



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

SÉRGIO GONÇALVES DE SOUZA JÚNIOR

**APRESENTAÇÃO E APLICAÇÃO DO SOFTWARE ANAFAS EM
ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO**

Uberlândia
2018

SÉRGIO GONÇALVES DE SOUZA JUNIOR

**APRESENTAÇÃO E APLICAÇÃO DO SOFTWARE ANAFAS EM
ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Isaque Nogueira Gondim

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e amigos que me incentivaram durante o curso e me deram força para concluir etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas oportunidades a mim concedidas.

Aos meus pais, Maria de Fátima de Jesus e Sérgio Gonçalves de Souza, e à minha irmã Ana Paula Gonçalves de Souza pelo carinho, atenção e suporte que me foi dado durante essa trajetória.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e motivação durante as horas de estudos, necessários nesta caminhada acadêmica e pelas amizades duradouras e verdadeiras.

Aos professores que se dedicaram e contribuíram para a minha formação, não medindo esforços para transmitir seu conhecimento.

Ao Prof. Isaque Nogueira Gondim pela ajuda, confiança e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

À banca examinadora pela disponibilidade para participar da avaliação deste trabalho.

RESUMO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) sofre modificações a todo tempo, com entrada e saída de elementos da rede. Essas modificações se dão, devido às alterações e ampliações nos sistemas de geração e transmissão, bem como alterações de carregamento do sistema.

Visando minimizar os impactos causados por essas modificações e acessos, e garantir a correta conexão por parte dos acessantes, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) propõe regras de acesso à rede consolidadas em Procedimentos de Rede. Com o intuito de atender aos critérios estabelecidos nos Procedimentos de Rede e facilitar os estudos de acesso, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desenvolveu o ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) que é um software de análise de curto-circuito na rede elétrica, capaz de simular faltas simultâneas, orientar resultados a ponto de falta ou a ponto de monitoração, realizar equivalentes de rede, estudo de superação de disjuntores, entre outros.

Integrado ao ANAFAS, o SAPRE (Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas) que oferece uma interface de edição de diagramas, facilitando as análises dos fenômenos elétricos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar as funcionalidades destes softwares, de maneira explicativa e exemplificada através de estudo de casos.

Palavras-Chave: ANAFAS, CEPEL, curto-circuito, falta, SAPRE, simulação, software.

ABSTRACT

The National Interconnected System (SIN) undergoes modifications at all times, with input and output from network elements. These changes occur because of changes and expansions in the generation and transmission systems, as well as system load changes.

In order to minimize the impacts caused by these modifications and accesses, and to guarantee the correct connection by the accessors, the National Electric System Operator (ONS) proposes network access rules consolidated in Network Procedures. In order to meet the criteria established in the Network Procedures and to facilitate access studies, the Electrical Energy Research Center (CEPEL) developed the ANAFAS (Simultaneous Fault Analysis), which is a network short circuit analysis software electrical, capable of simulating simultaneous faults, orient results to the point of fault or to the point of monitoring, perform network equivalents, study of breaker overcoming, among others.

Integrated with ANAFAS, SAPRE (System of Analysis and Design of Electrical Networks) that offers an interface of editing diagrams, facilitating the analysis of electrical phenomena.

This work aims to present the functionalities of these softwares, in an explanatory and exemplified way through case studies.

Key Words: ANAFAS, CEPEL, short circuit, fault, SAPRE, simulation, software.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - INTERFACE ANAFAS.....	17
FIGURA 2 - INTERFACE DO SAPRE.....	19
FIGURA 3 - ACESSO À LISTA DE COMPONENTES PELO MENU [DADOS].....	20
FIGURA 4 - ACESSO À BARRA DE ATALHOS PARA A INSERÇÃO DOS ELEMENTOS DO SISTEMA.....	21
FIGURA 5 - BARRA DE FERRAMENTA DE DESENHO.....	21
FIGURA 6 - BOTÃO "INSERIR OU DESENHAR ELEMENTO".....	22
FIGURA 7 - MENU SUSPENSO DE DESENHO.....	22
FIGURA 8 - JANELA DE DADOS DE BARRA CA.....	24
FIGURA 9 - DADOS DE ÁREA.....	25
FIGURA 10 - DADOS DE GRUPO BASE DE TENSÃO.....	26
FIGURA 11 - EDIÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREA.....	27
FIGURA 12 - EDIÇÃO DOS DADOS GRÁFICOS DO GRUPO BASE DE TENSÃO.....	27
FIGURA 13 - ÍCONE LINHA CA.....	28
FIGURA 14 - PARÂMETROS DA LINHA CA.....	29
FIGURA 15 - INSERINDO IMPEDÂNCIA MÚTUA.....	30
FIGURA 16 – BOTÃO IMPEDÂNCIA MÚTUA LOCALIZADA NA BARRA DE DESENHO.....	30
FIGURA 17 - PARÂMETROS DE IMPEDÂNCIA MÚTUA.....	31
FIGURA 18 – BOTÃO OBTER INFORMAÇÕES DO ELEMENTO.....	32
FIGURA 19 - JANELA DE INFORMAÇÕES DE IMPEDÂNCIAS MÚTUAS DA LINHA.....	33
FIGURA 20 - JANELA EDITAR TRECHOS DE LINHA.....	33
FIGURA 21 - BOTÃO EXIBIR LINHAS COM MÚTUAS E CIRCUITO COM MÚTUAS.....	34
FIGURA 22 - SENTIDOS DA CORRENTE INDUTORA E DA TENSÃO INDUZIDA PARA VALORES POSITIVOS DE MÚTUA.....	35
FIGURA 23 - ÍCONE DO MOTOR DE INDUÇÃO NA BARRA DE DESENHO.....	35
FIGURA 24 - DADOS DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	37
FIGURA 25 - MODELAGEM DOS MOTORES DE INDUÇÃO PELO SAPRE.....	38
FIGURA 26 - ÍCONE DO COMPENSADOR ESTATICO NA BARRA DE DESENHO.....	39
FIGURA 27 - ÍCONE SHUNT DE BARRA.....	39
FIGURA 28 - DADOS DE SHUNT DE BARRA E DE COMPENSADOR ESTATICO.....	40
FIGURA 29 - MODELAGEM DOS SHUNTS DE BARRA E COMPENSADORES ESTATICOS PELO SAPRE.....	41
FIGURA 30 - INSERINDO GERADORES PELO MENU "DADOS".....	42
FIGURA 31 - LOCALIZAÇÃO DO BOTÃO GERADOR INDIVIDUALIZADO NA BARRA DE DESENHO.....	42
FIGURA 32 - JANELA DE DADOS DO GERADOR.....	43
FIGURA 33- MODELAGEM NA FALTA DE GERADORES DE INDUÇÃO/DUPLAMENTE ALIMENTADOS	44
FIGURA 34 - MODELAGEM DOS GERADORES EÓLICOS SÍNCRONOS COM INVERSOR PERANTE A FALTA.....	45
FIGURA 35 - CAMPO DE HABILITAÇÃO DO GERADOR EÓLICO.....	46
FIGURA 36 - CAMPOS PARA A CONFIGURAÇÃO DOS GERADORES EÓLICOS SÍNCRONOS COM INVERSOR.....	47
FIGURA 37 - ÍCONE DE CARGA INDIVIDUALIZADA NA BARRA DE DESENHO.....	48
FIGURA 38 - JANELA DE DADOS DE CARGA.....	48
FIGURA 39 - ÍCONE DO COMPENSADOR SÉRIE NA BARRA DE DESENHO.....	49
FIGURA 40 - JANELA DE DADOS DE CONFIGURAÇÃO DO COMPENSADOR SÉRIE.....	50
FIGURA 41 - DADOS DE PROTEÇÃO DE CAPACITOR SÉRIE.....	51
FIGURA 42 - ARRANJO DE PROTEÇÕES MOV PARA CAPACITORES SÉRIE.....	52

FIGURA 43 - ÍCONE TRANSFORMADOR NA BARRA DE DESENHO	52
FIGURA 44 - INSERIR TRANSFORMADOR ATRAVÉS DO MENU "DADOS"	53
FIGURA 45 - JANELA DE DADOS DE TRANSFORMADOR DE 2 ENROLAMENTOS.....	54
FIGURA 46 - DIAGRAMAS DE SEQUÊNCIA ZERO.....	55
FIGURA 47 - EXEMPLO GRÁFICO DE LIGAÇÃO DE TRANSFORMADOR DE 3 ENROLAMENTOS	57
FIGURA 48 - TRANSFORMADOR COM O PRIMÁRIO LIGADO EM BARRA FICTÍCIA COMO PARTE DO ARRANJO DE TRAFOS DE 3 ENROLAMENTOS	57
FIGURA 49 - ÍCONE DO TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO NA BARRA DE DESENHOS.....	58
FIGURA 50 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DE DADOS DE TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO ..	58
FIGURA 51 - ACESSO AO MENU DE MUDANÇA DE BASE DO SISTEMA	59
FIGURA 52 - JANELA DE MUDANÇA DE BASE DO SISTEMA	59
FIGURA 53 - BARRA DE FERRAMENTAS DE AJUSTE DE DESENHO	60
FIGURA 54 - ENUMERAÇÃO DOS BOTÕES DA BARRA DE FERRAMENTAS DE AJUSTE DE DESENHO	60
FIGURA 55 - EXEMPLO DE ESPECIFICAÇÃO DE FALTA COM INTERVALOS DE PONTOS EM LINHA CA	64
FIGURA 56 - CRITÉRIO PARA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES POR CONSTANTE DE TEMPO (X/R) ..	66
FIGURA 57 - SUBCONJUNTOS E RELAÇÃO (X/R).....	67
FIGURA 58 - CONDIÇÕES DE FALTA DA SEGUNDA ETAPA DO ESTUDO DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES	68
FIGURA 59 - COMBINAÇÃO LINEAR DE FATORES	71
FIGURA 60 - POLARIDADE DE MEDIÇÕES DE CORRENTE E POTÊNCIA	71
FIGURA 61 - SISTEMA EXEMPLO	73
FIGURA 62 - VISÃO GERAL DO DIAGRAMA UNIFILAR	76
FIGURA 63 - CONFIGURAÇÃO DO GERADOR 1	77
FIGURA 64 - CONFIGURAÇÃO DO TRANSFORMADOR 1	78
FIGURA 65 - LOCALIZAÇÃO DAS MÚTUAS NO DIAGRAMA UNIFILAR.....	79
FIGURA 66 - PARÂMETROS DA LINHA 3 (LT3)	79
FIGURA 67 - ACESSO AO ESTUDO INDIVIDUAL	80
FIGURA 68 - JANELA DO ESTUDO INDIVIDUAL	81
FIGURA 69 - JANELA DE DEFEITO SHUNT.....	81
FIGURA 70 - RESULTADOS NO DIAGRAMA PARA AS FALTAS SIMULTÂNEAS NAS BARRAS 2 E 7 – FASE A	82
FIGURA 71 - INDICAÇÃO DE GRANDEZAS NO DIAGRAMA.....	84
FIGURA 72 - JANELA DE OPÇÕES DE LEGENDA	85
FIGURA 73 - BOTÕES DE EXIBIÇÃO DE FASE E SEQUÊNCIA	86
FIGURA 74 - DIAGRAMA FASORIAL DA FALTA NA BARRA 2.....	86
FIGURA 75 - PORÇÃO DO RELATÓRIO DAS FALTAS SIMULTÂNEAS NAS BARRAS 2 E 7.....	87
FIGURA 76 - GRANDEZAS DO RELATÓRIO DE EXECUÇÃO	88
FIGURA 77 - PROCEDIMENTO DE ACESSO AO ESTUDO MACRO EM BARRA.....	89
FIGURA 78 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DE ESTUDO MACRO EM BARRAS.....	90
FIGURA 79 - JANELA DE ESPECIFICAÇÃO DE IMPEDÂNCIAS	91
FIGURA 80 - JANELA DE ESPECIFICAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE FALTA.....	91
FIGURA 81 - JANELA DE CASOS DE ESTUDO MACRO	92
FIGURA 82 - RESULTADOS DA FALTA TRIFÁSICA NA BARRA 3 COM IMPEDÂNCIA DE CURTO.....	93
FIGURA 83 - RESULTADO DE CURTO-CIRCUITO COM DESLIGAMENTO DA LT1	94
FIGURA 84 - RESULTADO DE CURTO-CIRCUITO COM DESLIGAMENTO DA LT2	94
FIGURA 85 - RESULTADO DE CURTO-CIRCUITO COM DESLIGAMENTO DA LT2.1	95
FIGURA 86 - RESULTADO DE CURTO-CIRCUITO COM DESLIGAMENTO DA LT8	95
FIGURA 87 - AMOSTRA DO RELATÓRIO DE FALTA ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA	98

FIGURA 88 - AMOSTRA DO RELATÓRIO DE FALTA PARA CURTO NA BARRA 3 COM IMPEDÂNCIA DE FALTA E DESLIGAMENTO DA LT1	99
FIGURA 89 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DE ESTUDO MACRO INTERMEDIÁRIO.....	100
FIGURA 90 – JANELA DE INSERÇÃO DE BARRAS LOCAIS	101
FIGURA 91 - JANELA DE CASOS DO ESTUDO MACRO PARA A FALTA INTERMEDIÁRIA.....	102
FIGURA 92 - FALTA MONOFÁSICA EM 50% DA LINHA	104
FIGURA 93 - JANELA DE CONSTANTES BÁSICAS	105
FIGURA 94 - RELATÓRIO DE FALTA INTERMEDIÁRIA.....	105
FIGURA 95 - ÍCONE DE PONTO DE MONITORAÇÃO NA BARRA DE DESENHO.....	106
FIGURA 96 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO PONTO DE MONITORAÇÃO.....	107
FIGURA 97 - JANELA DE INSERÇÃO DO PONTO DE MONITORAÇÃO.....	107
FIGURA 98 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DE GRANDEZAS MONITORADAS	108
FIGURA 99 - JANELA DE ESTUDO MACRO EM BARRAS COM RELATÓRIO DE EXECUÇÃO ORIENTADO A PONTO DE MONITORAÇÃO	109
FIGURA 100 - RESULTADO DO PONTO DE MONITORAÇÃO NO DIAGRAMA PARA A BARRA 7	110
FIGURA 101 - RESULTADO DO PONTO DE MONITORAÇÃO NO DIAGRAMA PARA A BARRA 9	111
FIGURA 102 - AMOSTRA DO RELATÓRIO DO ESTUDO ORIENTADO A PONTO DE MONITORAÇÃO	112
FIGURA 103 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DE CÁLCULO DE EQUIVALENTE	113
FIGURA 104 - SELEÇÃO DE BARRAS RETIDAS	114
FIGURA 105 - RELATÓRIO DE ESTATÍSTICAS DE EQUIVALENTE	114
FIGURA 106 - CIRCUITO EQUIVALENTADO	115
FIGURA 107 - ELEMENTOS NÃO DESENHADOS	115
FIGURA 108 - ÍCONE DO GERENCIADOR DE DADOS	116
FIGURA 109 - GERENCIADOR DE DADOS.....	117
FIGURA 110 - LINHA EQUIVALENTE	118
FIGURA 111 - RETENÇÃO DA BARRA 2 NO CÁLCULO DE EQUIVALENTES	119
FIGURA 112 - DADOS DE EQUIVALENTE E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	119
FIGURA 113 - CIRCUITO EQUIVALENTE E DADOS DE IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE.....	120
FIGURA 114 - RESULTADOS NO DIAGRAMA, DO CURTO TRIFÁSICO EM REDE EQUIVALENTADA	121

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICA DE TENSÃO DOS TRANSFORMADORES E GERADORES	74
TABELA 2 - IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA DOS ELEMENTOS DA REDE.....	74
TABELA 3 - TRECHOS ACOPLADOS E IMPEDÂNCIAS MÚTUAS	75
TABELA 4 - BARRAMENTOS DO SISTEMA	75
TABELA 5 - RESULTADOS DO CURTO MONOFÁSICO NA BARRA 2.....	83
TABELA 6 - RESULTADOS DO CURTO FASE-FASE-TERRA NA BARRA 7	83
TABELA 7 - CURTO TRIFÁSICO COM IMPEDÂNCIA DE FALTA NA BARRA 3.....	96
TABELA 8 - CURTO TRIFÁSICO COM IMPEDÂNCIA DE FALTA E DESLIGAMENTO DA LT1	96
TABELA 9 - CURTO TRIFÁSICO COM IMPEDÂNCIA DE FALTA E DESLIGAMENTO DA LT2	96
TABELA 10 - CURTO TRIFÁSICO COM IMPEDÂNCIA DE FALTA E DESLIGAMENTO DA LT2.1	97
TABELA 11 - CURTO TRIFÁSICO COM IMPEDÂNCIA DE FALTA E DESLIGAMENTO DA LT8	97
TABELA 12 - VALORES DE FALTA MONOFÁSICA INTERMEDIÁRIA NA LT3.....	103
TABELA 13 - TENSÕES PÓS-FALTA PARA O CURTO FASE-FASE-TERRA COM RESULTADO ORIENTADO A PONTO DE MONITORAÇÃO.....	110
TABELA 14 - CURTO TRIFÁSICO COM IMPEDÂNCIA DE FALTA NA BARRA 3, COM CIRCUITO EQUIVALENTADO	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAFAS – Análise de Faltas Simultâneas

ANAREDE – Análise de Redes Elétricas

FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SAPRE – Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas

SIN – Sistema Interligado Nacional

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	13
1.1- INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
1.2- JUSTIFICATIVA	13
1.3- OBJETIVO	14
1.4- ESTRUTURA DO TEXTO	15
2- O SIMULADOR	17
2.1- ANAFAS	17
2.2- SAPRE.....	18
3- CRIANDO UM SISTEMA ELÉTRICO NO SIMULADOR	20
3.1- FERRAMENTAS DE DESENHO E CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS	20
3.1.1- BARRA CA.....	22
3.1.2- DADOS DE ÁREA.....	24
3.1.3- DADOS DE GRUPO BASE DE TENSÃO.....	25
3.1.4- LINHA CA	27
3.1.5- IMPEDÂNCIAS MÚTUAS	29
3.1.6- MOTORES DE INDUÇÃO.....	35
3.1.7- SHUNTS DE BARRA E COMPENSADORES ESTÁTICOS	38
3.1.8- GERADORES SÍNCRONOS	41
3.1.9- CARGA INDIVIDUALIZADA	48
3.1.10- COMPENSADOR SÉRIE	49
3.1.11- TRANSFORMADORES DE 2 ENROLAMENTOS.....	52
3.1.12- TRANSFORMADORES DE 3 ENROLAMENTOS.....	56
3.1.13- TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO.....	58
3.1.14- BASE DO SISTEMA	59
3.1.15- BARRA DE FERRAMENTAS DE EDIÇÃO DE DESENHO	60
4- MODELAGEM DE FALTAS E MODOS DE ESTUDO.....	62
4.1- FALTAS SHUNT	62
4.2- FALTAS SÉRIE	62
4.3- ABERTURAS	62
4.4- REMOÇÃO	63
4.5- ESTUDO INDIVIDUAL.....	63
4.6- ESTUDO MACRO	63
4.6.1- PONTOS DE FALTA.....	63
4.6.2- CONTINGÊNCIAS.....	64
4.7- ESTUDO DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES	65
4.8- EQUIVALENTES PARA CURTO-CIRCUITO	69
4.9- EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO.....	69
4.10- MODOS DE SOLUÇÃO	70
4.10.1- SOLUÇÃO ORIENTADA A PONTO DE FALTA	70
4.10.2- SOLUÇÃO ORIENTADA A PONTO DE MONITORAÇÃO.....	70
5- ESTUDO DE CASOS	73
5.1- APRESENTAÇÃO DOS DADOS DOS COMPONENTES DO SISTEMA	73
5.2- MONTAGEM DO DIAGRAMA NO SAPRE	75

5.3- FALTAS SIMULTÂNEAS – CURTO MONOFÁSICO NA BARRA 2 E FASE-FASE-TERRA NA BARRA 7	80
5.3.1- <i>RESULTADO DA SIMULAÇÃO NO DIAGRAMA E ANÁLISE DA FALTA</i>	82
5.3.2- <i>SENTIDO DAS CORRENTES E VALORES NEGATIVOS</i>	84
5.3.3- <i>MUDANÇA DE UNIDADES DE VALORES DE CURTO NO DIAGRAMA</i>	85
5.3.4- <i>EXIBIÇÃO DE RESULTADOS POR FASE E POR SEQUÊNCIA</i>	85
5.3.5- <i>DIAGRAMAS FASORIAIS</i>	86
5.3.6- <i>LIMPAR RESULTADOS DO CURTO</i>	87
5.3.7- <i>RELATÓRIO DE FALTA</i>	87
5.4- ESTUDO MACRO EM BARRA – FALTA TRIFÁSICA NA BARRA 3 COM CONTINGÊNCIA E IMPEDÂNCIA DE FALTA	89
5.4.1- <i>CONFIGURAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE CURTO</i>	90
5.4.2- <i>ESPECIFICAÇÃO DAS CONTINGÊNCIAS</i>	92
5.4.3- <i>RESULTADO DA SIMULAÇÃO NO DIAGRAMA E ANÁLISE DA FALTA</i>	92
5.4.4- <i>RELATÓRIO DE FALTA</i>	98
5.5- ESTUDO MACRO INTERMEDIÁRIO – FALTA MONOFÁSICA NA LT3	100
5.5.1- <i>BARRAS LOCAIS E REMOTAS</i>	101
5.5.2- <i>RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO DIAGRAMA E ANÁLISE DA FALTA</i>	102
5.5.3- <i>GRAU DE VIZINHANÇA (“NBACK”)</i>	104
5.5.4- <i>RELATÓRIO DE FALTA</i>	105
5.6- FALTA FASE-FASE-TERRA COM SOLUÇÃO ORIENTADA À PONTO DE MONITORAÇÃO	106
5.6.1- <i>ESPECIFICAÇÃO DO PONTO DE MONITORAÇÃO</i>	106
5.6.2- <i>RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA FALTA</i>	109
5.6.3- <i>RELATÓRIO DE EXECUÇÃO ORIENTADO A PONTO DE MONITORAÇÃO</i>	111
5.7- EQUIVALENTES DE CURTO-CIRCUITO	112
5.7.1- <i>EQUIVALENTE ENTRE DUAS BARRAS</i>	113
5.7.2- <i>REDUÇÃO À UMA IMPEDÂNCIA SIMPLES (THÉVENIN)</i>	118
5.7.3- <i>CURTO-CIRCUITO EM REDE EQUIVALENTADA</i>	120
6- CONCLUSÃO	123
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

1- INTRODUÇÃO

1.1- INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

Como dito em [1], até meados do século 20, os sistemas elétricos eram supridos por pequenos geradores e transformadores, que funcionavam de maneira independente em relação a outros sistemas. No século XXI, os sistemas elétricos operam interligados, de maneira que haja suprimento para todas as cargas do sistema, garantindo o atendimento da demanda do mercado. Essa interligação acaba solicitando alguns cuidados na operação da rede, cujas características se diferem das antes vistas nos sistemas isolados. Por exemplo, como o autor em [2] cita, a existência de um maior número de máquinas interligadas, faz com que a corrente de curto-circuito seja mais severa, decorrendo-se da necessidade do dimensionamento de disjuntores de maior capacidade. Outra característica, são os fenômenos causados por um curto-circuito em uma rede elétrica, que causam perturbações em outras redes que estão conectadas a esta.

Assim, quando objetiva-se trabalhar com um sistema elétrico, principalmente interligado, é preciso ter em mente que é necessário um planejamento das ações, tanto de curto, quanto a longo prazo, para que se conheça as características e as reações do sistema perante as modificações. Um exemplo citado em [3], é o cálculo e uso das correntes de curto-circuito para os estudos de proteção e dimensionamentos de relés. A partir de modificações na estrutura do sistema, esses valores podem ser alterados, comprometendo o bom desempenho dos elementos antes dimensionados.

Diante disso, se faz necessário conhecer os procedimentos de cálculo bem como interpretar os resultados dos estudos de curto-circuito.

1.2- JUSTIFICATIVA

Os procedimentos de cálculos manuais para os estudos de curtos-circuitos, são eficazes em parte dos casos. Porém, se faz necessário uma maior agilidade e confiabilidade nos resultados obtidos, bem como a praticidade de se obter resultados quase instantaneamente, eliminando muitas vezes a tarefa cansativa de repetição de cálculos e procedimentos na determinação das grandezas desejadas (e devidamente, em consequência da dimensão dos sistemas estudados).

O software de simulação de curto-circuito ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) é considerado uma ferramenta de suma importância nas análises de falta na rede elétrica. É um dos softwares utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), e tido como referência nos Procedimentos de Rede. O ANAFAS está presente no Submódulo 18.2 - Relação dos Sistemas e Modelos Computacionais [4], bem como, utiliza as diretrizes presentes no Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos [5].

Perante a completude deste software, é de interesse que essa ferramenta seja entendida, estudada e aplicada, nos estudos de curto-circuito.

1.3- OBJETIVO

Diante do exposto, este trabalho trará uma visão prática da utilização do software de Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS) em integração com o Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas (SAPRE), aplicando-o em exemplos, deixando de maneira clara as análises de faltas, bem como algumas facilidades da sua utilização.

Os softwares SAPRE e ANAFAS, são propriedade do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que integra o grupo Eletrobrás [6], [7] e [8].

O programa computacional ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) é utilizado para cálculo de curtos-circuitos na rede elétrica. Permite a execução automática de grande número de faltas, inclusive deslizantes, resultados orientados a pontos de falta ou de monitoração, estudo automático de superação de disjuntores, obtenção de equivalentes e cálculo automático da evolução dos níveis de curto. É desenvolvido sob a linha de pesquisa “Planejamento, Operação e Análise de Redes Elétricas”.

O programa está integrado ao SAPRE (Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas), que dispõe de editor gráfico de diagramas, interação e resultados pelo diagrama. Sua interface gráfica, aliada ao uso dos aplicativos de pós-processamento de resultados FormCepel [9] e do EditCepel [10], permite maior versatilidade e aumento de produtividade. Os arquivos de dados da rede para uso no programa ANAFAS estão disponíveis para download na Web em sites de algumas instituições setoriais.

Entre os principais usuários do ANAFAS estão: entidades setoriais, como Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE); empresas Eletrobras; agentes de geração, transmissão e distribuição; grandes consumidores industriais; produtores independentes; universidades (versões acadêmicas). [7]

1.4- ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos:

No primeiro capítulo discorre-se sobre a evolução dos sistemas elétricos, a interligação dos mesmos, e o que isso acarreta na operação das redes. É mostrado que as análises que antes eram inexistentes ou eram consideradas simplórias, passam a ser impraticáveis sob o ponto de vista de uma rede com grandes dimensões. Disto, nasce a necessidade de normatização e definição de parâmetros de operação, visando manter o sistema estável. A partir disto é apresentado o software ANAFAS, que ajuda a entender os fenômenos relacionados aos estudos de curto-circuito, são citadas as facilidades mediante a sua utilização.

O segundo capítulo faz uma introdução às ferramentas ANAFAS e SAPRE, destacando a interatividade proporcionada pelo ambiente SAPRE. É exposto o quão convidativo é para o usuário, a interface deste simulador em relação à interface do ANAFAS.

No terceiro capítulo é mostrado como são modelados os elementos no SAPRE. São mostrados os parâmetros a serem inseridos em cada elemento da rede elétrica, bem como a aplicação de cada um. Os elementos são explicados para que o usuário consiga modelar um sistema elétrico sem grandes dificuldades de operação do software.

No quarto capítulo são introduzidos os tipos de faltas e os modos de estudo. Nele fala-se sobre as faltas passíveis de serem simuladas, os tipos de estudo individual e macro, bem como as facilidades que o software propõe (estudo de superação de disjuntores, equivalentes de curto-circuito, soluções orientadas a ponto de falta e a ponto de monitoração, dentre outros)

No quinto capítulo, são feitos estudos de caso, onde são feitas simulações e são aplicados os conceitos de curto-circuito para o entendimento dos resultados. Nele, ainda são

apresentadas e explicadas na prática algumas facilidades do software na visualização dos resultados, como por exemplo diagramas fasoriais, relatórios de execução, dentre outros.

No sexto é feita uma conclusão sobre a realização deste trabalho

O sétimo capítulo apresenta as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2- O SIMULADOR

2.1- ANAFAS

O simulador de faltas ANAFAS é apropriado para simulações de grandes redes elétricas e soluciona diversos tipos de estudos de faltas, inclusive simultâneas. As faltas podem ser simuladas em um ponto intermediário da linha de transmissão ou em barramentos, sendo elas *shunt* através de impedâncias ou não, e de abertura de linha (interrupção de circuito). A **Figura 1** mostra a interface do ANAFAS.

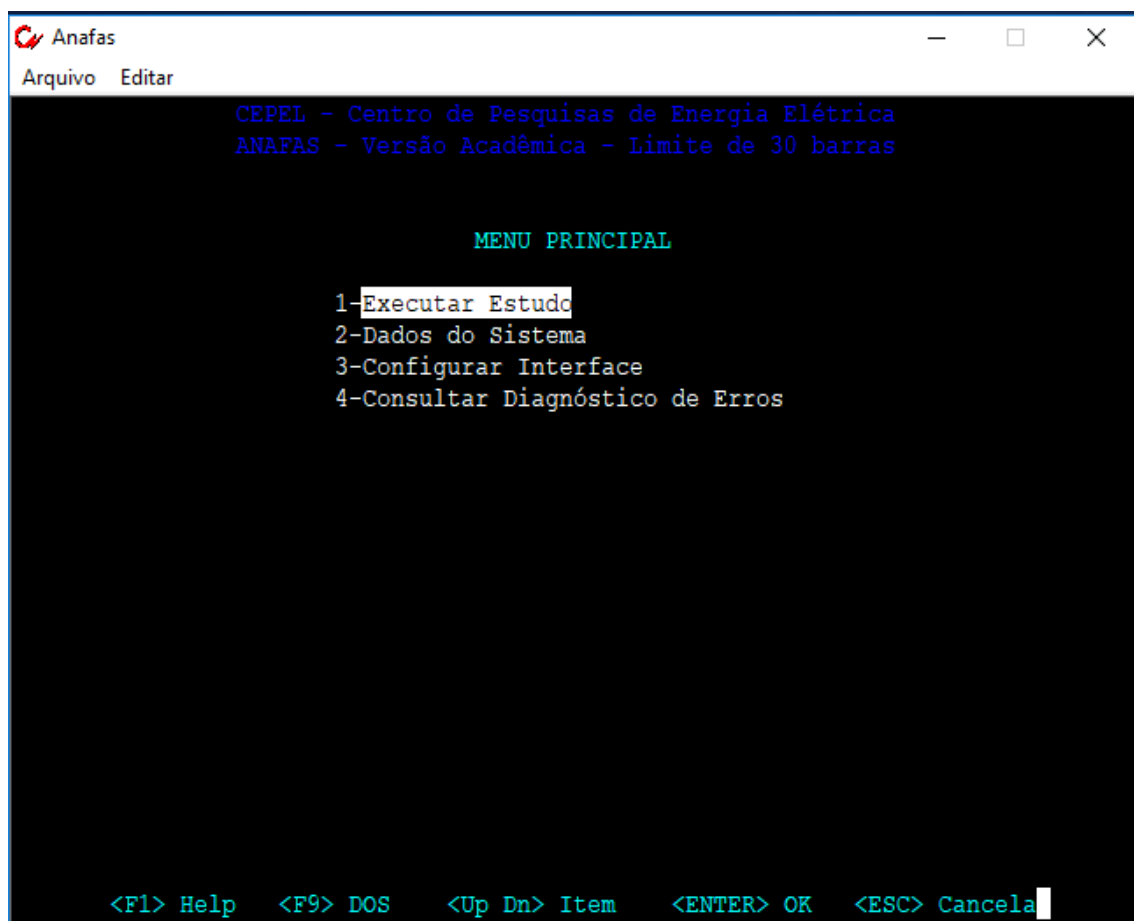


Figura 1 - Interface ANAFAS

O ANAFAS modela o sistema elétrico, permitindo ao usuário determinar características de ligação e defasamento de transformadores, tapes, inserção de impedâncias de sequência dos componentes da rede, impedâncias de regime (transitório, subtransitório e permanente) para máquinas síncronas, etc. Os estudos de falta podem ser determinados através de estudo

individual, ou macro (conjunto de casos de falta) tendo sua solução orientada ao ponto da falta ou à um ponto de monitoração de grandezas.

Os resultados dos estudos são mostrados na tela, através de relatórios de dados, podendo ser interativos ou gravados em arquivo.

A modelagem do sistema elétrico, é feita através de um arquivo texto (arquivo primário) editado pelo usuário. Esse tipo de modelagem pode ser encontrado em [11], Apêndice 1.1.

Neste trabalho não se tem como foco a utilização dessa modelagem e arquivo texto explicitamente. Será utilizada uma ferramenta com interface mais interativa e familiar ao usuário, o SAPRE.

2.2- SAPRE

O SAPRE (Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas) é um programa integrado às aplicações do ANAFAS e ANAREDE [12]. Ele apresenta uma interface que se associa ao modo de Fluxo de Potência do ANAREDE, como também com o modo de curto-circuito do ANAFAS.

Os mecanismos presentes neste software englobam todos os tipos de estudos de curto-circuito presentes no ANAFAS (sejam eles individuais, macros, pontos de monitoração, superação de disjuntores, dentre outros) como também fornece todos os tipos de relatórios disponíveis no ANAFAS. O diferencial da utilização do SAPRE, está na interface gráfica, e na adição de recursos visuais que facilitam os estudos e entendimento dos fenômenos simulados.

O SAPRE apresenta uma interface mais convidativa ao usuário, como constata-se na **Figura 2**. Nesta interface é possível criar graficamente, diagramas de redes, bem como executar estudos de curto-circuito com resultados demonstrados no próprio diagrama, como será visto mais adiante. A versão utilizada neste trabalho é a “**versão 2.2 Beta – dezembro de 2011**”[13].

