ph#Mdl:IV MaqSincr3ph#Mdl:V DDU	Modelo I 3ph Modelo II 3ph Modelo III 3ph Modelo MD02 3ph Modelo MD03 3ph Disp.Def.Usuário
stREG_TENSAO	Regulador Tensão			RegTensao#REF RegTensao#Mdl:Ka RegTensao#Mdl:1oORD RegTensao#Mdl:1oORDe DDU	Sem Reg. Tensão Modelo Ka Modelo 1oORD Modelo 1oORDe Disp.Def.Usuário			RegTensao#REF RegTensao#Mdl:Ka RegTensao#Mdl:1oORD RegTensao#Mdl:1oORDe DDU	Sem Reg. Tensão Modelo Ka Modelo 1oORD Modelo 1oORDe Disp.Def.Usuário
stREG_VELOC	Regulador Velocidade			CtrlVeloc#REF CtrlVeloc#Mdl:Termo DDU	Sem Reg. Veloc. Modelo Turbina RV_01 Disp.Def.Usuário			CtrlVeloc#REF DDU	Sem Reg. Veloc. Disp.Def.Usuário
stREG_ESTAB	Regulador Estabilizador			NO_MODEL PSS#Mdl:w DDU	Sem Reg. Estab. Modelo PSS_w Disp.Def.Usuário			NO_MODEL DDU	Sem Reg. Estab. Disp.Def.Usuário

Dispositivos disponíveis no Simulight

ANEXOS

A. 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	
	41	XOR	1	2	
	42	NOT	1	1	
DISCRET	43	zINTEGRD	1	1	K, T, To, Lmin, Lmax
	44	PTOS	1	1	Ui, Yi

GRUPO	Ind	TIPO	NO_SAIDAS	NO_ENTRADS	PARAMETROS
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/Iim,G,B]
	56	oSERIE	-	10	[Gs,Bs,(P/Ire,Q/Iim,G,B),(P/Ire,Q/Iim,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

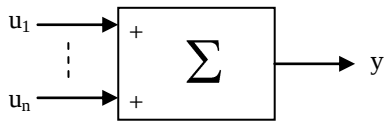
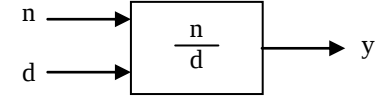
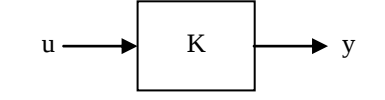
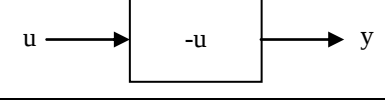
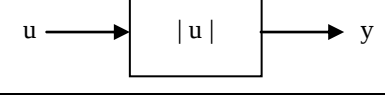
	Diagrama	Estrutura no XML
1		<pre><SOMD id="xxx" out=" y " stt="NO"> <ADD sgnl="+"> u1 </ADD> : <ADD sgnl="+"> un </ADD> </SOMD></pre>
2		<pre><MULT id="xxx" out=" y " stt="NO"> <ADD> u1 </ADD> : <ADD> un </ADD> </MULT></pre>
3		<pre><DIVS id="xxx" num=" n " den=" d " out=" y " stt="NO"/></pre>
4		<pre><GANH id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO" K=" K "/></pre>
5		<pre><NEGV id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></pre>
6		<pre><ABSL id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></pre>

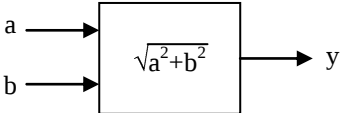
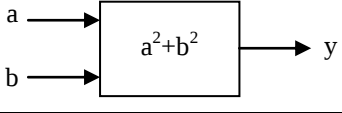
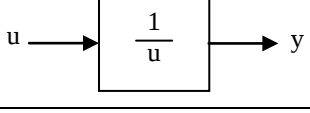
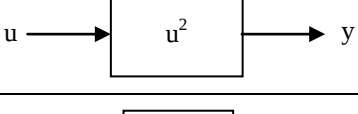
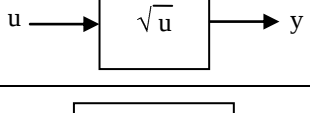
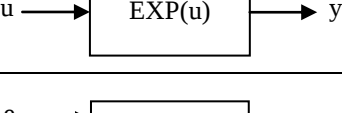
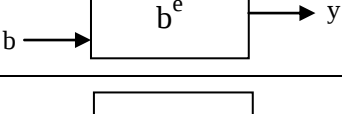
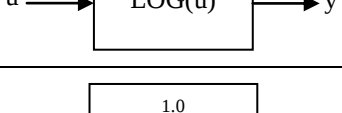
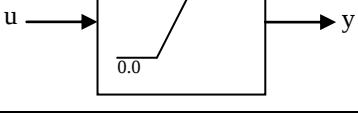
	Diagrama	Estrutura no XML
7		<code><MOD id="xxx" in1=" a " in2=" b " out=" y " stt="NO"/></code>
8		<code><MOD2 id="xxx" in1=" a " in2=" b " out=" y " stt="NO"/></code>
9		<code><INVS id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
10		<code><SQR id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
11		<code><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><SIGM id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO" T="xxx"/></code>

Tabela A.3 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → TRIGONOM

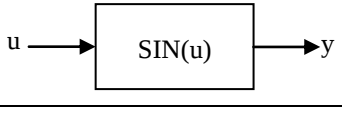
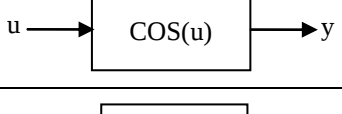
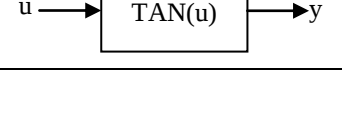
	Diagrama	Estrutura no XML
16		<code><SENO id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
17		<code><COSS id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>
18		<code><TANG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></code>

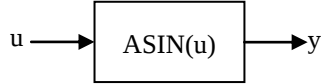
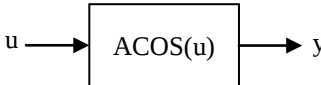
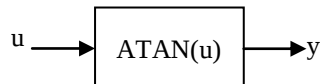
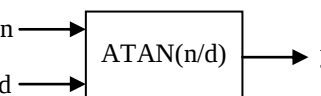
	Diagrama	Estrutura no XML
19		<pre><ASEN id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></pre>
20		<pre><ACOS id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></pre>
21		<pre><ATAN id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="NO"/></pre>
22		<pre><ATAN2 id="xxx" num=" n " den=" d " out=" y " stt="NO"/></pre>

Tabela A.4 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → COMPLEX

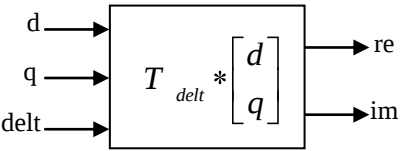
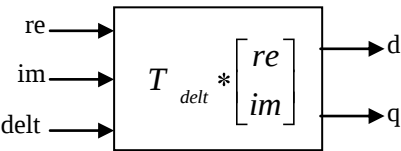
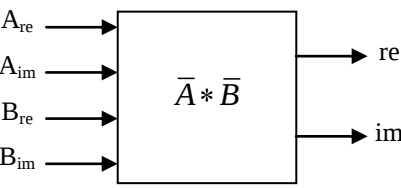
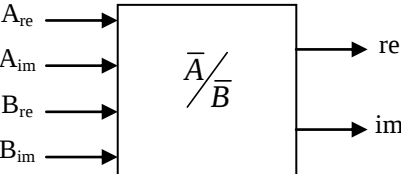
	Diagrama	Estrutura no XML
23		<pre><DQ-C id="xxx"> <RE stt="NO"> re </RE> <IM stt="NO"> im </IM> <D> d </D> <Q> q </Q> <DELT> delt </DELT> </DQ-C></pre>
24		<pre><C-DQ id="xxx"> <D stt="NO"> d </D> <Q stt="NO"> q </Q> <RE> re </RE> <IM> im </IM> <DELT> delt </DELT> </C-DQ></pre>
25		<pre><CMUL id="xxx"> <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>
26		<pre><CDIV 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> </CDIV></pre>

Tabela A.5 Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → NLINEAR

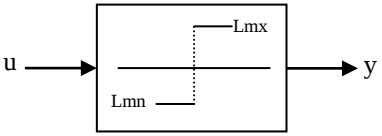
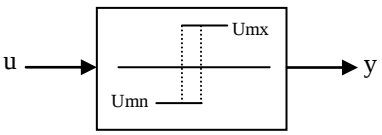
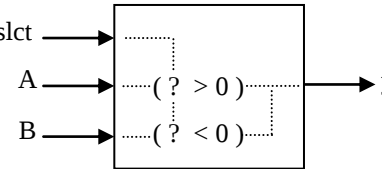
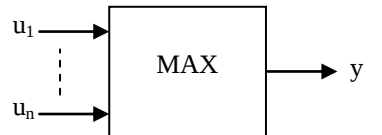
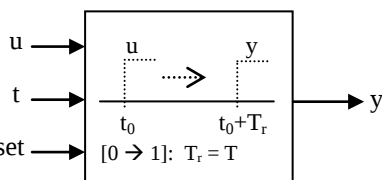
	Diagrama	Estrutura no XML
27		<pre><LIMIT id="xxx" inp=" u " out=" y " lmax=" Lmx " lmin=" Lmn "/></pre> ou <pre><LIMIT id="xxx" inp=" u " out=" y " > <LMIN> Lmn </LMIN> <LMAX> Lmx </LMAX> </LIMIT></pre> Limites máximo e mínimo definidos por função ou por variável interna do modelo.
28		<pre><DEAD id="xxx" 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

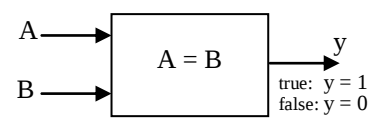
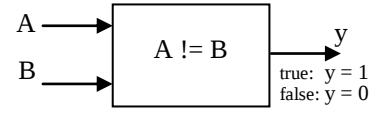
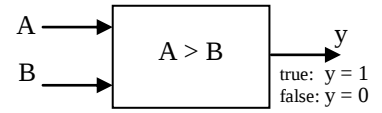
	Diagrama	Estrutura no XML
33		<pre><EQ id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
34		<pre><NE id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
35		<pre><GT id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>

	Diagrama	Estrutura no XML
36		<pre><GE id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
37		<pre><LT id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
38		<pre><LE id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
39		<pre><OR id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
40		<pre><AND id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
41		<pre><XOR id="xxx" op1=" A " op2=" B " out=" y "/></pre>
42		<pre><NOT id="xxx" inp=" u " out=" y "/></pre>

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 de diagramas dos blocos: GROUP_NLIN → DISCRET

	Diagrama	Estrutura no XML
48		<pre><CINI id="xxx" vars="xxx" expr="xxx"/></pre>

Tabela de diagramas dos blocos: GRUPO → DISCRET

	Diagrama	Estrutura no XML
49		<pre><INTG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k "/></pre>
50		<pre><DERV id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k "/></pre>
51		<pre><LAG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " P=" p " T=" t "/></pre>
52		<pre><WSHT id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " P=" p " T=" t "/></pre>
53		<pre><LDLG id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" P1=" p1 " T1=" t1 " P2=" p2 " T2=" t2 "/></pre>
54		<pre><BLC2 id="xxx" inp=" u " out=" y " stt="0" K=" k " A=" a " B=" b " C=" c "/></pre>



B. Modelos Dinâmicos [1][2]

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 [1] e [2]

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.

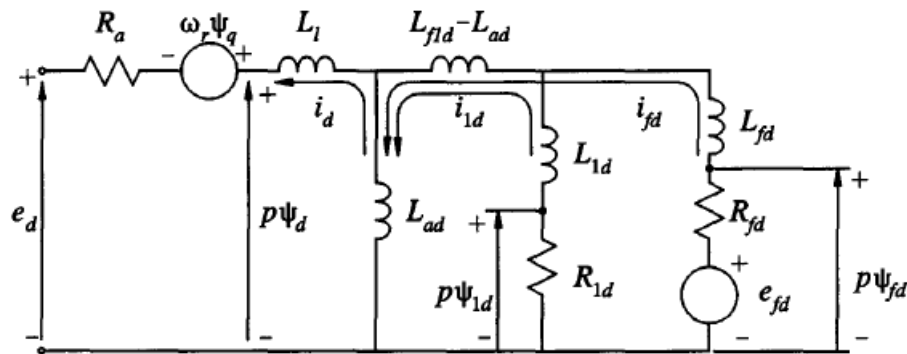


Figura B.1 – Circuito equivalente no eixo-d.

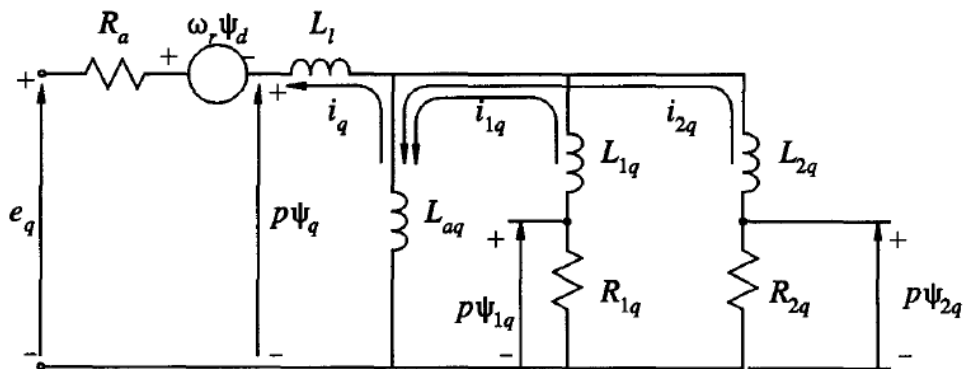


Figura B.2 – Circuito equivalente no eixo-q.

Parâmetros da Máquina Síncrona:

$$L_d' = L_l + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}}$$

$$L_d'' = L_l + \frac{L_{ad}L_{fd}L_{ld}}{L_{ad}L_{fd} + L_{ad}L_{ld} + L_{fd}L_{ld}}$$

$$L_q' = L_l + \frac{L_{aq}L_{lq}}{L_{aq} + L_{lq}}$$

$$L_q'' = L_l + \frac{L_{aq}L_{lq}L_{2q}}{L_{aq}L_{lq} + L_{aq}L_{2q} + L_{lq}L_{2q}}$$

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:

$T_1 = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}}$	$T_2 = \frac{L_{ad} + L_{ld}}{R_{ld}}$
$T_3 = \frac{1}{R_{ld}} \left(L_{ld} + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right)$	$T_4 = \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} \right)$
$T_5 = \frac{1}{R_{ld}} \left(L_{ld} + \frac{L_{ad}L_l}{L_{ad} + L_l} \right)$	$T_6 = \frac{1}{R_{ld}} \left(L_{ld} + \frac{L_{ad}L_lL_{fd}}{L_{ad}L_l + L_{ad}L_{fd} + L_{fd}L_l} \right)$
$T_{q0}' = \frac{L_{aq} + L_{lq}}{R_{lq}}$	$T_{q0}'' = \frac{1}{R_{2q}} \left(L_{2q} + \frac{L_{aq}L_{lq}}{L_{aq} + L_{lq}} \right)$

Para máquinas de pólos salientes os parâmetros no eixo-q são:

$$L_q = L_l + L_{aq} \quad L_q'' = L_l + \frac{L_{aq}L_{lq}}{L_{aq} + L_{lq}} \quad T_{q0}'' = \frac{L_{aq} + L_{lq}}{R_{lq}}$$

- 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:

$$\begin{aligned} X_d &\geq X_q > X'_d > X'_q > X''_d > X''_q \\ T'_{d0} &> T'_d > T''_{d0} > T''_d > T_{kd} \\ T'_{q0} &> T'_q > T''_{q0} > T''_q \end{aligned}$$

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

C. Edição de dados no Simulight

Máquina Síncrona:

Modelo I

Dados do Modelo

Identificação

Id : MaqSincr#Mdl:I

Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xld	%pu	X'd

OK Cancelar

Figura C.1 – Modelo I – Maq.