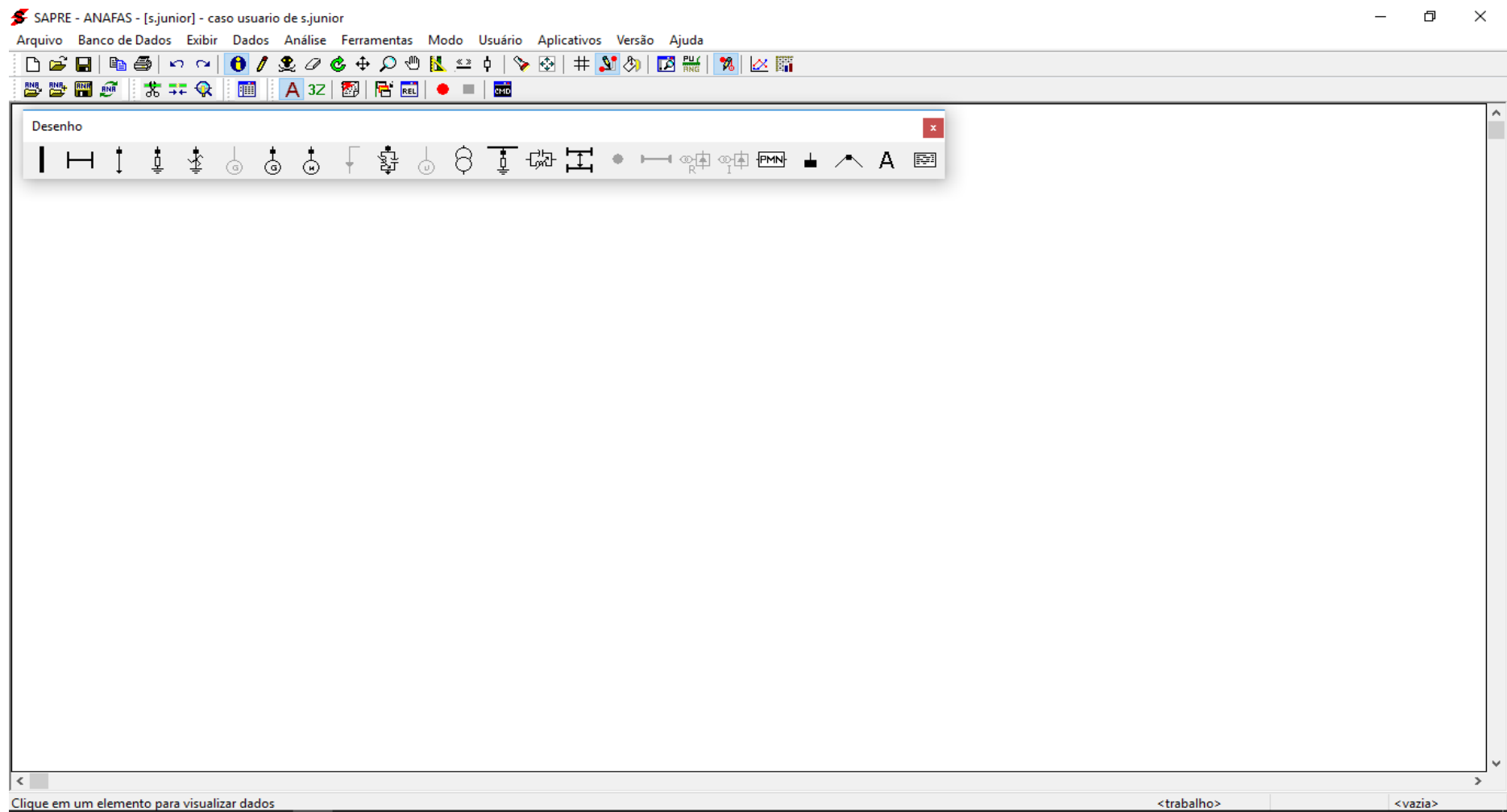


Figura 2 - Interface do SAPRE

3- CRIANDO UM SISTEMA ELÉTRICO NO SIMULADOR

3.1- FERRAMENTAS DE DESENHO E CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS

A partir da tela inicial do SAPRE, é possível acessar o menu com as ferramentas de desenho dos elementos, de várias formas. A primeira dela é acessar o menu **[Dados > Rede CA]** como mostra a **Figura 3**. Nela observa-se a lista de componentes que podem ser inseridos no sistema.

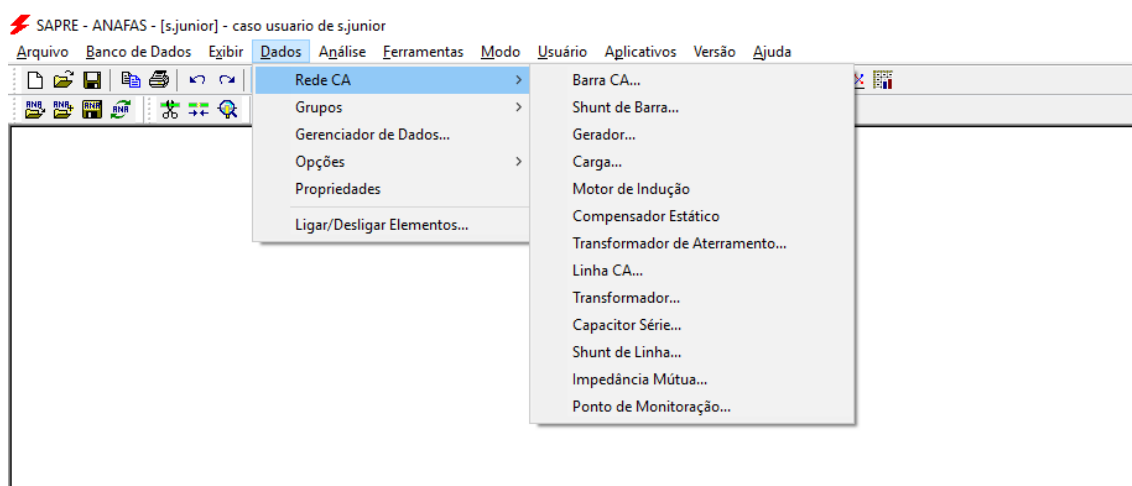


Figura 3 - Acesso à lista de componentes pelo menu [Dados]

Outro modo de ter acesso às ferramentas de desenho, como mostrado na **Figura 4**, é através da inserção de uma barra de atalhos que pode ser habilitada através do acesso ao menu **[Ferramentas > Barra de Ferramentas > Desenho...]**.

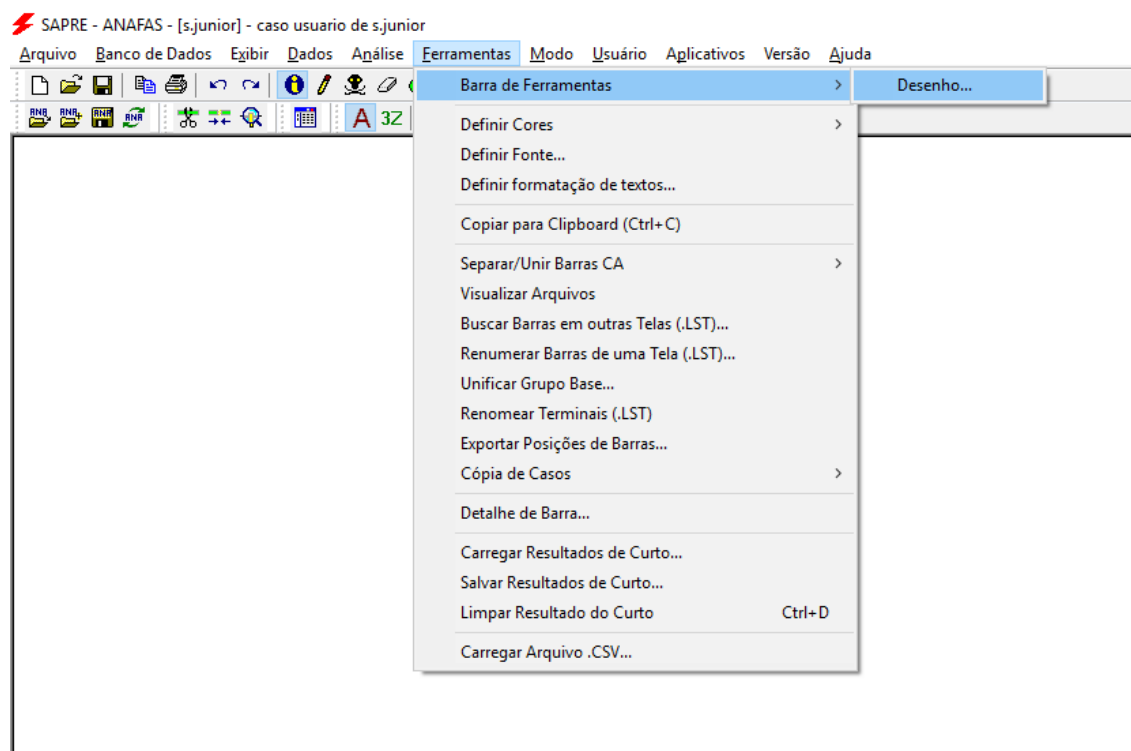


Figura 4 - Acesso à barra de atalhos para a inserção dos elementos do sistema

A partir deste comando uma barra com atalhos para a inserção dos componentes surgirá na tela, com mostrado na **Figura 5**.

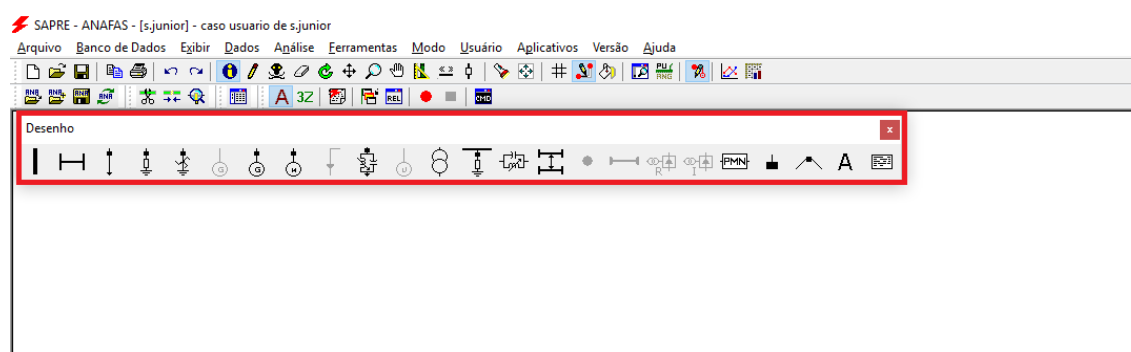


Figura 5 - Barra de ferramenta de desenho

O terceiro modo de inserir os elementos do circuito, é clicar no botão **“Inserir ou Desenhar Elemento”** que está presente na barra de ferramentas, ou como alternativa, pode-se acessar esse comando diretamente pela tecla **“F3”** como mostra a **Figura 6**.

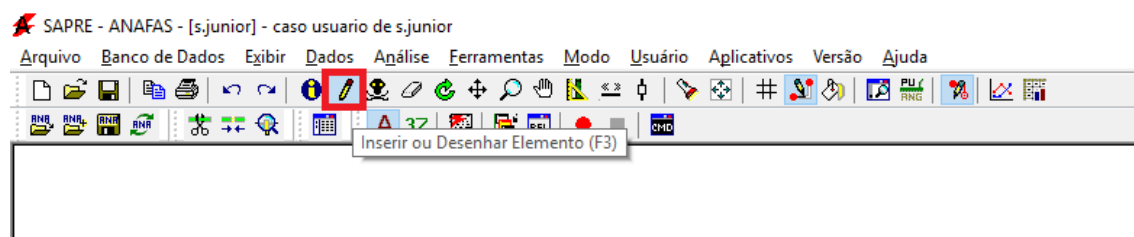


Figura 6 - Botão "Inserir ou Desenhar Elemento"

O cursor se tornará um ícone em formato de caneta, a barra de ferramenta de desenho irá surgir. Caso necessite um menu de desenho rápido, clicando com o botão direito do mouse, um menu suspenso surgirá com as opções de desenho, como destacado na **Figura 7**.

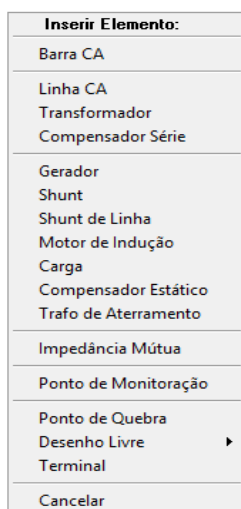


Figura 7 - Menu suspenso de desenho

3.1.1- BARRA CA

O primeiro elemento a ser inserido (obrigatoriamente) são os barramentos, pois a partir deles criam-se as conexões com geradores síncronos, transformadores, motores, etc. Caso o usuário tente inserir um gerador síncrono, por exemplo, sem ter inserido nenhuma barra, este gerador não poderá ser fixado na área de desenho, por não possuir destino de ligação. O mesmo acontece com transformadores, e neste caso é necessário a prévia especificação de duas barras que irão se conectar com o primário e secundário do transformador.

Através de um dos comandos de inserção de elemento, a barra CA pode ser inserida. Ao selecionar o elemento barra CA (primeiro ícone da barra de desenho, circulado em vermelho na **Figura 8**), clicando uma vez com o botão esquerdo do mouse na área de desenho, uma barra surgirá, e é possível mudá-la de posição repetindo o clique unitário no local desejado. Após escolhida a posição do elemento, um duplo clique com o botão esquerdo do mouse a fixará e então a janela de especificação de parâmetro surgirá. Na **Figura 8** é mostrada a janela de definição de dados para a barra CA. Nela observa-se os parâmetros:

- **Número:** O usuário define um número a ser associado a barra.
- **Nome:** O usuário define um nome ou sigla para a barra.
- **Área:** Define a área na qual a barra está situada. Este campo é mais utilizado geralmente em grandes sistemas, em que, para a facilitação das análises é conveniente subdividir o sistema em áreas, para que seja mais fácil a identificação de algum grupo de cargas, geradores, linhas de transmissão, etc.
- **Ligado:** Confere o status ligado/desligado desabilitando o elemento.
- **Base de Tensão[kV]:** Solicita o nível de tensão base, no qual a barra está inserida. Esse dado deve ser inserido na unidade de kV.
- **Menor Capacidade de Interrupção[kA]:** Neste campo, é inserido o valor de corrente de interrupção do disjuntor de menor capacidade ligado à barra. Este dado é utilizado nos estudos de Superação de Disjuntores.
- **Tipo:** Podendo variar entre Normal, Fictícia de Transformador e Auxiliar. A barra tipo Normal é a barra CA padrão. A barra tipo Fictícia de Transformador (ou mid-point) é uma barra utilizada na representação de transformadores de 3 enrolamentos. A barra Auxiliar (line-tap) é utilizada como ponto de derivação em linhas de transmissão, é utilizada também como barramento para inserção de capacitores série, e também como ponto de mudança de parâmetros em uma linha de transmissão.
- **Tensão Pré-Falta:** Tensão na barra, na iminência do curto-circuito. Sabe-se devido aos estudos de fluxo de potência que as tensões nas barras variam constantemente tendendo a se diferenciar de 1 p.u.
- **Ângulo Pré-Falta:** O usuário insere o ângulo de fase para aquela barra, na iminência da falta.

- **Barras Vizinhas:** Neste campo o usuário consegue visualizar os dados das barras vizinhas a esta, ou seja, ao selecionar os campos “Número” ou “Nome”, é mostrado as barras as quais está conectada e, clicando em “mostrar” seus dados serão exibidos.

Após feitos os preenchimentos dos campos essenciais, o botão “Inserir” é habilitado.

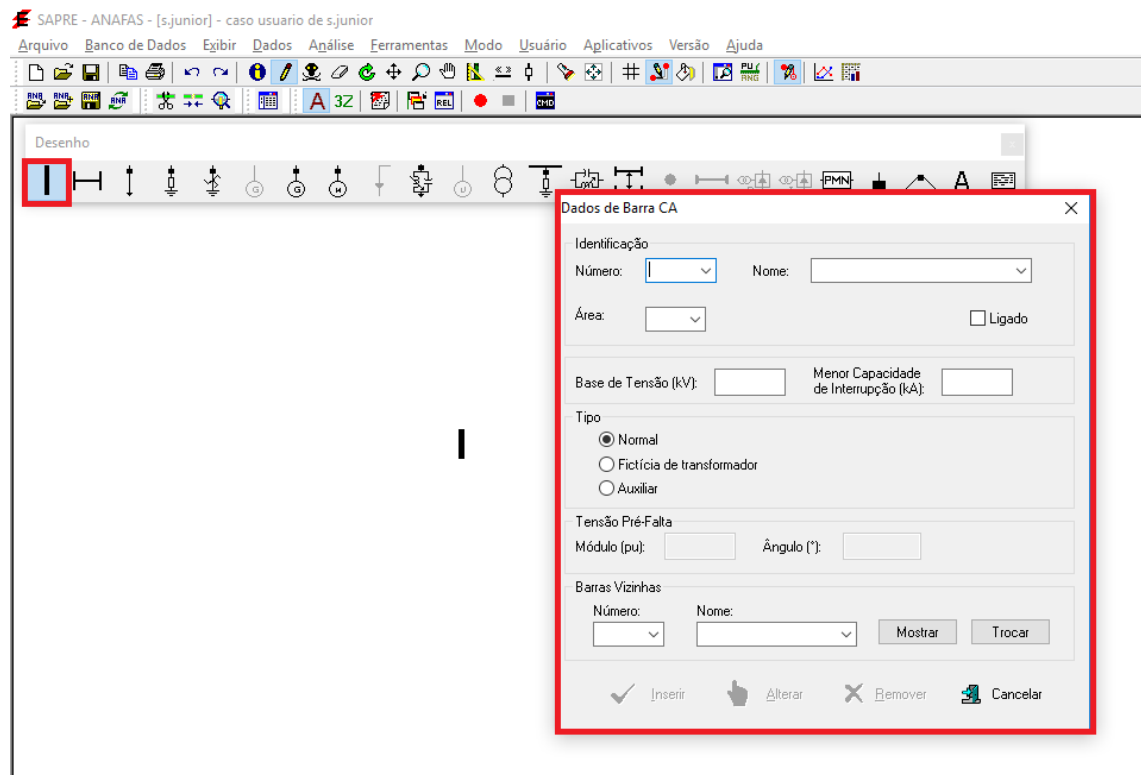


Figura 8 - Janela de Dados de Barra CA

3.1.2- DADOS DE ÁREA

A janela contida na **Figura 9** poderá aparecer durante o preenchimento dos Dados de Barra CA, mais especificamente após o preenchimento do dado de área, se caso essa área não tenha sido criada previamente no arquivo. Esta janela configura uma identificação, ou observação para a área. Nela existem os campos:

- **Número:** Número de representação da área escolhido.
- **Identificação:** Informação inserida pelo usuário para identificação da área.

- **Intercâmbio Especificado, Mínimo e Máximo [MW]:** Os intercâmbios de potência são informações para o modo de Fluxo de Potência que definem as potências transmitidas entre barras. Esses campos não são necessários nos estudos de curto-circuito, podendo ser deixados sem preenchimento.

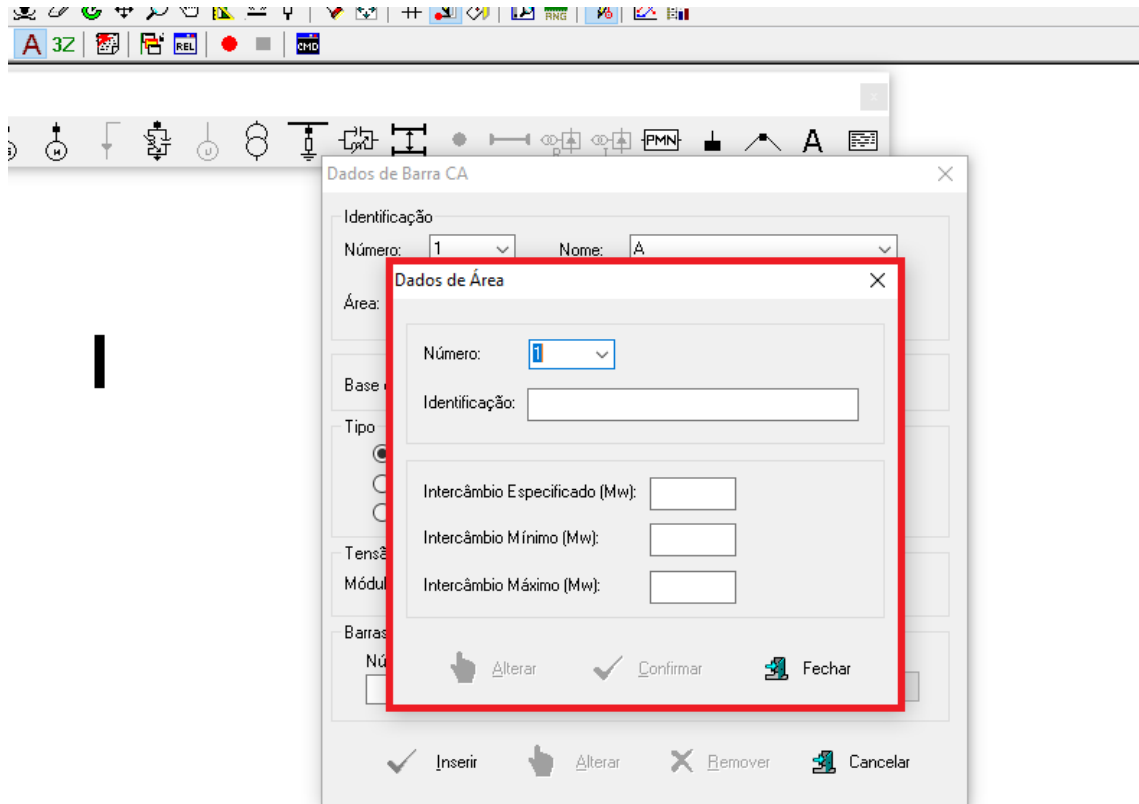


Figura 9 - Dados de Área

3.1.3- DADOS DE GRUPO BASE DE TENSÃO

A janela destacada contida na **Figura 10**, é a janela de Dados de Grupo Base de Tensão. Nela especificamos, para uma das tensões base do sistema, as características gráficas pertencentes a esse nível de tensão. Nela é possível selecionar:

- **Espessura:** Seleciona a espessura das linhas pertencentes a esta área.
- **Seleção de Cor:** Seleciona a cor das linhas pertencentes a esta área.

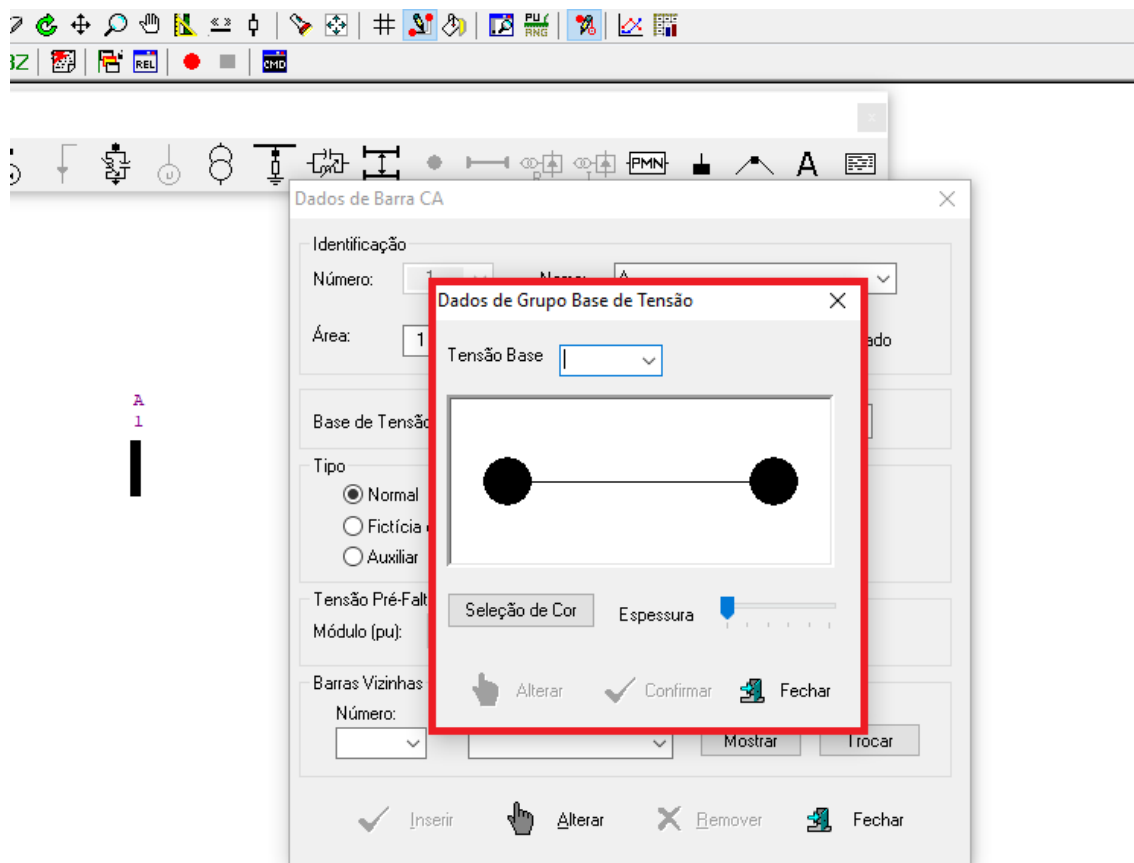


Figura 10 - Dados de Grupo Base de Tensão

Caso o usuário queira modificar posteriormente, ou até consultar as configurações feitas nestes campos, o usuário deve acessar o menu **[Dados > Grupos > Área...]** para modificar o nome ou identificação de área, ou **[Dados > Grupos > Grupo Base de Tensão...]** para modificar os dados gráficos de um determinado grupo base de tensão. A **Figura 11** mostra o acesso ao menu para modificação da identificação de área.

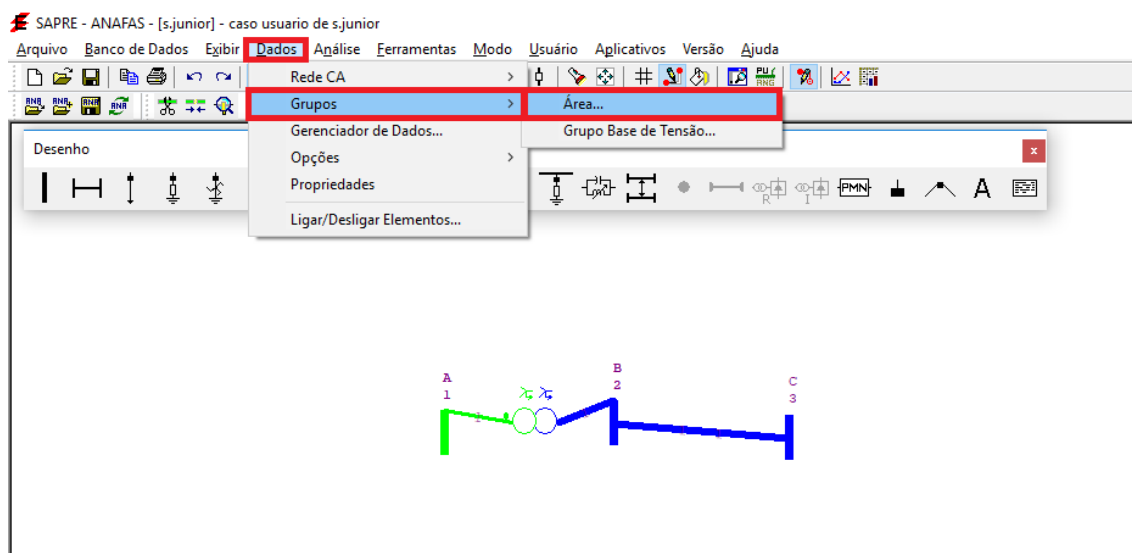


Figura 11 - Edição da identificação de área

A **Figura 12** mostra o acesso à mudança gráfica dos parâmetros do Grupo Base de Tensão.

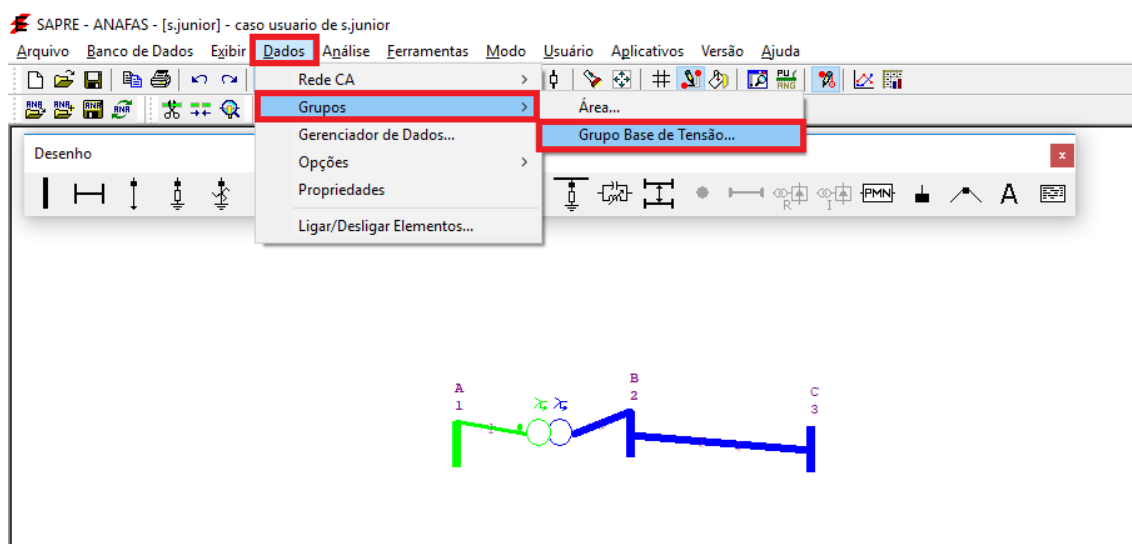


Figura 12 - Edição dos dados gráficos do Grupo Base de Tensão

3.1.4- LINHA CA

A **Figura 13** mostra a localização do ícone da Linha CA. Para inserir uma Linha CA o primeiro passo é seleccionar o ícone destacado na **Figura 13**. Após isso, o cursor se tornará um ícone de caneta. O próximo passo é especificar a Barra “De” e a Barra “Para”. Essas são as barras que estarão ligadas nas extremidades da linha. Para especificá-las basta, após seleccionar

o ícone da barra CA, clicar com o botão esquerdo do mouse na Barra “De” e depois na Barra “Para”, definindo assim as barras nas quais a linha estará ligada.

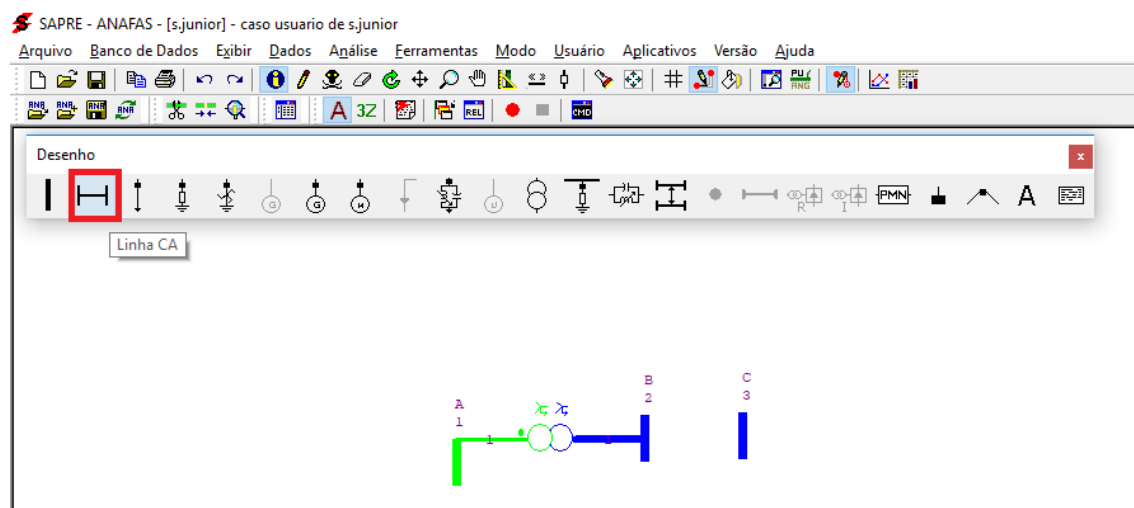


Figura 13 - Ícone Linha CA

Após selecionar a Barra “De” e a Barra “Para”, uma janela, mostrada na **Figura 14**, surgirá, para a especificação dos parâmetros da Linha CA. Nela estão contidos os seguintes parâmetros a serem especificados:

- **Barra “De”:** Barra de onde a linha será ligada.
- **Barra “Para”:** Barra para onde a linha será ligada
- **Nome:** Nome das barras “De” e “Para”
- **Número do Circuito:** Esse campo se refere ao número do circuito a qual a linha pertence. Entende-se que, número de circuito, se relaciona com a quantidade de linhas em paralelo de mesma Barra “De” e Barra “Para”. Assim, duas linhas em paralelo, que comecem nas mesmas barras e terminem nas mesmas barras, deverão ser designadas com números de circuito diferentes. Geralmente, ao se fazer ligações em paralelo entre Linhas CA, o software já enumera os circuitos em paralelo automaticamente. Ou seja, ao inserir a segunda linha (linha em paralelo), a janela de parâmetros já especifica que este é o circuito 2. A numeração dos circuitos paralelos é sequencial.
- **Área:** Área na qual a linha está inserida.
- **Resistência (R1% e R0%):** Valor da resistência de sequência positiva e zero da Linha CA em porcentagem. Lembrando que esse dado deve ser transformado em grandeza no sistema p.u. para depois ser transformada em porcentagem.

- **Reatância (X1% e X0%):** Valor da reatância da de sequência positiva e zero da Linha CA em porcentagem. Lembrando que esse dado deve ser transformado em grandeza no sistema p.u. para depois ser transformada em porcentagem.
- **Susceptância (S1 e S0 Mvar):** Susceptância Linha CA de sequência positiva e negativa requerida em Mvar.
- **Capacidade de interrupção (kA):** É a capacidade de interrupção dos disjuntores do terminal “De” e do terminal “Para” da Linha CA.

Figura 14 - Parâmetros da Linha CA

O ANAFAS considera as impedâncias de sequência negativa, iguais às de sequência positiva. Por esse motivo, não há o campo de preenchimento destas grandezas.

3.1.5- IMPEDÂNCIAS MÚTUAS

As impedâncias mútuas são impedâncias que se originam da relação da interação de corrente e tensão induzida entre condutores próximos. No software, são modeladas por acoplamentos de sequência zero entre duas linhas. Para a inserção das impedâncias mútuas,

existem dois caminhos. Um deles é mostrado na **Figura 15**, cujo caminho é através do menu [Dados > Rede CA > Impedância Mútua...].