Parâmetros:

- H : Inércia do rotor em segundos
D : Coeficiente de amortecimento em pu/pu.
(relação: base-máquina/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

Dados do Modelo

Identificação

Id : MaqSincr#Mdl:II

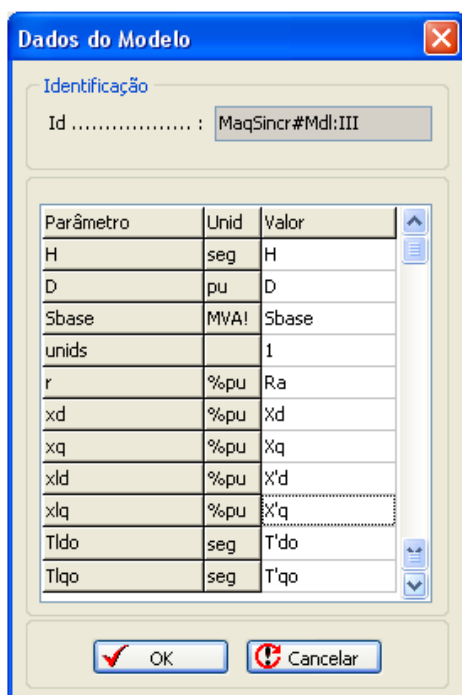
Parâmetro	Unid	Valor
H	seg	H
D	pu	D
Sbase	MVA	Sbase
unids		1
r	%pu	Ra
xd	%pu	Xd
xq	%pu	Xq
xld	%pu	X'd
Tldo	seg	T'do

OK Cancelar

Figura C.2 – Modelo II – Maq.

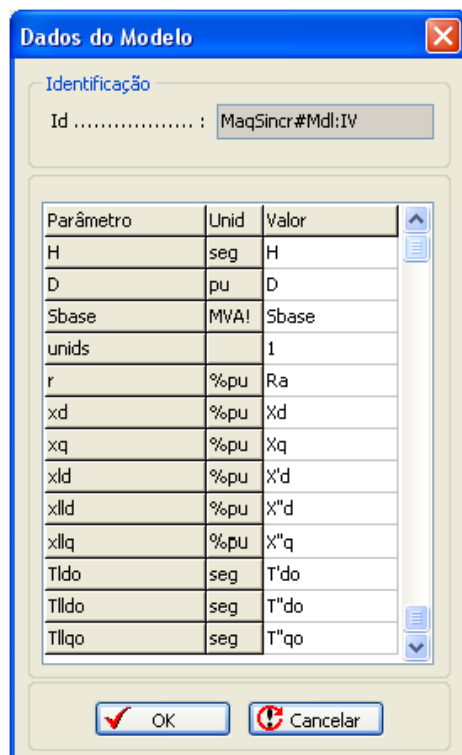
Parâmetros:

- 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''d
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.

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 C.6.

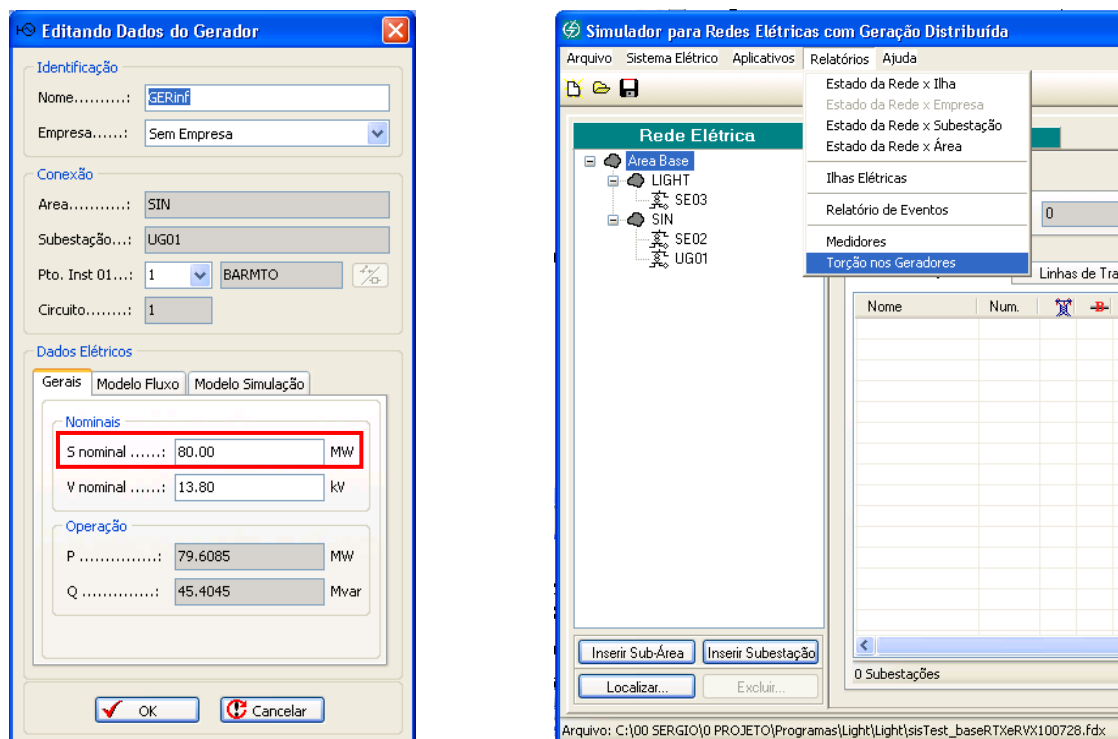


Figura C.6 – Esforço torcionais da Maq.

Exemplo:

Seja o sistema mostrado ($S_{G2}=14\text{MW}$) na Figura C.7 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.

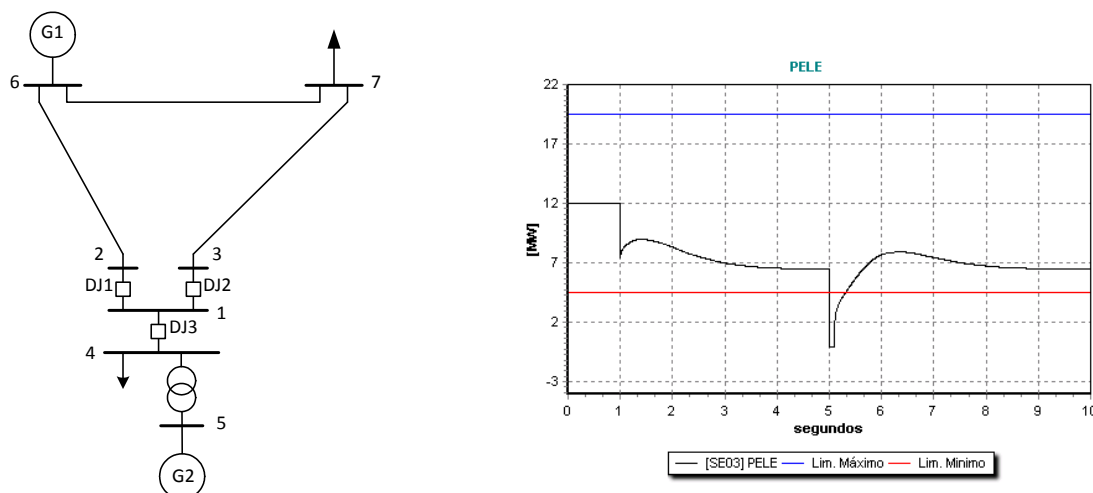


Figura C.7 – Sistema exemplo e Esforço torcionais do G2

Observando a Figura C.7, pode-se dizer que o gerador G2, em $t=5\text{s}$, 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 $12 \pm 0,5 \cdot 14$ MW (superior = 19MW e inferior = 5MW) e a variação da potência gerada (ΔP) em $t=1^-$ e em $t=1^+$ é 4.9 MW ($4.9 \text{ MW} < 7 \text{ MW} = 0,5 \cdot 14 \text{ MW}$) 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) 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.

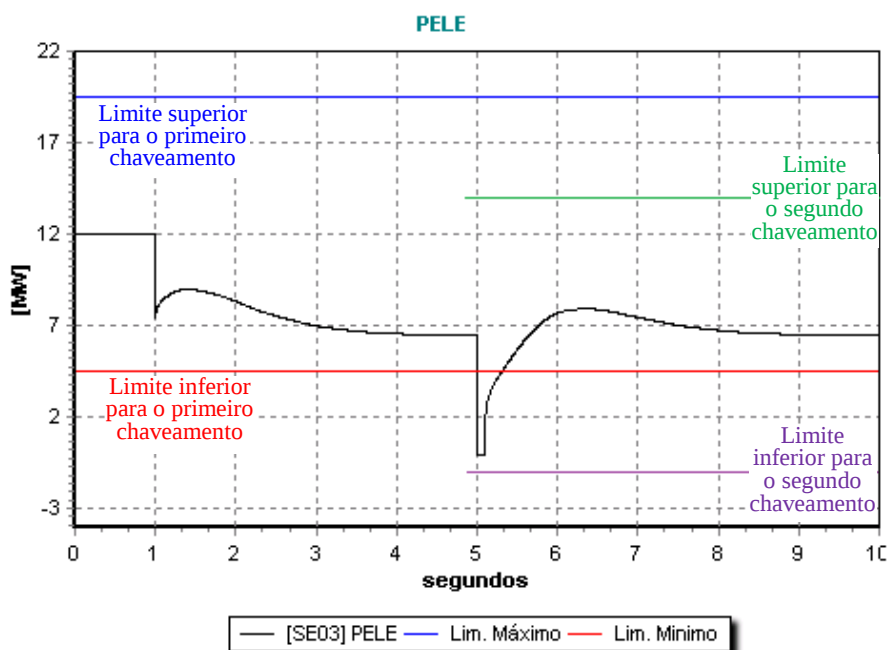


Figura C.8 – Esforço torcionais do G2

Regulador de Tensão:

Modelo I

Dados do Modelo

Identificação

Id : RegTensao#REF

Parâmetro	Unid	Valor
Efd	pu	1

OK Cancelar

Parâmetros:

Efd : Tensão de Campo em pu.

Figura C.9 – Modelo I – R. Tensão

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, recomenda-se usar o evento modifica parâmetro)

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. Velocidade.

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.

T2 : Constante de tempo do segundo Lead-Leg em segundos.

Figura C.15 – Modelo I – Estabilizador.

Modelo de Carga

Modelo Z Constante

The screenshot shows the 'Editando Dados da Carga' dialog box with the 'Modelo Z Constante' selected. The 'Dados Elétricos' tab is active, and the 'Modelo Simulação' sub-tab is selected. The 'Tipo' dropdown is set to 'Modelo Z Constante'. The table below lists the parameters to be defined:

Parâmetro	Unid	Valor
P	MW	P
Q	MVAR	Q
Vo	pu	Vo
Vc	pu	Vc

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 (calculado interno).
- Vc : Tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante em p.u.

Figura C.16 – Modelo Z constante.

Modelo ZIP

The screenshot shows the 'Editando Dados da Carga' dialog box with the 'Modelo ZIP' selected. The 'Dados Elétricos' tab is active, and the 'Modelo Simulação' sub-tab is selected. The 'Tipo' dropdown is set to 'Modelo ZIP'. The table below lists the parameters to be defined:

Parâmetro	Unid	Valor
P	MW	P
Q	MVAR	Q
a1	%	a1
b1	%	b1
c1	%	c1
a2	%	a2
b2	%	b2
c2	%	c2
Vo	pu	Vo
Vc	pu	Vc

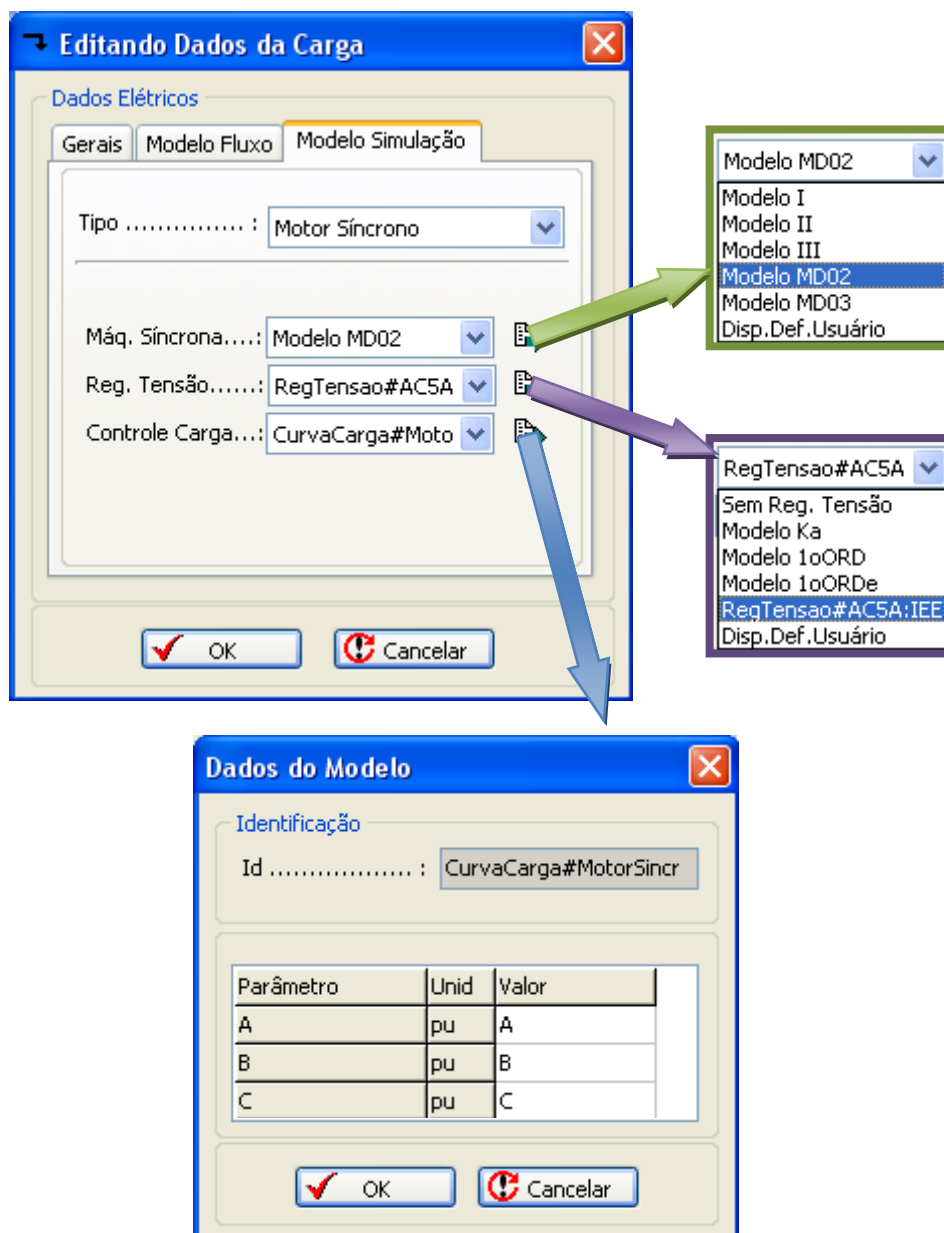
Parâmetros:

- 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 (calculado interno).
- Vc : Tensão abaixo da qual a carga passa a ser modelada como impedância constante em p.u.

Figura C.17 – Modelo ZIP.

$$P_0 = \begin{cases} P \left[a_1 + b_1(V/V_0) + c_1(V/V_0)^2 \right] & V \geq V_c \\ P \left[a_1(V/V_c)^2 + b_1(V/V_c)(V/V_0) + c_1(V/V_0)^2 \right] & V < V_c \end{cases}$$

$$Q_0 = \begin{cases} Q \left[a_2 + b_2(V/V_0) + c_2(V/V_0)^2 \right] & V \geq V_c \\ Q \left[a_2(V/V_c)^2 + b_2(V/V_c)(V/V_0) + c_2(V/V_0)^2 \right] & V < V_c \end{cases}$$

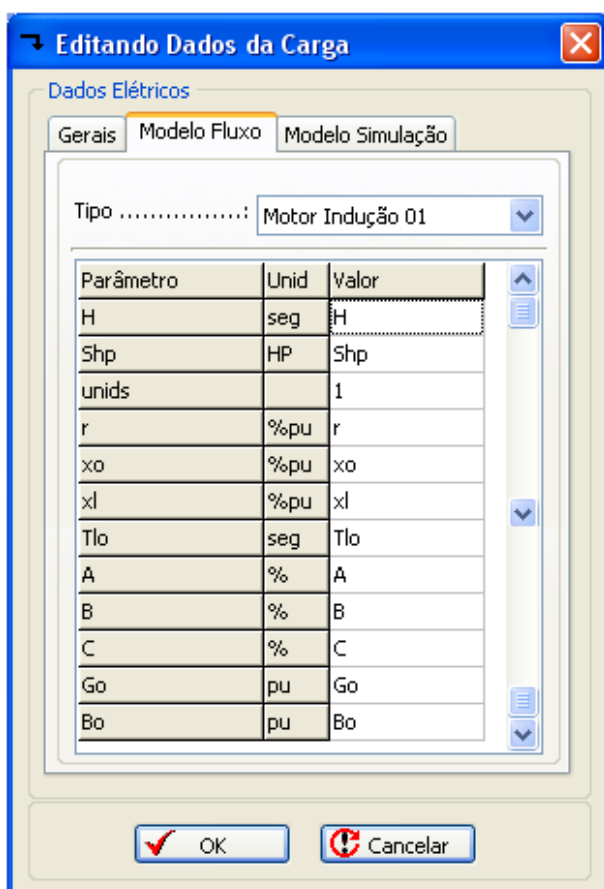
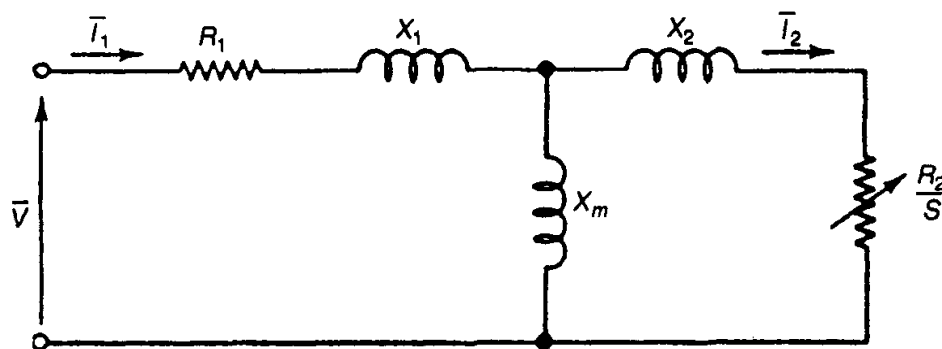
Motor Síncrono:**Figura C.18** –Motor de Indução – modelo simulação.

OBS: Na inicialização do modelo, parte dinâmica, o parâmetro C é calculado pelo programa, depois de estar no processo de simulação, o parâmetro C pode ser modificado durante a simulação (recomenda-se usar o evento modifica parâmetro)

Onde:

$$T_m \propto \{a + b(\text{speed}) + c(\text{speed})^2\}$$

Modelo Motor de Indução:



$$X_0 = X_1 + X_m$$

$$X' = X_1 + \frac{X_2 X_m}{X_2 + X_m}$$

$$T'_0 = \frac{X_2 + X_m}{2\pi f_0 R_2}$$

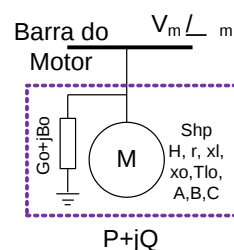
$$T_m = A + BS + CS^2$$

f_0 : frequência elétrica, assumido constante.

Figura C.19 – Modelo Motor de Indução.

Parâmetros:

- H : Inércia do rotor em segundos
- Shp : Potência nominal em hp
- unids: Nro de motores ligados no barramento
- r : resistência do estator em % (R_1)
- xo : reatância de circuito aberto em % ($X_1 + X_m$)
- xl : reatância transitória ou de rotor bloqueado em % (X')
- Tlo : constante de tempo de circuito aberto no rotor em segundo (T'_0)
- A,B,C: constantes da curva do Torque mecânico
- Go,Bo: cálculo interno sem interferência do usuário (para manter a injeção $P+jQ$).



Partida de Motor de Indução:

O Simulight não conta com um modulo de partida de motor, mas este pode ser usado para tal fim, mas lembrando que o modelo usado pelo Simulight é para frequências próximas à fundamental (50/60 Hz), as respostas obtidas para frequências muito baixas e/ou altas geram “lixo numérico” e a curva mostrada na tela dos medidores só indicaram a tendências das curvas medidas nessas frequências. A seguir os passos para simular uma partida de motor.

Seja a Barra SE a barra da subestação do sistema original onde se quer simular a partida do motor⁸, sendo este conectado na barra 2 através do transformador.

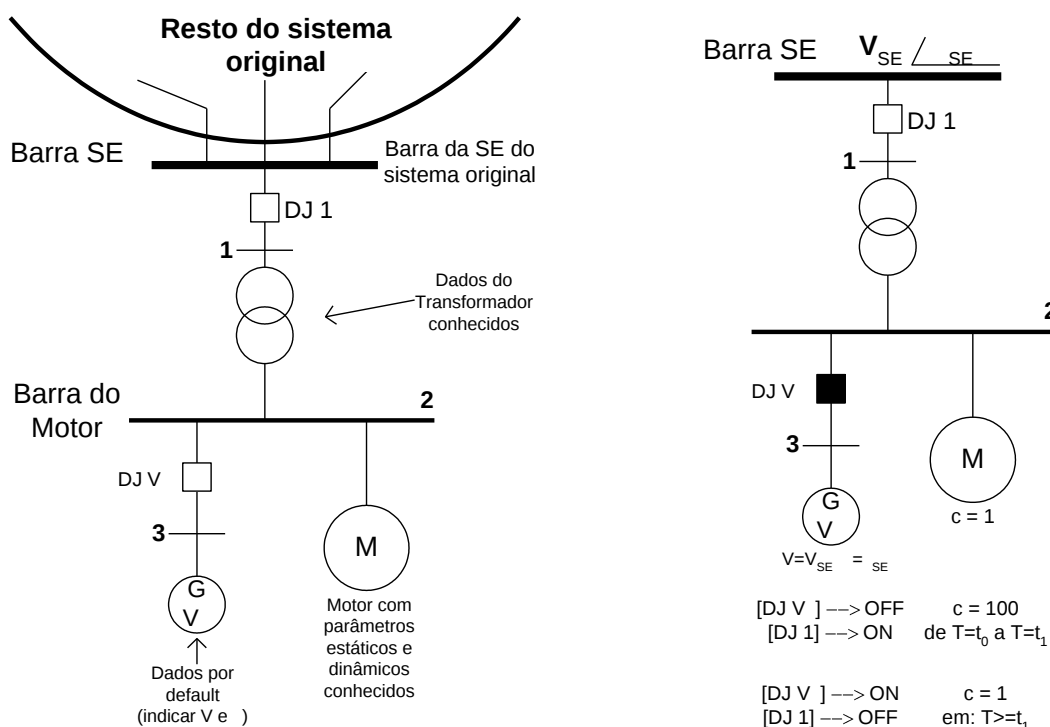


Figura C.20 – Esquema para a partida do Motor de Indução.

O gerador mostrado é fictício, este é adicionado para que a ilha elétrica que pertence o motor sempre fique ativa e assim obter as medidas correspondentes. Também vai servir para parar o motor antes de se conectar ao sistema original.

FLOW: [DJ 1]: desligado, [DJ V0] ligado.

- Executar Flow para a ilha maior, obtendo-se os valores de V_{SE} e θ_{SE} .
- Passar para o gerador fictício V0 os valores obtidos no passo anterior.
- Executar Flow para a ilha do motor.

SIMULAÇÃO: Eventos

- Em $t=t_0$: Modifica parâmetro do motor: $c=1$ para $c=100$ (para parar o motor)
- Em $t=t_1$: Abrir disjuntor [DJ V0]
Fechar disjuntor [DJ 1]
Modifica parâmetro do motor: $c=100$ para $c=1$ (inicia partida do motor)

⁸ Na subestação (SE) do sistema original, devem-se adicionar os barramentos, disjuntores, gerador, transformador (caso exista) e o motor (dados estáticos e dinâmicos conhecidos).

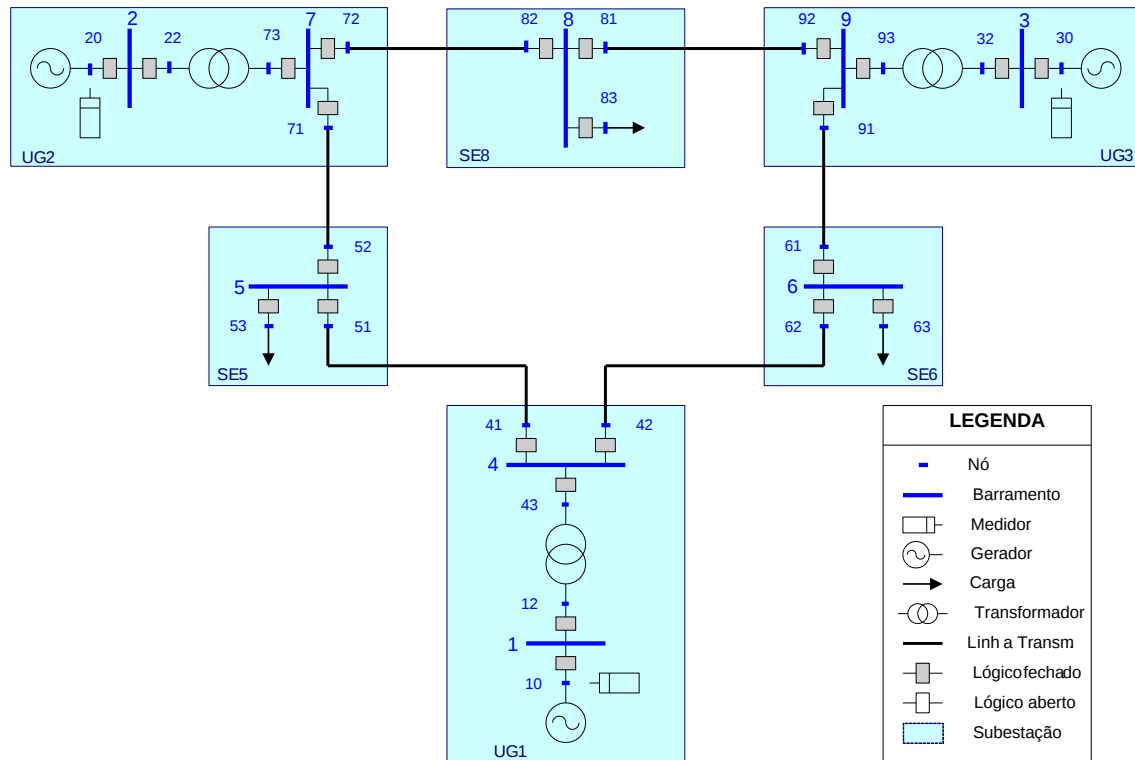


Figura C.21 – Sistema de 9 barras, a onde se conecta o motor de indução.

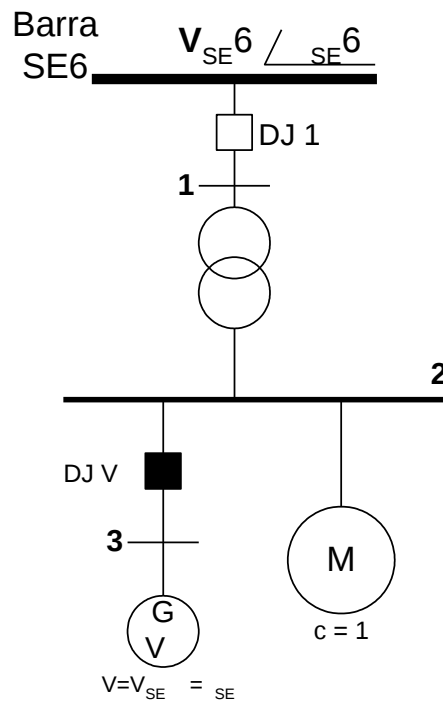


Figura C.22 – Esquema de como inserir o motor de Indução no barramento 6.

Alguns resultados da partida do Motor de Indução, utilizando o roteiro indicado:

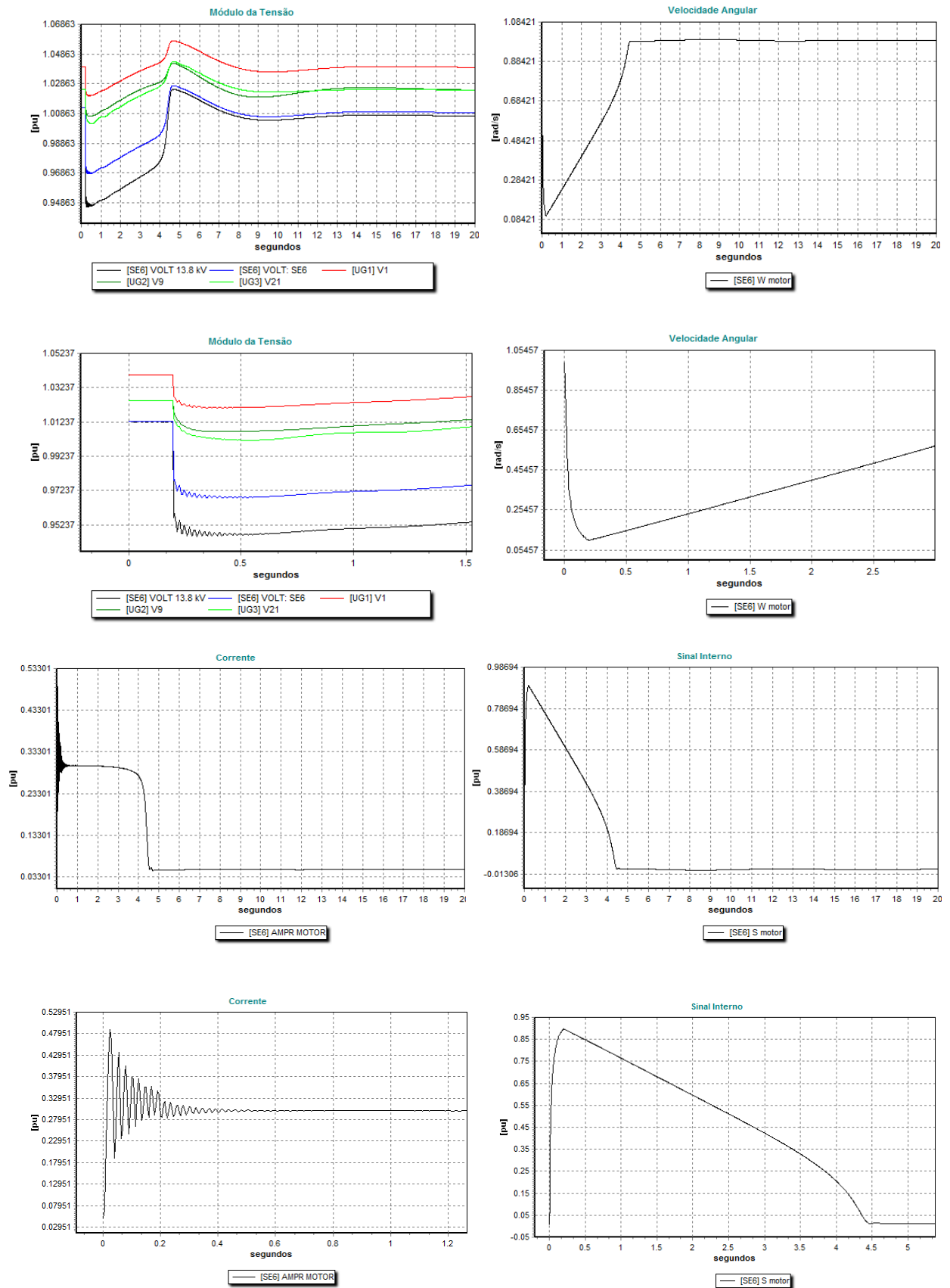


Figura C.23 – Algumas curvas representativas na partida do Motor de Indução.