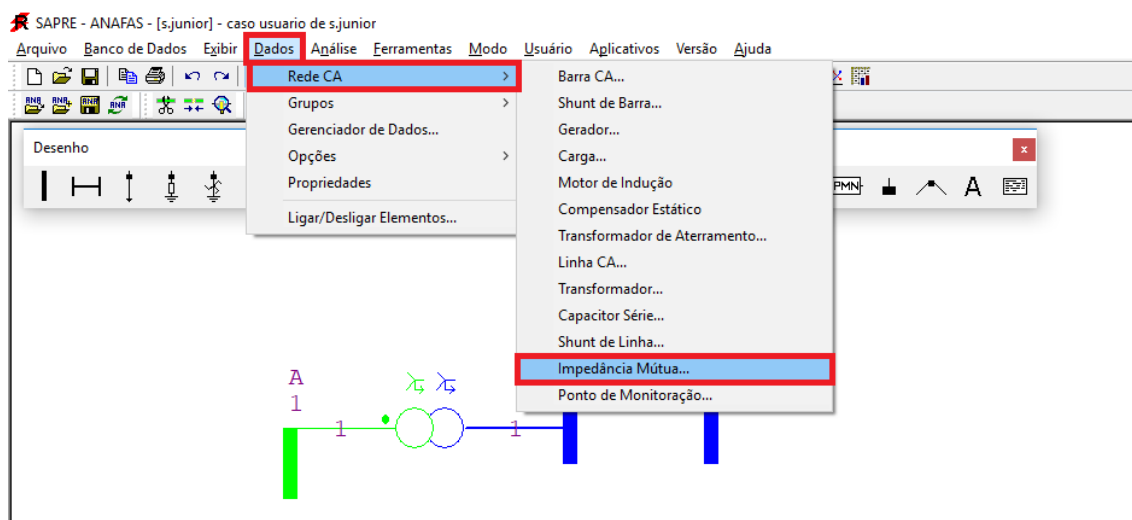


Figura 15 - Inserindo impedância mútua

A **Figura 16** mostra uma alternativa para a inserção das impedâncias mútuas, através da barra de desenho. Selecionando o ícone de Impedância Mútua, basta clicar nas duas linhas que estarão envolvidas. A diferença entre os modos de inserção de mútuas, está na especificação das linhas: no primeiro modo é necessário inserir manualmente as linhas acopladas magneticamente, já no segundo essas informações são preenchidas no ato da seleção através do desenho.

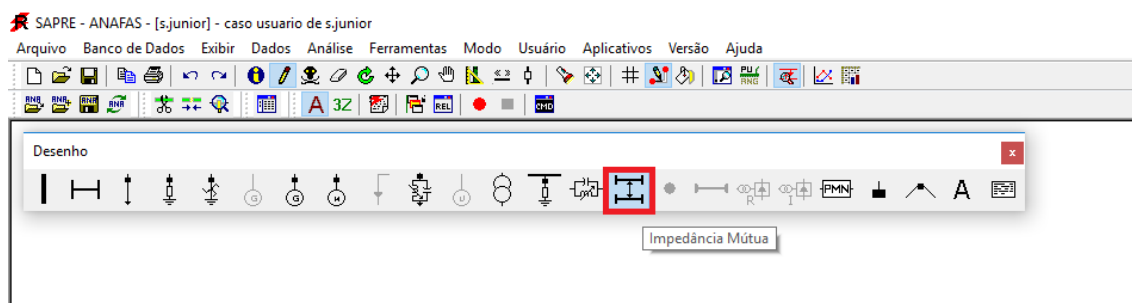


Figura 16 – Botão Impedância Mútua localizada na barra de desenho

A **Figura 17** mostra a janela de configuração de Impedâncias Mútuas.

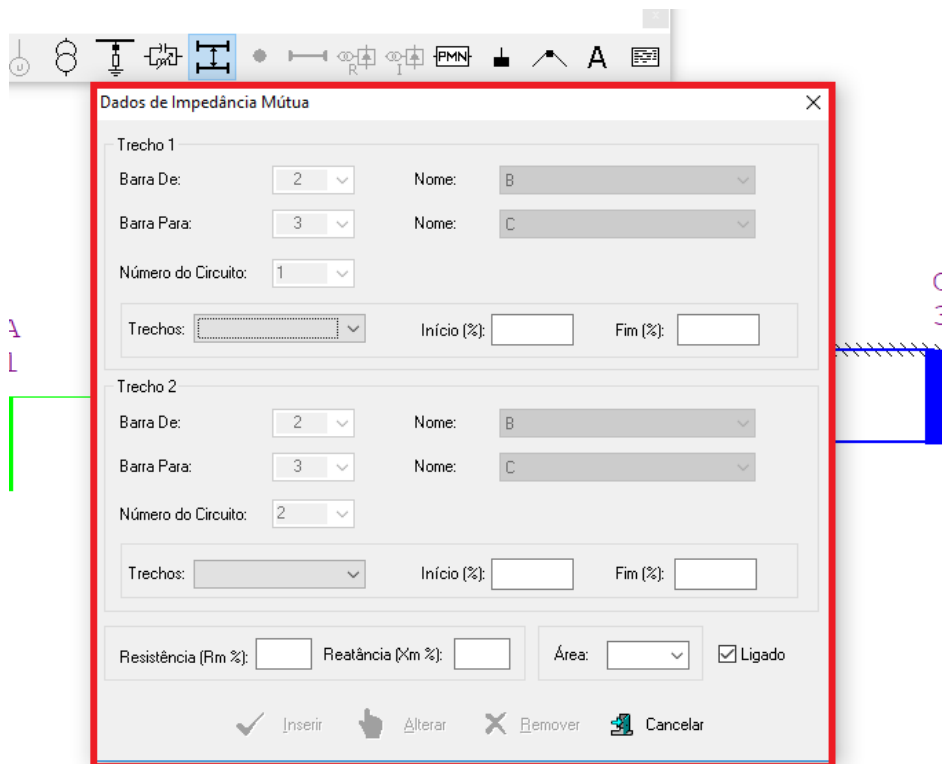


Figura 17 - Parâmetros de Impedância Mútua

Os dados de configuração de mútua, são:

Trecho 1:

- **Barra “De”:** Barra inicial do primeiro trecho de mútua
- **Barra “Para”:** Barra final do primeiro trecho de mútua
- **Número do circuito:** Circuito na qual está a linha do trecho 1
- **Início (%) e Fim (%):** São as porcentagens de linha com mútua variando de 0 a 100% contando a partir da barra inicial (Barra “De”).

Trecho 2:

- **Barra “De”:** Barra inicial do segundo trecho de mútua
- **Barra “Para”:** Barra final do segundo trecho de mútua
- **Número do circuito:** Circuito na qual está a linha do trecho 2
- **Início (%) e Fim (%):** São as porcentagens de linha com mútua variando de 0 a 100% contando a partir da barra inicial (Barra “De”).

- **Resistência ($R_m\%$):** Resistência em porcentagem da mútua entre as linhas.
- **Reatância ($X_m\%$):** Reatância em porcentagem da mútua entre as linhas.
- **Área:** Área onde se encontra a mútua inserida.

Uma forma de consultar as informações de quaisquer elementos inseridos no sistema, é mostrado na **Figura 18**. Clicando no ícone na barra de ferramentas (destacado em vermelho) “Obter Informações do Elemento” ou apenas com o atalho “F2” o cursor de mouse estará acompanhado da letra “i”, que indica que ao clicar com o botão esquerdo do mouse, a janela específica com as informações do elemento surgirá, podendo ter seus dados alterados caso o usuário deseje realizar alguma alteração.

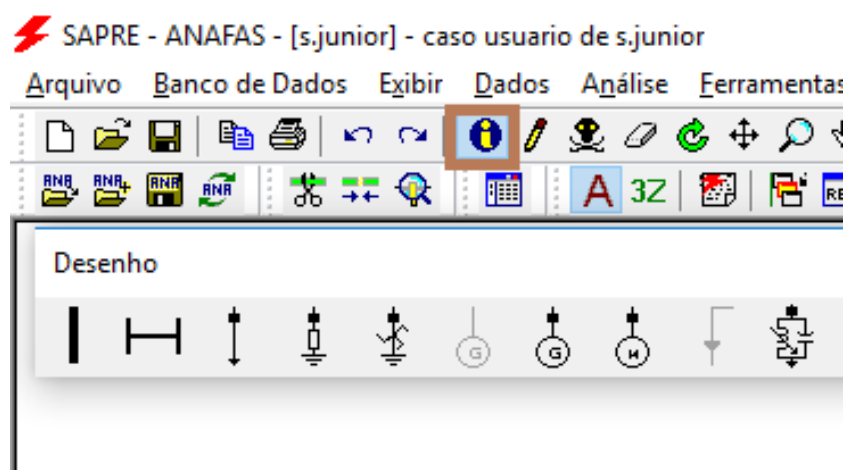


Figura 18 – Botão Obter Informações do Elemento

As configurações de mútua podem ser consultadas utilizando o botão Obter Informações do Elemento, clicando com o botão direito do mouse sobre a linha com mútua. A **Figura 19** mostra a janela que surge ao se clicar com o botão direito do mouse sobre a linha com mútua.

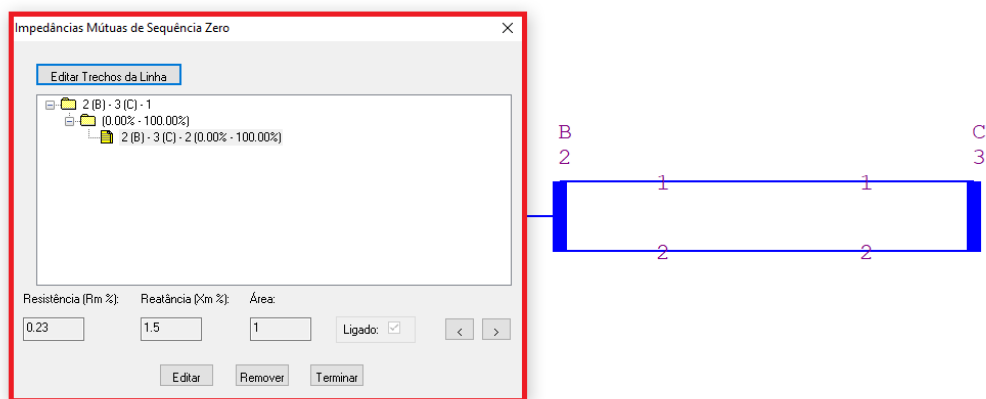


Figura 19 - Janela de informações de impedâncias mútuas da linha

Na janela da **Figura 19**, é possível editar os trechos de linha. A **Figura 20** mostra a janela que surge ao clicar no botão “Editar Trechos de Linha”, sendo essa edição simples, basta selecionar o trecho em questão, adicionar os novos valores de porcentagem e clicar em “ALTERAR” e depois “Terminar”.

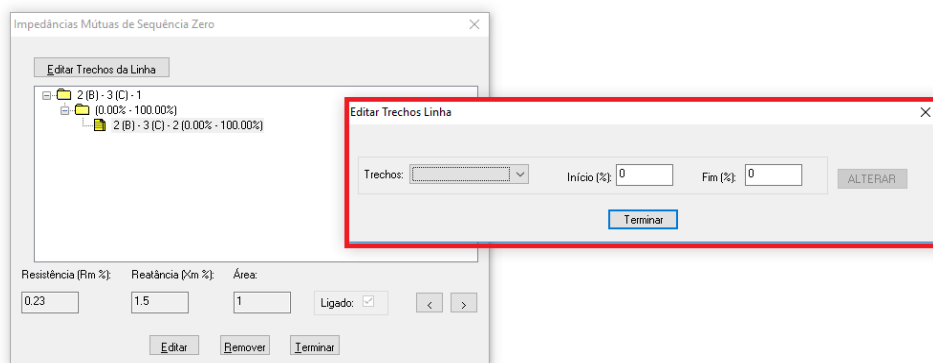


Figura 20 - Janela Editar Trechos de Linha

Ainda de acordo com a **Figura 19**, ela mostra além do botão “Editar Trechos de Linha”, o campo central que informa as barras “De” e “Para”, bem como o número do circuito, que identifica a linha e as porcentagens de acoplamento entre as linhas acopladas. Mais abaixo é possível ver os valores percentuais de Resistência, Reatância e Área, que podem ser editados através do botão “Editar”.

A visualização gráfica das mútuas pode ser vista através do botão “Exibir Linhas com Mútuas” situado na barra de ferramentas. Esse botão tem três estados, mudando a visualização do diagrama a cada clique: “Exibir Desenho Normal”, “Exibir Elementos Não Desenhados”,

“Exibir Linhas com Mútuas”. Para exibir as linhas com mútuas, clique até que seu status mude para “Exibir Linhas com Mútuas”. A **Figura 21** mostra a localização do botão “Exibir Linhas com Mútuas” e uma demonstração de como são ilustradas as mútuas no circuito da imagem. Na representação gráfica, entre as linhas de mútuas, existe uma indicação em vermelho com os valores de resistência e reatância da mútua, bem como a indicação da porcentagem das linhas cujos acoplamentos são diferentes de 100%.

Os valores de mútua ($R_m\%$ e $X_m\%$) podem ser preenchidos com valores negativos. Isso se deve devido a “polaridade” do acoplamento mútuo. Ou seja, a polaridade da queda de tensão induzida deve ser oposta à direção da corrente indutora. Quando isso não acontece os valores da resistência e impedância mútua serão negativos.

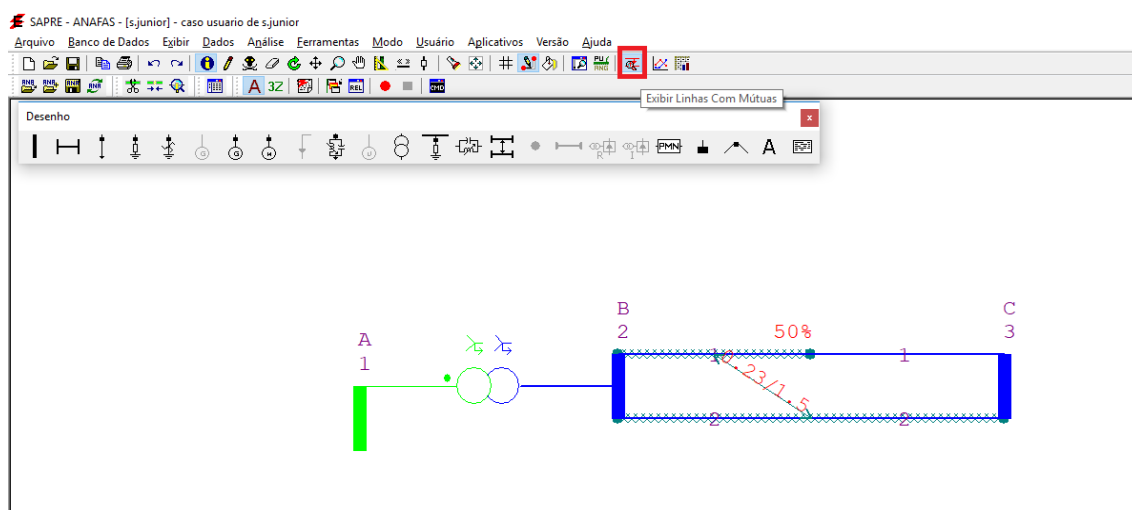


Figura 21 - Botão Exibir Linhas com Mútuas e circuito com mútuas

A **Figura 22** ilustra os sentidos da corrente indutora e da tensão induzida para valores positivos de mútua.

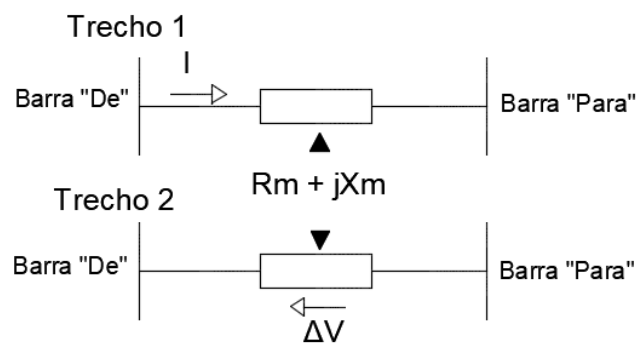


Figura 22 - Sentidos da corrente indutora e da tensão induzida para valores positivos de mútua

Fonte: Adaptação de Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

3.1.6- MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores de indução podem ser inseridos a partir da barra de desenho ou do menu [Dados > Rede CA > Motor de Indução]. A **Figura 23** mostra o ícone relativo ao motor de indução na barra de desenho.

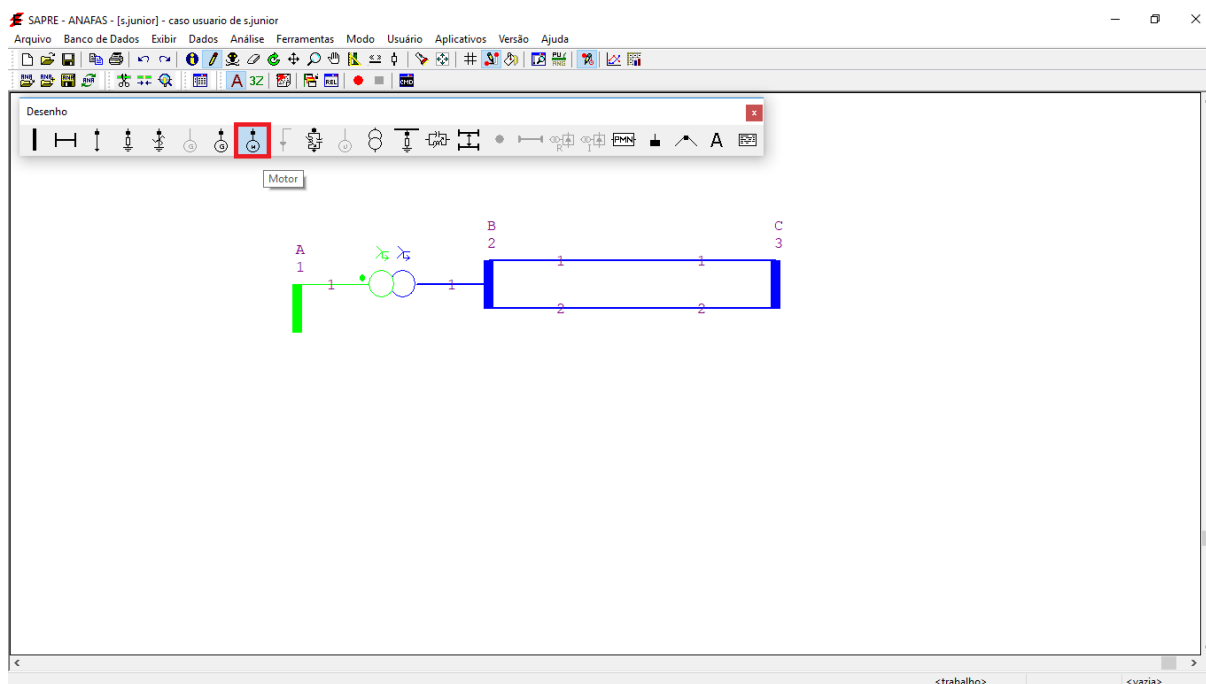


Figura 23 - Ícone do Motor de Indução na barra de desenho

Ao selecionar o botão do Motor de Indução, o cursor se tornará um ícone em formato de caneta. Clicando uma vez com o botão esquerdo do mouse a representação do motor irá surgir, e após escolher a posição para a fixação do desenho, basta clicar duas vezes com o botão esquerdo do mouse para fixar o desenho. Após isso o software pedirá para selecionar a barra de ligação do motor. Um clique sobre a barra desejada irá selecioná-la.

Após selecionada a barra, a janela de configuração dos parâmetros do motor irá surgir. A **Figura 24** mostra a janela de configuração do Motor de Indução. Nela estão os seguintes parâmetros:

- **Barra:** Barra na qual o motor está conectado
- **Nome:** Nome da barra na qual o motor está conectado.
- **Grupo:** (Opcional) Identificação numérica do grupo de elemento
- **Área:** Área na qual o motor está ligado
- **Ligado:** Ativa ou desativa o motor do diagrama
- **Resistência (R%) Estator:** Resistência em porcentagem do estator
- **Reatância (X%) Estator:** Reatância em porcentagem do estator
- **Resistência (R%) Rotor:** Resistência em porcentagem do rotor
- **Reatância (X%) Rotor:** Reatância em porcentagem do rotor
- **Reatância de Magnetização (Xm%):** Reatância de magnetização em porcentagem
- **Base de Potência (HP):** Base de potência na qual os valores de resistência e reatância estão referenciados.
- **Resistência de Aterramento (Rn%):** Resistência de aterramento em porcentagem (Apenas para o motor ligado em estrela)
- **Reatância de Aterramento (Xn%):** Reatância de aterramento em porcentagem (Apenas para o motor ligado em estrela)
- **Nº de Unidades/Unidades em operação:** Número de unidades idênticas ligadas em paralelo na mesma barra/ Número de unidades em operação.
- **Capacidade de Interrupção do Disjuntor:** Dado usado para estudo de superação de disjuntores. É a capacidade de interrupção de corrente de curto em kA.

Dados de Motor de Indução

Identificação

Barra: 3 Nome: C

Grupo: Área: ☒ Ligado

Estator

Resistência (R %): Reatância (X %):

Rotor

Resistência (R %): Reatância (X %):

Reatância de Magnetização (Xm %): Base de Potência (HP):

Tipo de Conexão

Resistência de Aterramento (Rn %): Reatância de Aterramento (Xn %): ☐ Ligação em Δ

Número de Unidades: Número de Unidades em Operação:

Capacidade de Interrupção do disjuntor (kA):

☒ Inserir ☐ Alterar ☐ Remover ☐ Cancelar

Figura 24 - Dados do Motor de Indução

A **Figura 25** mostra a modelagem dos motores de indução feita pelo SAPRE.

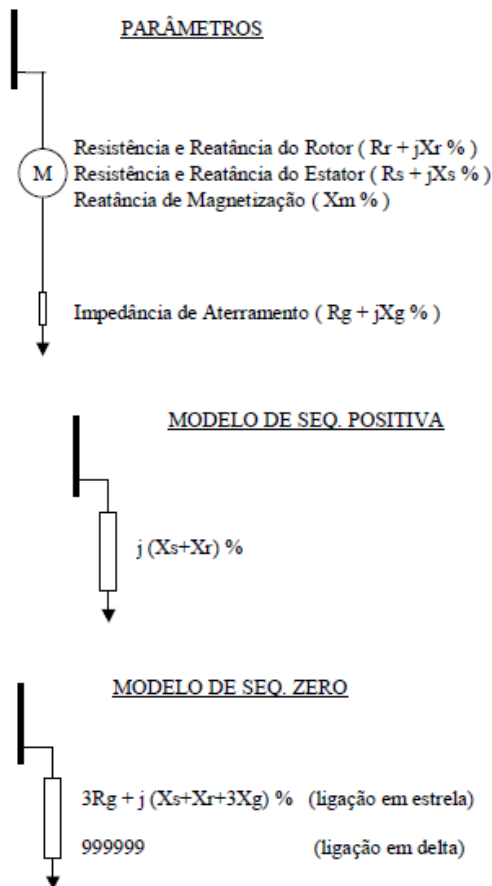


Figura 25 - Modelagem dos motores de indução pelo SAPRE

Fonte: Manual do Usuário –SAPRE (2011)

3.1.7- SHUNTS DE BARRA E COMPENSADORES ESTÁTICOS

Os compensadores estáticos são dispositivos empregados para produção ou absorção de reativos das linhas. Os shunts de barra podem ser capacitores em derivação (geram energia reativa) ou reatores shunt (absorvem excesso de energia reativa do sistema, e amenizam o efeito Ferranti).

A **Figura 26** mostra o ícone do Compensador Estático na barra de desenho.

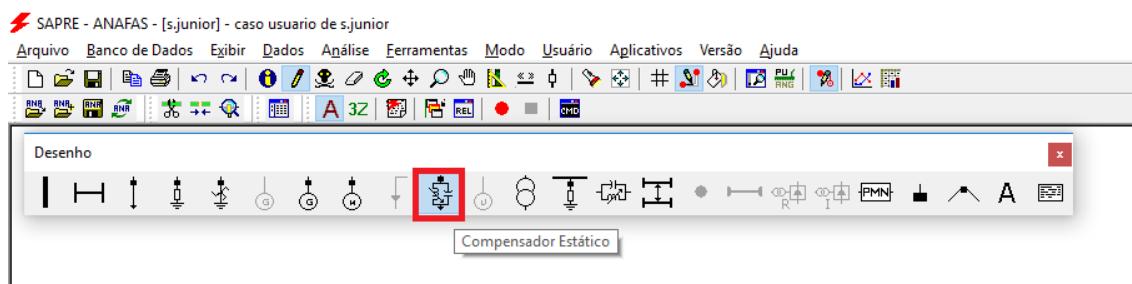


Figura 26 - Ícone do Compensador Estático na barra de desenho

A **Figura 27** mostra o ícone do Shunt de Barra na barra de desenho. Estes elementos podem ser acessados também pelo menu [**Dados > Rede CA > Shunt de Barra**] e [**Dados > Rede CA > Compensador Estático**]. Ao selecionar algum destes elementos, basta clicar uma vez com o botão esquerdo do mouse para especificar a posição, e duas vezes para fixar o elemento. Após isso basta clicar na barra de destino de ligação.

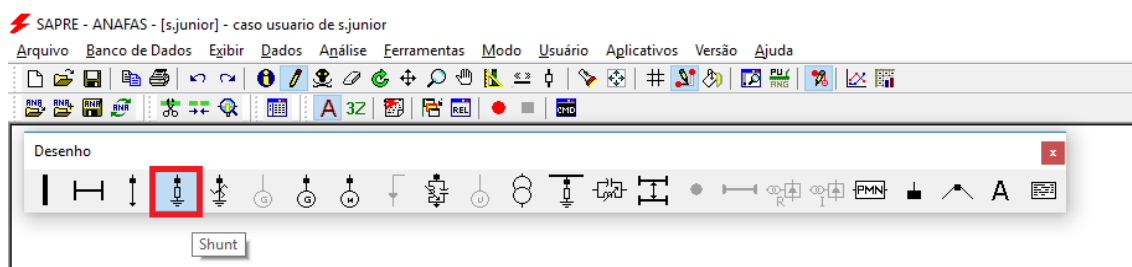


Figura 27 - Ícone Shunt de Barra

A janela de especificação de dados surgirá, e é semelhante tanto para o Shunt de Barra, quanto para o Compensador Estático.

A **Figura 28** mostra a janela de especificação de dados para os dois elementos.

Figura 28 - Dados de Shunt de Barra e de Compensador Estático

Os dados a serem especificados no Shunt de Barra e no Compensador Estático são:

- **Dados de Identificação:** Dados pertinentes de identificação do elemento (semelhante aos dados comuns aos outros elementos)
- **Reatância ($\pm X\%$):** Reatância do Shunt de Barra em porcentagem, podendo ter valor positivo (Indutor) ou negativo (Capacitor)
- **Resistência de Aterramento ($R_n\%$) e Reatância de Aterramento ($X_n\%$):** Valores de impedância de aterramento do Shunt de Barra para a ligação em estrela.
- **Nº de Unidades/Unidades em operação:** Número de unidades idênticas ligadas em paralelo na mesma barra/ Número de unidades em operação.
- **Capacidade de Interrupção do Disjuntor:** Dado usado para estudo de superação de disjuntores. É a capacidade de interrupção de corrente de curto em kA.

O SAPRE modela os Shunts de Barra e os Compensadores Série de acordo com a **Figura 29**.

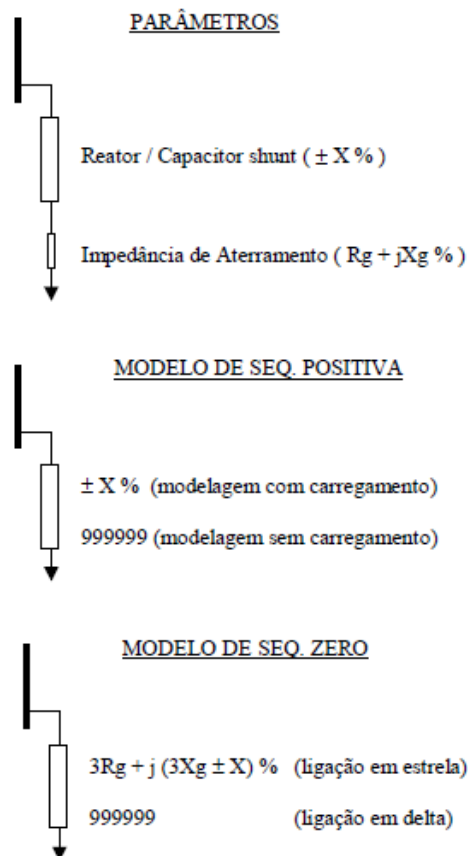


Figura 29 - Modelagem dos Shunts de Barra e Compensadores Estáticos pelo SAPRE

Fonte: Manual do Usuário –SAPRE (2011)

3.1.8- GERADORES SÍNCRONOS

Como mencionado por Kindermann [3], os geradores são considerados os principais elementos do sistema elétrico, suprindo as cargas e mantendo os valores de tensão em faixas de operação. Isso garante o fornecimento de energia para as cargas e a estabilidade do sistema. Durante o curto-circuito, existe um encurtamento da impedância vista pelo gerador, fazendo com que seja necessário a injeção de uma corrente de valores elevados para que o sistema não entre em colapso. Diante disso faz-se necessário a eliminação do defeito o mais rápido possível, com a ajuda dos relés de proteção e disjuntores.

Para inserir geradores na simulação, basta acessar o menu [**Dados > Rede CA > Gerador...**]. A **Figura 30**, mostra como inserir geradores através do menu “Dados”.

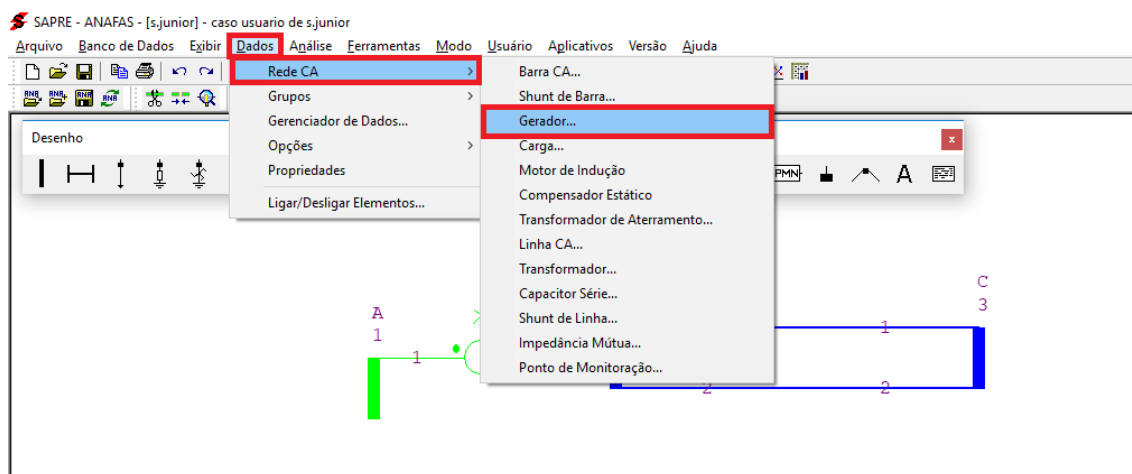


Figura 30 - Inserindo Geradores pelo menu "Dados"

Outra maneira é mostrada na **Figura 31**, onde insere-se um gerador a partir da barra de desenho. Após selecionar o modo de inserção do desenho, uma janela para configuração dos dados surgirá.

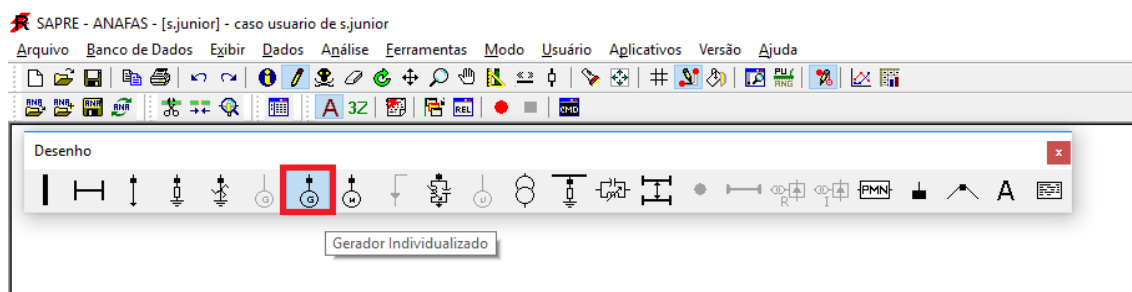


Figura 31 - Localização do botão Gerador Individualizado na barra de desenho

A **Figura 32** mostra a janela de configuração de dados do Gerador.

Dados de Gerador

Identificação
 Barra: 1 Nome: A
 Grupo: Área: ☐ Eólico (*) ☐ Equivalente ☒ Ligado
 (*) tipo síncrono com conversor de frequência

Sequência Positiva
 Resistência (R1 %): Reatância Subtransitória (X''d %):
 Reatância de Regime (Xd %): Reatância Transitória (X'd %):

Sequência Zero
 Resistência (R0 %): Reatância (X0 %):

Tipo de Conexão
 Resistência de Aterramento (Rn %): Reatância de Aterramento (Xn %): ☐ Ligação em Δ

Eólico
 Corrente Máxima de Seq. Positiva (Imáx Arms): Fator de Potência de Operação (FP_pré):
 Tensão Mínima para Injetar (Vmin pu): Potência Ativa Pré-Falta (Pinic MW):
 Fator de Potência de Curto (FP_CC):

Número de Unidades: Número de Unidades em Operação:
 Número Mínimo de Unidades:

Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):

Inserir Alterar Remover Cancelar

Figura 32 - Janela de dados do Gerador

Na janela de dados do gerador, são requeridos os seguintes parâmetros:

- **Dados de Identificação:** Dados pertinentes de identificação do elemento (semelhante aos dados comuns aos outros elementos)
- **Eólico:** Ao marcar esta opção, passa a inserir uma Máquina Eólica Síncrona
- **Resistência (R1%):** Resistência de sequência positiva em porcentagem.
- **Reatância Subtransitória (X''d%):** Reatância utilizada para o período subtransitório
- **Reatância Transitória (X'd%):** Reatância utilizada para o período transitório do curto-circuito
- **Reatância de Regime (Xd%):** Reatância utilizada em regime permanente
- **Resistência de Sequência Zero (R0%):** Resistência de sequência zero em porcentagem.
- **Reatância de Sequência Zero (X0%):** Reatância de sequência zero em porcentagem.

- **Resistência de Aterramento ($R_n\%$):** Resistência de aterramento em porcentagem. Só é utilizada em ligações estrela.
- **Reatância de Aterramento ($X_n\%$):** Reatância de Aterramento em porcentagem. Só é utilizada em ligações estrela.
- **Ligação em Δ :** Seleciona o tipo de ligação do gerador em delta ou estrela.
- **Número de Unidades:** Quantidade de geradores idênticos em paralelo ligados a mesma barra.
- **Número de Unidades em Operação:** Quantidade de geradores idênticos em paralelo ligados a mesma barra em operação. Podem haver vários geradores, porém apenas algumas unidades ligadas
- **Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):** Capacidade de interrupção de curto-circuito do disjuntor do gerador.

3.1.9- GERADORES EÓLICOS

Os Geradores Eólicos possuem tecnologias variadas. As tecnologias mais comuns são os Geradores de Indução, os Geradores de Indução Duplamente Alimentados e os Geradores Síncronos com Inversor.