D. 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.

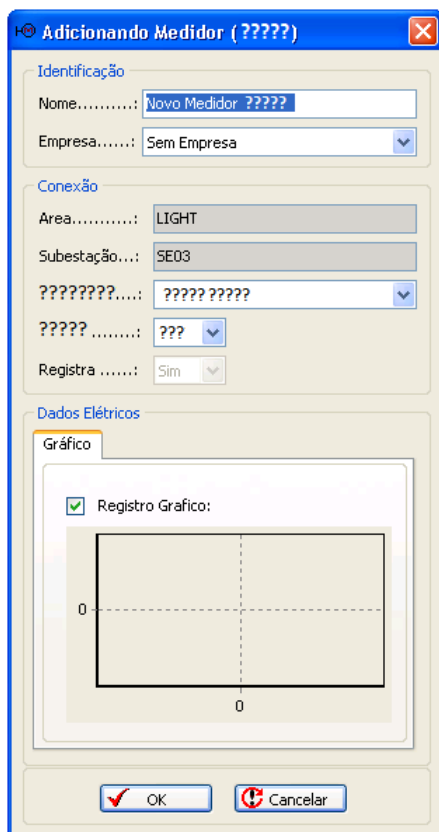
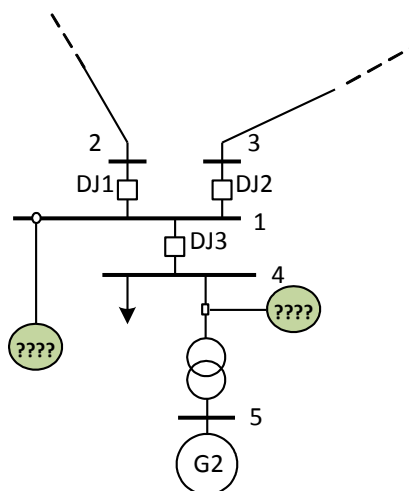



Figura D.1 – Janela padrão dos medidores do Simulight.

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:

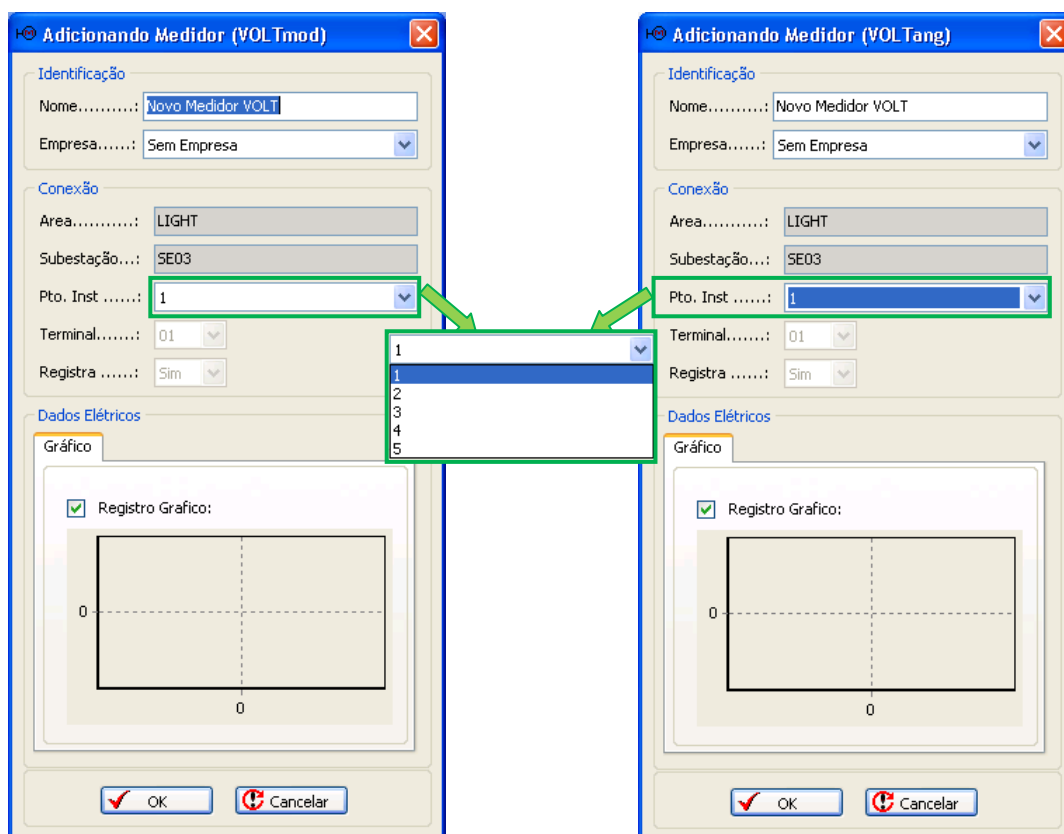


Figura D.2 – Medidor do módulo da tensão (VOLMod) e ângulo da tensão (VOLTang).

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.

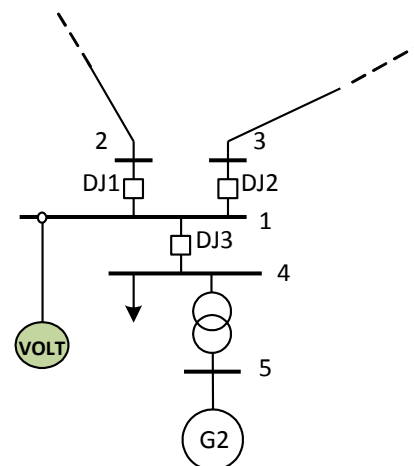


Figura D.3 – Diagrama de conexão

Medidor Frequencia:

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.

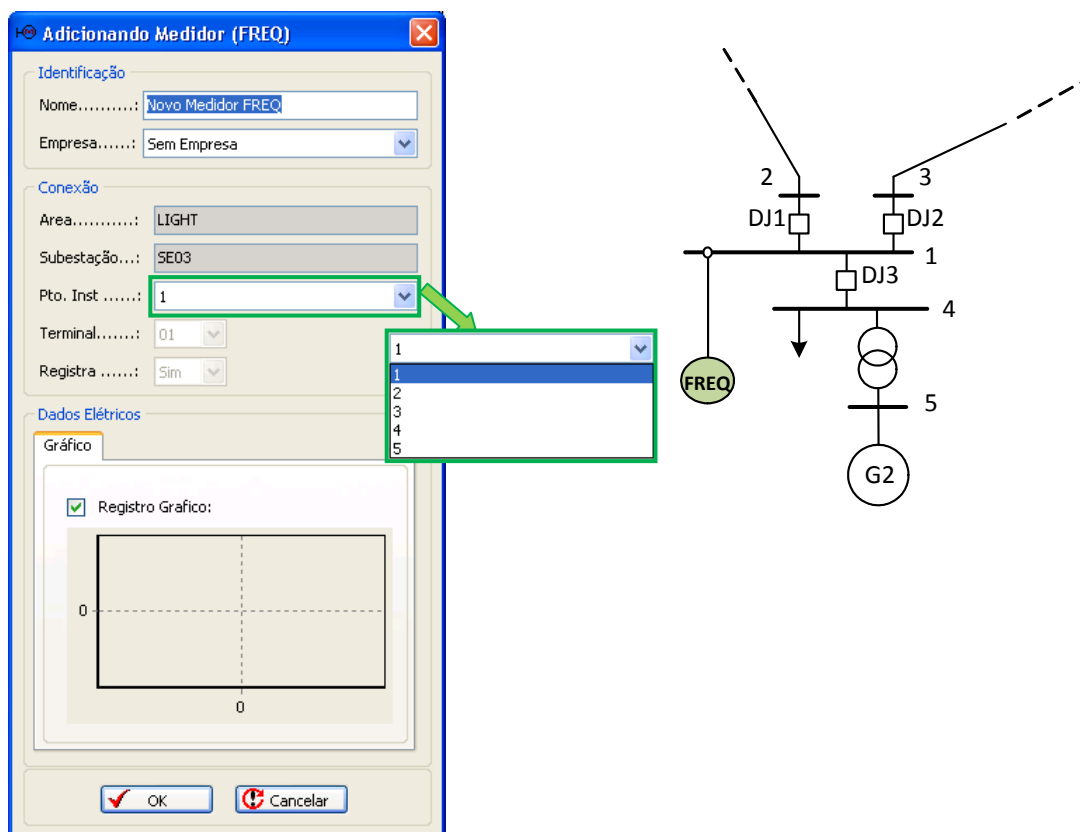


Figura D.4 – Medidor de Frequencia (FREQ) e diagrama de conexão

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)

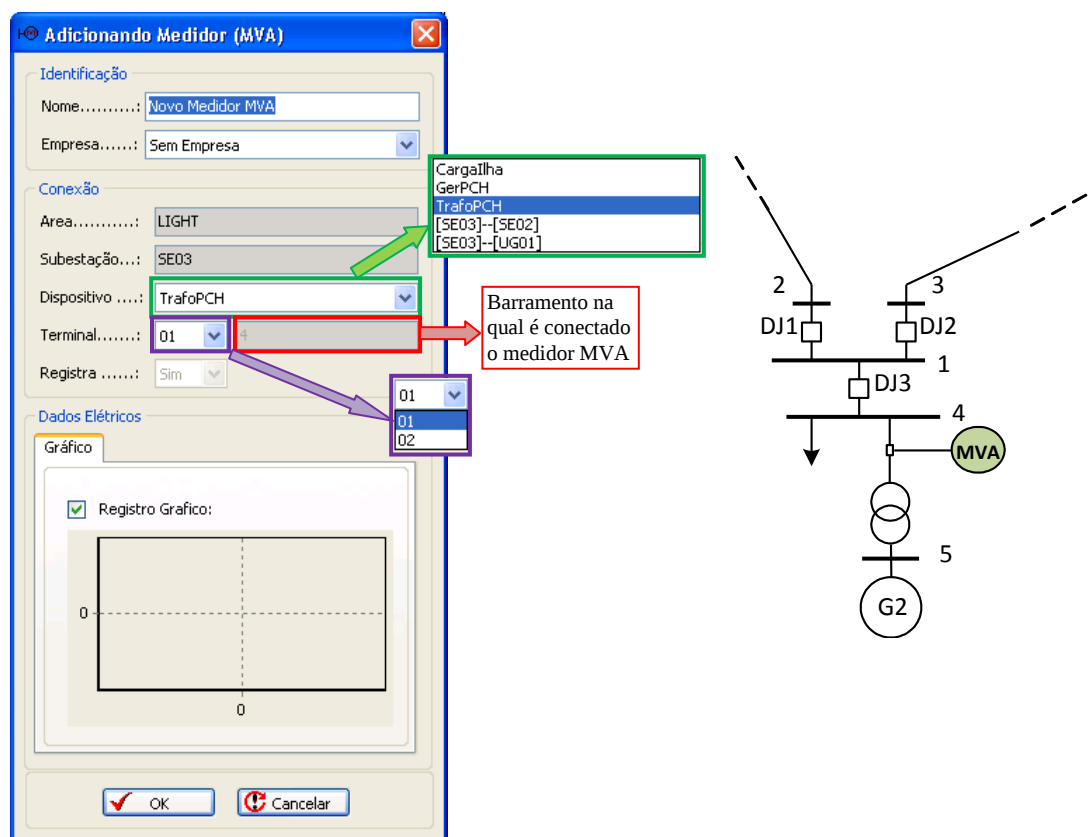


Figura D.5 – Medidor de Potência Aparente (MVA) e diagrama de conexão

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)

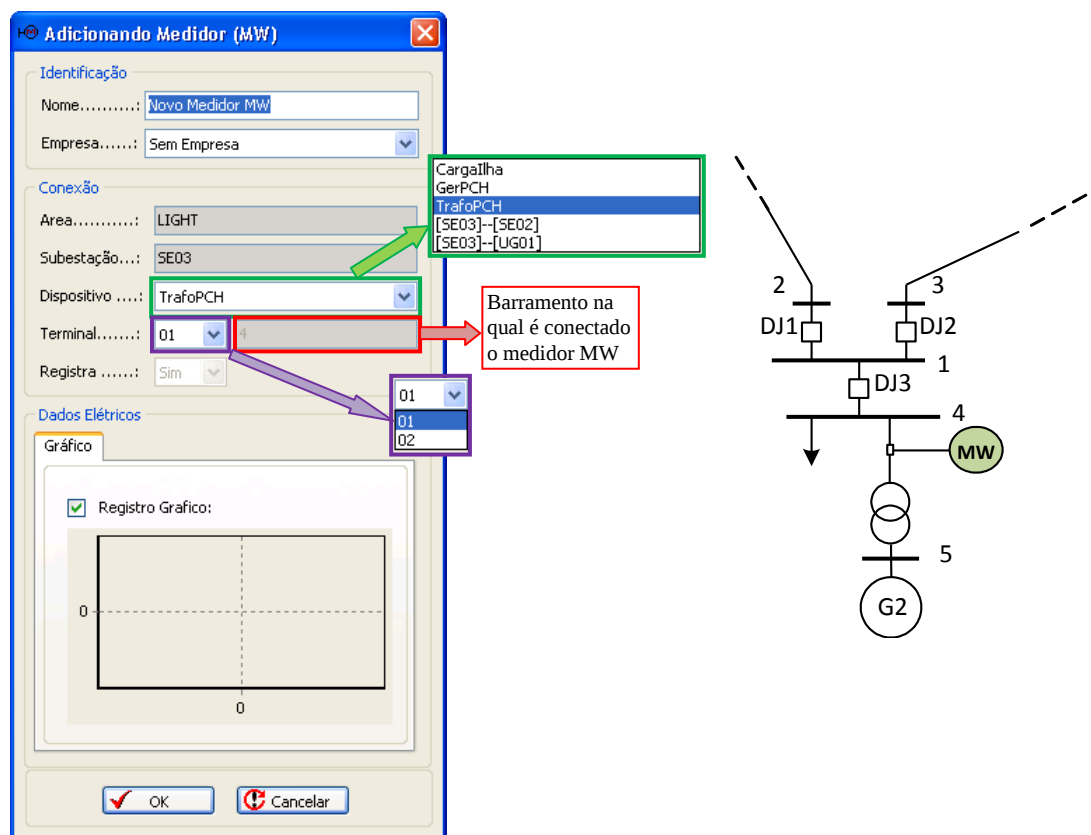


Figura D.6 – Medidor de Potência Ativa (MW) e diagrama de conexão

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)

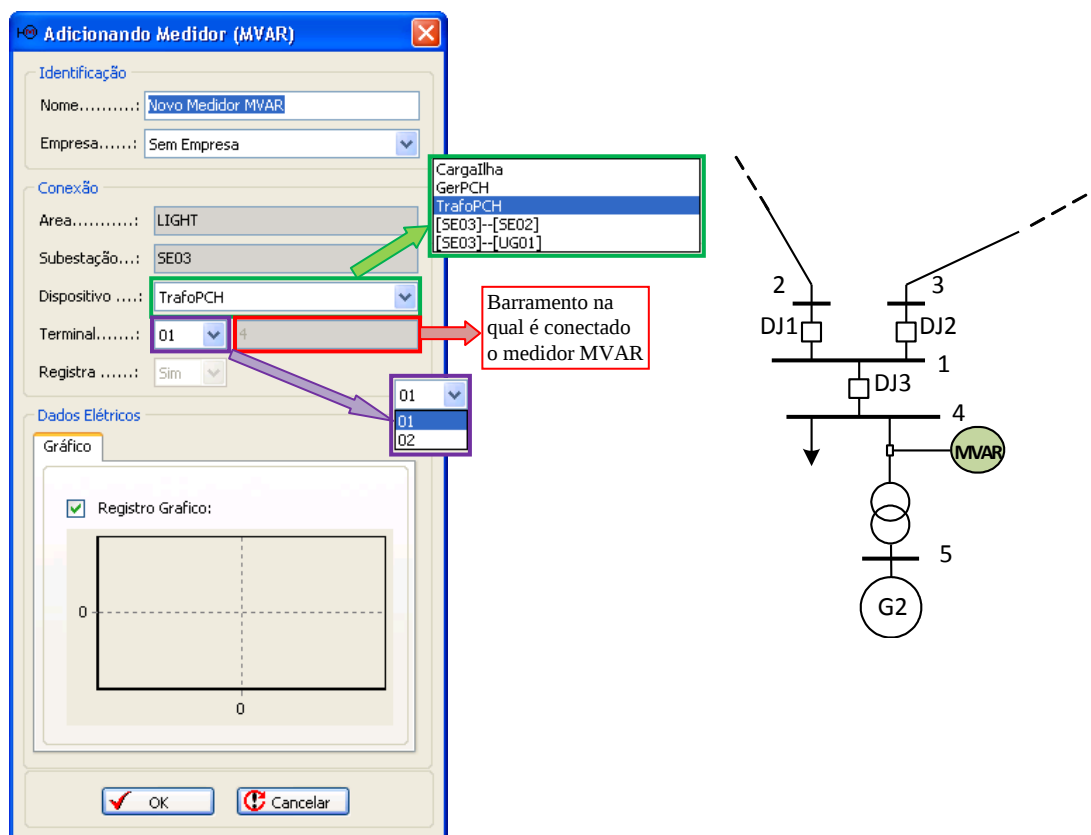


Figura D.7 – Medidor de Potência Reativa (MVAR) e diagrama de conexão

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)

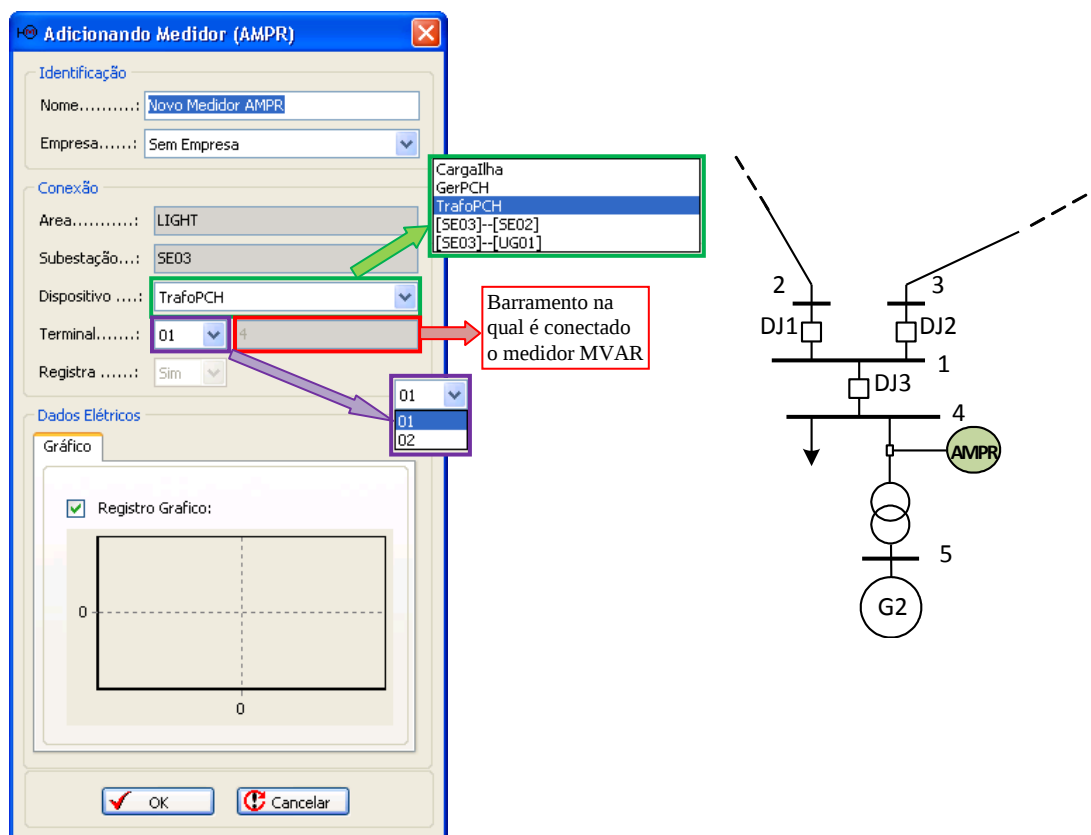


Figura D.8 – Medidor de Corrente (AMPR) e diagrama de conexão

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

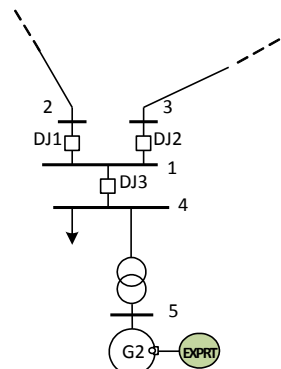
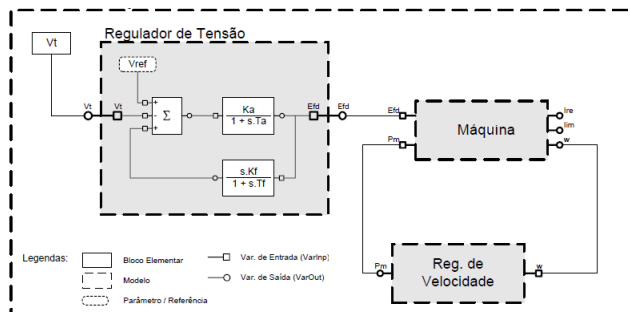


Figura D.9 – Representação esquemática do gerador/motor com seus reguladores e diagrama de conexão

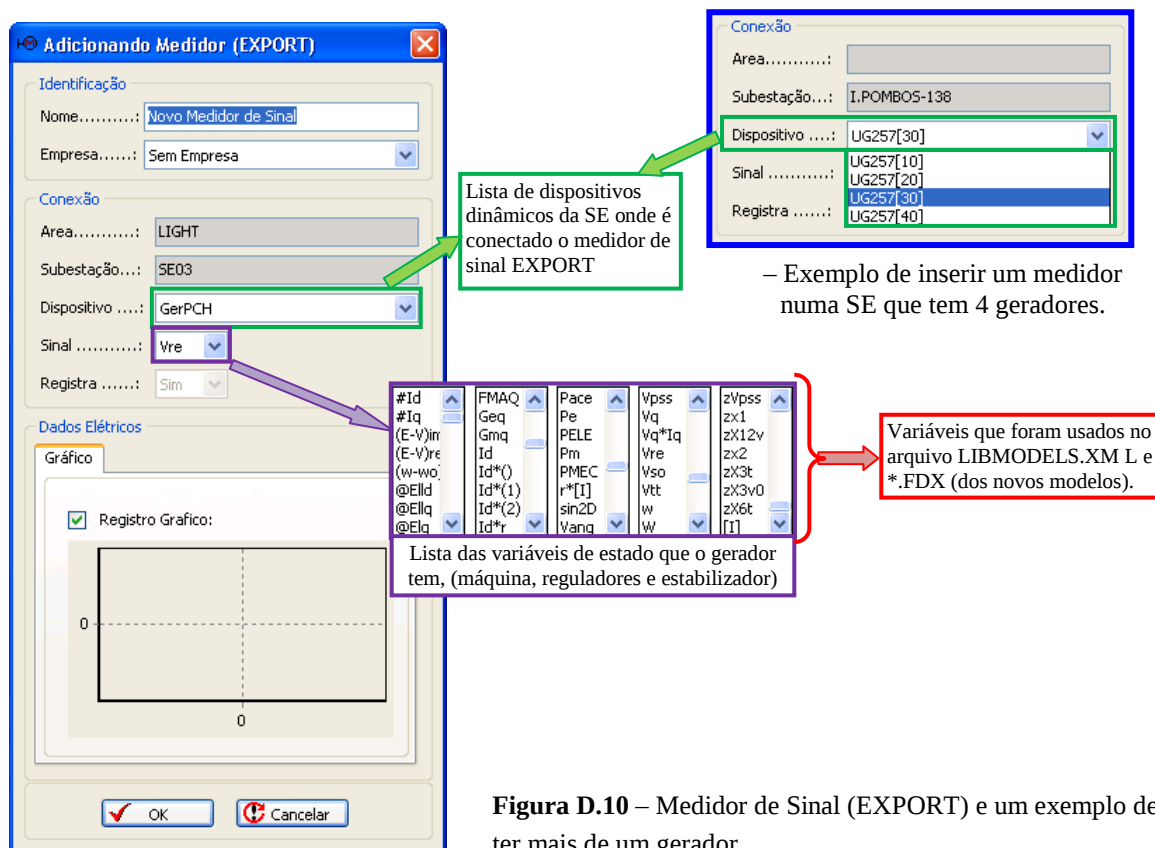


Figura D.10 – Medidor de Sinal (EXPORT) e um exemplo de ter mais de um gerador

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).

E. 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).

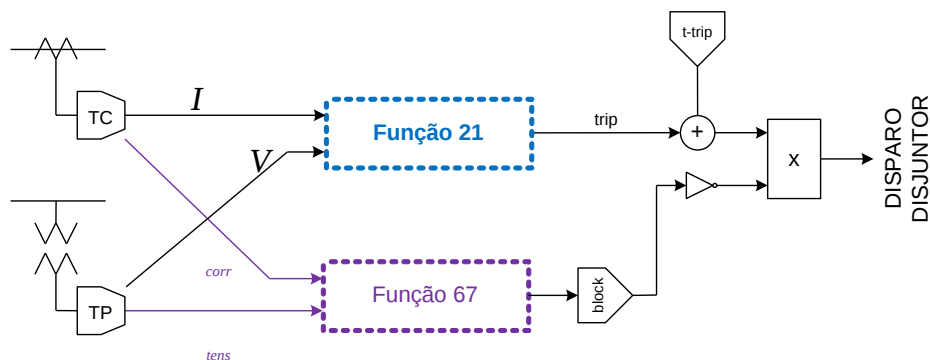


Figura E.1 – Modelo do Relé de Distância (Relé 21)

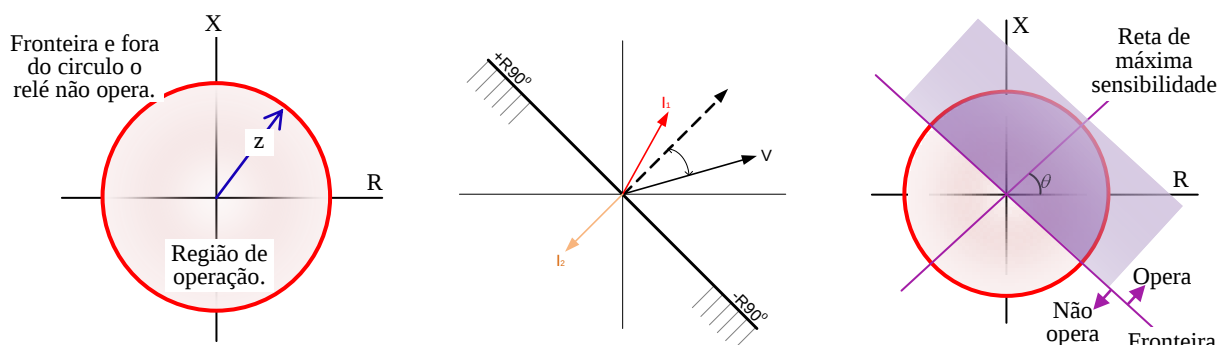


Figura E.2 – Região de operação, Função direcional e Relé 21 com diferencial

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.

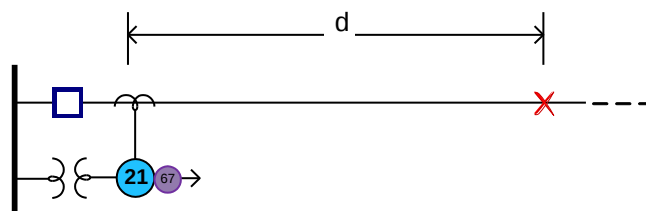


Figura E.3 – Relé de Distância no sistema de potência.

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:

$$Z_F = V_F / I_F$$

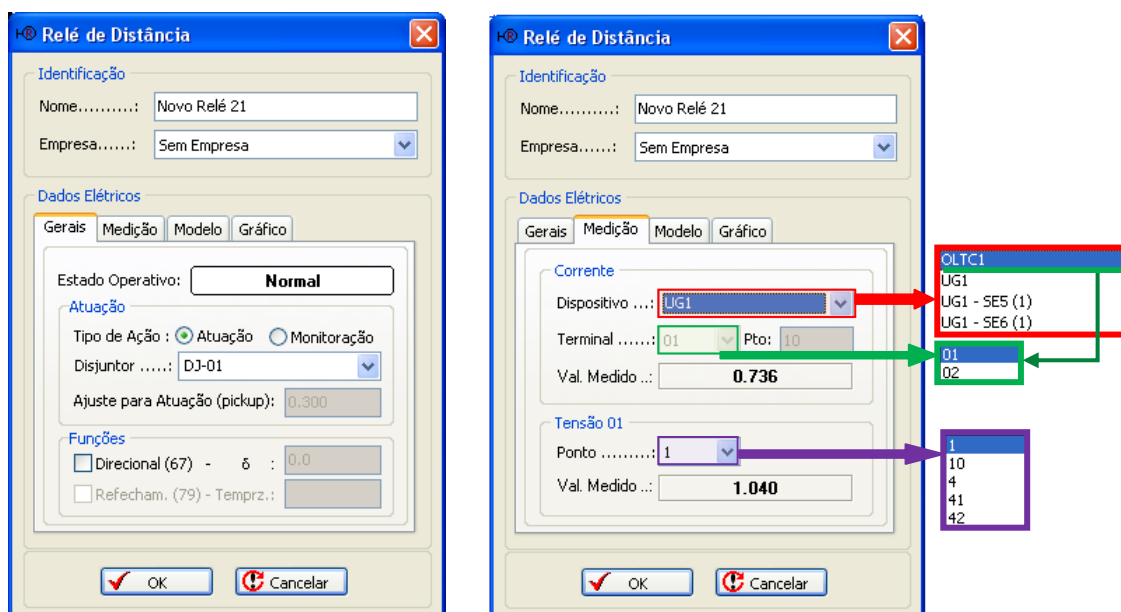


Figura E.4 – Relé 21: Gerais e Medição

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.

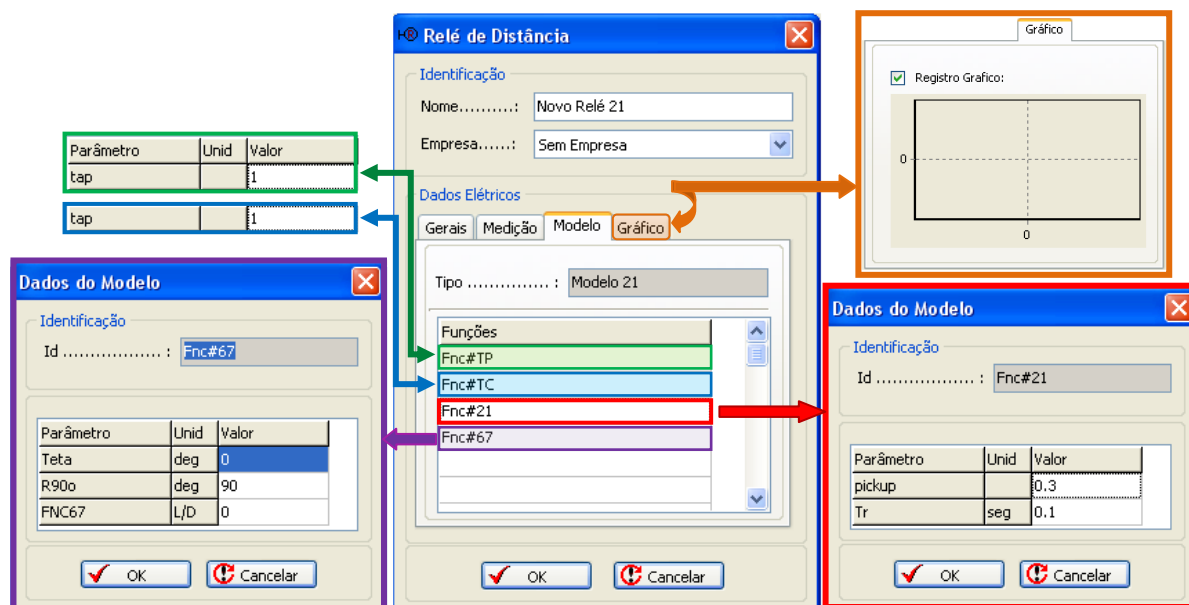


Figura E.5 – Relé 21: Modelo e Gráfico

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.