Assim como apresentado em [11], os geradores de indução, bem como os geradores eólicos de indução duplamente alimentados, apresentam a mesma modelagem pelo software, sendo representados como um motor de indução (fonte ideal seguida de impedâncias de sequência). Os geradores de indução contribuem apenas nos instantes iniciais do curto-circuito, isso acontece, pois, seu campo magnético é alimentado pela rede e, na ocorrência de uma falta próxima podem sofrer desmagnetização. Os geradores eólicos de indução duplamente alimentados têm a alimentação do rotor pela rede, através de um retificador/inversor. Ambos são modelados de acordo com a **Figura 33**.

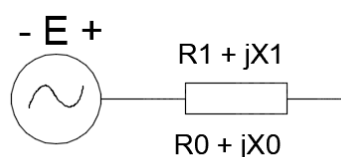


Figura 33- Modelagem na falta de Geradores de Indução/Duplamente Alimentados

Fonte: Adaptado de Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

Já os Geradores Eólicos Síncronos com Inversor, são conectados à um retificador/inversor e sua tensão é gerada pela rotação do eixo e que pode ter frequências variadas a depender da velocidade do vento. Então o retificador/inversor recebe a tensão e a retifica e inverte para a compatível com a rede, e faz com que toda a potência passe pelo conversor.

Para entender a modelagem deste tipo de gerador é preciso entender as características de operação do conversor [11]:

- A potência ativa de saída e o fator de potência são fatores a serem mantidos constantes durante a falta.
- Contribui apenas com sequência positiva nas faltas, mesmo que sejam desequilibradas (faltas fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase)
- Existe uma corrente de contribuição de curto-circuito máxima, na qual o conversor se limita.
- O gerador é desconectado caso a tensão esteja abaixo de um limite pré-estabelecido

Os Geradores Eólicos Síncronos com Inversor se comportam como uma fonte de corrente de sequência positiva durante uma falta. Sua contribuição com a falta depende do valor da tensão terminal e é necessário um processo iterativo para obter a solução. A **Figura 34** exemplifica a modelagem dos Geradores Eólicos Síncronos com Inversor perante a falta.

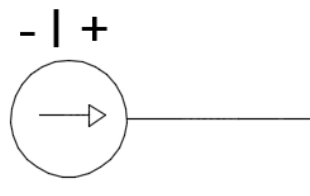


Figura 34 - Modelagem dos Geradores Eólicos Síncronos com Inversor perante a falta

Fonte: Adaptado de Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

Para inserir um gerador Eólico Síncrono com Inversor o procedimento é o mesmo da inserção de um Gerador Síncrono comum, a não ser pela especificação “Eólico” na janela de dados, no campo de identificação do elemento. A **Figura 35** mostra a janela de dados para a

especificação dos parâmetros dos Geradores Eólicos Síncronos com Inversor com o campo “Eólico” destacado em vermelho. Ao se marcar a opção “Eólico” automaticamente, habilita-se os campos de inserção de parâmetros do gerador eólico.

The image shows a software window titled "Dados de Gerador" (Generator Data). It contains several sections for configuring a generator. The "Identificação" (Identification) section has fields for "Barra" (1), "Nome" (A), "Grupo", and "Área". A red box highlights the "Eólico (*)" checkbox, which is checked. Below this, another red box contains the text "(*) tipo síncrono com conversor de frequência". To the right of the "Eólico" checkbox are checkboxes for "Equivalente" (unchecked) and "Ligado" (checked). The "Sequência Positiva" (Positive Sequence) section has fields for "Resistência (R1 %)", "Reatância Subtransitória (%Xd %)", "Reatância de Regime (%Xd %)", and "Reatância Transitória (%Xd %)". The "Sequência Zero" (Zero Sequence) section has fields for "Resistência (R0 %)" and "Reatância (%X0 %)". The "Tipo de Conexão" (Connection Type) section has fields for "Resistência de Aterramento (Rn %)", "Reatância de Aterramento (%Xn %)", and a checkbox for "Ligação em" (connected to). The "Eólico" (Wind) section has fields for "Corrente Máxima de Seq. Positiva (Imáx Arms)", "Fator de Potência de Operação (FP_pré)", "Tensão Mínima para Injetar (Vmin pu)", "Potência Ativa Pré-Falta (Pinic MW)", and "Fator de Potência de Curto (FP_CC)". The "Número de Unidades" (Number of Units) section has fields for "Número de Unidades", "Número Mínimo de Unidades", and "Número de Unidades em Operação". The "Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA)" section has a field for "Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA)". At the bottom, there are buttons for "Inserir" (Insert), "Alterar" (Change), "Remover" (Remove), and "Cancelar" (Cancel).

Figura 35 - Campo de habilitação do Gerador Eólico

A **Figura 36** destaca os campos habilitados para a configuração dos Geradores Eólicos Síncronos com Inversor.

Dados de Gerador

Identificação
 Barra: 1 Nome: A
 Grupo: Área: ☒ Eólico (*) ☐ Equivalente ☒ Ligado
 (*) tipo síncrono com conversor de frequência

Sequência Positiva
 Resistência (R1 %): Reatância Subtransitória (X''d %):
 Reatância de Regime (Xd %): Reatância Transitória (X''d %):

Sequência Zero
 Resistência (R0 %): Reatância (X0 %):

Tipo de Conexão
 Resistência de Aterramento (Rn %): Reatância de Aterramento (Xn %): ☐ Ligação em Δ

Eólico
 Corrente Máxima de Seq. Positiva (Imáx Arms): Fator de Potência de Operação (FP_pré):
 Tensão Mínima para Injetar (Vmin pu): Potência Ativa Pré-Falta (Pinic MW):
 Fator de Potência de Curto (FP_CC):

Número de Unidades: Número de Unidades em Operação:
 Número Mínimo de Unidades:
 Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):

Inserir Alterar Remover Cancelar

Figura 36 - Campos para a configuração dos Geradores Eólicos Síncronos com Inversor

A configuração de geradores eólicos requer:

- **Corrente máxima de sequência positiva (Imáx Arms):** Valor máximo de corrente que o inversor pode injetar.
- **Tensão mínima para injetar (Vmin p.u.):** Tensão mínima para retirada de operação do gerador. Caso alguma fase, durante a falta, apresente valor inferior a esta tensão, o gerador é desconectado da rede.
- **Fator de Potência de Curto (FP_CC):** É o fator de potência durante o curto. Utiliza-se geralmente o mínimo fator de potência admitido pelo controle do inversor. Durante a falta o processo interativo tenta mantê-lo constante.
- **Fator de Potência de Operação (FP_pré):** Campo de preenchimento opcional. Esse dado não é utilizado para obter a contribuição de corrente de falta durante o curto. Esse parâmetro indica o fator de potência pré-falta, e é utilizado para obter a injeção de corrente pré-falta do gerador quando a potência inicial é conhecida e a simulação utiliza carregamento pré-falta.

- **Potência Ativa Pré-Falta (Pinic MW):** Campo de preenchimento opcional. É a potência ativa gerada antes da falta.

3.1.9- CARGA INDIVIDUALIZADA

As cargas são do tipo impedância constante ($R+jX$). As cargas podem ser inseridas através da barra de desenho, como também pelo menu [Dados > Rede CA > Carga...]. A **Figura 37** mostra o botão de Carga Individualizada na barra de desenho.

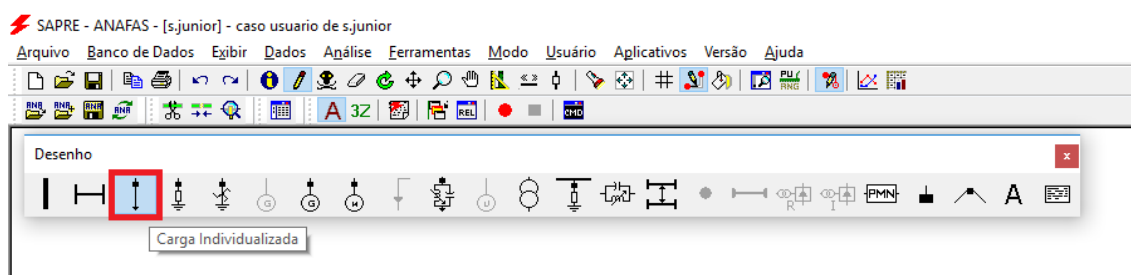


Figura 37 - Ícone de Carga Individualizada na barra de desenho

A **Figura 38** mostra a janela de configuração de dados de carga. A potência da carga pode ser capacitiva ($P-jQ$) ou indutiva ($P+jQ$).

Figura 38 - Janela de dados de Carga

Os dados de carga são:

- **Dados de Identificação:** Dados pertinentes de identificação do elemento (semelhante aos dados comuns aos outros elementos)
- **Carga Ativa (P MW):** Potência ativa da carga dado em MW.
- **Carga Reativa (Q Mvar):** Potência reativa da carga, podendo ser positiva ou negativa, dadas em Mvar.
- **Número de Unidades:** Quantidades de cargas idênticas ligadas à barra.
- **Número de Unidades em Operação:** Quantidade de cargas idênticas em operação.
- **Capacidade de Interrupção do Disjuntor (kA):** Capacidade de interrupção de corrente de falta do disjuntor de carga.
- **Ligação em Δ :** Ligação em delta da carga (define os parâmetros de sequência zero do elemento)

3.1.10- COMPENSADOR SÉRIE

A compensação série é a inserção de capacitores série na linha para minimizar os efeitos das grandes indutâncias dos circuitos. O compensador pode ser inserido utilizando a barra de desenho mostrada na **Figura 39**.

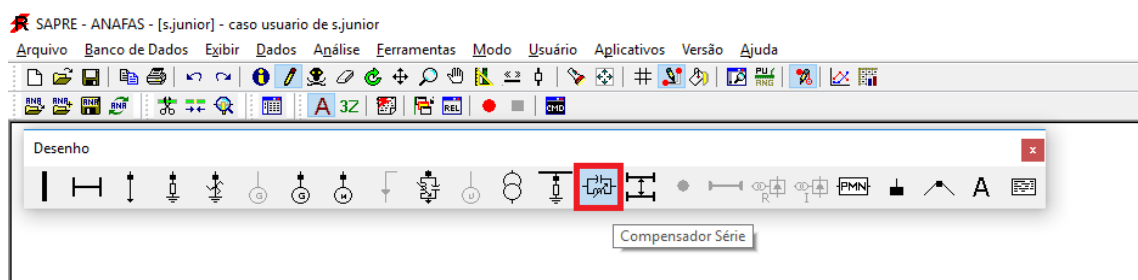
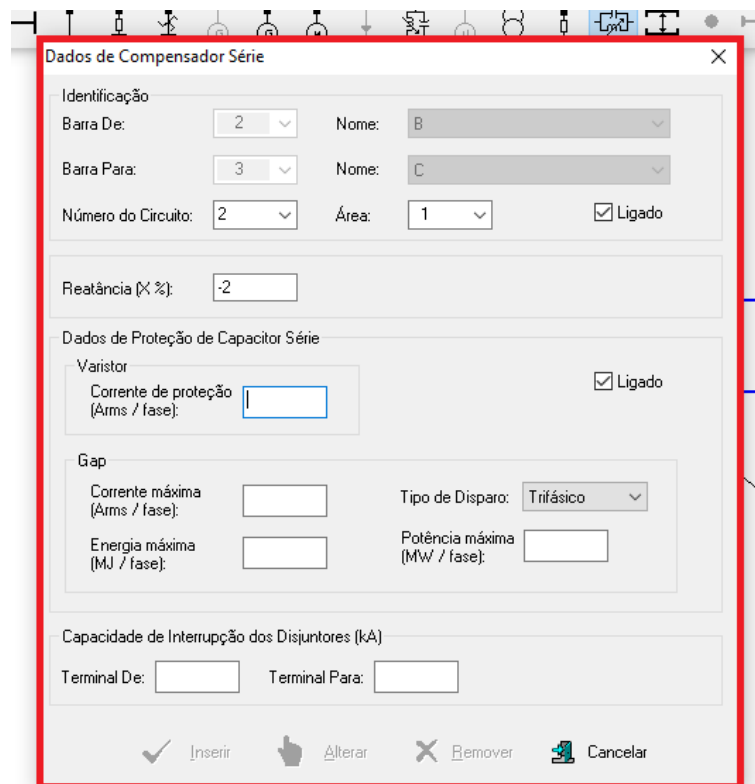


Figura 39 - Ícone do Compensador Série na barra de desenho

Outro modo de inserir um compensador série é através do menu [**Dados > Rede CA > Capacitor Série**].

Ao selecionar o compensador série pela barra de ferramentas, é necessário clicar uma vez com o botão esquerdo do mouse para selecionar a posição do desenho, e duas vezes para fixá-lo na área de desenho. Após feito isso, é necessário clicar nas barras “De” e “Para” da linha correspondente de onde o compensador irá ser instalado. Após selecionado as barras da extremidade da linha selecionada, uma janela de configuração irá surgir.

A **Figura 40** mostra a janela de configuração do compensador série.



A janela de configuração do compensador série, intitulada "Dados de Compensador Série", apresenta os seguintes campos e opções:

- Identificação:**
 - Barra De: 2
 - Barra Para: 3
 - Número do Circuito: 2
 - Área: 1
 - Ligado: ☒
- Reatância (X %):** -2
- Dados de Proteção de Capacitor Série:**
 - Varistor:**
 - Corrente de proteção (Arms / fase):
 - Ligado: ☒
 - Gap:**
 - Corrente máxima (Arms / fase):
 - Energia máxima (MJ / fase):
 - Tipo de Disparo: Trifásico
 - Potência máxima (MW / fase):
- Capacidade de Interrupção dos Disjuntores (kA):**
 - Terminal De:
 - Terminal Para:

Na base da janela, há uma barra de ferramentas com os ícones e rótulos: Inserir, Alterar, Remover e Cancelar.

Figura 40 - Janela de dados de configuração do compensador série

Os dados de configuração do compensador série são:

- **Barra “De” e Barra “Para”:** Barras dos terminais da linha onde será adicionado o compensador série.
- **Número do Circuito:** Número do circuito onde será instalado o compensador. É importante ter atenção neste dado pois, ele é responsável pela diferenciação das linhas de mesmas barras “De” e “Para”, ou seja, onde há circuitos paralelos.
- **Área:** Área onde se encontra o circuito a se instalar o compensador.
- **Ligado:** Ativa ou desativa o compensador do circuito.
- **Reatância (X%):** Valor da reatância do compensador em porcentagem. Neste dado pode-se inserir valores positivos (reator) ou negativos (capacitor). Inserindo valores negativos de reatância, o campo “Dados de Proteção de Capacitor Série”. A **Figura 41** mostra o campo “Dados de Proteção de Capacitor Série” destacado em vermelho.

Figura 41 - Dados de Proteção de Capacitor Série

O campo relativo aos dados de proteção do capacitor série, são necessários pois, o capacitor, assim como outro elemento qualquer do sistema, está sujeito à grandes correntes de falta. Desse modo, perante a falta, existe uma queda de tensão no capacitor que pode danificá-lo. Para a proteção dos capacitores série é instalado em paralelo com o mesmo, um conjunto de equipamentos constituídos por um varistor, um gap centelhador e/ou um by-pass. O varistor também conhecido como MOV (Metal-Oxide Varistor) é um semiconductor de resistência variável de acordo com a queda de tensão aplicada nos seus terminais. Deste modo quando a queda de tensão atingir valores determinadamente altos, o varistor passa a conduzir a corrente de falta que outrora passaria pelo capacitor. O gap é necessário na medida em que a dissipação de calor pelo varistor é comprometida devido à severidade da corrente de falta. Assim o gap atua removendo temporariamente o varistor e a compensação série do circuito [11].

Os dados de proteção do capacitor série são:

- **Corrente de proteção (Arms/fase):** Corrente que circula pelo capacitor fazendo com que o MOV atinja seu limite de tensão a partir do qual desvia a corrente de falta para si.
- **Corrente Máxima (Arms/fase):** Corrente na qual o gap é acionado e remove o conjunto de compensação série.

- **Energia Máxima (MJ/fase):** Energia máxima dissipada pelo varistor
- **Tipo de disparo: Trifásico ou Monofásico** – Escolhe se o gap deve disparar nas três fases para correntes máximas ou se deve disparar apenas nas fases em que a corrente máxima ocorrer.
- **Potência Máxima (MW/fase):** Potência máxima dissipada pelo MOV.

A **Figura 42** mostra o arranjo de proteções MOV de capacitores série.

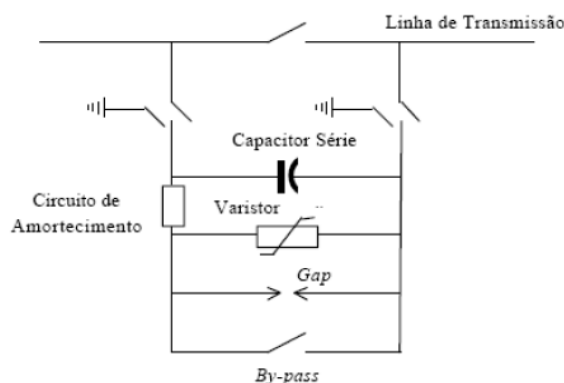


Figura 42 - Arranjo de proteções MOV para capacitores série

Fonte: Manual do Usuário –SAPRE (2011)

3.1.11- TRANSFORMADORES DE 2 ENROLAMENTOS

Os transformadores de 2 enrolamentos podem ser inseridos através da barra de desenhos ou através do menu [Dados > Rede CA > Transformador...]. A **Figura 43** mostra a inserção de transformadores através da barra de desenhos.

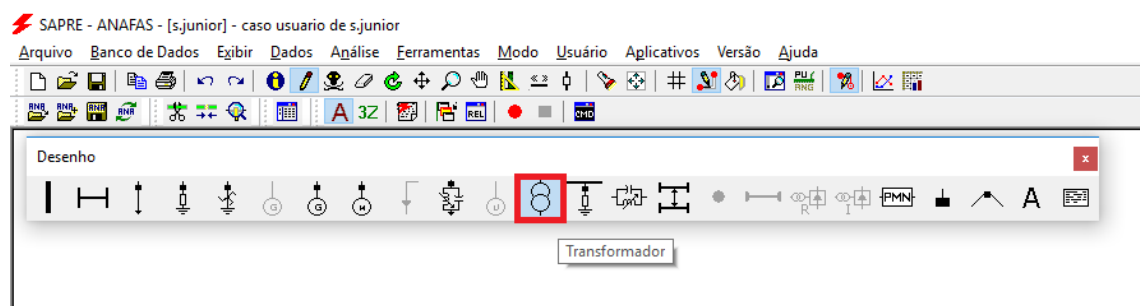


Figura 43 - Ícone Transformador na barra de desenho

A **Figura 44** mostra a inserção de transformadores através do menu “Dados”.

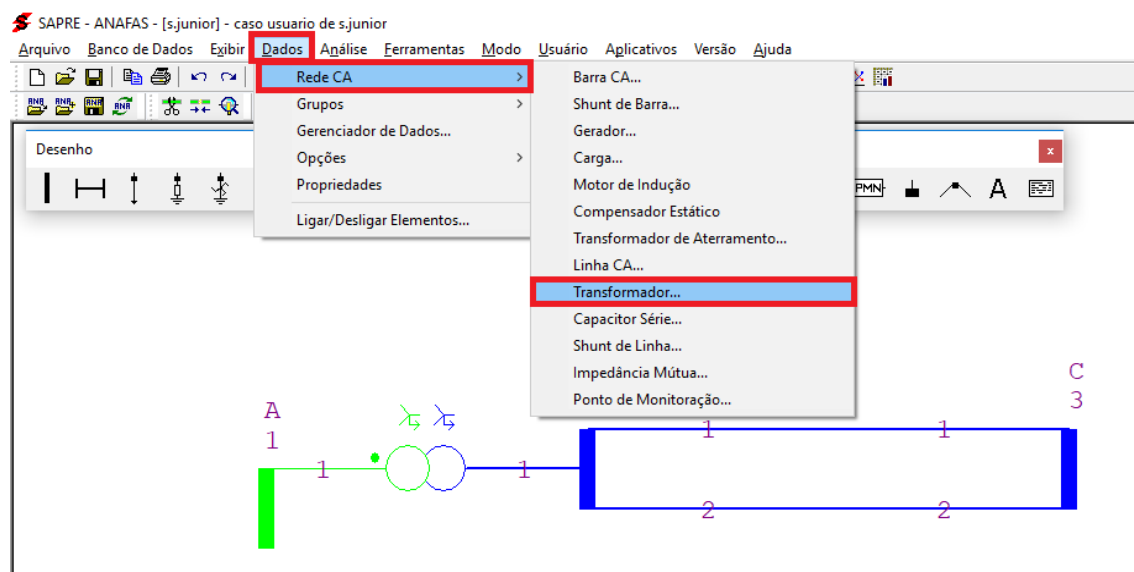


Figura 44 - Inserir Transformador através do menu "Dados"

Ao inserir o transformador pela barra de desenho é necessário clicar com o botão esquerdo do mouse para definir a posição do mesmo, e depois dar duplo clique para confirmar. Caso o usuário queira rotacionar o desenho do transformador, basta clicar com o botão direito do mouse enquanto o elemento ainda não estiver sido fixado definitivamente. Após fixado o desenho, é necessário especificar a barra “De” e barra “Para” na qual o elemento se conectará.

Após a conexão nas barras, uma janela de configuração de dados surgirá. A janela de dados do transformador é mostrada na **Figura 45**.

Dados de Transformador

Identificação

Primário: 1 Nome: A

Secundário: 2 Nome: B

Número do Circuito: 1 Área: 1 ☒ Ligado

Sequência Positiva

Resistência (R1 %): 1 Reatância (X1 %): 1

Sequência Zero

Resistência (R0 %): 1 Reatância (X0 %): 1

Tipo de Conexão do Primário

☐ Delta ☐ Estrela não aterrado ☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0 Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Tipo de Conexão do Secundário

☐ Delta ☐ Estrela não aterrado ☒ Estrela aterrado

Resistência de Aterramento (Rn %): 0 Reatância de Aterramento (Xn %): 0

Defasamento (°): 0 ☐ Implícito: ☒ Explícito: Tap (pu): 1

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Capacidade de Interrupção (kA)

Terminal De: Terminal Para:

☐ Inserir ☐ Alterar ☐ Remover ☐ Fechar

Figura 45 - Janela de dados de transformador de 2 enrolamentos

Os transformadores, assim como as linhas CA, tem impedâncias de sequência positiva e negativa iguais. Isso ocorre pois, não há diferença entre a energização por sequência positiva ou negativa. As impedâncias de sequência zero do transformador dependem da forma construtiva do núcleo e da conexão entre os enrolamentos. Têm valor igual, maior ou até infinito em comparação com as impedâncias de sequência positiva. Quando de valores finitos, a circulação de corrente se sequência zero dependerá da forma de conexão entre enrolamentos.

A **Figura 46** exemplifica os tipos de conexão e os circuitos equivalentes para a sequência zero nos transformadores.

SÍMB.	DIAGRAMA DE LIGAÇÕES	CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SEQUÊNCIA ZERO

Figura 46 - Diagramas de sequência zero

Fonte: Adaptação de STEVENSON (1986)

Os dados de transformador requerido pelo software são:

- **Primário:** Barra ligada ao primário do transformador
- **Secundário:** Barra ligada ao secundário do transformador
- **Número do Circuito:** Caso existam mais de um circuito nas mesmas barras “De” e “Para”, é necessário informar o número do circuito no qual se deseja inserir o transformador
- **Ligado:** Liga ou desliga o transformador do circuito.
- **Resistência (R1%):** Resistência de sequência positiva do transformador
- **Reatância (X1%):** Reatância de sequência positiva do transformador
- **Resistência (R0%):** Resistência de sequência zero do transformador
- **Reatância (X0%):** Reatância de sequência zero do transformador

- **Tipo de Conexão do Primário:** As conexões podem ser delta, estrela aterrado e estrela não aterrado.
- **Tipo de Conexão do Secundário:** As conexões podem ser delta, estrela aterrado e estrela não aterrado.
- **Resistência de Aterramento ($R_n\%$):** Caso o usuário opte por ligação estrela aterrada, pode-se inserir um valor de resistência de aterramento
- **Reatância de Aterramento ($X_n\%$):** Caso o usuário opte por ligação estrela aterrada, pode-se inserir um valor de reatância de aterramento
- **Defasamento:** O usuário define um defasamento angular do secundário em relação ao primário do transformador. O defasamento entre transformadores delta-estrela de polaridade subtrativa é de -30° no lado de delta, para sequência positiva. Para a sequência negativa o valor é positivo ($+30^\circ$). Para mudar o defasamento do transformador basta selecionar a opção “Explicito” e preencher o campo “defasamento” com o ângulo desejado em graus.
- **Tap:** Tap do lado com “ponto” do transformador, que representa o primário. O tap deve estar entre 0,6 e 1,4.

3.1.12- TRANSFORMADORES DE 3 ENROLAMENTOS

Os transformadores de 3 enrolamentos, quando alimentados pelo enrolamento primário, podem receber cargas nos enrolamentos secundário e terciário ou em ambos. Caso exista carga apenas no enrolamento secundário e o terciário se encontrar vazio, o trafo se comportará como um transformador de 2 enrolamentos.

Os transformadores de 3 enrolamentos podem ser representados o SAPRE com a ajuda de uma Barra Fictícia de Transformador, representando o ponto central da ligação dos três transformadores. A configuração é a mesma do transformador de 2 enrolamentos, no entanto o lado que é ligado na Barra Fictícia de Transformador não pode ser preenchido.

A **Figura 47** mostra um exemplo de ligação de transformador de 3 enrolamentos.

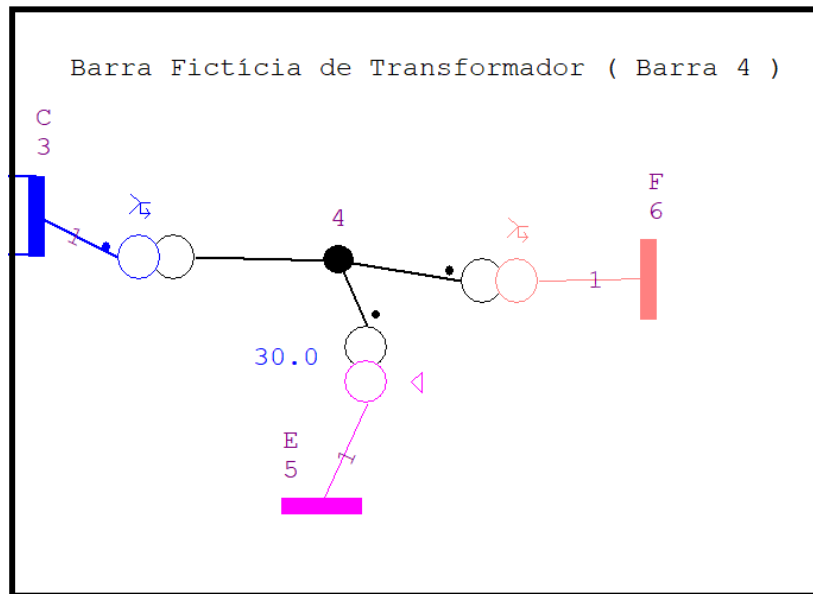


Figura 47 - Exemplo gráfico de ligação de transformador de 3 enrolamentos

A **Figura 48** exemplifica que o lado ligado na barra fictícia é anulado, destacando o transformador, e seu lado de conexão com a barra fictícia.

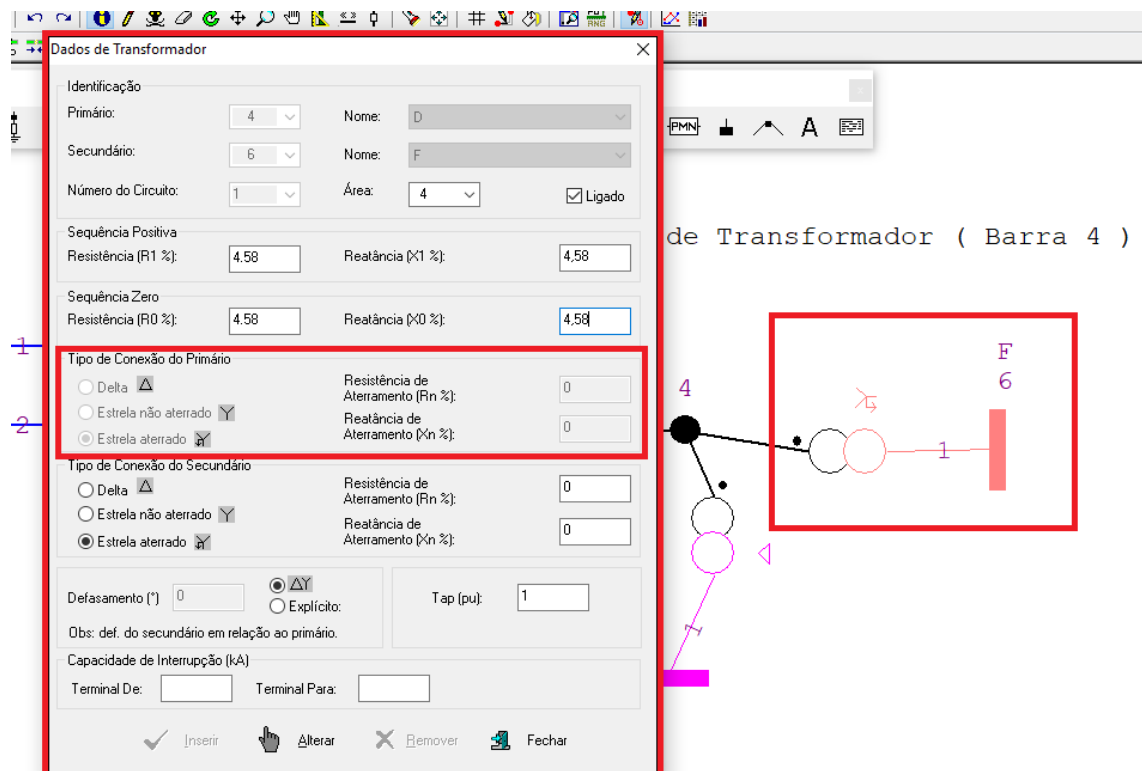


Figura 48 - Transformador com o primário ligado em barra fictícia como parte do arranjo de trafos de 3 enrolamentos

3.1.13- TRANSFORMADORES DE ATERRAMENTO

São utilizados quando se necessita aterrar o neutro. Isso facilita a identificação de faltas fase-terra nos sistemas elétricos por exemplo.

A **Figura 49** mostra o ícone na barra de desenhos referente ao transformador de aterramento.

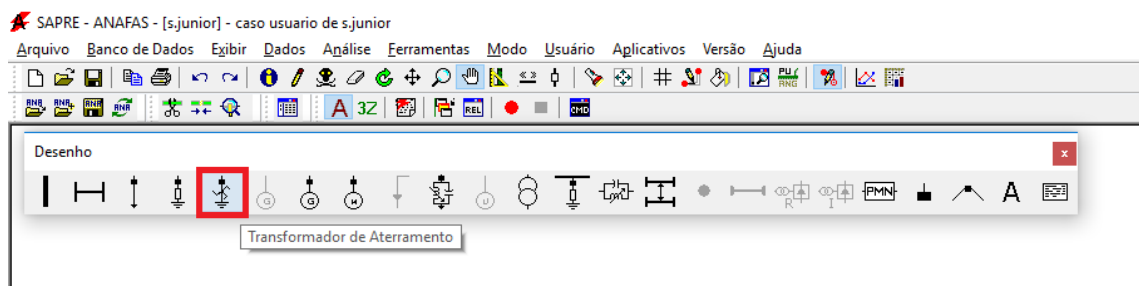


Figura 49 - Ícone do transformador de aterramento na barra de desenhos

A **Figura 50** mostra a janela de dados do transformador de aterramento.

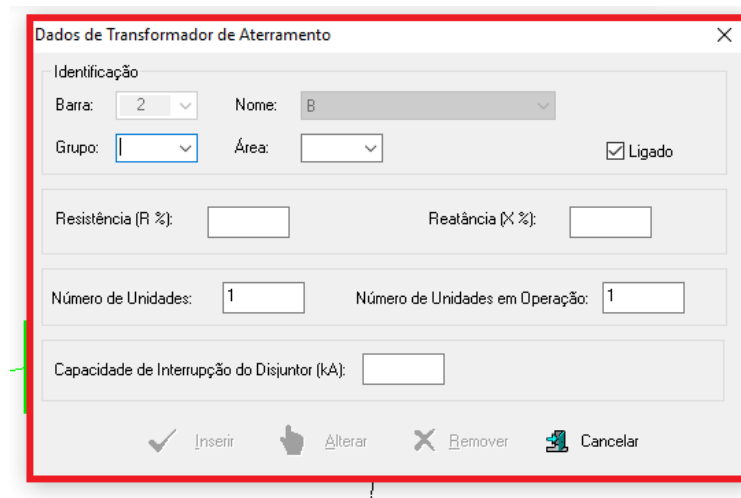


Figura 50 - Janela de configuração de dados de transformador de aterramento

Os dados de configuração dos trafos de aterramentos são:

- **Dados de Identificação:** Dados pertinentes de identificação do elemento (semelhante aos dados comuns aos outros elementos)
- **Resistência (R%):** Resistência de aterramento em porcentagem

- **Reatância (X%):** Reatância de aterramento em porcentagem
- **Número de Unidade:** Número de unidades idênticas ligadas na mesma barra
- **Número de Unidades de Operação:** Unidades idênticas ligadas na mesma barra em operação.

3.1.14- BASE DO SISTEMA

A base de potência escolhida para transformar os dados em p.u. (Por Unidade) é comum ao sistema todo. A base padrão do SAPRE é **100MVA**. No entanto é possível mudar esta base para uma melhor manipulação dos cálculos. A mudança de base é feita através do menu **[Dados > Opções > Constantes Básicas]**. A **Figura 51** mostra os caminhos para a mudança de base.

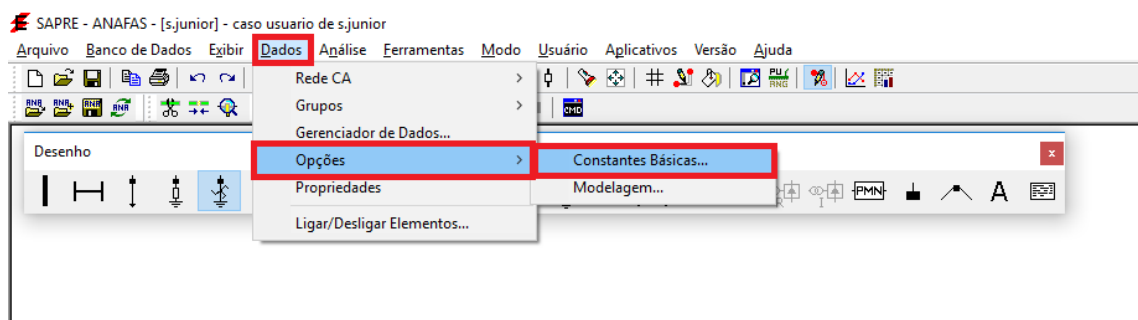


Figura 51 - Acesso ao menu de mudança de base do sistema

A **Figura 52** mostra a janela de mudança de base do sistema.