Grafico:

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.

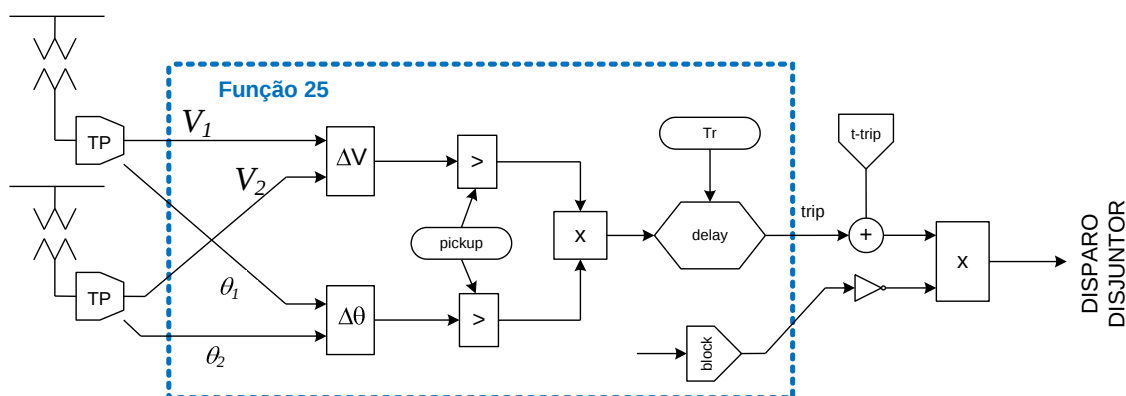


Figura E.6 – Modelo do Relé de Sincronismo (Relé 25)

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.

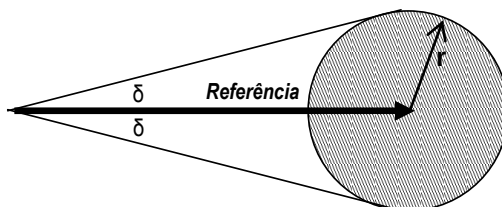


Figura E.7 – Relé de Sincronismo: Função 25

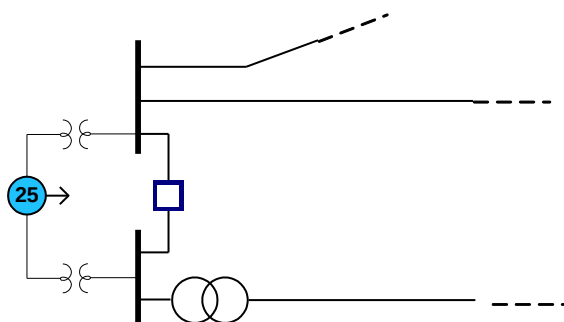


Figura E.8 Relé de Sincronismo no sistema de potência.

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 (tr) para a atuação do disjuntor.

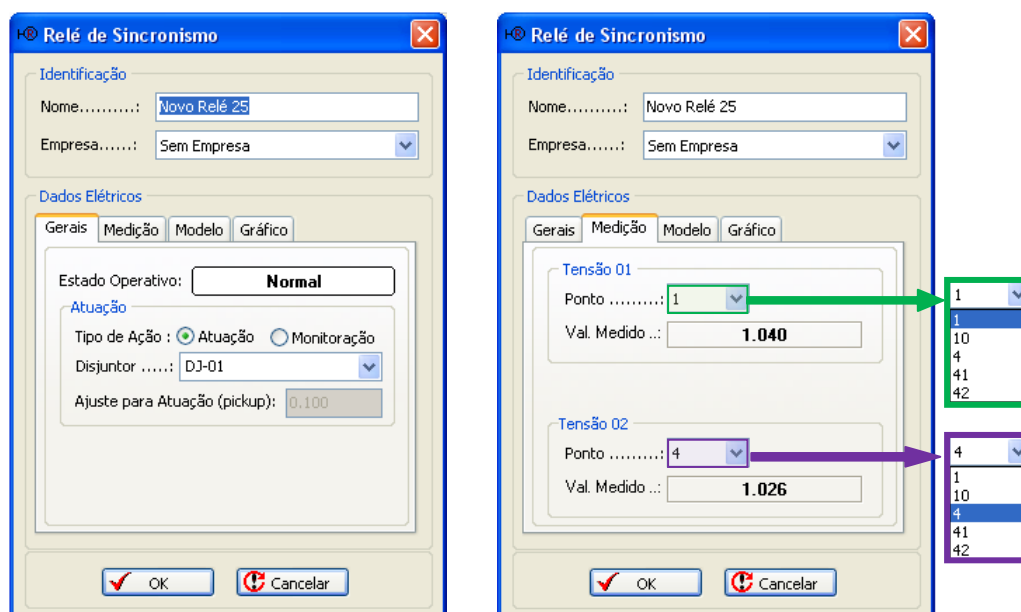


Figura E.9 – Relé 25: Gerais e Medição

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.

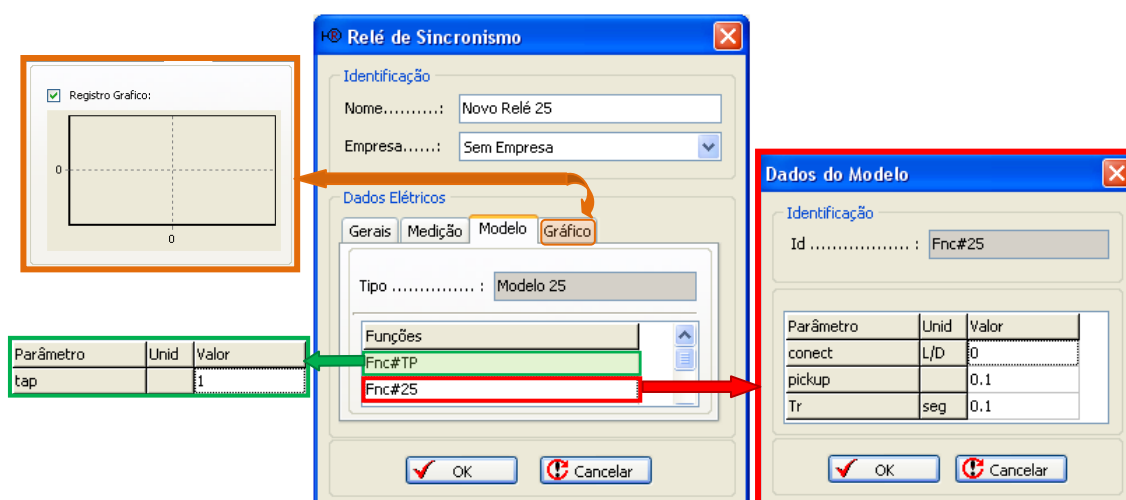


Figura E.10 – Relé 25: Modelo e Gráfico

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.

Grafico:

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.

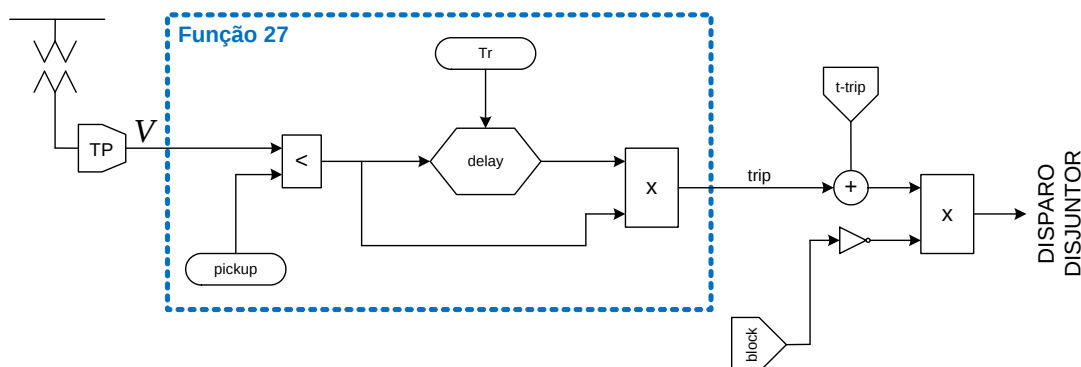


Figura E.11 – Modelo do Relé de Sub Tensão (Relé 27)



Figura E.12 – Relé de Sub Tensão no sistema de potência

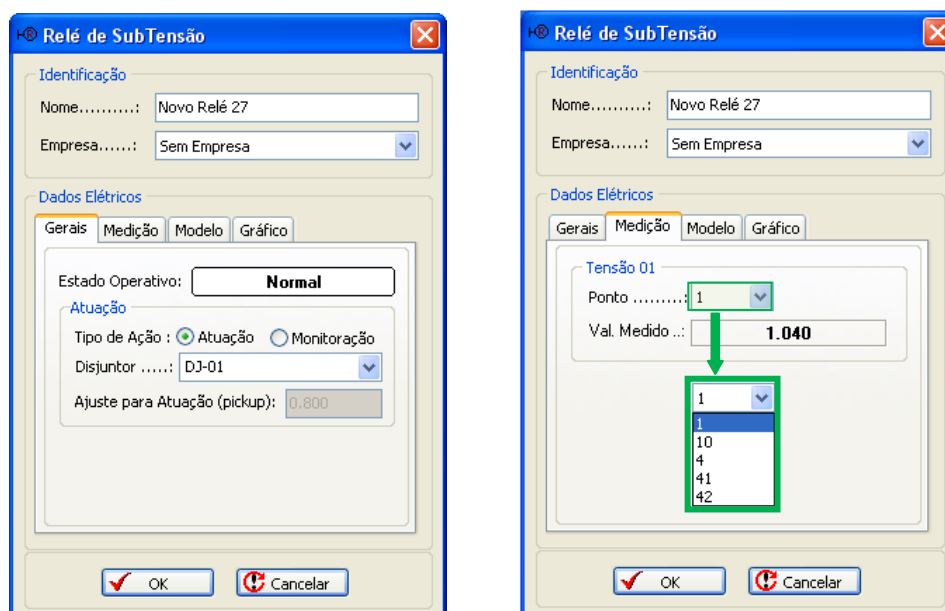


Figura E.13 – Relé 27: Gerais e Medição

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 Modelo/Fun#27.

Medição:

Ponto: Onde a Tensão será medida.

Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

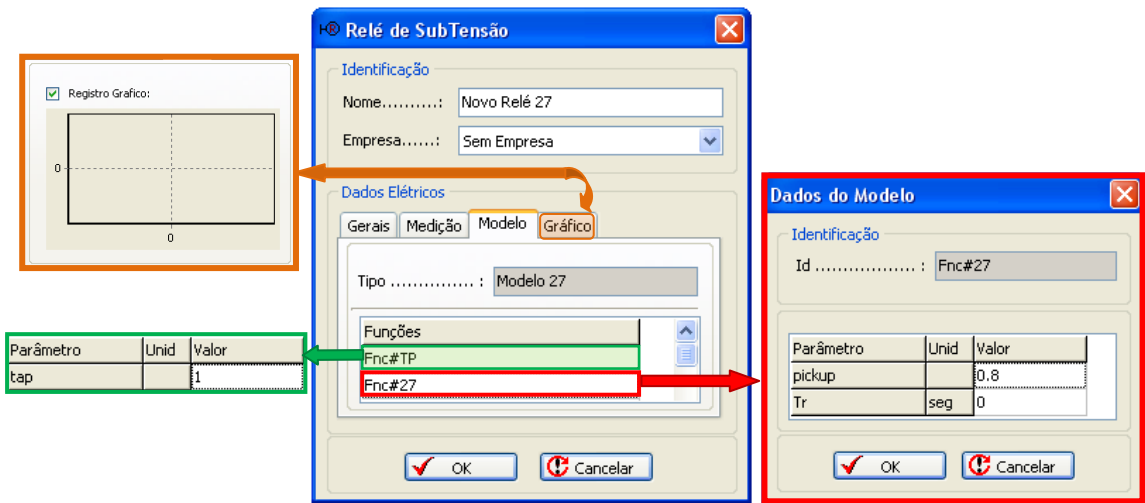


Figura E.14 – Relé 27: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#27: [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 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.

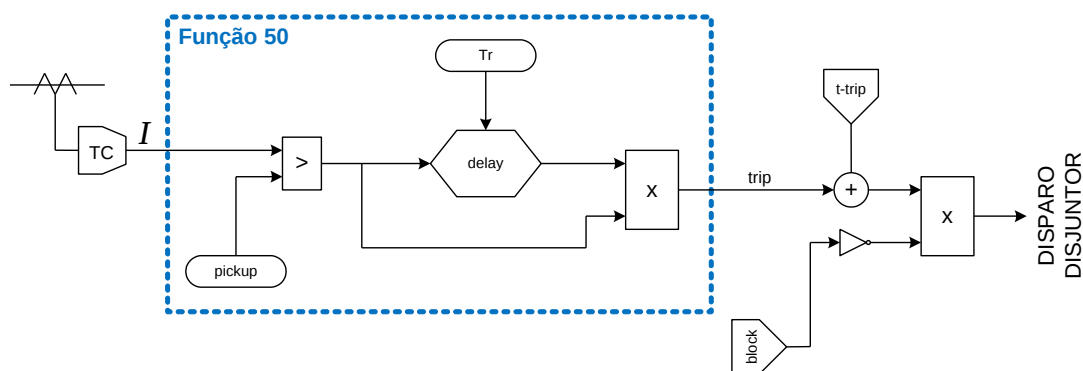


Figura E.15 – Modelo do Relé de Sobre Corrente Instantâneo (Relé 50)