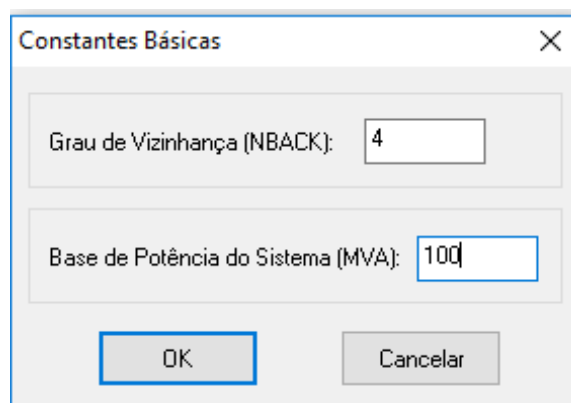


Figura 52 - Janela de mudança de base do sistema

3.1.15- BARRA DE FERRAMENTAS DE EDIÇÃO DE DESENHO

A **Figura 53** mostra a barra usada para ajustar graficamente os elementos desenhados. Ela se encontra na parte superior da janela do programa.

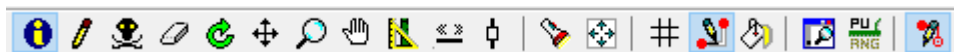


Figura 53 - Barra de ferramentas de ajuste de desenho

As funções da barra de ferramentas de desenho podem ser vistas com a ajuda das enumerações da **Figura 54**.

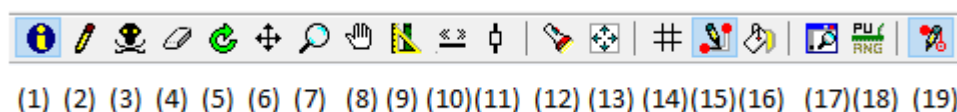


Figura 54 - Enumeração dos botões da barra de ferramentas de ajuste de desenho

As funções dos botões são:

1. Exibe as informações do elemento escolhido, podendo editá-las.
2. Ferramenta de desenho de elementos
3. Exclui os dados elétricos e gráficos do elemento escolhido
4. Apaga os dados gráficos do elemento escolhido, mas não o exclui eletricamente, mantendo seus efeitos elétricos no sistema
5. Gira o elemento ao clicar no mesmo com essa função ativada
6. Move um elemento (ou vários elementos) ao se criar uma caixa de seleção com o botão esquerdo do mouse. Clicando e arrastando o elemento com o botão direito ele é movido sem o uso da caixa de seleção
7. Ativa o modo zoom. Clicando com o botão esquerdo do mouse temos uma aproximação (Zoom in). Clicando com o botão direito temos um afastamento (Zoom out). Ao clicar e arrastar com o botão esquerdo do mouse criamos uma caixa de zoom in.
8. Move a área de trabalho ao se clicar com o botão esquerdo do mouse e arrastar.
9. Alinha os elementos deixando-os com apresentação mais retilínea. Cria uma caixa de seleção ao se clicar com o botão esquerdo e arrastar.

10. Redimensiona a barra clicando nas extremidades da mesma. O botão esquerdo aumenta a barra, e o esquerdo do mouse diminui. Nas linhas de transmissão, ao se clicar na junção entre linha e barra com o botão direito, a ligação da linha na barra é suspensa, e com o esquerdo do mouse, a linha é rebaixada.
11. Separa os elementos de uma determinada barra em 2 barras distintas. Clique na barra que deseja separar e depois na posição em que deseja a nova barra. Selecione os elementos da nova barra na janela que surgirá.
12. Localiza alguma barra do sistema, determinada pelo usuário, através do nome ou número.
13. Aplica um Zoom abrangendo a visualização de toda área de trabalho
14. Aciona o Grid, que são as linhas de grade da área de trabalho.
15. Desenha automaticamente todos os elementos série que interligam a barra desenhada a outras barras já desenhadas
16. Muda a cor de fundo da área de trabalho
17. Mostra a área de trabalho em modelo reduzido
18. Filtra as informações que são mostradas no diagrama, como nome das barras, número das barras, ângulo de tensão nas barras, etc.
19. Alterna a visualização entre desenho normal, elementos não desenhados e linhas com mútuas

4- MODELAGEM DE FALTAS E MODOS DE ESTUDO

O ANAFAS conta com a modelagem de faltas Shunt em barras e pontos intermediários de circuitos, faltas série, abertura de fases e remoção de circuitos. A seguir é feita uma introdução sobre tais modelagens.

4.1- FALTAS SHUNT

As faltas shunts são faltas entre fases pertencentes a uma mesma barra, para terra ou não. Eles são classificados em sólidos ou não-sólidos. Os curtos sólidos são aqueles que não apresentam impedância de curto. Os não-sólidos são aqueles que possuem impedância de falta, seja o curto entre fases ou entre fases e terra.

No ANAFAS o usuário define se deseja simular um curto circuito sólido ou não-sólido, através de um conjunto de impedâncias entre fase e neutro ou entre fase e fase.

Os curtos shunt, como já dito, podem ser intermediários, ou seja, podem ocorrer em pontos intermediários de linha e também em pontos fictícios que simulam uma abertura de linha.

4.2- FALTAS SÉRIE

As faltas série são caracterizadas por envolver fases de diferentes circuitos em pontos diferentes do sistema, isso se deve devido à disposição das linhas de transmissão no espaço físico, como por exemplo em casos de linhas que são alocadas dividindo a mesma torre de transmissão, sendo de circuitos diferentes (e até com diferentes níveis de tensão), ou também linhas que se cruzam, podendo ocorrer faltas entre si. Esses curtos circuitos podem ocorrer também com impedância de falta.

4.3- ABERTURAS

Abertura é a interrupção de um ponto determinado pelo usuário, podendo ser na conexão com a barra ou em um ponto intermediário da linha. Essas aberturas de linha podem ser associadas a curtos nas fases abertas ou a faltas shunt envolvendo quaisquer fases.

4.4- REMOÇÃO

A remoção tem o efeito de extinção de um ramo juntamente com seus acoplamentos. Essa remoção não exclui o ramo de fato do circuito, ela é apenas temporária, enquanto o curto é simulado.

4.5- ESTUDO INDIVIDUAL

O estudo individual consiste em uma ou mais faltas simultâneas, especificadas pelo usuário.

4.6- ESTUDO MACRO

O Estudo Macro é a combinação dos tipos de curto-circuito, pontos de falta e contingências. Nele é possível por exemplo simular vários tipos de faltas (fase-terra, trifásica, fase-fase, etc) em mais de uma barra, com contingências, no entanto cada barra curto-circuitada é analisada independentemente das outras barras curto-circuitadas.

4.6.1- PONTOS DE FALTA

Os pontos de falta do estudo macro podem ser em barra ou intermediárias. As faltas em barra são definidas pelas barras a serem curto-circuitadas. Já nas faltas intermediárias, eles podem ser especificados pela porcentagem da linha em que se deseja aplicar a falta. Nesse tipo de modelagem a linha é dividida simetricamente ao meio onde o usuário define o intervalo de aplicação das faltas variando em um comprimento de 0 a 50% da linha, e define também um delta, que é o espaçamento entre os pontos de falta que vão ocorrer dentro desse intervalo.

A **Figura 55**, retirada do “Manual do Usuário – ANAFAS, Versão 6.4 – Jun/12”, dá alguns exemplos de intervalos de pontos falta em linha de transmissão.

Intervalo		$\Delta\%$	Pontos de Falta (%)
10%	30%	5%	10, 15, 20, 25, 30, 70, 75, 80, 85, 90%
0%	50%	25%	0 25 50 75 100%
20%	20%	-	20 80%
50%	-	-	50%
10%	25%	10%	10 20 80 90%

Figura 55 - Exemplo de especificação de falta com intervalos de pontos em linha CA

Fonte: Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

Na **Figura 55**, observa-se que o intervalo de ocorrência do primeiro exemplo é de 10 a 30%. Este intervalo é relativo aos dois lados da linha de transmissão, ou seja, vale a contagem a partir das duas barras nas extremidades. A partir disso as porcentagens são definidas simetricamente em relação ao meio da linha. Definidos os intervalos de 20% (de 10% a 30%) os pontos onde as faltas ocorrerão estão espaçados de 5%.

4.6.2- CONTINGÊNCIAS

As contingências são alterações na topologia da rede elétrica, originárias de desligamentos de elementos para manutenção, retirada de elementos por atuação de relés, entrada e saída de cargas do sistema, etc. Essas alterações, momentâneas ou não, influenciam nos limites de operação da rede (modifica as tensões nas barras, sobrecarga em ramos do sistema, etc), e do ponto de vista da segurança de operação das redes, é necessário o conhecimento das possíveis contingências da rede para eliminar os problemas de violação destes limites.

As contingências que podem ser simuladas no ANAFAS, para faltas em barra são:

- **Desligamento dos Circuitos Adjacentes:** desconecta e aterra as três fases dos circuitos ligados à barra em curto.
- **Remoção dos Circuitos Adjacentes:** Remove os circuitos ligados à barra em curto. Nesta contingência, os acoplamentos mútuos de sequência zero são também eliminados.

Caso não haja acoplamentos, essa contingência se assemelha à remoção de circuitos adjacentes.

- **Curto no Fim das Linhas Adjacentes:** A falta especificada é aplicada no terminal remoto das linhas ligadas a barra, com as três fases abertas e aterradas.
- **Abertura no Terminal Remoto dos Circuitos Adjacentes:** Abre e aterra as três fases do terminal remoto das linhas ligadas na barra em curto.
- **Abertura Dupla dos Circuitos Adjacentes:** Os terminais das linhas ligadas à barra em curto são abertos nas três fases. Nesta contingência, haverá circulação de corrente de sequência zero na linha aberta, caso haja acoplamento entre a linha contingenciada e outras linhas, e haja valores de susceptância de sequência zero especificados. Do caso contrário, essa contingência se assemelha à remoção de circuitos adjacentes.

Para as faltas intermediárias, as contingências possíveis são os Desligamentos e as Remoções, podendo ser em circuitos adjacentes, acoplados, ou em ambos.

4.7- ESTUDO DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

Os estudos de superação são necessários para detectar disjuntores que foram superados em termos de curto-circuito, corrente de carga ou tensão de restabelecimento. Ou seja, pretende-se saber quais disjuntores estão sujeitos às grandezas com valores acima das nominais.

O ANAFAS separa este estudo em duas etapas. Na primeira compara-se o nível de curto total da barra analisada, com o disjuntor de menor capacidade ligado a ela. Caso o curto total da barra seja menor que a capacidade do menor disjuntor ligado à barra, não há superação. Caso o curto seja próximo ou superior da menor capacidade de interrupção, essas barras serão analisadas na segunda etapa.

Na segunda etapa, simulações são feitas, de modo que se determine a maior corrente que circula no terminal de cada circuito ligado à barra.

No ANAFAS é feito esse estudo de superação com corrente de curto-circuito simétrica, utilizando a constante de tempo (X/R). O critério para esse estudo é baseado no relatório “Estudos de Curto-Circuito – Período 2004-2007” [14], do Operador Nacional do Sistema Elétrico. O diagrama da **Figura 56**, encontrado em “Submódulo 11.3 – Estudos de Curto-Circuito – Vigência 12/2017”[15], exemplifica os critérios para os estudos de superação.

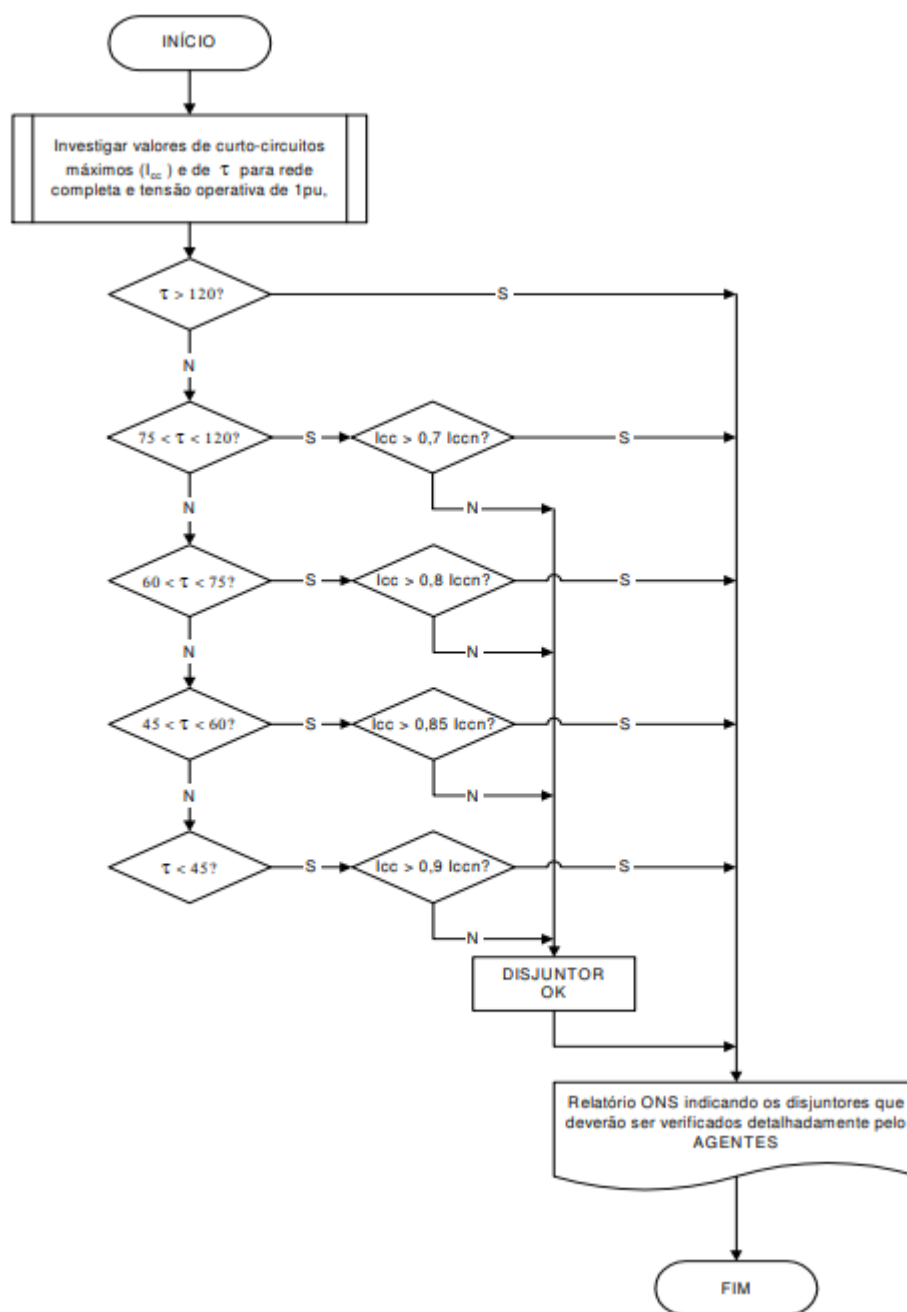


Figura 56 - Critério para superação de disjuntores por constante de tempo (X/R)

Fonte: Procedimentos de Rede, Submódulo 11.3 – Estudos de Curto-Circuito – Vigência 12/2017

Na **Figura 56**, temos os valores são expressos em milissegundos, relativos à constante de tempo, no entanto o software ANAFAS os expressa na relação (X/R).

A **Figura 57** mostra uma tabela retirada do “Manual do Usuário – ANAFAS, Versão 6.4 – Jun/12”, que caracteriza como são analisadas as constantes de tempo e organiza as barras em subconjuntos de acordo com seu nível de superação.

Subconjunto	Maior $\frac{X}{R}$ entre 1F e 3F	Maior $\frac{\text{Nível de curto}}{\text{Cap. de interrupção}}(\%)$ entre 1F e 3F
(a)	Menor que 16,96	> 90%
(b)	16,96 ~ 22,62	> 85%
(c)	22,62 ~ 28,28	> 80%
(d)	28,28 ~ 45,24	> 70%
(e)	Maior que 45,24	Qualquer
(f)	Qualquer	90% - 100%
(g)	Qualquer	> 100%
(h)	Qualquer	> "X" %

Figura 57 - Subconjuntos e relação (X/R)

Fonte: Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

Na primeira etapa, as barras são classificadas com os subconjuntos mostrados na **Figura 57**. Os subconjuntos (a – e) são os especificados nos critérios da ONS, que dividem os circuitos de acordo com sua relação (X/R). No subconjunto (f) estão contidas as barras em estado de “ALERTA”, que são as barras com superação entre 90 e 100% com qualquer relação (X/R). O subconjunto (g) contém as barras com superação acima de 100% e seu estado é “SUPERADO”. Por fim o subconjunto (h) que contém as barras, com qualquer relação (X/R) que tenha "X%" de superação determinado pelo usuário.

Na segunda etapa do estudo, analisa-se as barras do subconjunto (h), que é o grupo no qual o usuário definiu a porcentagem de superação desejada. Nesta etapa, a análise é baseada na contribuição de correntes de falta vinda de cada circuito, para saber se há realmente superação de disjuntores. São simuladas três condições faltas:

- Falta na barra, onde se verifica a corrente de falta que passa pelo circuito do disjuntor
- Falta na saída de linha após o disjuntor, onde se verifica a corrente de contribuição vinda pelo lado da barra
- Falta na saída de linha com a outra extremidade do circuito aberta

A **Figura 58** ilustra as condições de falta da segunda etapa do estudo de superação de disjuntores.

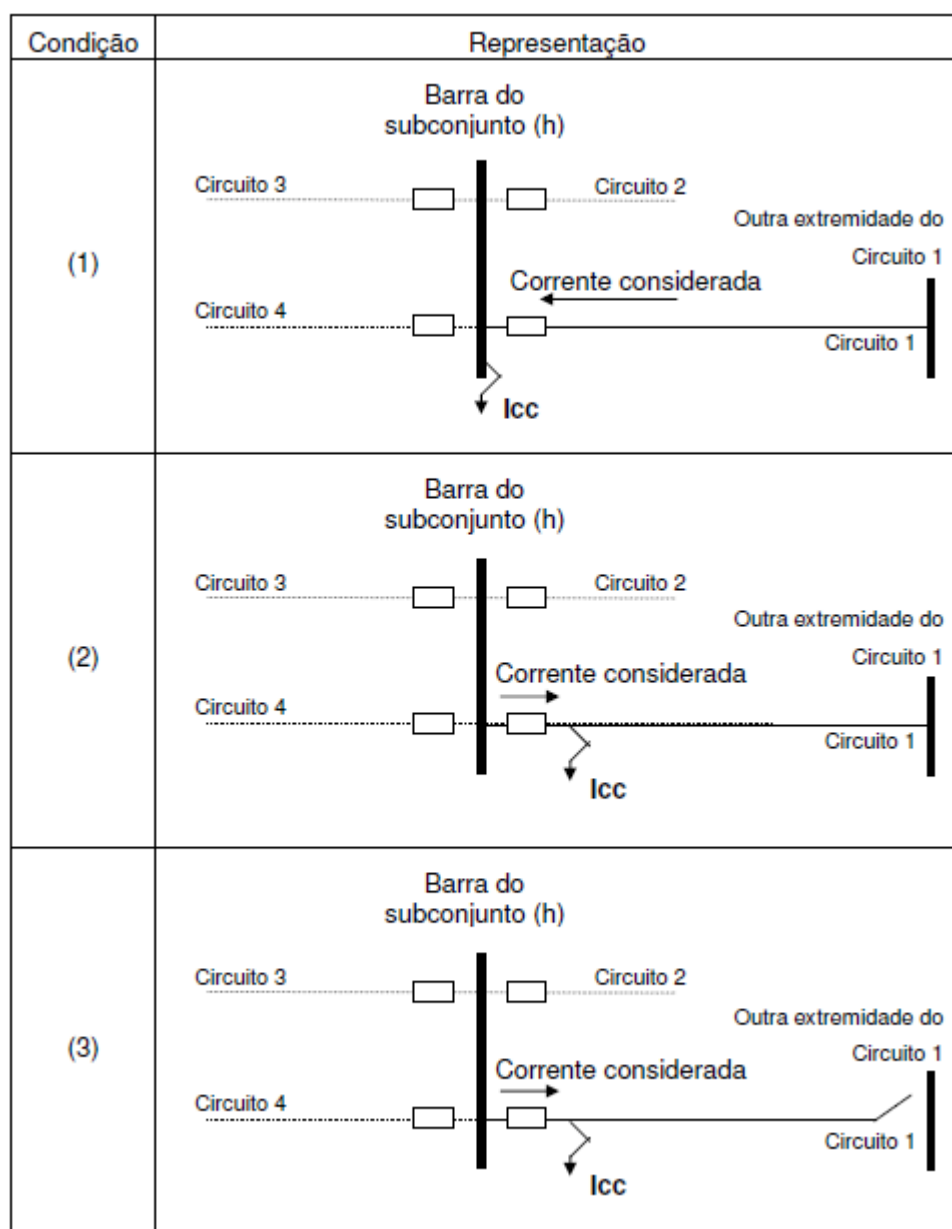


Figura 58 - Condições de falta da segunda etapa do estudo de superação de disjuntores

Fonte: Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

Cada barra incluída na segunda etapa do estudo, tem seus circuitos analisados pelas três condições, tanto para faltas trifásicas quanto monofásicas. O maior valor de corrente de contribuição dentre as condições, é comparado com a capacidade do disjuntor do respectivo circuito. Caso esse valor seja 100% ou mais, o status do disjuntor será “SUPERADO”. Caso esse valor esteja entre 90% e 100%, o status é “ALERTA”.

4.8- EQUIVALENTES PARA CURTO-CIRCUITO

Esta funcionalidade é utilizada quando deseja-se gerar equivalentes em um circuito com o intuito de delimitar as análises em elementos fora da área equivalentada. A equivalência se dá por um conjunto de ligações série e shunt que são feitas na simplificação do circuito.

No ANAFAS uma área que sofre a equivalência é chamada de área equivalentada ou área externa. A área fora do equivalente recebe o nome de área interna ou retida. A separação dessas duas áreas é chamada de fronteira.

Ao se equivalentar alguma porção do circuito, é necessário atentar-se para que linhas mutuamente acopladas não fiquem “partidas” entre áreas retidas e equivalentadas. Isso, apesar de não afetar os resultados finais de correntes de falta e tensões nas barras, pode afetar as contribuições de corrente de sequência zero no circuito que foi “partido”. Dessa forma haverá diferença nos valores de contribuição de sequência zero na rede equivalentada, em relação à mesma rede não equivalentada. Para evitar que isso aconteça, o usuário pode escolher a retenção de linhas externas que tenham algum acoplamento com linhas internas.

Um outro fator que pode gerar divergência entre redes equivalentadas ou não equivalentadas, é o desprezo de ligações série de grandes impedâncias. Para isso o ANAFAS disponibiliza ao usuário o recurso de designar um valor de impedância máximo no qual, para uma ligação série equivalente ser desprezada, deverá ter seu valor de impedância máximo superado.

4.9- EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO

Esta função compara os valores de curto-circuito em barras, de configurações diferentes de mesmo sistema elétrico. Com essa função é possível fazer uma comparação entre dois sistemas iguais de parâmetros diferentes. Por exemplo, caso queira-se comparar o mesmo sistema elétrico, com duas configurações diferentes: um sem carga e outro com carregamento pré-falta.

Para a comparação é necessário carregar os dois arquivos do ANAFAS. Os resultados são gerados em forma de relatório, com os níveis trifásicos e monofásicos de curto-circuito para cada barra referente às duas configurações, bem como o percentual de evolução dos valores (aumento ou decaimento nos níveis de curto-circuito).

4.10- MODOS DE SOLUÇÃO

Os modos de solução se referem aos resultados dos Estudos Macro e Individual, que podem ser orientados a ponto de falta, ou a ponto de monitoração.

4.10.1- SOLUÇÃO ORIENTADA A PONTO DE FALTA

Os resultados orientados a ponto de falta são soluções direcionadas ao ponto de falta e nas barras de contribuição. Os valores da corrente de falta total é a mostrado no ponto de falta, bem como os valores das correntes de contribuição nas linhas da vizinhança. É possível escolher o grau de vizinhança (“NBACK”) e mostrar os resultados apenas no grau desejado de barras vizinhas ao defeito.

Os resultados das tensões e correntes podem ser expressos tanto nas grandezas físicas (kV, kA, etc.) quanto em P.U. tanto nos relatórios quanto no diagrama do circuito. Os ângulos de fase das correntes e tensões são dados em graus, podendo ser dados em todo o círculo trigonométrico (-180° a 180°), ou no semicírculo negativo (-180° a 0°) para as correntes pressupostas indutivas. Essas tensões apresentadas são tensões fase-neutro, podendo ainda ser apresentadas como tensões fase-fase através da interatividade dos diagramas fasoriais proporcionados.

4.10.2- SOLUÇÃO ORIENTADA A PONTO DE MONITORAÇÃO

Os pontos de monitoração são pontos que monitoram grandezas especificadas pelo usuário, através da combinação linear de fatores que podem ser medições, outras grandezas monitoradas, ou constantes (reais ou complexas). As grandezas monitoradas são definidas pela combinação de fatores [11]. A **Figura 59** ilustra a combinação linear de fatores.

$$G = K \frac{\sum_i F_i}{\sum_j F_j}$$

- G: grandeza monitorada
- K: ganho constante (opcional)
- F_i : fatores numerador
- F_j : fatores denominador (opcional) .

Figura 59 - Combinação linear de fatores

Fonte: Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

Os fatores como ditos anteriormente podem ser medições, grandezas ou constantes. As medições podem ser obtidas de qualquer ponto do sistema, independentemente da localização do ponto de monitoração. As medidas de tensão, corrente e potência podem se referir à condição pré e pós-falta.

As medições de corrente e potência sofrem polarização a depender da direção da corrente. Se a corrente por exemplo estiver saindo do ponto de monitoração para o outro terminal do circuito, a polaridade é positiva. A **Figura 60** ilustra a polaridade das medições de corrente e potência.

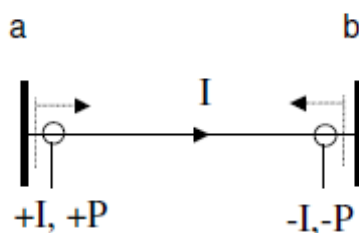


Figura 60 - Polaridade de medições de corrente e potência

Fonte: Manual do Usuário – ANAFAS (2012)

As medições de corrente e tensão e potência são feitas nas unidades físicas (kA, kV e MVA), fazendo com que o usuário trabalhe com os parâmetros também nessas unidades, em pontos de monitoração. As grandezas podem ser definidas em coordenadas de fase (a, b, c, bc, ca, ab) ou de sequência (0, 1, 2), bem como tripolares ou monopulares.

No SAPRE, a magnitude, o ângulo de fase, parte real ou imaginária pode ser monitorada especificando um limite inferior e superior para a saída da grandeza. No SAPRE os valores de

limites inferiores terão que ser menores que os superiores, ou seja, ao monitorar um ângulo de fase de corrente indutiva, os dados inferiores terão que ser nativos e os superiores serão zero.

Os pontos de observação podem ser configurados para operarem dentro de um determinado raio de faltas que ocorram em barras vizinhas.

5- ESTUDO DE CASOS

5.1- APRESENTAÇÃO DOS DADOS DOS COMPONENTES DO SISTEMA

O sistema da **Figura 61** servirá como modelo para exemplificar e realizar-se os estudos de curto-circuito. Este sistema foi baseado no sistema encontrado no “Manual do Usuário – ANAFAS, Versão 6.4 – Jun/12, pág. A34”. Este sistema se encontra descarregado e todas as tensões pré-falta são as nominais.

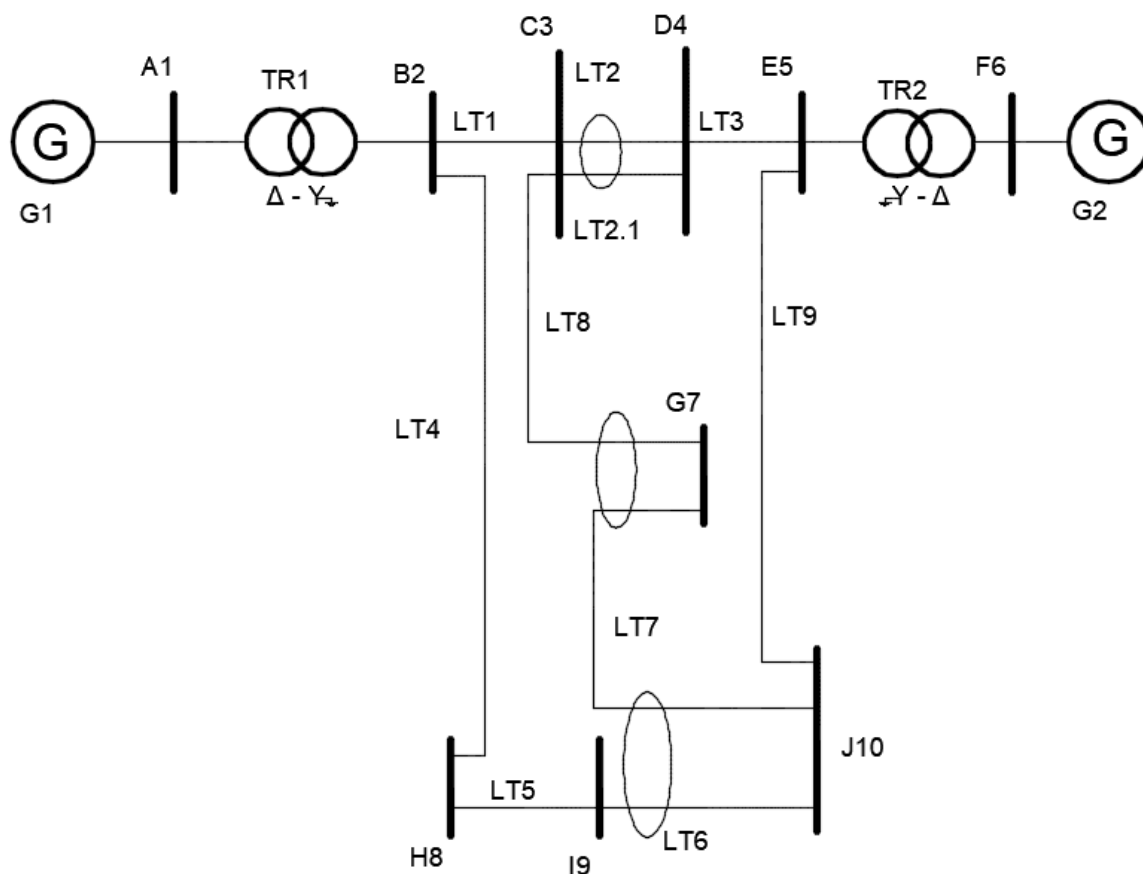


Figura 61 - Sistema exemplo

Essa rede é composta por dois geradores síncronos (G1, G2), dois transformadores delta/estrela-aterrado (TR1, TR2), dez barras CA (A1, B2, C3, D4, E5, F6, G7, H8, I9, J10) e dez linhas de transmissão (LT1, LT2, LT2.1, LT3, LT4, LT5, LT6, LT7, LT8, LT9).

A **Tabela 1** mostra as relações de tensão dos transformadores e as tensões dos geradores. Os transformadores são elevadores delta/estrela-aterrado (6,6/230kV) e os geradores são de (6,6kV), conforme mostrado.

Tabela 1 - Característica de tensão dos transformadores e geradores

Elemento da rede	Tensão
G1	6,6 kV
G2	6,6 kV
TR1	(6,6/230 kV)
TR2	(6,6/230 kV)

Os valores das reatâncias consideradas nesse estudo são os sub-transitórios. A base de potência utilizada é 100 MVA e a base de tensão são as bases características de cada região. Os valores inseridos no software são os valores de sequência positiva e zero, os valores de sequência negativa são considerados iguais aos de sequência negativa.

A **Tabela 2** mostra os valores de impedância de sequência, dos elementos da rede.

Tabela 2 - Impedâncias de sequência dos elementos da rede

Base de potência: 100MVA				
Elemento da rede	Resistência R1 (p.u.)	Reatância X1 (p.u.)	Resistência R0 (p.u.)	Reatância X0 (p.u.)
G1	0	0,0527	∞	∞
G2	0	0,0447	∞	∞
TR1	0,0458	0,0458	0,0458	0,0458
TR2	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378
LT1	0,0012	0,028	0,0022	0,048
LT2	0,0008	0,0175	0,0017	0,0346
LT2.1	0,0008	0,0175	0,0017	0,0346
LT3	0,0010	0,0192	0,0020	0,0392
LT4	0,0012	0,028	0,0022	0,048
LT5	0,0016	0,0368	0,0049	0,1023
LT6	0,0015	0,0347	0,0053	0,1063
LT7	0,0016	0,0368	0,0049	0,1023
LT8	0,0015	0,0347	0,0053	0,1063
LT9	0,0010	0,0192	0,0020	0,0392

Existem acoplamentos entre algumas linhas. A **Tabela 3** mostra os trechos acoplados, as porcentagens de acoplamento das linhas e o valor das impedâncias mútuas.

Tabela 3 - Trechos acoplados e impedâncias mútuas

Base de potência: 100MVA					
Circuito 1	Trecho 1	Circuito 2	Trecho 2	Rm (p.u.)	Xm (p.u.)
LT2 (3 para 4)	0% - 100%	LT2.1 (3 para 4)	0% - 100%	0,0052	0,0219
LT8 (3 para 7)	50% - 100%	LT7 (7 para 10)	0% - 25%	-0,0032	-0,0112
LT7 (7 para 10)	0% - 50%	LT6 (9 para 10)	0% - 100%	0,0058	0,0288

A nomenclatura das barras do sistema está disposta na **Tabela 4**, bem como seus níveis de tensão e tipo.

Tabela 4 - Barramentos do sistema

Barra			Tensão Base (kV)
Número	Nome	Tipo	
1	A	Normal	6,6
2	B	Normal	230
3	C	Normal	230
4	D	Normal	230
5	E	Normal	230
6	F	Normal	6,6
7	G	Normal	230
8	H	Normal	230
9	I	Normal	230
10	J	Normal	230

5.2- MONTAGEM DO DIAGRAMA NO SAPRE

A montagem do diagrama no SAPRE, segue os métodos descritos no capítulo 3 deste trabalho. A partir deles e dos parâmetros disposto no subitem 5.1 deste trabalho, a montagem

do diagrama foi feita e pode ser conferida na **Figura 62**. A **Figura 62** mostra a visão geral do diagrama unifilar do sistema exemplo.