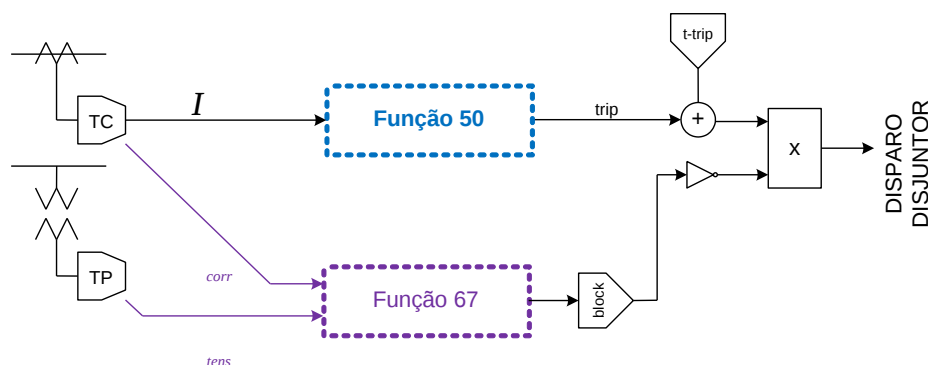


Figura E.16 – Relé de Sobre Corrente Instantâneo com a função diferencial

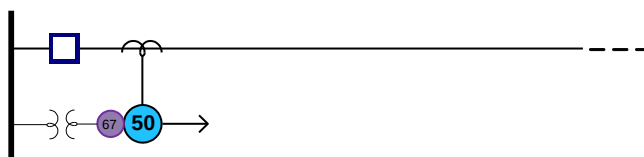


Figura E.17 – Relé de Sobre Corrente no sistema de potência

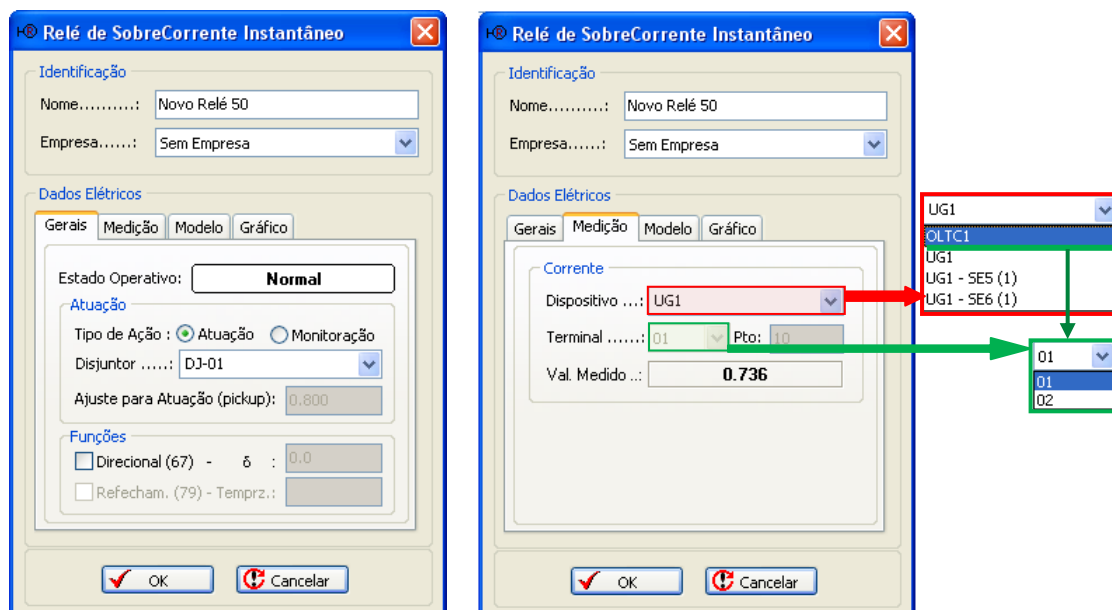


Figura E.18 – Relé 50: Gerais e Medição

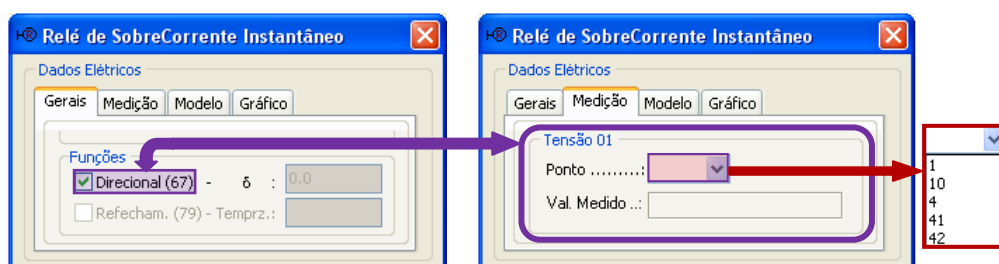


Figura E.19 – Relé 50: Ativando o modelo da Função 67

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.

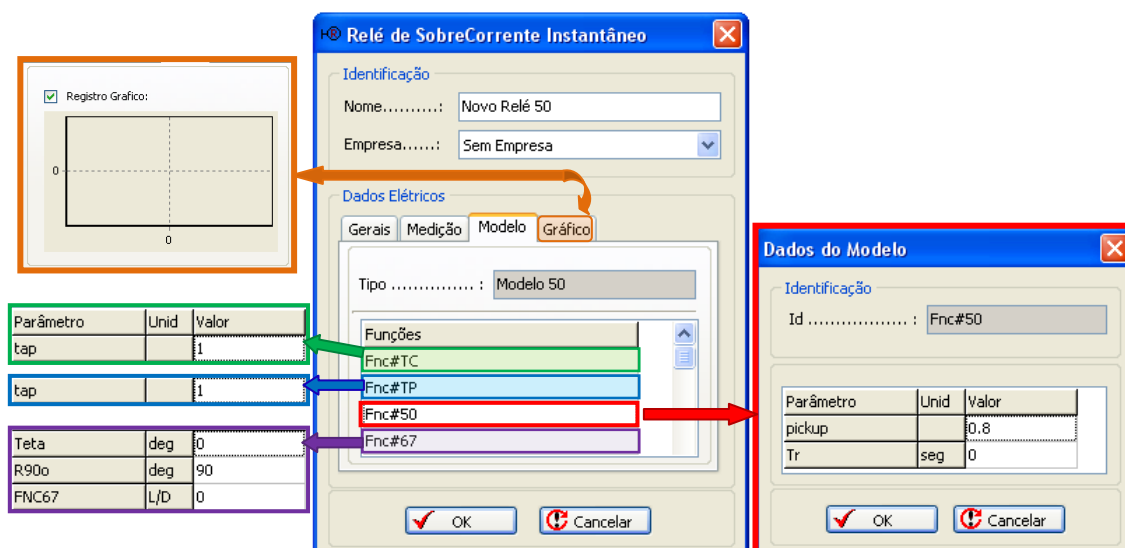


Figura E.20 – Relé 50: Modelo e Gráfico

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)

Gráfico:

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 (T_r) depende dos parâmetros K_1 e K_2 , 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.

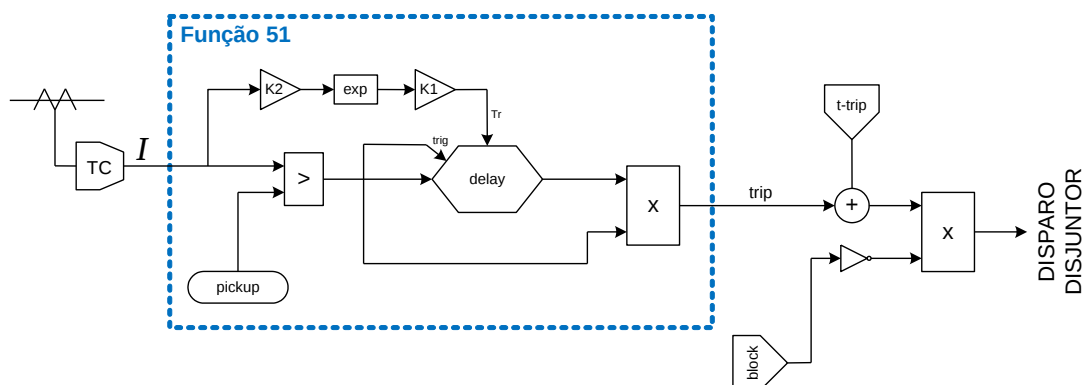


Figura E.21 – Modelo do Relé de Sobre Corrente Temporizado (Relé 51)

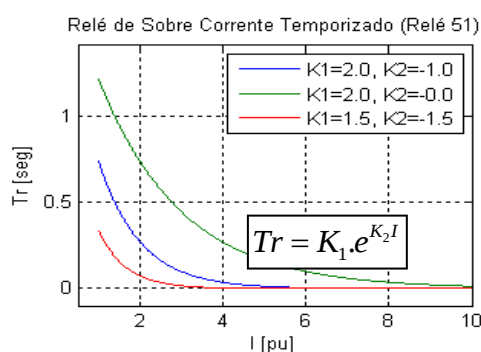


Figura E.22 – Temporização do Relé de Sobre Corrente (variação de K_1 e K_2)

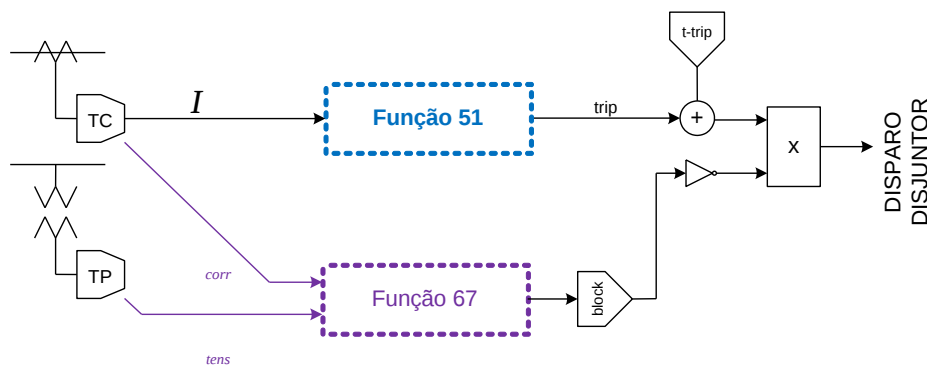


Figura E.23 – Relé de Sobre Corrente Temporizado com a função diferencial

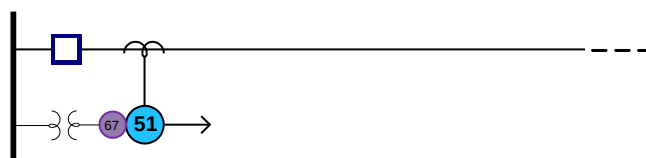


Figura E.24 – Relé de Sobre Corrente Temporizado no sistema de potência

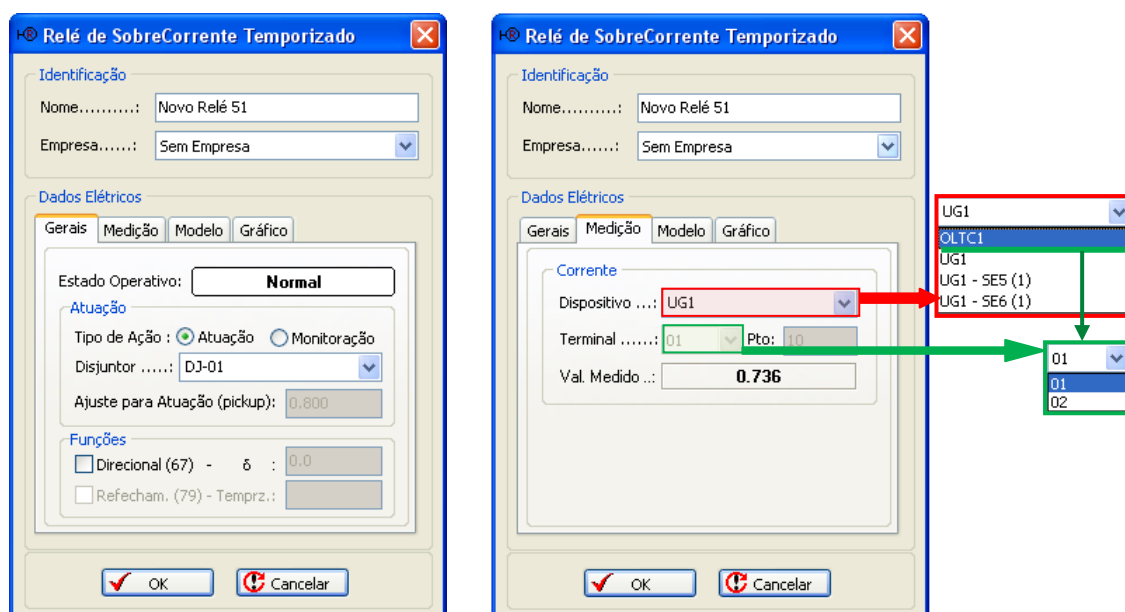


Figura E.25 – Relé 51: Gerais e Medição

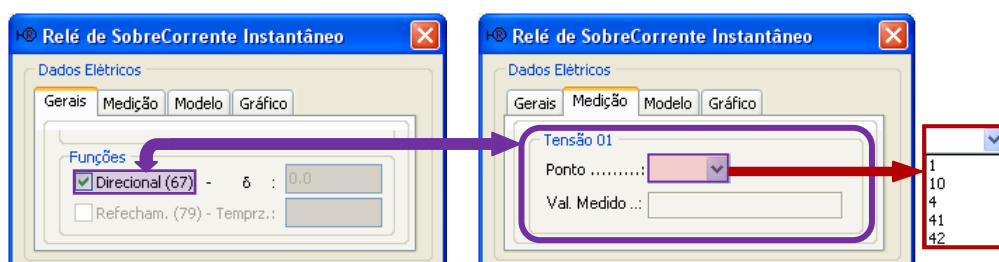


Figura E.26 – Relé 51: Ativando o modelo da Função 67

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#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.

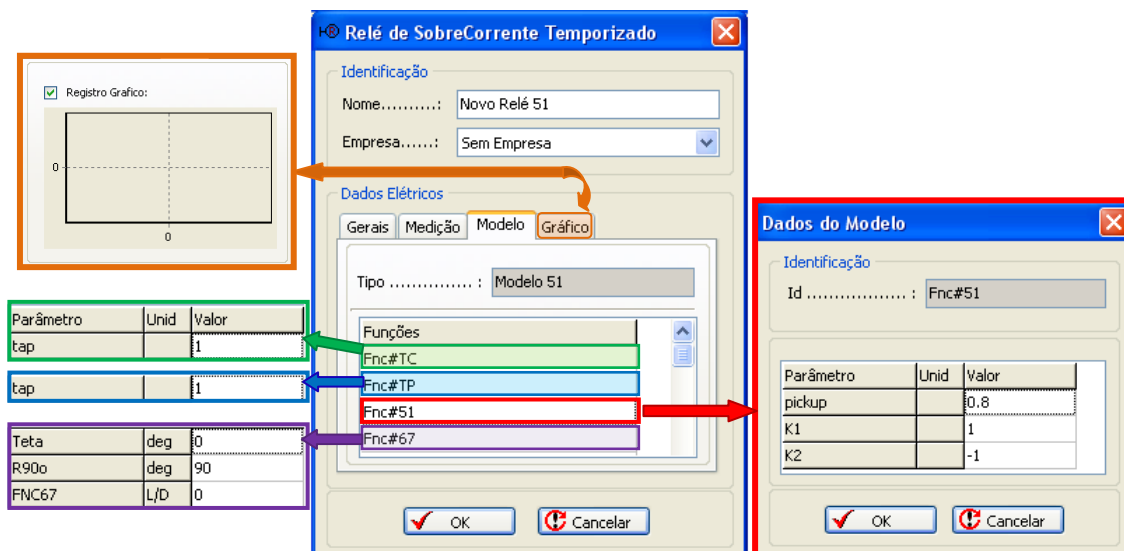


Figura E.27 – Relé 51: Modelo e Gráfico

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.