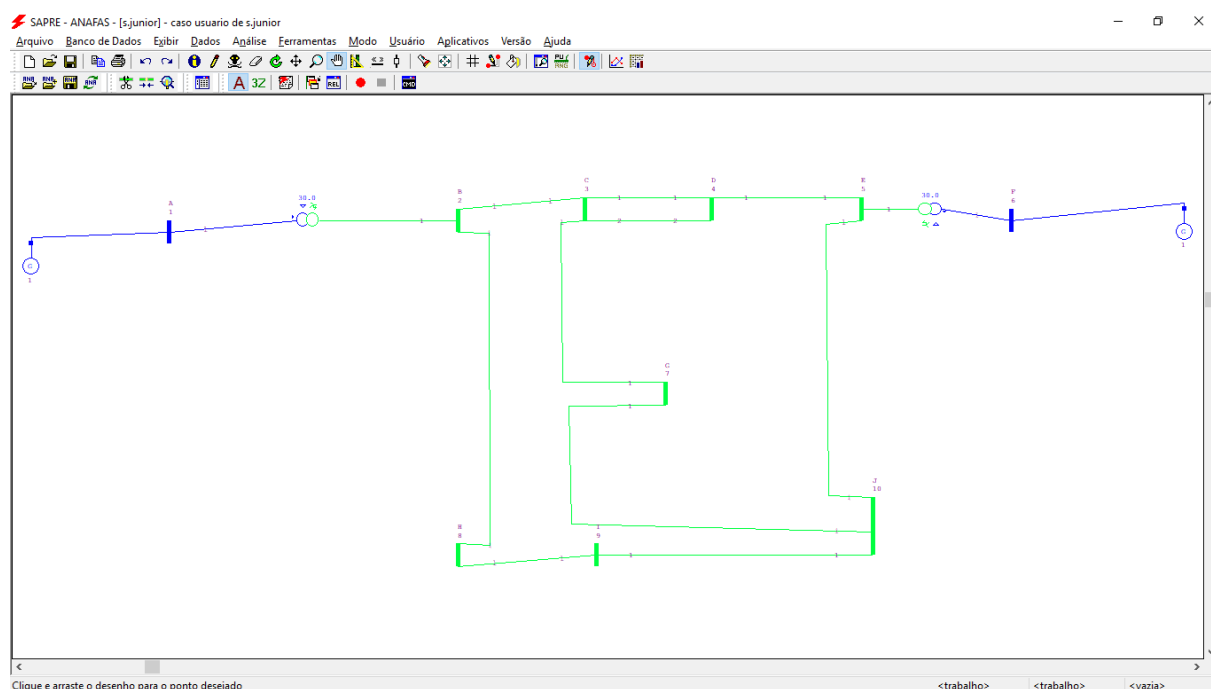


Figura 62 - Visão geral do diagrama unifilar

O sistema possui dois níveis de tensão base: 6,6kV e 230kV. O nível de 6,6 kV foi convencionado na área 2 (área de 6,6kV), que é a área dos geradores. A área verde (área de 230kV) foi convencionada para o nível de 230 kV, compreendida entre os dois geradores.

Como exemplo, a **Figura 63** mostra a configuração do gerador 1 (G1). Para o outro gerador, salvo os parâmetros próprios, a configuração é a mesma.

Dados de Transformador

Identificação

Primário:

1

Nome:

A

Secundário:

2

Nome:

B

Número do Circuito:

1

Área:

1

Ligado

Sequência Positiva

Resistência (R1 %):

4.58

Reatância (X1 %):

4.58

Sequência Zero

Resistência (R0 %):

4.58

Reatância (X0 %):

4.58

Tipo de Conexão do Primário

☒ Delta

Resistência de

Aterramento (Rn %):

0

☐ Estrela não aterrado

Reatância de

Aterramento (Xn %):

0

☐ Estrela aterrado

Tipo de Conexão do Secundário

☐ Delta

Resistência de

Aterramento (Rn %):

0

☐ Estrela não aterrado

Reatância de

Aterramento (Xn %):

0

☒ Estrela aterrado

Defasamento (°)

30

☒ ΔY

☐ Explícito:

Obs: def. do secundário em relação ao primário.

Tap (pu):

1

Capacidade de Interrupção (kA)

Terminal De:

209

Terminal Para:

4.4

Inserir

Alterar

Remover

Fechar

Figura 64 - Configuração do transformador 1

A **Figura 65** mostra o diagrama unifilar com as impedâncias mútuas sendo exibidas, utilizando a ferramenta “Exibir Linhas com Mútuas”, localizada na barra de ferramenta de ajuste de desenho especificada no capítulo 3 deste trabalho.

78

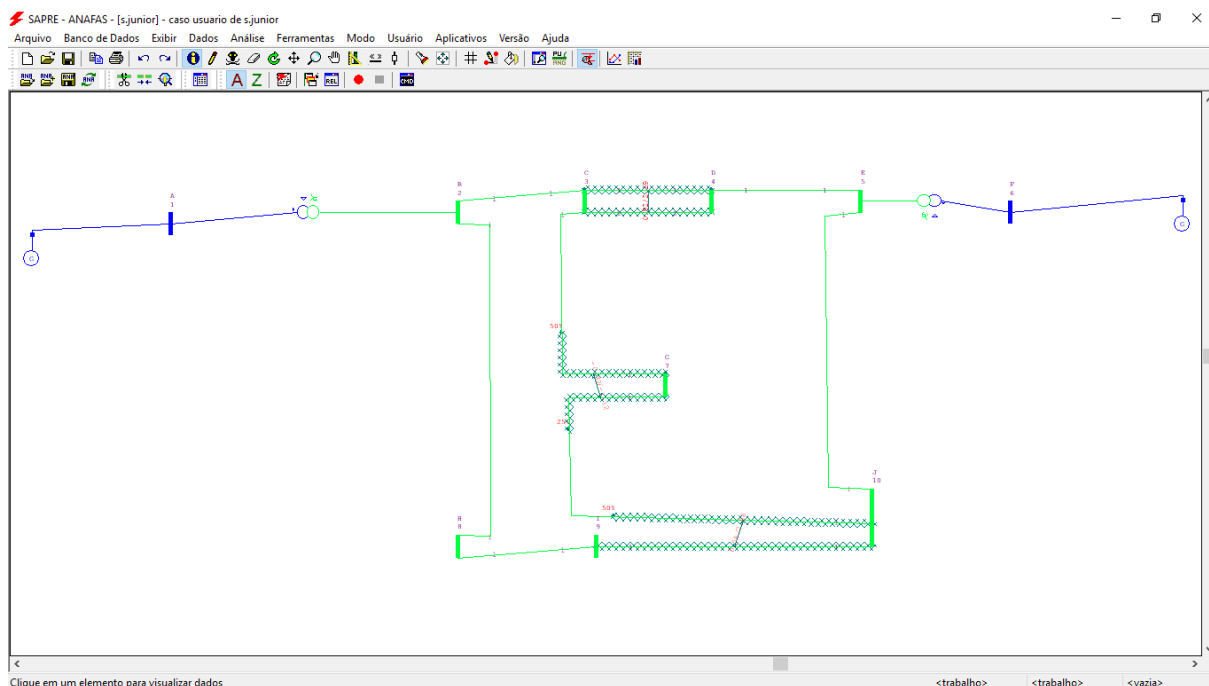


Figura 65 - Localização das mútuas no diagrama unifilar

A **Figura 66** mostra a janela de dados da linha de transmissão 3 (LT3), as demais linhas seguem os mesmos padrões de preenchimento, salvo as particularidades dos dados de cada linha.

The screenshot shows the 'Dados de Linha CA' dialog box. It contains the following fields and values:

- Identificação:**
 - Barra De: 4
 - Barra Para: 5
 - Número do Circuito: 1
 - Nome: D
 - Nome: E
 - Área: 1
 - ☒ Ligado
- Sequência Positiva:**
 - Resistência (R1 %): 0.1
 - Reatância (X1 %): 1.92
 - Susceptância (S1 Mvar): 0
- Sequência Zero:**
 - Resistência (R0 %): 0.2
 - Reatância (X0 %): 3.92
 - Susceptância (S0 Mvar): 0
- Capacidade de Interrupção (kA):**
 - Terminal De: 4.15
 - Terminal Para: 4.55

At the bottom of the dialog box, there are four buttons: Inserir (with a checkmark icon), Alterar (with a hand icon), Remover (with an X icon), and Fechar (with a close icon).

Figura 66 - Parâmetros da linha 3 (LT3)

5.3- FALTAS SIMULTÂNEAS – CURTO MONOFÁSICO NA BARRA 2 E FASE-FASE-TERRA NA BARRA 7

Essas faltas ocorrem simultaneamente em duas barras do circuito. A falta monofásica é configurada para ocorrer na barra 2, e a falta bifásica para terra acontece na barra 7.

Para simular essas faltas é necessário acessar o menu [Análise > Estudo Individual...]. A **Figura 67** indica o caminho para acessar a opção de estudo individual.

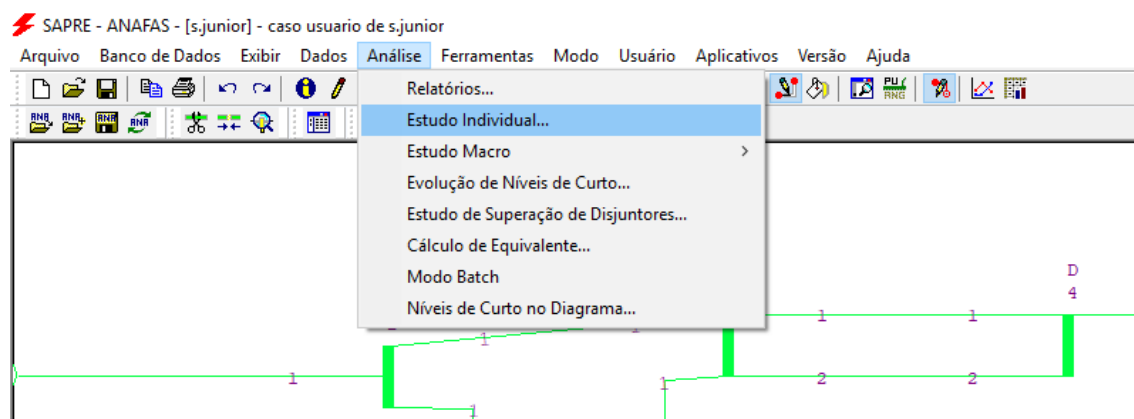


Figura 67 - Acesso ao Estudo Individual

Ao selecionar a opção de Estudo Individual, uma janela surgirá, contendo os parâmetros iniciais para a definição do estudo. A **Figura 68** mostra a janela dos parâmetros iniciais do Estudo Individual. A parte superior, destacada com um retângulo vermelho, é destinada à escolha do tipo de falta a ser simulada. Na parte inferior, destacada em retângulo preto, o usuário pode selecionar (opcionalmente) a orientação do relatório de execução da falta, bem como definir a unidade de saída das grandezas presentes no relatório.

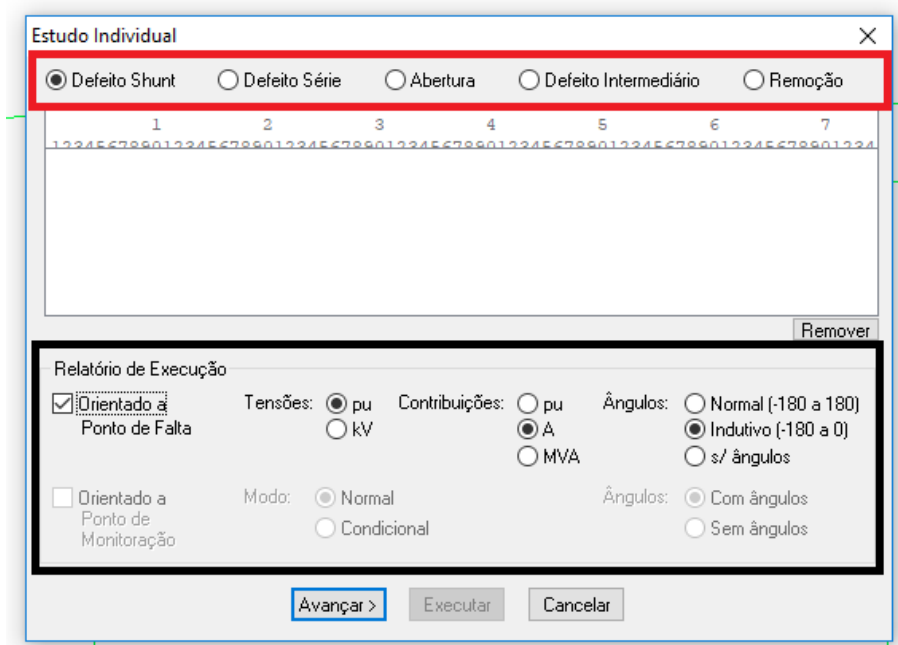


Figura 68 - Janela do Estudo Individual

Após selecionado o tipo de falta e os parâmetros do relatório de saída, o usuário deve selecionar o botão “Avançar”. Ao avançar, surgirá mais uma janela, na qual é solicitado os parâmetros da falta shunt. A **Figura 69** mostra a janela de defeito shunt.

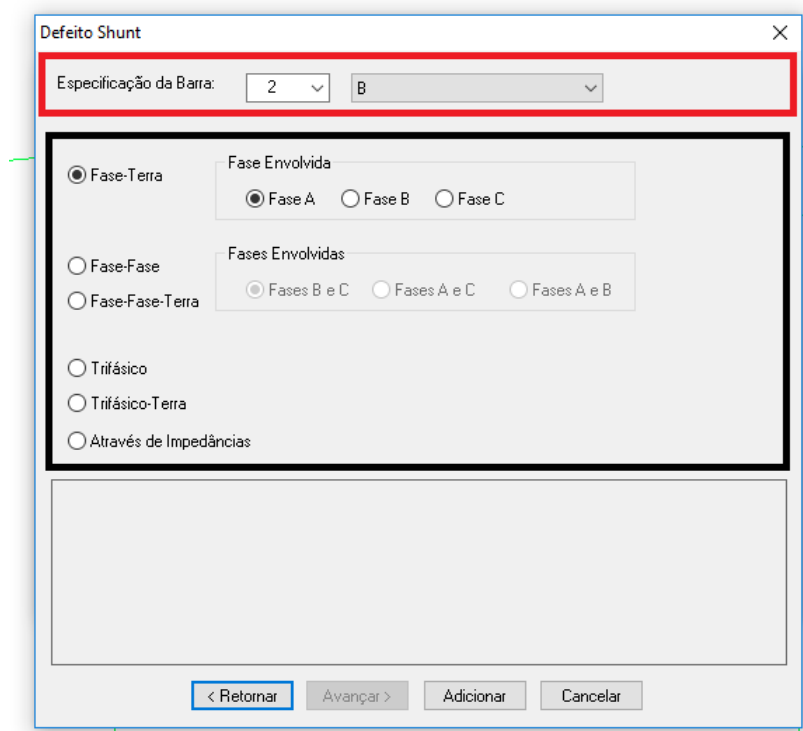


Figura 69 - Janela de Defeito Shunt

O parâmetro do retângulo vermelho diz respeito à localização da barra do defeito. No retângulo preto estão contidos os parâmetros do tipo de falta e as respectivas fases envolvidas no defeito.

Após selecionar a falta, deve-se clicar em “Adicionar”. A janela da **Figura 68** voltará a aparecer para que o usuário possa especificar uma nova falta para ocorrer simultaneamente. Para especificar uma nova falta simultânea basta selecionar novamente o tipo de defeito e seus parâmetros. As janelas de configuração para os outros defeitos são similares e intuitivas. Para simular, basta clicar em “Executar”.

5.3.1- RESULTADO DA SIMULAÇÃO NO DIAGRAMA E ANÁLISE DA FALTA

Ao executar a simulação da falta, o diagrama unifilar exibirá os resultados. Nos pontos da falta é exibido um ícone vermelho em formato de “raio” indicando que a falta (ou as faltas) ocorreram ali. Nas barras são exibidos os valores de módulo de tensão pós-falta. As linhas exibem os valores de contribuição das correntes de curto. As grandezas estão em p.u. (Por Unidade). A **Figura 70** mostra o resultado no diagrama do curto simultâneo nas barras 2 e 7 para a fase A.

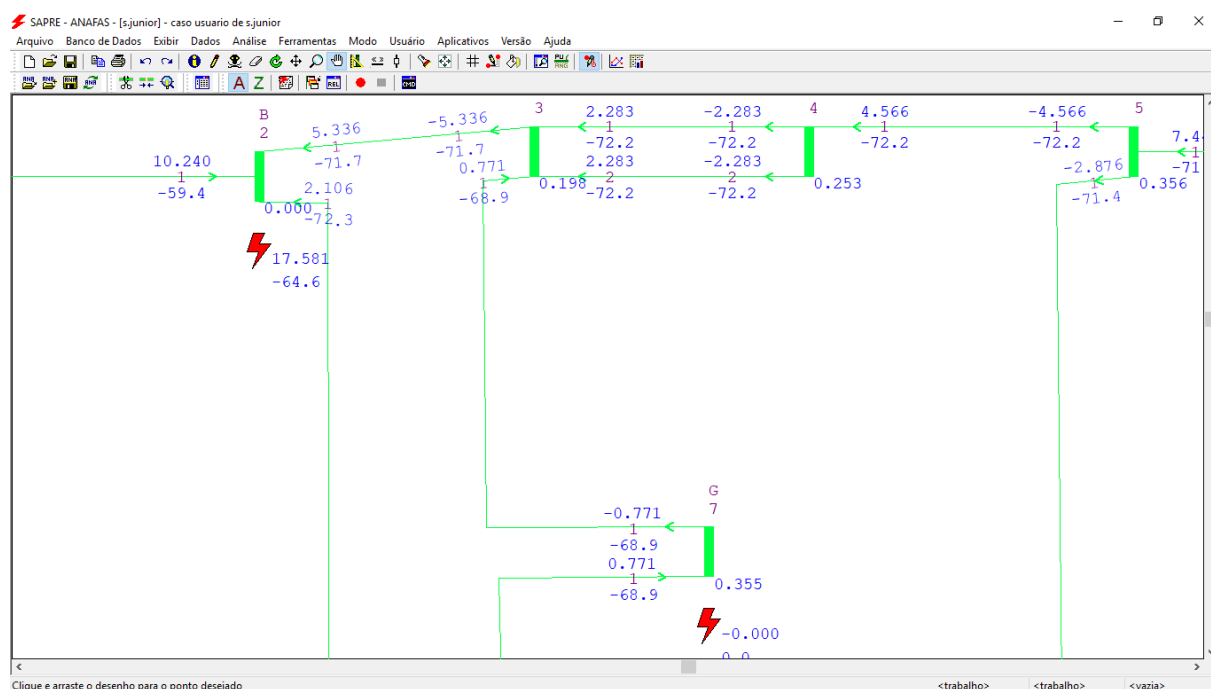


Figura 70 - Resultados no diagrama para as faltas simultâneas nas barras 2 e 7 – Fase A

A **Tabela 5** mostra os resultados para o curto monofásico na barra 2.

Tabela 5 - Resultados do curto monofásico na barra 2

Curto monofásico – Barra 2											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,000	0,0	Z	0,188	-179,3	A	17,581	-64,6	Z	5,86	-64,6
B	0,377	-122,3	P	0,280	9,9	B	0,000	0,0	P	5,86	-64,6
C	0,479	139,4	N	0,099	-152,5	C	0,000	0,0	N	5,86	-64,6

A **Tabela 6** mostra os resultados para o curto na barra 7.

Tabela 6 - Resultados do curto fase-fase-terra na barra 7

Curto fase-fase-terra – Barra 7											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,355	9,8	Z	0,118	9,8	A	0,000	0,0	Z	-2,879	-83,1
B	0,000	0,0	P	0,118	9,8	B	-11,730	-4,0	P	8,178	-74,6
C	0,000	0,0	N	0,118	9,8	C	-13,181	-144,0	N	-5,348	-70,0

Observando o resultado da **Tabela 5**, vemos que para o curto monofásico da barra 2, a corrente de curto total é dada pela corrente da fase A, que vale **17,581 p.u.** ou **4413,1 A**. Isso é característico dos curtos monofásicos, onde a corrente de curto é dada pela fase defeituosa. As correntes das fases B e C, terão valor nulo quando desprezadas as correntes de carga. Outra característica deste curto é a igualdade dos valores de sequência zero, positiva e negativa, que equivalem um terço cada uma da corrente total de falta (corrente da fase A) [1].

As tensões fase-neutro na barra do curto monofásico sofrem um afundamento de maior magnitude devido à influência do curto simultâneo fase-fase-terra, ocorrido na barra 7. A severidade do afundamento se deve pelas características do curto bifásico para terra, em que as fases do envolvidas no defeito sólido, tem tensão nula.

O curto fase-fase-terra ocorrido na barra 7 tem por característica própria do curto, a corrente total de falta dada pela soma das correntes das fases defeituosas (fases B e C). A corrente total de falta é **8,629 p.u.** ou **2165,9 A**. Essa corrente também é encontrada triplicando

o valor da corrente de sequência zero. Houve também um afundamento de tensão de maior severidade na fase A, devido a interação do curto monofásico simultâneo.

5.3.2- SENTIDO DAS CORRENTES E VALORES NEGATIVOS

Os sentidos das correntes são mostrados no diagrama e os valores são convencionados como positivos ou negativo dependendo do sentido das correntes em relação às barras. Para as correntes que chegam nos nós (barras) a corrente é representada como positiva (módulo positivo) e para as correntes que deixam o nó a representação é negativa. A **Figura 71** exemplifica os valores de corrente e tensões do resultado da simulação. Nela, as grandezas contidas no retângulo preto são as correntes de contribuição vindas das linhas conectadas à barra em curto, relativas à fase A. A grandeza contida no retângulo vermelho, juntamente com o símbolo de “raio”, é a corrente total de curto para a fase A do sistema. A grandeza contida no retângulo laranja, é o módulo de tensão da barra em questão, que é uma das barras em curto.

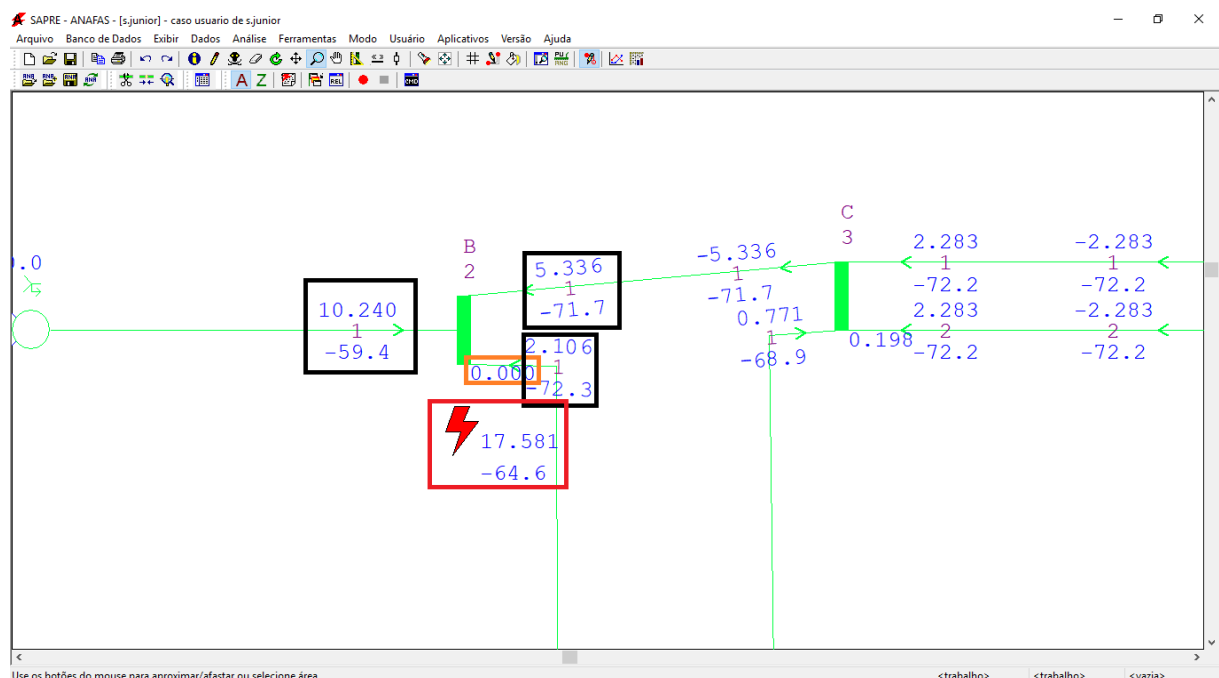


Figura 71 - Indicação de grandezas no diagrama

5.3.3- MUDANÇA DE UNIDADES DE VALORES DE CURTO NO DIAGRAMA

O usuário pode definir as unidades exibidas no diagrama através do menu **[Exibir > Opções de Legenda...]** ou simplesmente pelo comando **[Ctrl+I]**.

Ao acionar esse comando, a janela de configuração de legenda surgirá. Nessa janela é possível mudar as unidades dos parâmetros mostrados no diagrama, como por exemplo, exibir os valores de corrente em quiloampères em vez de P.U.

A **Figura 72** mostra a janela de Configuração de Legenda. Nela é possível configurar tanto as unidades das grandezas, como mostrar ou omiti-las no diagrama. Por exemplo, é possível, caso queira-se, informar o ângulo das tensões nas barras, os dados de identificação das barras, os parâmetros de sequência positiva e zero das linhas, etc.

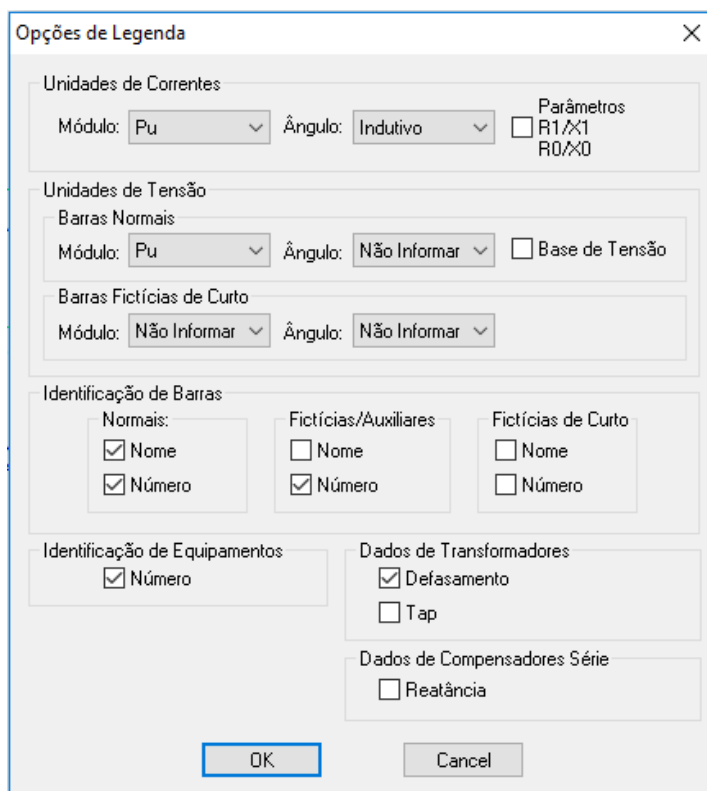


Figura 72 - Janela de opções de legenda

5.3.4- EXIBIÇÃO DE RESULTADOS POR FASE E POR SEQUÊNCIA

É possível exibir os valores para as fases A, B e C do sistema, como também os valores de sequência positiva, negativa e zero. A **Figura 73** mostra a localização dos botões para a seleção de fases e seleção de sequência. Clicando no botão da barra de ferramentas destacado

em preto, muda-se a visualização dos resultados entre as fases A, B e C, cada um por vez. Já o botão destacado em vermelho muda a visualização de resultados para a fase A das componentes de sequência (P, N, Z).



Figura 73 - Botões de exibição de fase e sequência

5.3.5- DIAGRAMAS FASORIAIS

Para os resultados de curto, o software oferece a exibição dos diagramas fasoriais. Para visualizar um diagrama fasorial basta clicar com o botão direito do mouse, com o botão “Obter Informações do Elemento (F2)” acionado, em alguma grandeza (tensão nas barras, corrente de curto total, corrente de contribuição, etc.). A **Figura 74** mostra o diagrama fasorial para o ponto de falta na barra 2.

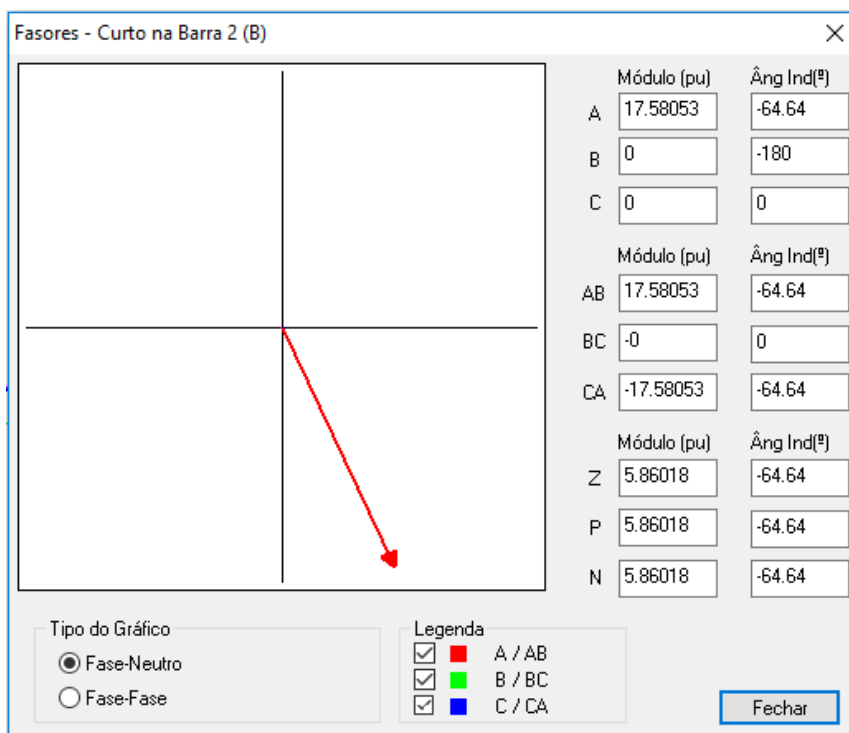


Figura 74 - Diagrama fasorial da falta na barra 2

5.3.6- LIMPAR RESULTADOS DO CURTO

Caso o usuário deseje limpar os resultados da simulação, do diagrama, ele pode efetuar o comando [Ctrl + d] ou acessar o menu [Ferramentas > Limpar Resultados do Curto].

5.3.7- RELATÓRIO DE FALTA

Se o usuário optou pelo Relatório de Execução na configuração da falta, juntamente com os resultados no diagrama, irá ser gerado um relatório em forma de texto, com os resultados da falta simulada. Neste relatório estão contidas as tensões e correntes e curto, bem como as contribuições.

A **Figura 75** mostra uma porção do relatório gerado para as faltas simultâneas nas barras 2 e 7.

```
caso usuario de s.junior

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 2 DEFEITOS
1) Curto monofasico p/ terra na fase A da barra      2 (B      ) .
2) Curto bifasico p/ terra nas fases B e C da barra  7 (G      ) .

T E N S O E S   E   C O R R E N T E S   D E   C U R T O

Barra      2 (B      )
TENSAO(pu)      CORRENTE(pu )
mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.
A 0.000  0.0  Z 0.188 -179.3  A 17.581 -64.6  Z 5.860 -64.6
B 0.377 -122.3  P 0.280  9.9  B 0.000  0.0  P 5.860 -64.6
C 0.479 139.4  N 0.099 -152.5  C 0.000  0.0  N 5.860 -64.6

Barra      7 (G      )
TENSAO(pu)      CORRENTE(pu )
mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.
A 0.355  9.8  Z 0.118  9.8  A 0.000  0.0  Z -2.879 -83.1
B 0.000  0.0  P 0.118  9.8  B -11.730 -4.0  P 8.178 -74.6
C 0.000  0.0  N 0.118  9.8  C -13.181 -144.0  N -5.348 -70.0

T E N S O E S   E   C O R R E N T E S   D E   C O N T R I B U I C A O

Bar.      2 (B      ) TEN.(pu)
mod. ang.      mod. ang.
A 0.000  0.0  Z 0.188 -179.3
B 0.377 -122.3  P 0.280  9.9
C 0.479 139.4  N 0.099 -152.5

Bar.      3 (C      ) TEN.(pu)      Cir. 1L(      ) CORR.(pu ) p/ 2
mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.
A 0.198 13.2  Z 0.072 173.3  A 5.336 -71.7  Z 2.434 -82.0
B 0.266 -124.2  P 0.258 11.2  B -3.387 -179.6  P -0.820 -92.1
C 0.327 142.4  N 0.017 -49.9  C 4.607 -151.6  N 3.714 -69.3

Bar.      8 (H      ) TEN.(pu)      Cir. 1L(      ) CORR.(pu ) p/ 2
mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.
A 0.076 12.5  Z 0.147 -180.0  A 2.106 -72.3  Z 0.861 -84.0
B 0.343 -122.6  P 0.278 10.4  B -1.012 -176.0  P -0.135 -122.2
C 0.429 140.5  N 0.062 -146.8  C 1.518 -155.4  N 1.352 -69.3

Bar.      1 (A      ) TEN.(pu)      Cir. 1T(      ) CORR.(pu ) p/ 2
mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.      mod. ang.
A 0.711 -43.9  Z 0.000  0.0  A 10.240 -59.4  Z 2.908 -44.3
B 0.636 -160.9  P 0.684 -40.7  B 4.397 -178.7  P 6.679 -68.9
C 0.707  82.8  N 0.048 -97.5  C -6.122 -152.5  N 0.911 -37.5
```

Figura 75 - Porção do relatório das faltas simultâneas nas barras 2 e 7

O relatório mostra os valores de módulo e ângulo para cada fase (A, B e C) e para as componentes de sequência. A **Figura 76** é uma porção do relatório de falta e destaca melhor os valores de módulo e ângulo para cada fase e para as componentes de sequência.

caso usuario de s.junior

DESCRICAO DA FALTA COMPOSTA DE 2 DEFEITOS									
1) Curto monofasico p/ terra na fase A da barra 2 (B) .									
2) Curto bifasico p/ terra nas fases B e C da barra 7 (G) .									

TENSOES E CORRENTES DE CURTO									
Barra 2 (B)									
TENSAO(pu)					CORRENTE(pu)				
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.000	0.0	Z 0.188	-179.3	A	17.581	-64.6	Z	5.860	-64.6
B 0.377	-122.3	P 0.280	9.9	B	0.000	0.0	P	5.860	-64.6
C 0.479	139.4	N 0.099	-152.5	C	0.000	0.0	N	5.860	-64.6
Barra 7 (G)									
TENSAO(pu)					CORRENTE(pu)				
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.355	9.8	Z 0.118	9.8	A	0.000	0.0	Z	-2.879	-83.1
B 0.000	0.0	P 0.118	9.8	B	-11.730	-4.0	P	8.178	-74.6
C 0.000	0.0	N 0.118	9.8	C	-13.181	-144.0	N	-5.348	-70.0

TENSOES E CORRENTES DE CONTRIBUICAO									
Bar. 2 (B) TEN.(pu)									
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.000	0.0	Z 0.188	-179.3	A	0.000	0.0	Z	-2.879	-83.1
B 0.377	-122.3	P 0.280	9.9	B	-11.730	-4.0	P	8.178	-74.6
C 0.479	139.4	N 0.099	-152.5	C	-13.181	-144.0	N	-5.348	-70.0
Bar. 3 (C) TEN.(pu)									
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.198	13.2	Z 0.072	173.3	A	5.336	-71.7	Z	2.434	-82.0
B 0.266	-124.2	P 0.258	11.2	B	-3.387	-179.6	P	-0.820	-92.1
C 0.327	142.4	N 0.017	-49.9	C	4.607	-151.6	N	3.714	-69.3
Bar. 8 (H) TEN.(pu)									
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.076	12.5	Z 0.147	-180.0	A	2.106	-72.3	Z	0.861	-84.0
B 0.343	-122.6	P 0.278	10.4	B	-1.012	-176.0	P	-0.135	-122.2
C 0.429	140.5	N 0.062	-146.8	C	1.518	-155.4	N	1.352	-69.3
Cir. 1L() CORR.(pu) p/ 2									
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 5.336	-71.7	Z 2.434	-82.0	A	5.336	-71.7	Z	2.434	-82.0
B -3.387	-179.6	P -0.820	-92.1	B	-3.387	-179.6	P	-0.820	-92.1
C 4.607	-151.6	N 3.714	-69.3	C	4.607	-151.6	N	3.714	-69.3

Figura 76 - Grandezas do relatório de execução

Na **Figura 76**, os dados de descrição da falta estão contidos no retângulo roxo. Esses dados informam o tipo de falta descrita no relatório e as barras em que ocorrem. Os dados contidos no retângulo vermelho, são os valores para os pontos de falta. Nele estão os valores para as barras 2 e 7. Os dados apresentados são de tensão e corrente para cada barra, tanto para as fases quanto para as sequências. No retângulo verde estão contidas as tensões e corrente de

contribuição. Os retângulos pretos destacam a tensão na barra 3 e a corrente de contribuição desta barra para a barra 2.

5.4- ESTUDO MACRO EM BARRA – FALTA TRIFÁSICA NA BARRA 3 COM CONTINGÊNCIA E IMPEDÂNCIA DE FALTA

Para iniciar um estudo Macro em barra, o usuário deve acessar o menu **[Análise > Estudo Macro > Em Barra...]**. A **Figura 77** mostra o caminho para acessar o Estudo Macro em Barra.

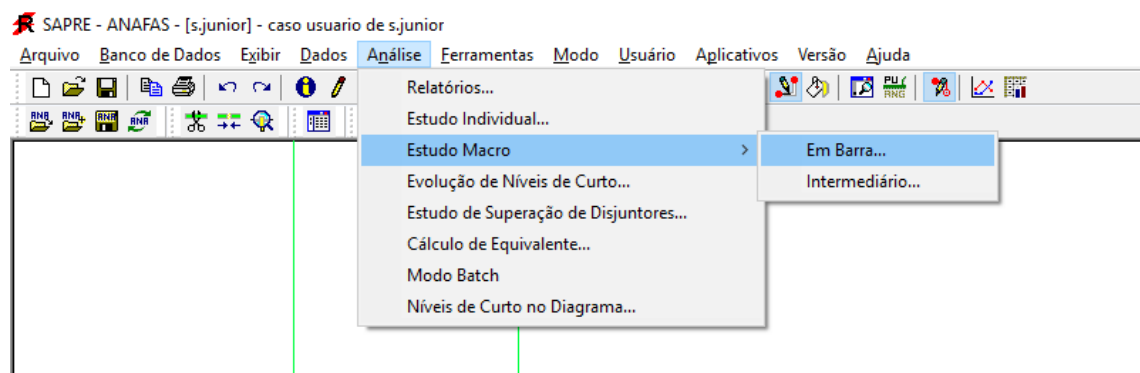


Figura 77 - Procedimento de acesso ao Estudo Macro em Barra

Ao selecionar esse estudo, uma janela irá surgir para que o usuário configure a falta. A **Figura 78** mostra a janela de configuração de estudo macro em barra.

Figura 78 - Janela de configuração de Estudo Macro em Barras

Na **Figura 78**, o retângulo vermelho destaca os tipos de defeitos possíveis de serem simulados. No campo destacado com retângulo verde, escolhe-se as barras que participarão do estudo. Através do botão “Selecionar” é possível escolher as barras diretamente no diagrama unifilar, clicando sobre as barras desejadas ou criando uma caixa de seleção (clicando com o botão esquerdo do mouse e arrastando, cria-se uma caixa de seleção).

5.4.1- CONFIGURAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DE CURTO

Ao selecionar a opção “Através de Impedâncias”, habilita-se o botão “Especificar”. Ao clicar no botão “Especificar” uma janela para a inserção e exclusão de impedâncias de falta surge, como mostra a **Figura 79**.

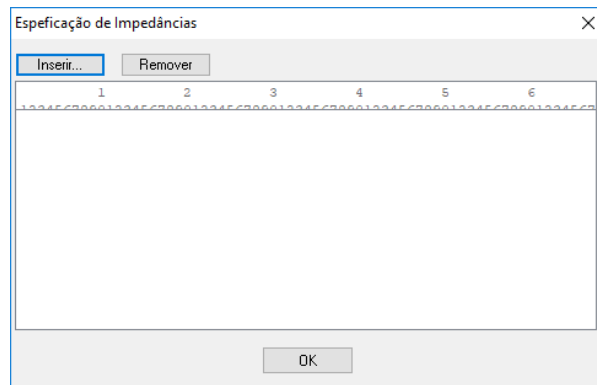


Figura 79 - Janela de especificação de Impedâncias

Ao clicar no botão “Inserir” uma nova janela se abre. A **Figura 80** mostra essa janela, e destaca os campos de impedâncias entre fases, entre fase e neutro e entre neutro e terra. Os campos destacados com retângulo preto, são os campos de impedâncias entre fase e neutro. Os campos destacados com retângulo vermelho são as impedâncias entre fases. O campo destacado com retângulo verde é a impedância de aterramento do neutro.

No campo “Unidades” o usuário define a unidade em que os parâmetros serão inseridos. Os dados de impedância são inseridos no formato $(R + jX)$ em p.u. ou em ohms.

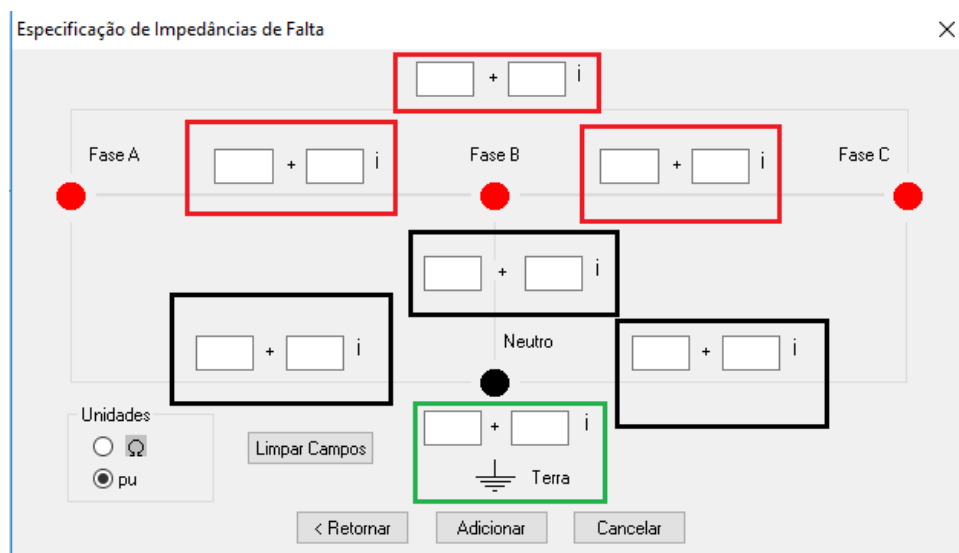


Figura 80 - Janela de especificação de impedância de falta

Para este curto é especificado a impedância entre fase e neutro, que serão iguais para as três fases. A impedância inserida nos campos destacados com o retângulo preto será $(0,1 + j0,3)$ p.u.

Terminada a inserção de impedância, o botão “Adicionar” deve ser selecionado.

5.4.2- ESPECIFICAÇÃO DAS CONTINGÊNCIAS

Ainda em relação à **Figura 78**, nos campos delimitados pelo retângulo preto, a contingência escolhida para esse curto-circuito foi: Desligamentos dos Circuitos Adjacentes. O número máximo de circuitos afetados por essas contingências será 1, assim a contingência ocorrerá em 1 circuito de cada vez.

5.4.3- RESULTADO DA SIMULAÇÃO NO DIAGRAMA E ANÁLISE DA FALTA

Após executada a simulação, os resultados são mostrados no diagrama unifilar. No Estudo Macro uma janela de Casos de Estudo Macro surge na tela, especificando as simulações realizadas. A janela de Casos do Estudo Macro é mostrada na **Figura 81**.

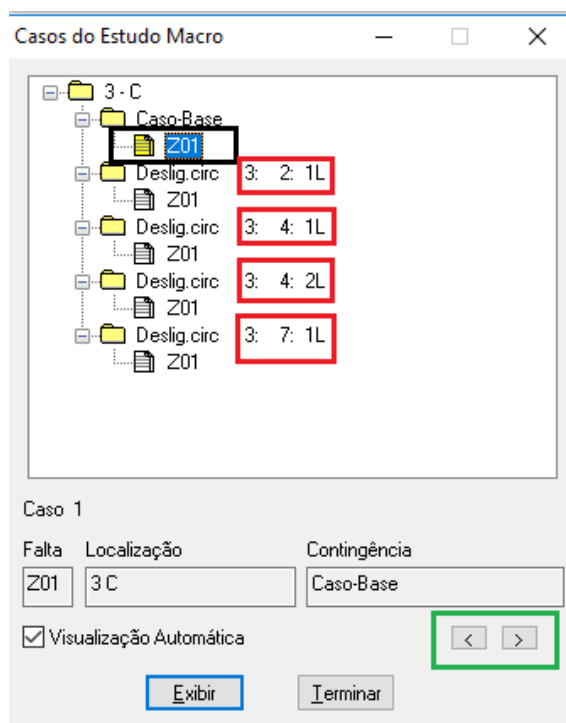


Figura 81 - Janela de Casos de Estudo Macro

Na **Figura 81**, são mostradas as especificações das contingências simuladas. Através dos botões contidos no retângulo verde, é possível visualizar no diagrama unifilar os resultados das simulações feitas. O caso contido no retângulo preto são os valores para a falta sem a aplicação de contingência e com a impedância de falta. Os dados contidos nos retângulos vermelhos, são as indicações de onde ocorreram as contingências. Por exemplo, o primeiro

retângulo vermelho logo abaixo do retângulo preto, especifica que ocorreu uma contingência no circuito 1 existente entre as barras 3 e 2.

Ao selecionar os botões do retângulo verde, os casos de contingência e seus respectivos valores de simulação são mostrados no diagrama. O usuário pode selecionar diretamente o caso desejado e clicar no botão “Exibir” da **Figura 81** para mostrar os resultados no diagrama

A **Figura 82** mostra resultado para a falta com impedância, sem contingências.

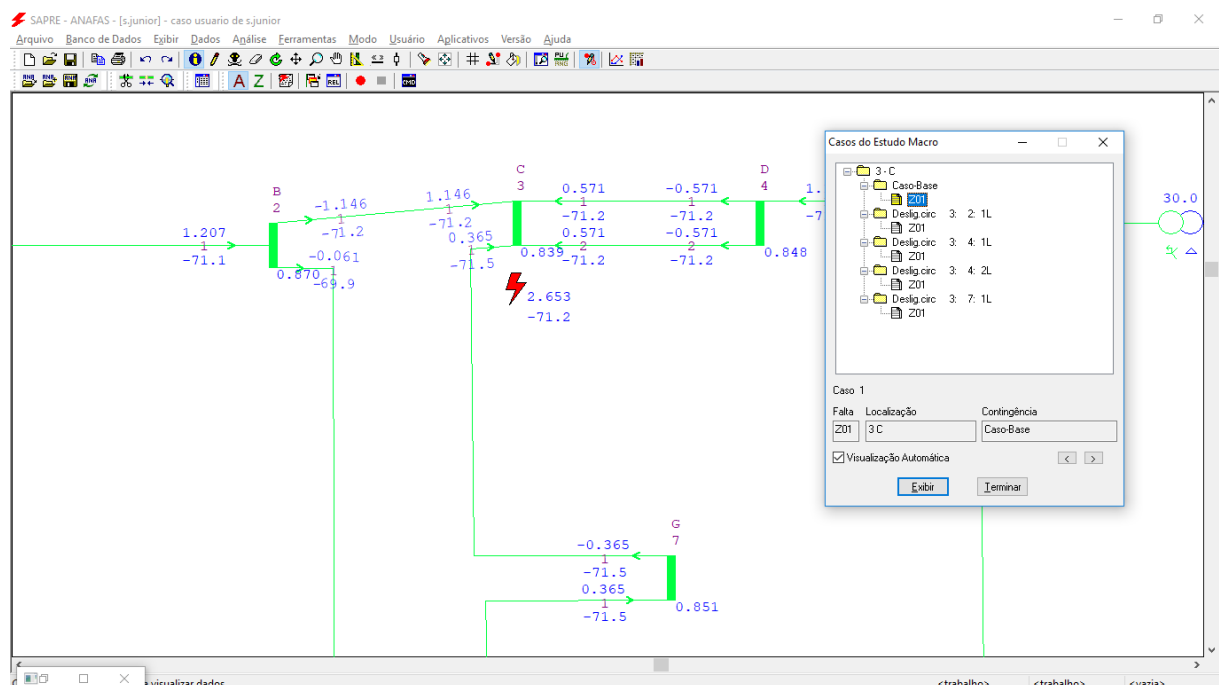


Figura 82 - Resultados da falta trifásica na barra 3 com impedância de curto

A **Figura 83** mostra o resultado para a falta, aplicando um desligamento na linha entre as barras 3 e 2 (LT1).

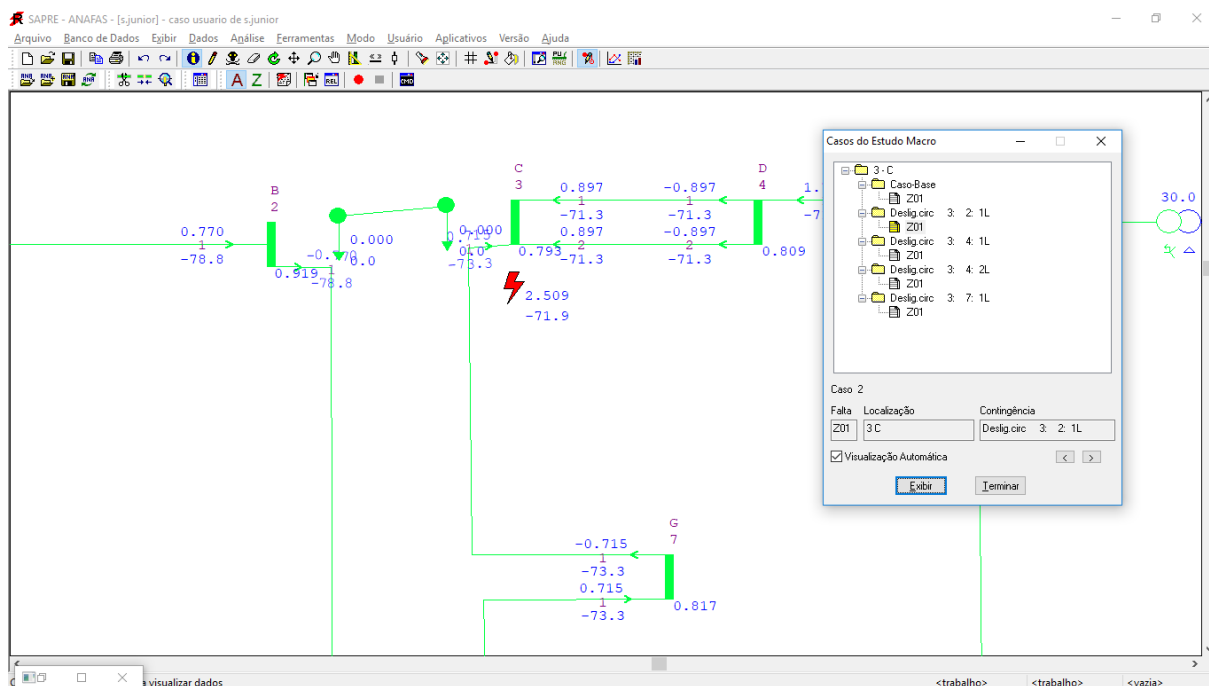


Figura 83 - Resultado de curto-circuito com desligamento da LT1

A **Figura 84** mostra o resultado para a falta, aplicando um desligamento na linha do circuito 1 entre as barras 3 e 4 (LT2).

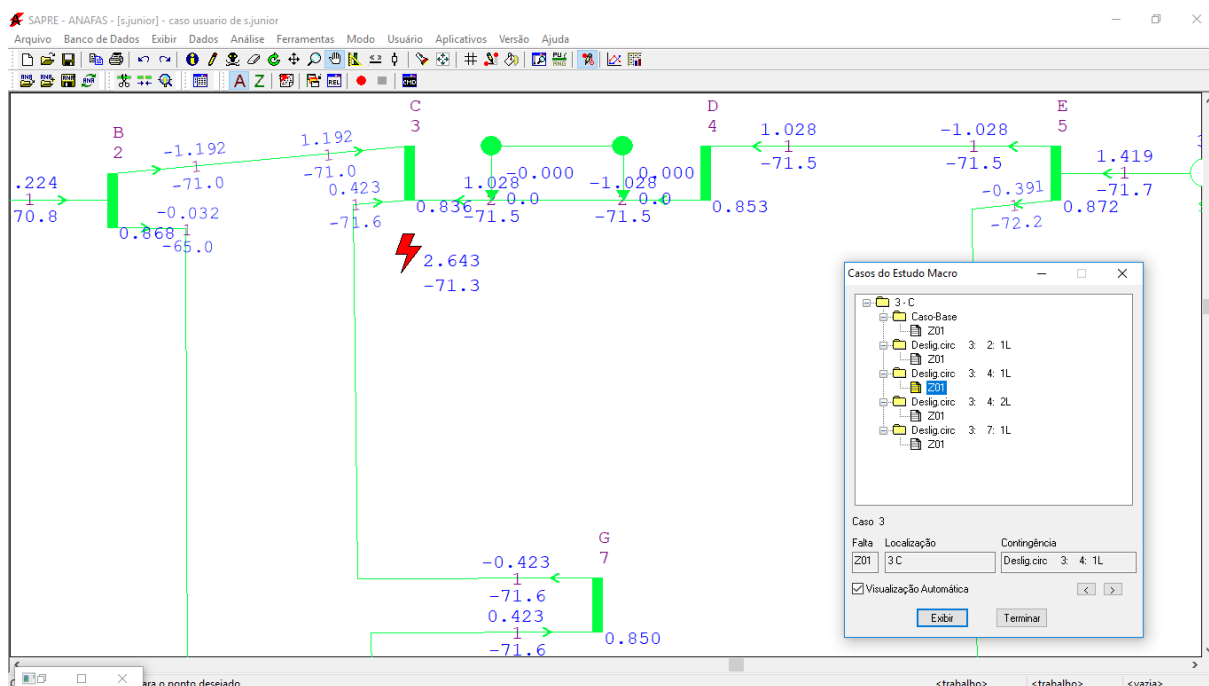


Figura 84 - Resultado de curto-circuito com desligamento da LT2

A **Figura 85** mostra o resultado para a falta, aplicando um desligamento na linha do circuito 2 entre as barras 3 e 4 (LT2.1).

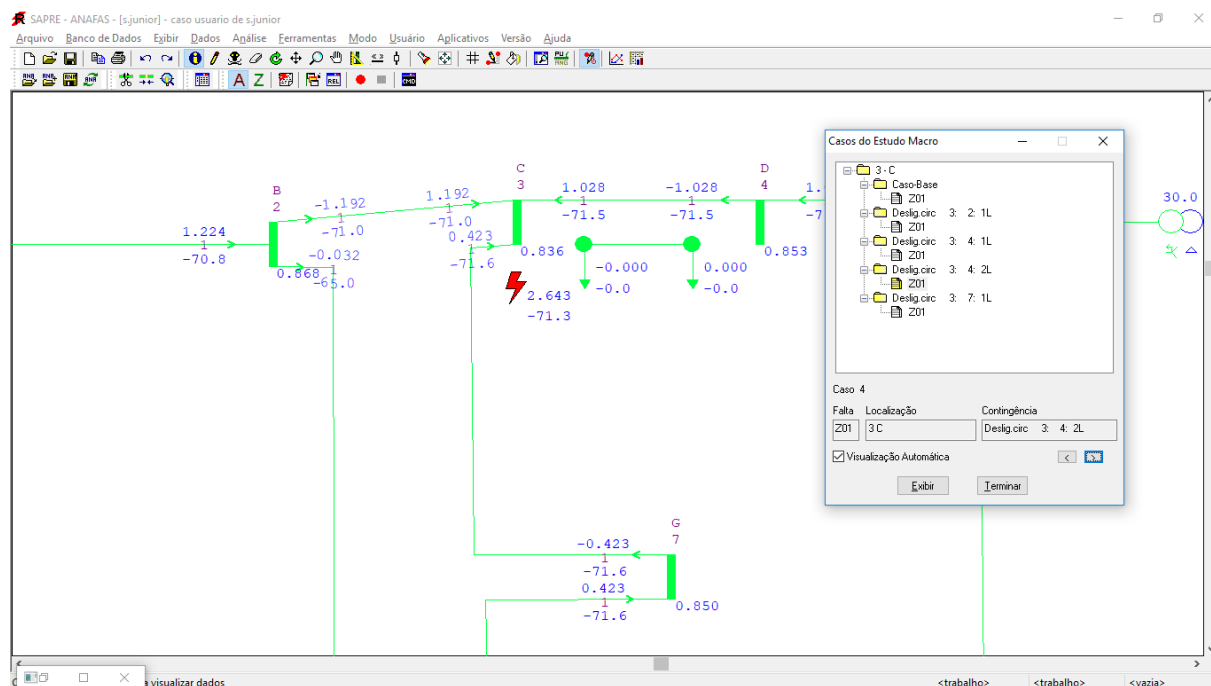


Figura 85 - Resultado de curto-circuito com desligamento da LT2.1

A **Figura 86** mostra o resultado para a falta, aplicando um desligamento na linha do circuito 1 entre as barras 3 e 7 (LT8).

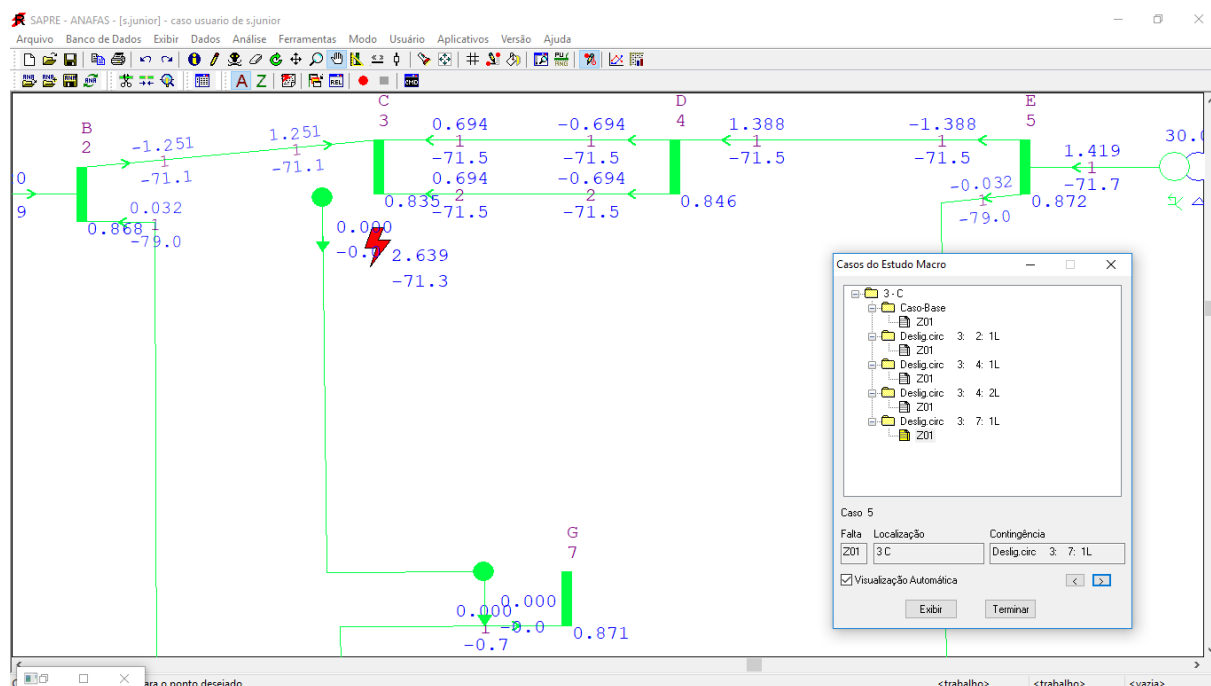


Figura 86 - Resultado de curto-circuito com desligamento da LT8

A **Tabela 7** mostra os valores de curto-circuito da barra 3 com impedância de falta

Tabela 7 - Curto trifásico com impedância de falta na barra 3

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,839	0,3	Z	0,000	0,0	A	2,653	-71,2	Z	0,000	0,0
B	0,839	-119,7	P	0,839	0,3	B	-2,653	-11,2	P	2,653	-71,2
C	0,839	120,3	N	0,000	0,0	C	-2,653	-131,2	N	0,000	0,0

A **Tabela 8** mostra os valores de curto-circuito da barra 3 com impedância de falta e desligamento da LT1

Tabela 8 - Curto trifásico com impedância de falta e desligamento da LT1

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3 – Desl. LT1											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,793	-0,3	Z	0,000	0,0	A	2,509	-71,9	Z	0,000	0,0
B	0,793	-120,3	P	0,793	-0,3	B	-2,509	-11,9	P	2,509	-71,9
C	0,793	119,7	N	0,000	0,0	C	-2,509	-131,9	N	0,000	0,0

A **Tabela 9** mostra os valores de curto-circuito da barra 3 com impedância de falta e desligamento da LT2

Tabela 9 - Curto trifásico com impedância de falta e desligamento da LT2

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3 – Desl. LT2											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,836	0,3	Z	0,000	0,0	A	2,643	-71,3	Z	0,000	0,0
B	0,836	-119,7	P	0,836	0,3	B	-2,643	-11,3	P	2,643	-71,3
C	0,836	120,3	N	0,000	0,0	C	-2,643	-131,3	N	0,000	0,0

A **Tabela 10** mostra os valores de curto-circuito da barra 3 com impedância de falta e desligamento da LT2.1

Tabela 10 - Curto trifásico com impedância de falta e desligamento da LT2.1

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3 – Desl. LT2.1											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,836	0,3	Z	0,000	0,0	A	2,643	-71,3	Z	0,000	0,0
B	0,836	-119,7	P	0,836	0,3	B	-2,643	-11,3	P	2,643	-71,3
C	0,836	120,3	N	0,000	0,0	C	-2,643	-131,3	N	0,000	0,0

A **Tabela 11** mostra os valores de curto-circuito da barra 3 com impedância de falta e desligamento da LT8

Tabela 11 - Curto trifásico com impedância de falta e desligamento da LT8

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3 – Desl. LT8											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,835	0,2	Z	0,000	0,0	A	2,639	-71,3	Z	0,000	0,0
B	0,835	-119,8	P	0,835	0,2	B	-2,639	-11,3	P	2,639	-71,3
C	0,835	120,2	N	0,000	0,0	C	-2,639	-131,3	N	0,000	0,0

Com os valores de curto-circuito das tabelas 7, 8, 9, 10 e 11, pode-se observar uma semelhança nos resultados entre eles. Isso mostra que a contingência aplicada nos circuitos de primeira vizinhança da barra 3 não influenciaram de maneira significativa na corrente de falta. A corrente de curto mais branda dentre as simuladas é **2,509 p.u.** ou **629,8 A**, relativa ao caso de abertura da LT1. A mais severa é **2,653 p.u.** ou **665,9 A**. A diferença entre as duas correntes é relativamente pequena.

O fator que teve uma grande influência nesta simulação, foi a impedância de curto **(0,1+0,3j)**. Esta impedância de falta quando comparada com as demais impedâncias do circuito, mostra ser relativamente grande. Isso fez com que as tensões no ponto de falta fossem relativamente próximas das nominais chegando, por exemplo, a medir **0,836 p.u.** ou **83,6%** da

tensão nominal. As impedâncias de curto são impossíveis de se prever com precisão, e dependem do tipo de superfície que a corrente do cabo energizado encontra ao conduzir-se para terra.

5.4.4- RELATÓRIO DE FALTA

O relatório para esse estudo, informa o valor das impedâncias de falta, os dados da falta trifásica na barra 3 através de impedância com suas respectivas contribuições de corrente e tensões nas barras, além de informar os resultados para os casos de faltas com contingência.

A **Figura 87** é uma amostra do relatório, relativa ao curto através de impedâncias de falta.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas

Pag. 1

caso usuario de s.junior

DESCRIÇÃO DAS FALTAS ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIAS

SAPRE - REDE:<vazia> CASO:<trabalho>

Item		AN	BN	CN	BC	CA	AB	NG
Z01	R(p.u.)	0.100	0.100	0.100	*****	*****	*****	*****
	X(p.u.)	0.300	0.300	0.300	*****	*****	*****	*****

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
1	Z01	3 C	Caso-Base

TENSOES E CORRENTES DE CURTO									
Barra 3 (C)									
TENSAO (pu)				CORRENTE (pu)					
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A 0.839	0.3	Z 0.000	0.0	A 2.653	-71.2	Z 0.000	0.0		
B 0.839	-119.7	P 0.839	0.3	B -2.653	-11.2	P 2.653	-71.2		
C 0.839	120.3	N 0.000	0.0	C -2.653	-131.2	N 0.000	0.0		

TENSOES E CORRENTES DE CONTRIBUICAO									
Bar. 3 (C) TEN. (pu)									
mod.	ang.	mod.	ang.						
A 0.839	0.3	Z 0.000	0.0						
B 0.839	-119.7	P 0.839	0.3						
C 0.839	120.3	N 0.000	0.0						
Bar. 2 (B) TEN. (pu)				Cir. 1L() CORR. (pu) p/ 3					
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.		
A 0.870	0.9	Z 0.000	0.0	A 1.146	-71.2	Z 0.000	0.0		
B 0.870	-119.1	P 0.870	0.9	B -1.146	-11.2	P 1.146	-71.2		
C 0.870	120.9	N 0.000	0.0	C -1.146	-131.2	N 0.000	0.0		
Bar. 4 (D) TEN. (pu)				Cir. 1L() CORR. (pu) p/ 3					
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.		
A 0.848	0.5	Z 0.000	0.0	A 0.571	-71.2	Z 0.000	0.0		
B 0.848	-119.5	P 0.848	0.5	B -0.571	-11.2	P 0.571	-71.2		
C 0.848	120.5	N 0.000	0.0	C -0.571	-131.2	N 0.000	0.0		

Figura 87 - Amostra do relatório de falta através de impedância

No relatório da **Figura 87**, os dados contidos no retângulo vermelho são os valores fase-neutro ($R+jX$) inseridos para a impedância de falta. Os dados do retângulo preto são as tensões e correntes no ponto da falta (barra 3). No retângulo verde estão contidos os valores de tensão para as barras 2, 3 e 4, bem como as correntes de contribuição da barra 2 para a barra 3, e da barra 4 para a barra 3.

A **Figura 88** é uma amostra do relatório, relativa ao curto com desligamento na linha entre as barras 2 e 3 (LT1).

CASO		FALTA		LOCALIZACAO		CONTINGENCIA			
2		Z01		3 C		Deslig.circ 3: 2: 1L			

TENSÕES E CORRENTES DE CURTO									
Barra 3 (C)									
TENSÃO (pu)					CORRENTE (pu)				
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.793	-0.3	Z 0.000	0.0		A 2.509	-71.9	Z 0.000	0.0	
B 0.793	-120.3	P 0.793	-0.3		B -2.509	-11.9	P 2.509	-71.9	
C 0.793	119.7	N 0.000	0.0		C -2.509	-131.9	N 0.000	0.0	

TENSÕES E CORRENTES DE CONTRIBUICAO									
Bar. 3 (C) TEN. (pu)									
mod.	ang.	mod.	ang.						
A 0.793	-0.3	Z 0.000	0.0						
B 0.793	-120.3	P 0.793	-0.3						
C 0.793	119.7	N 0.000	0.0						
Bar. 4 (D) TEN. (pu)					Cir. 1L() CORR. (pu) p/ 3				
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.809	0.0	Z 0.000	0.0		A 0.897	-71.3	Z 0.000	0.0	
B 0.809	-120.0	P 0.809	0.0		B -0.897	-11.3	P 0.897	-71.3	
C 0.809	120.0	N 0.000	0.0		C -0.897	-131.3	N 0.000	0.0	
Bar. 4 (D) TEN. (pu)					Cir. 2L() CORR. (pu) p/ 3				
mod.	ang.	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	
A 0.809	0.0	Z 0.000	0.0		A 0.897	-71.3	Z 0.000	0.0	
B 0.809	-120.0	P 0.809	0.0		B -0.897	-11.3	P 0.897	-71.3	
C 0.809	120.0	N 0.000	0.0		C -0.897	-131.3	N 0.000	0.0	

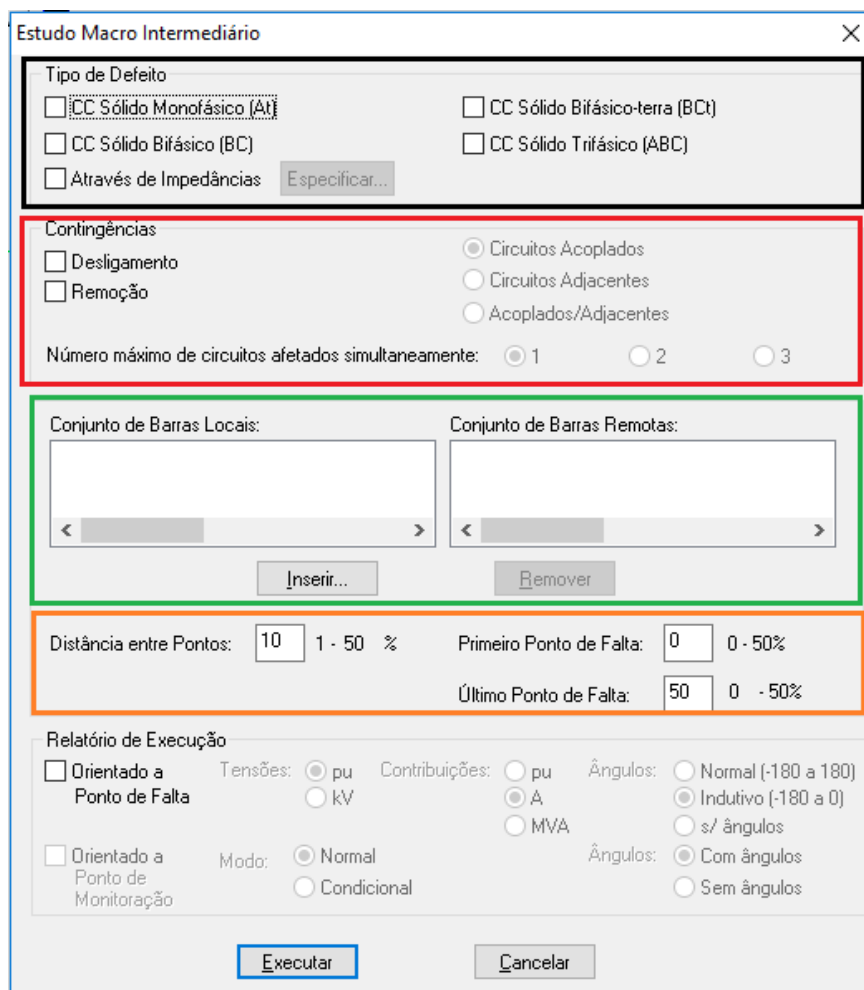
Figura 88 - Amostra do relatório de falta para curto na barra 3 com impedância de falta e desligamento da LT1

O retângulo vermelho contém a informação da barra do curto, como também da contingência sofrida. O retângulo preto contém a corrente e a tensão no ponto de falta, aplicada a contingência. E o retângulo verde contém a tensão e as correntes de contribuição.