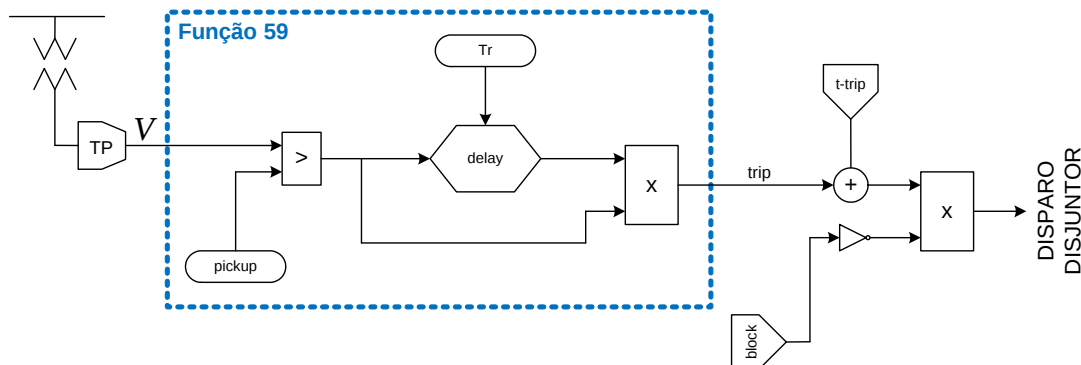


Figura E.28 – Modelo do Relé de Sobre Tensão (Relé 59)



Figura E.29 – Relé de Sobre Tensão no sistema de potência

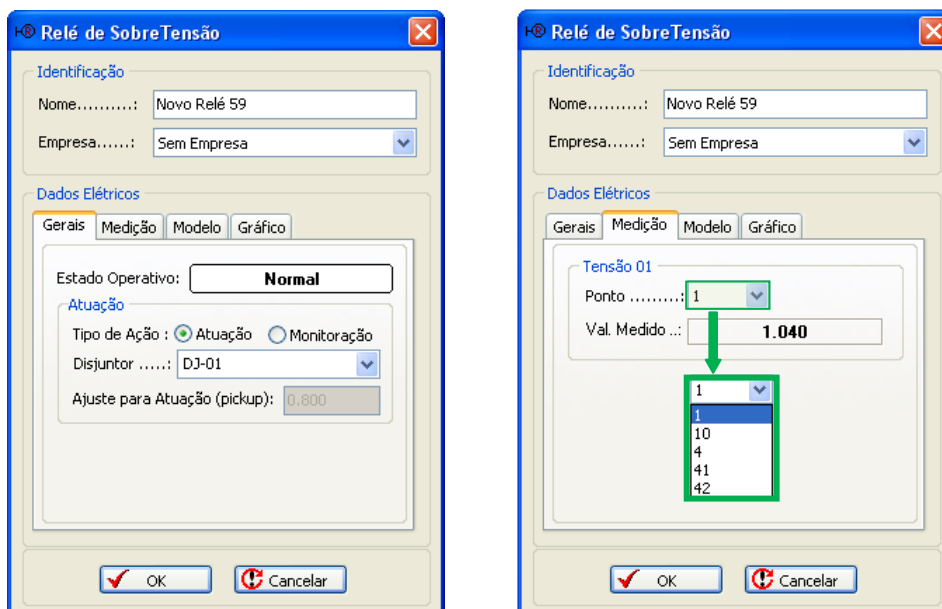


Figura E.30 – Relé 59: Gerais e Medição

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.

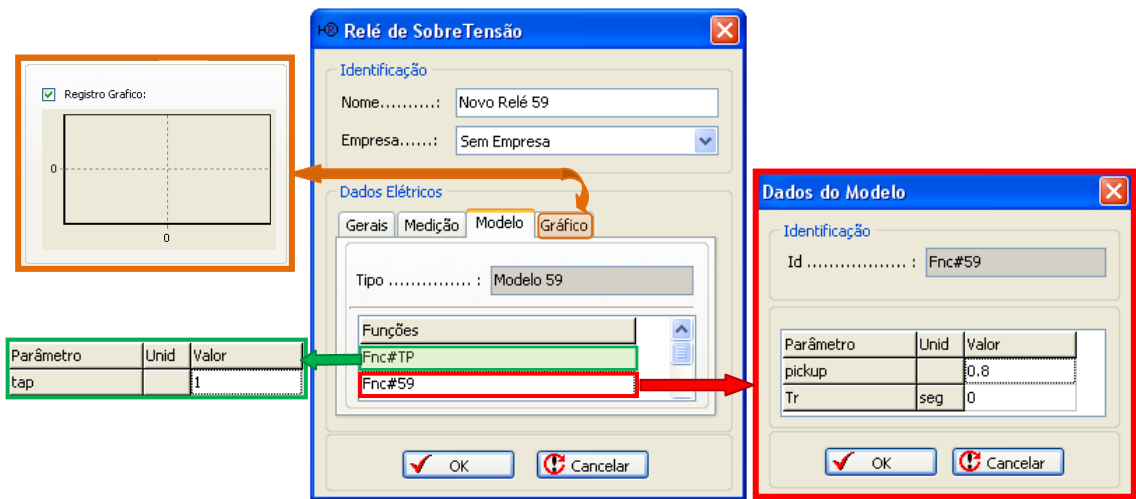


Figura E.31 – Relé 59: Modelo e Gráfico

Modelo:

Fun#TP: [tap] do transformador de potência

Fun#59: [pickup]: ajuste do relé para que este atue caso o valor medido atinge o pickup;

[Tr]: Tempo de retardo para a atuação do disjuntor.

Gráfico:

Para visualizar os valor de ajuste e valores medidos

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.

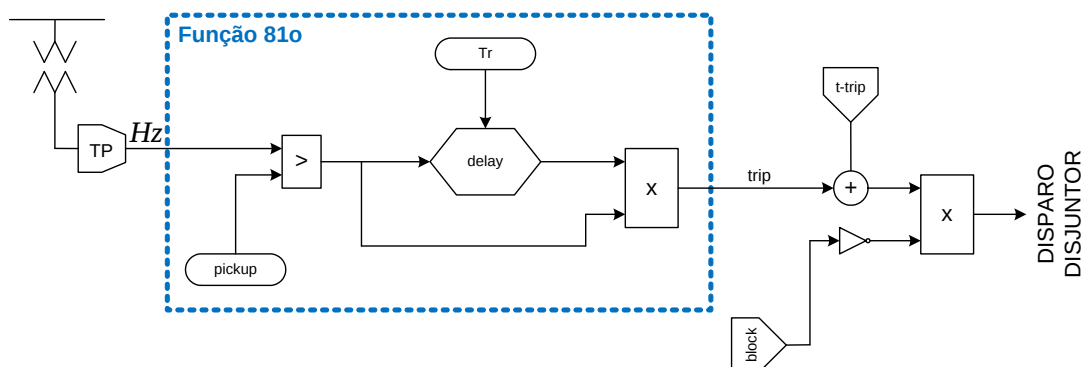


Figura E.32 – Modelo do Relé de Sobre Frequência (Relé 81o)

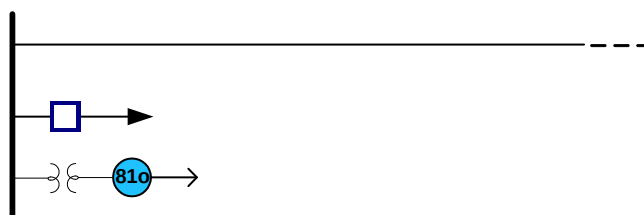


Figura E.33 – Relé de Sobre Frequência no sistema de potência

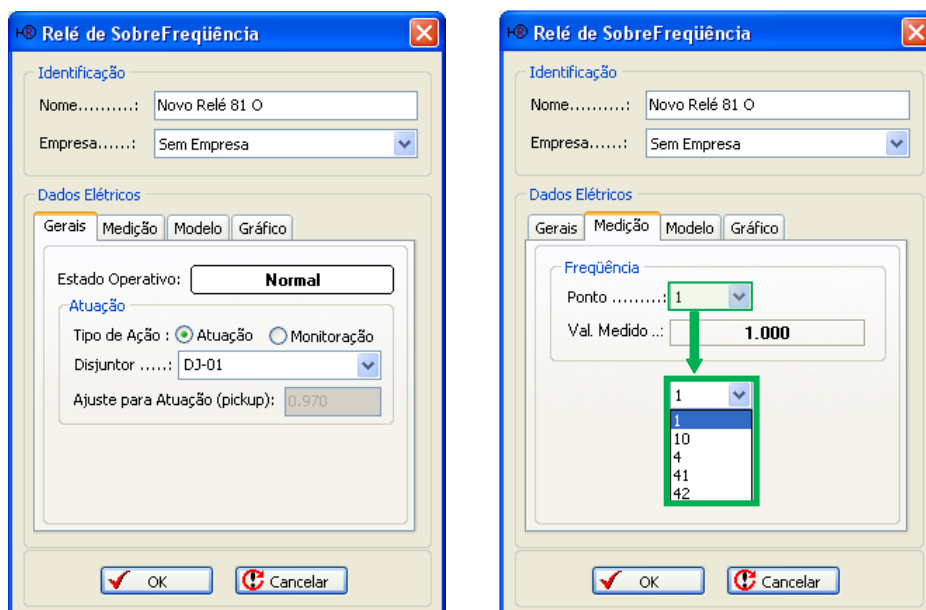


Figura E.34 – Relé 81o: Gerais e Medição

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 freqüência será medida.

Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

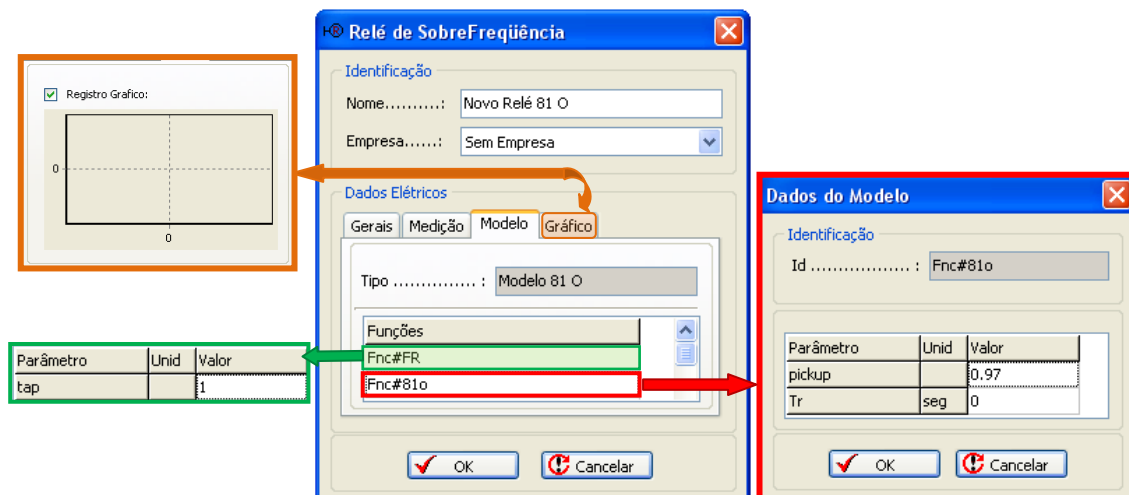


Figura E.35 – Relé 81o: Modelo e Gráfico

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 valor 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.

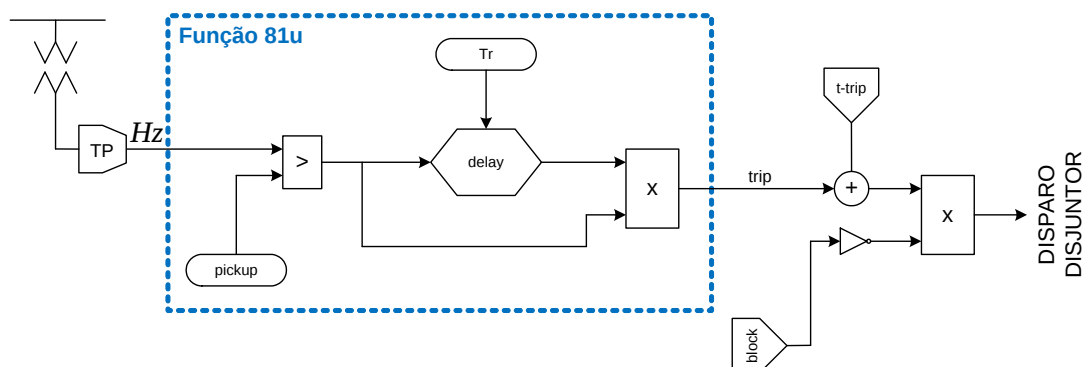


Figura E.36 – Modelo do Relé de Sub Frequência (Relé 81u)

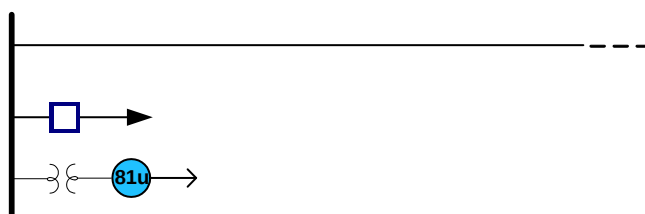


Figura E.37 – Relé de Sub Frequência no sistema de potência

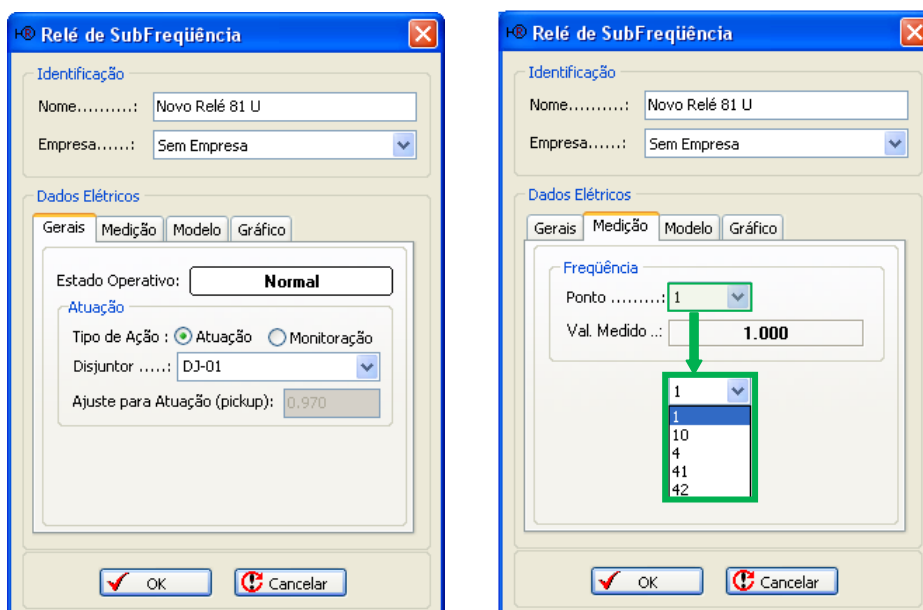


Figura E.38 – Relé 81o: Gerais e Medição

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 freqüência será medida.

Valor medido: valores medidos no ponto indicado.

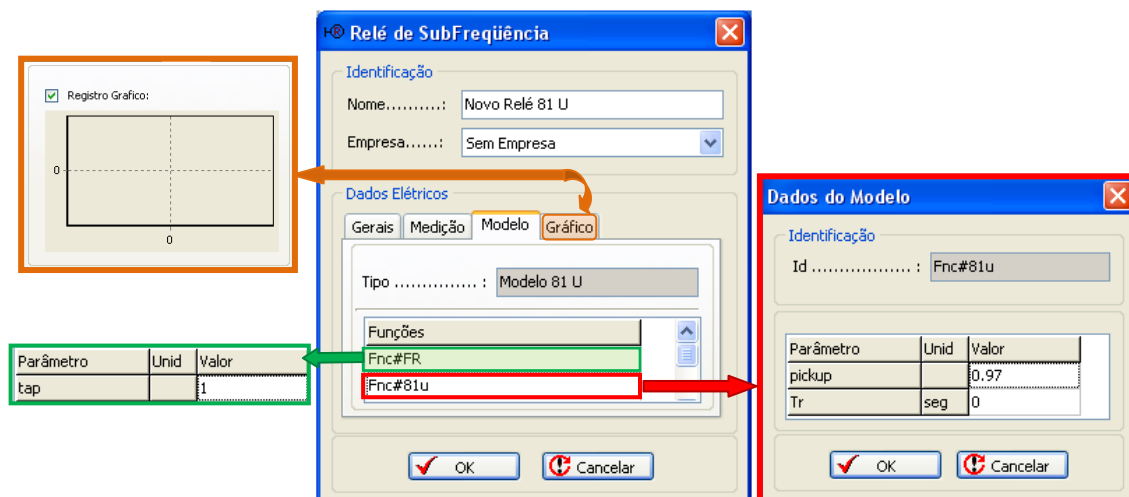


Figura E.39 – Relé 81u: Modelo e Gráfico

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.

Gráfico:

Para visualizar os valor de ajuste e valores medidos

REFERÊNCIA:

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [2] J. Arrillaga, C. P. Arnold, and B. J. Harker , *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1983.
- [3] P.M. Anderson, *Power System protection*, McGraw Hill & IEEE-Press, 1999.
- [3] 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.
- [4] P. Pourbeik, D. G. Ramey, N. Abi-Samra, D. Brooks & A. Gaikwad, “Vulnerability of Large Steam Turbine Generators to Torsional Interactions During Electrical Grid Disturbances,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1250-1258, August 2007.
- [5] ONS, “Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos,” Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3.