5.5- ESTUDO MACRO INTERMDIÁRIO – FALTA MONOFÁSICA NA LT3

O Estudo Macro Intermediário pode ser acessado pelo menu [Análise > Estudo Macro > Intermediário...]. Ao selecionar esse estudo, a janela de configuração desse estudo surgirá.

A Figura 89 mostra a janela de configuração do Estudo Macro Intermediário.



A janela de configuração do Estudo Macro Intermediário é composta por várias seções:

- Tipo de Defeito:** Contém quatro opções de caixa de seleção: CC Sólido Monofásico (At), CC Sólido Bifásico (BC), Através de Impedâncias (com botão Especificar...), CC Sólido Bifásico-terra (BCt) e CC Sólido Trifásico (ABC).
- Contingências:** Contém duas opções de caixa de seleção: Desligamento e Remoção. À direita, há três opções de rádio: Circuitos Acoplados (selecionado), Circuitos Adjacentes e Acoplados/Adjacentes. Abaixo, há um campo para "Número máximo de circuitos afetados simultaneamente:" com opções de rádio 1, 2 e 3.
- Conjunto de Barras Locais:** Uma lista vazia com botões de seta esquerda e direita.
- Conjunto de Barras Remotas:** Uma lista vazia com botões de seta esquerda e direita.
- Botões de Ação:** Abaixo das listas de barras, há botões "Inserir..." e "Remover".
- Distância entre Pontos:** Um campo numérico com o valor "10", seguido de "1 - 50 %".
- Primeiro Ponto de Falta:** Um campo numérico com o valor "0", seguido de "0 - 50%".
- Último Ponto de Falta:** Um campo numérico com o valor "50", seguido de "0 - 50%".
- Relatório de Execução:** Contém várias opções de caixa de seleção e rádio:
 - ☐ Orientado a Ponto de Falta
 - ☐ Orientado a Ponto de Monitoração
 - Tensões: ☒ pu, ☐ kV
 - Modo: ☒ Normal, ☐ Condicional
 - Contribuições: ☐ pu, ☒ A, ☐ MVA
 - Ângulos: ☐ Normal (-180 a 180), ☒ Indutivo (-180 a 0), ☐ s/ ângulos, ☒ Com ângulos, ☐ Sem ângulos
- Botões de Ação:** Abaixo do relatório, há botões "Executar" e "Cancelar".

Figura 89 - Janela de configuração de Estudo Macro Intermediário

Os dados contidos no retângulo preto são os dados de tipo de defeito. Os dados de contingência estão contidos no retângulo vermelho, e podem ser apenas Desligamento e Remoção, para os estudos intermediários.

5.5.1- BARRAS LOCAIS E REMOTAS

O retângulo verde contém o conjunto de barras locais e remotas que são as barras que delimitam início e fim dos curtos. Ao clicar em “Inserir” uma janela surge para a especificação dessas barras. A **Figura 90** mostra a janela de inserção de barras locais.

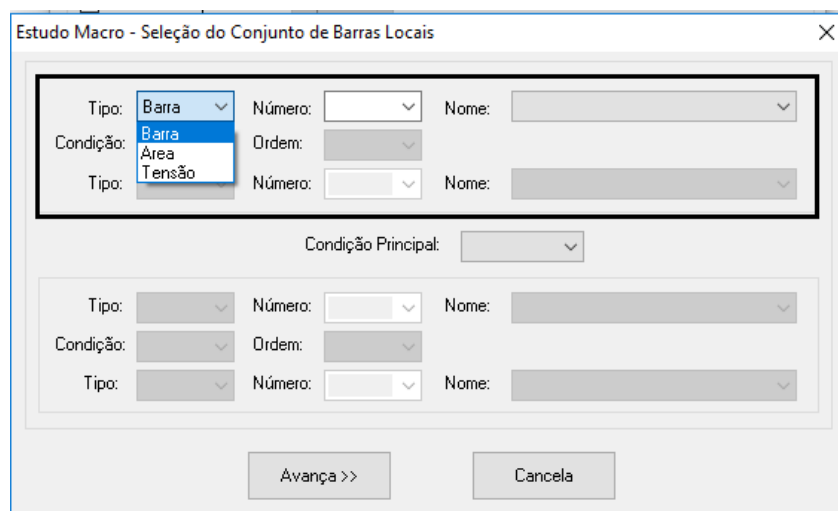
A imagem mostra uma janela de software intitulada "Estudo Macro - Seleção do Conjunto de Barras Locais". A janela possui um retângulo preto no topo que contém campos para "Tipo", "Número" e "Nome". Abaixo dele, há uma seção "Condição Principal" com um menu suspenso. Na parte inferior, há uma seção com campos para "Tipo", "Número" e "Nome", além de botões "Avança >>" e "Cancela".

Figura 90 – Janela de inserção de barras locais

Nesta janela, basta preencher os dados “tipo”, “número” e “nome” contidos no retângulo preto. Após preenchimento, ao clicar em “Avançar”, a janela do conjunto de barras remotas irá surgir. Ela é semelhante a janela da **Figura 90**.

Como se quer um curto na LT3, as barras locais e remotas são respectivamente as barras 4 e 5 (o curto avançará da barra 4 para a barra 5).

Após isso, o preenchimento dos dados do retângulo laranja pode ser feito. Nele especifica-se o intervalo de distância entre os curtos (em porcentagem), o primeiro e último ponto de falta, dados em porcentagem relativa à primeira metade da linha. No subitem 4.6.1 do capítulo 4 deste trabalho uma análise mais detalhada e feita sobre esses valores. Para este curto intermediário é definido um intervalo de 10% entre as faltas no decorrer da linha, começando na barra 4 e terminando na barra 5.

5.5.2- RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO DIAGRAMA E ANÁLISE DA FALTA

Após simular o curto, a janela de Casos de Estudo Macro surgirá, mostrando as porcentagens especificadas pelo usuário em que ocorreram os curtos. A **Figura 91** mostra a janela de Casos do Estudo Macro.

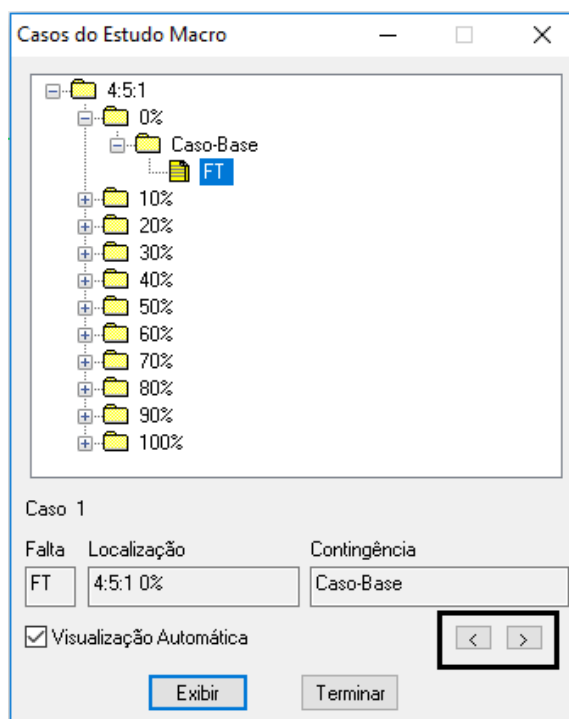


Figura 91 - Janela de Casos do Estudo Macro para a falta intermediária

Na **Figura 91**, para visualizar os resultados no diagrama unifilar, basta clicar nos botões contidos no retângulo preto. Ao clicar nestes botões, o usuário seleciona o curto a ser exibido no diagrama.

A **Tabela 12** mostra os valores de curto-circuito intermediário, ao longo da LT3.

Tabela 12 - Valores de falta monofásica intermediária na LT3

Curto-Circuito Monofásico Intermediário – LT3								
Linha (%)	Corrente de Falta (p.u.)		Tensões de Falta (p.u.)					
			A		B		C	
	Mód	Âng	Mod	Âng	Mod	Âng	Mod	Âng
0%	17,284	-67,9	0,0	0,0	0,947	-118,0	1,001	116,4
10%	17,383	-67,8	0,0	0,0	0,944	-117,9	1,001	116,2
20%	17,516	-67,5	0,0	0,0	0,940	-117,8	1,001	115,9
30%	17,687	-67,3	0,0	0,0	0,935	-117,6	1,002	115,7
40%	17,896	-66,9	0,0	0,0	0,930	-117,5	1,003	115,3
50%	18,147	-66,5	0,0	0,0	0,924	-117,3	1,005	114,9
60%	18,441	-66,0	0,0	0,0	0,916	-117,1	1,007	114,5
70%	18,782	-65,5	0,0	0,0	0,908	-116,8	1,009	114,0
80%	19,175	-64,9	0,0	0,0	0,898	-116,6	1,012	113,4
90%	19,624	-64,1	0,0	0,0	0,887	-116,3	1,016	112,8
100%	20,135	-63,3	0,0	0,0	0,874	-116,0	1,021	112,1

Através da **Tabela 12**, é possível observar que o curto ocorre na fase A do sistema, devido à sua natureza sólida, que acarreta tensão nula na fase defeituosa. Os valores de corrente atingem o valor máximo quando o curto “caminha” para 100% da linha, ou seja, o maior valor de curto ocorre na barra 5, com **20,135 p.u.** ou **5054,3 A**.

Nota-se que a tensão nas fases não defeituosas, se mantém em um nível relativamente alto, quando comparados com o nível de tensão da falta monofásica da **Tabela 5**. Aqui o afundamento de tensão é menos severo, devido a não existência de um curto simultâneo. Assim as tensões de fase das fases B e C se mantém relativamente próximas das nominais, onde a tensão na fase C se mantém mais fiel à tensão nominal, enquanto a tensão na fase B se afasta mais da nominal. Nota-se a diminuição dos valores de tensão na fase B conforme o curto se aproxima da barra 5, bem como o aumento da corrente de falta (fase A). Quanto maior a impedância que a corrente de curto enxerga, menor é a corrente de falta e maior é a tensão nas fases não defeituosas.

5.5.3- GRAU DE VIZINHANÇA (“NBACK”)

Através da **Figura 92**, é mostrado no diagrama, o resultado para um curto intermediário fase-terra em 50% da linha. Na imagem é possível notar que as correntes de contribuição e as tensões nas barras vizinhas ao curto foram omitidas, isso se deve ao grau de vizinhança (“NBACK”). O usuário pode definir nas configurações do software, um grau de vizinhança para os resultados exibidos tanto nos relatórios quanto no diagrama unifilar. O grau de vizinhança para este curto foi definido como zero, assim, tanto o relatório quanto o diagrama não exibe as contribuições de corrente e as tensões nas barras vizinhas.

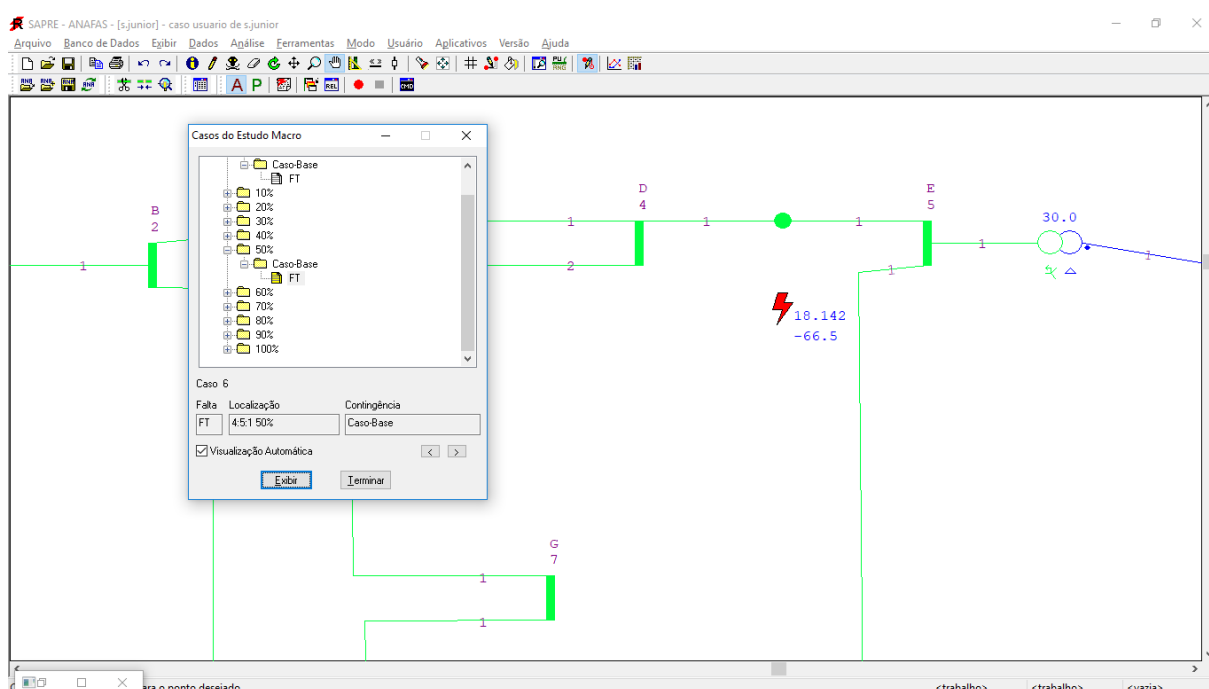
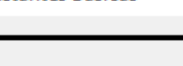


Figura 92 - Falta monofásica em 50% da linha

O grau de vizinhança determina o nível de vizinhança de exibição de resultados, ou seja, determina o “quão distante” (em relação ao curto) uma barra pode estar para sua tensão e correntes de contribuição sejam incluídas nos relatórios e no diagrama.

Para modificar o grau de vizinhança, basta acessar o menu **[Dados > Opções > Constantes Básicas]**. A janela de constantes básicas da **Figura 93** surgirá, podendo ser editado o valor do grau da vizinhança.



Constantes Básicas

Grau de Vizinhaça (NBACK): 0

Base de Potência do Sistema (MVA): 100

OK Cancelar

Figura 93 - Janela de Constantes Básicas

5.5.4- RELATÓRIO DE FALTA

Uma amostra do relatório de falta para o curto monofásico intermediário é mostrada na **Figura 94**. O grau de vizinhança foi modificado para zero, fazendo com que as contribuições de corrente e as barras vizinhas não fossem incluídas no relatório.

CASO	FALTA	LOCALIZACAO		CONTINGENCIA			
4	FT	4:	5: 1 30%	Caso-Base			
T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O							
Barra -1 (FIC.INTER.01)							
TENSAO(pu)				CORRENTE(pu)			
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A 0.000	0.0	Z 0.290	175.1	A 17.687	-67.3	Z 5.896	-67.3
B 0.935	-117.6	P 0.645	-1.1	B 0.000	0.0	P 5.896	-67.3
C 1.002	115.7	N 0.356	-178.0	C 0.000	0.0	N 5.896	-67.3

CASO	FALTA	LOCALIZACAO		CONTINGENCIA			
5	FT	4:	5: 1 40%	Caso-Base			
T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O							
Barra -1 (FIC.INTER.01)							
TENSAO(pu)				CORRENTE(pu)			
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A 0.000	0.0	Z 0.287	174.5	A 17.896	-66.9	Z 5.965	-66.9
B 0.930	-117.5	P 0.643	-1.2	B 0.000	0.0	P 5.965	-66.9
C 1.003	115.3	N 0.357	-177.8	C 0.000	0.0	N 5.965	-66.9

CASO	FALTA	LOCALIZACAO		CONTINGENCIA			
6	FT	4:	5: 1 50%	Caso-Base			
T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O							
Barra -1 (FIC.INTER.01)							
TENSAO(pu)				CORRENTE(pu)			
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A 0.000	0.0	Z 0.284	173.9	A 18.147	-66.5	Z 6.049	-66.5
B 0.924	-117.3	P 0.641	-1.3	B 0.000	0.0	P 6.049	-66.5
C 1.005	114.9	N 0.359	-177.6	C 0.000	0.0	N 6.049	-66.5

Os dados contidos no retângulo vermelho são relacionados ao curto intermediário em 30% da linha a partir da barra 4. Os dados contidos no retângulo preto são relacionados ao curto intermediário em 40% da linha a partir da barra 4. Os dados do retângulo verde são do curto em 50% da linha. Para simular esses curtos o software modela temporariamente uma barra fictícia na posição onde o curto ocorre, e que é identificada no relatório como um número negativo (Barra -1).

5.6- FALTA FASE-FASE-TERRA COM SOLUÇÃO ORIENTADA À PONTO DE MONITORAÇÃO

5.6.1- ESPECIFICAÇÃO DO PONTO DE MONITORAÇÃO

A inserção de um ponto de monitoração pode ser feita através do ícone da barra de desenhos, como mostra a **Figura 95**.

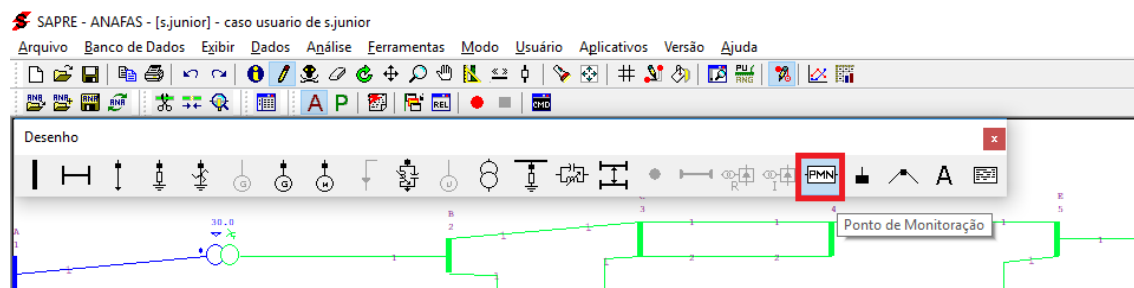


Figura 95 - Ícone de Ponto de Monitoração na barra de desenho

Outra forma de inserção é através do menu [**Dados > Rede CA > Ponto de Monitoração...**]

Ao inserir o Ponto de Monitoração pelo menu “Dados”, uma janela surgirá para a configuração do mesmo. A **Figura 96** mostra a janela de configuração de Ponto de Monitoração. Nesta janela o primeiro passo é inserir o Ponto de Monitoração através do botão “Inserir” contido no retângulo vermelho.

Pontos de Monitoração, Grandezas e Fatores

Ponto de Monitoração Inserir Editar

Grandeza Inserir Editar

Fator

Tipo

☐ Constante

☒ Medição

☐ Grandeza

Posição

☒ Numerador

☐ Denominador

Polaridade

☒ + ☐ -

Ganho

Módulo Ângulo

Medição Grandeza

Medição

☐ Pré-falta ☒ Pós-falta ☒ Medição Local

Tensão Barra Nome

Corrente Equipamento

Potência Barra Local Barra Remota Circuito

Unidade de Medição

Expressão da Grandeza

P Tipo Uni... Locali...

KG x

P Tipo Uni... Locali...

Inserir Alterar Remover Limpar Terminar

Figura 96 - Janela de configuração do Ponto de Monitoração

Ao clicar no botão “Inserir” a janela da **Figura 97** surge para que seja inserido o Ponto de Monitoração.

Pontos de Monitoração

Identificação

Equipamento

Série

Barra Local Barra Remota Circuito

Raio Status

Inserir

Alterar

Remover

Equip	Loc	Rem	Circ/Grp	Raio	Stat
Linha	10	5	1	3	L

ACEITAR Terminar

Figura 97 - Janela de inserção do Ponto de Monitoração

Como exemplo, será simulada uma monitoração da tensão da fase A na barra 10 do sistema. Ela deve monitorar e relatar, perante faltas fase-fase-terra em vários pontos do sistema, o valor mínimo de 93% do valor da tensão nominal.

Na **Figura 97**, no campo “Equipamento”, escolhe-se o equipamento que receberá o ponto de monitoração. A linha escolhida foi, a linha entre as barras 5 e 10.

No campo “Raio” deve-se inserir o raio de alcance de ativação do ponto de monitoração. O campo “Status” ativa ou desativa o ponto de monitoração.

O próximo passo é inserir a grandeza monitorada, através do botão “Inserir” contido no retângulo preto da **Figura 96**. A janela da **Figura 98** surgirá para a configuração da grandeza monitorada.

Nome	Mó...	Ân...	Mo...	Lim...	Lim...	T:
Tensão	1	0	M	0	123.5	M

Figura 98 - Janela de configuração de grandezas monitoradas

Na janela de configuração de grandezas monitoradas, o usuário define um nome para a grandeza, preenchendo o campo “Nome”. No campo “Monitoração” é requerido que o usuário escolha a natureza da grandeza monitorada: ângulo de fase, magnitude, parte real ou parte imaginária. No campo “Ganho” é preservado neste estudo, o Módulo 1 e Ângulo zero. Os limites inferior e superior são os limites que se deseja monitorar. Nessa simulação, como dito anteriormente, os limites serão de zero até 93% da tensão nominal da barra 10. A tensão fase-neutro nominal que se deseja monitorar é 93% de 132,8 kV (tensão fase-neutro da área de 230kV), que é 123,5kV. Para valores entre zero e 123,5kV o ponto de monitoração alertará o usuário, ficando na cor vermelha. Caso existam resultados para o ponto de monitoração, fora

da faixa de valores monitorados, o ponto de monitoração ficará na cor verde. Caso não existam valores captados pelo ponto de monitoração, ele ficará branco.

Após especificados os valores da **Figura 98**, o campo “Fator” contido no retângulo verde da **Figura 96** pode ser especificado. Nele escolhe-se “Fator” do tipo “Medição”, polaridade positiva e ganho “1”.

Na parte central da janela, escolhe-se uma medição “Pós-falta” no local do ponto de monitoração. A grandeza será a Tensão, como já dito. A unidade de medição será “A”, referente a fase A do sistema. Após isso o botão “Inserir” é habilitado. Seleciona-se o botão “Inserir” e depois “Terminar”.

5.6.2- RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA FALTA

Após definir os dados do ponto de monitoração, é simulado um conjunto de faltas bifásicas para terra, nas barras pertencentes ao nível de tensão de 230kV, exceto para a barra 10, próxima ao ponto de monitoração. A **Figura 99** mostra a janela de configuração de estudo macro para as faltas fase-fase-terra simuladas. O retângulo vermelho destaca a escolha do Relatório de Execução Orientado a Ponto de Monitoração.

A imagem mostra a janela "Estudo Macro em Barras" com as seguintes configurações:

- Tipo de Defeito:**
 - ☐ CC Sólido Monofásico (At)
 - ☒ CC Sólido Bifásico-terra (BCt)
 - ☐ CC Sólido Bifásico (BC)
 - ☐ CC Sólido Trifásico (ABC)
 - ☐ Através de Impedâncias (Botão "Especificar..." disponível)
- Contingências:**
 - ☐ Desligamento dos Circuitos Adjacentes
 - ☐ Remoção dos Circuitos Adjacentes
 - ☐ Curto-Circuito em Fim de Linha
 - ☐ Abertura de Terminal Remoto
 - ☐ Abertura Dupla
- Número máximo de circuitos afetados simultaneamente:**
 - ☒ 1
 - ☐ 2
 - ☐ 3
- Conjunto de Barras:**
 - Botões: Selecionar, Especificar, Remover
 - Lista: BARR 2, BARR 3, BARR 4, BARR 5, BARR 7, BARR 8, BARR 9
- Relatório de Execução (destacado por um retângulo vermelho):**
 - ☐ Orientado a Ponto de Falta
 - Tensões: ☒ pu, ☐ kV
 - Contribuições: ☐ pu, ☐ MVA
 - Ângulos: ☐ Normal (-180 a 180), ☐ Indutivo (-180 a 0), ☐ s/ ângulos
 - ☒ Orientado a Ponto de Monitoração
 - Modo: ☒ Normal, ☐ Condicional
 - Ângulos: ☒ Com ângulos, ☐ Sem ângulos
- Botões: Executar, Cancelar

Figura 99 - Janela de Estudo Macro em Barras com Relatório de Execução Orientado a Ponto de Monitoração

Os resultados da tensões pós-falta foram dispostos na **Tabela 13**.

Tabela 13 - Tensões pós-falta para o curto fase-fase-terra com resultado orientado a ponto de monitoração

Curto Fase-Fase-Terra			
Barra		Tensão (fase A)	
Número	Nome	Módulo (kV)	Ângulo (°)
2	B	110,676	-5,7
3	C	114,982	-3,8
4	D	116,301	-3,9
5	E	116,053	-6,5
7	G	124,892	-1,1
8	H	117,644	-2,1
9	I	123,772	-1,0

Dos resultados da **Tabela 5**, apenas as tensões das barras 7 e 9 ficaram fora do critério estabelecido no ponto de monitoração. Para esses resultados o ícone do ponto de monitoração ficou na cor verde, indicando que a tensão pós-falta é superior à 93% da tensão nominal da barra. A **Figura 100** mostra o resultado no diagrama para a barra 7.

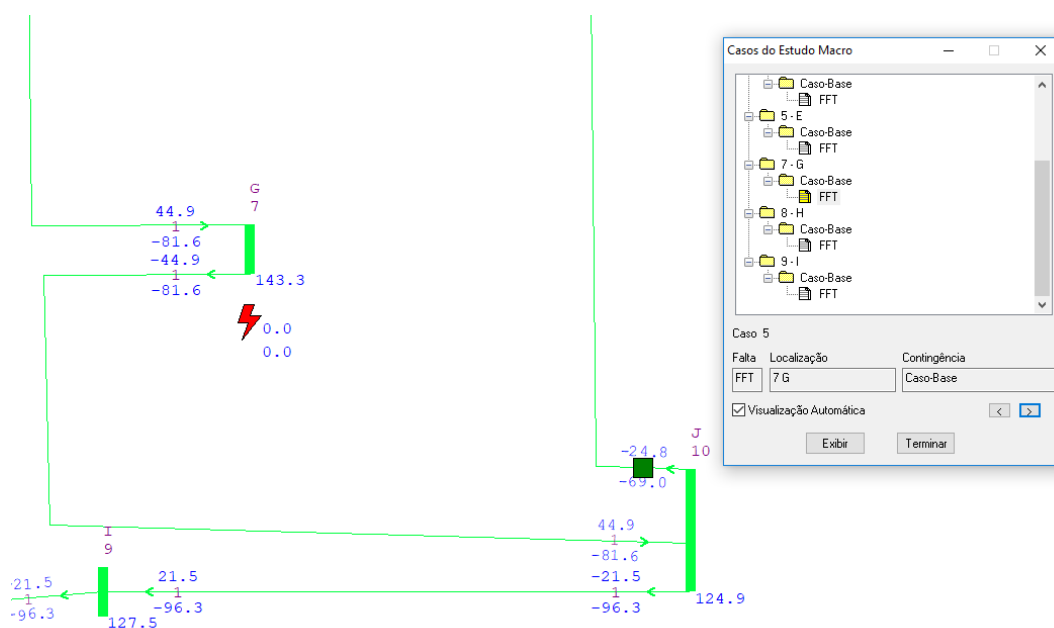


Figura 100 - Resultado do ponto de monitoração no diagrama para a barra 7

A **Figura 101** mostra o resultado para no diagrama para a barra 9.

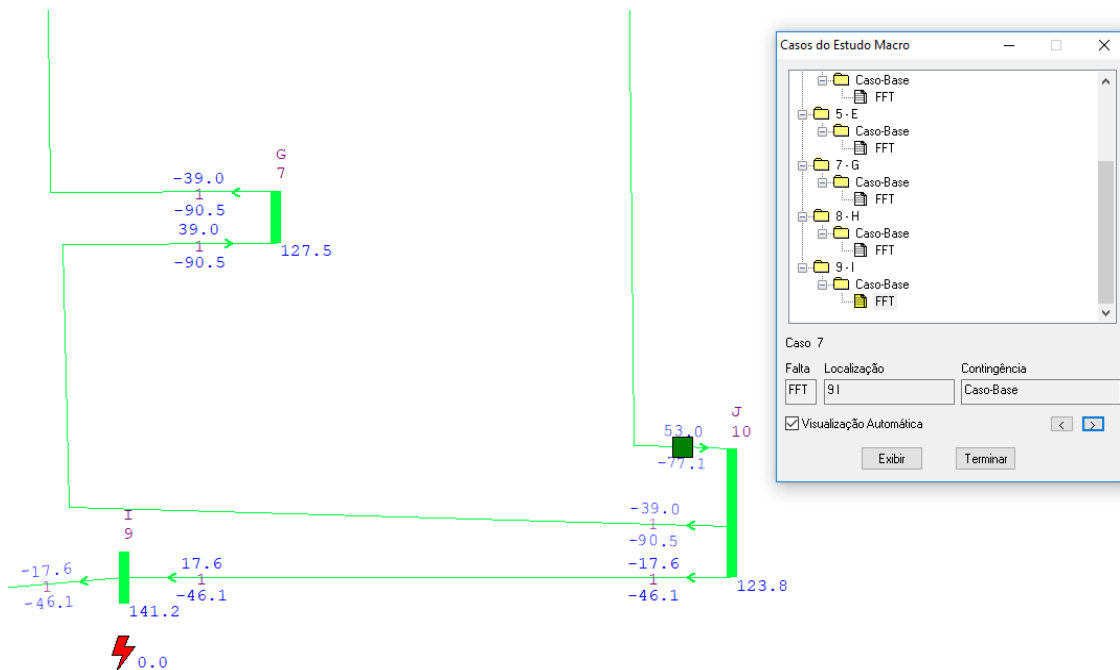


Figura 101 - Resultado do ponto de monitoração no diagrama para a barra 9

5.6.3- RELATÓRIO DE EXECUÇÃO ORIENTADO A PONTO DE MONITORAÇÃO

Uma amostra do relatório referente ao estudo orientado a ponto de monitoração pode ser vista na **Figura 102**. No relatório da **Figura 102**, são mostrados alguns dos valores das tensões nas barras, encontradas pelo ponto de monitoração.

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA		
5	FFT	7 G	Caso-Base		
P.Monitoracao: J			(10) : E	(5) : Circ.	1
Grandeza	Monitoracao	Unid. X	Unid. Y	Unid. Z	
Tensão	min < Mgn < max	124.892		-1.1	

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA		
6	FFT	8 H	Caso-Base		
P.Monitoracao: J			(10) : E	(5) : Circ.	1
Grandeza	Monitoracao	Unid. X	Unid. Y	Unid. Z	
Tensão	min < Mgn < max	* 117.644		-2.1	

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA		
7	FFT	9 I	Caso-Base		
P.Monitoracao: J			(10) : E	(5) : Circ.	1
Grandeza	Monitoracao	Unid. X	Unid. Y	Unid. Z	
Tensão	min < Mgn < max	123.772		-1.0	

Figura 102 - Amostra do relatório do estudo orientado a ponto de monitoração

Em relação à **Figura 102**, no retângulo preto, está o valor de tensão referente a fase A, na barra 7. No retângulo vermelho, os valores para a barra 8, e no retângulo verde os valores para a barra 9.

5.7- EQUIVALENTES DE CURTO-CIRCUITO

O cálculo de equivalentes pode ser feito através do menu **[Análise > Cálculo de Equivalente...]**. Ao seleccionar esta opção uma janela de configuração para retenção de barras (cálculo de equivalente) é mostrada na tela. A **Figura 103** mostra a janela de cálculo de equivalente.

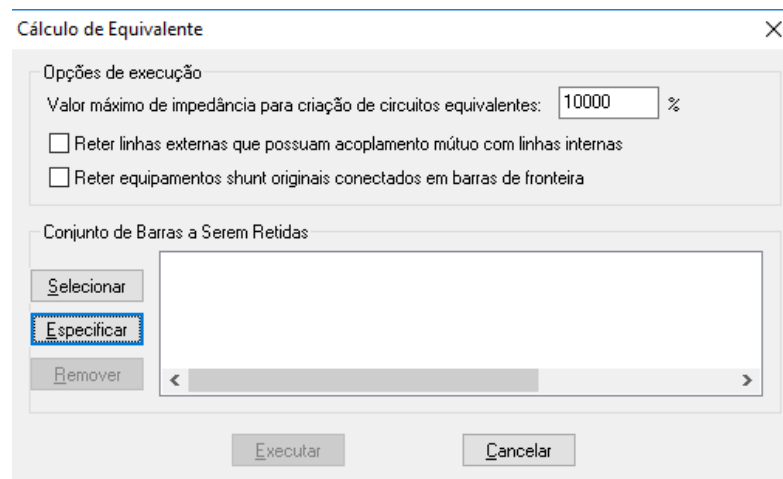


Figura 103 - Janela de configuração de cálculo de equivalente

Nesta janela ao clicar no botão “Selecionar”, é possível selecionar as barras a serem retidas (conservadas) do cálculo de equivalente.

5.7.1- EQUIVALENTE ENTRE DUAS BARRAS

Objetiva-se calcular o equivalente das impedâncias de todo o circuito de nível de tensão base de 230kV (parte verde do diagrama). Para isso irão ser retidas as barras 1, 2, 5 e 6.

Clicando no botão “Selecionar”, uma tela com o diagrama surge para selecionarmos as barras retidas. A **Figura 104** mostra a tela de seleção de barras retidas. Para selecionar as barras basta clicar nas barras desejadas, ou criar um retângulo de seleção clicando e arrastando com o botão esquerdo do mouse.

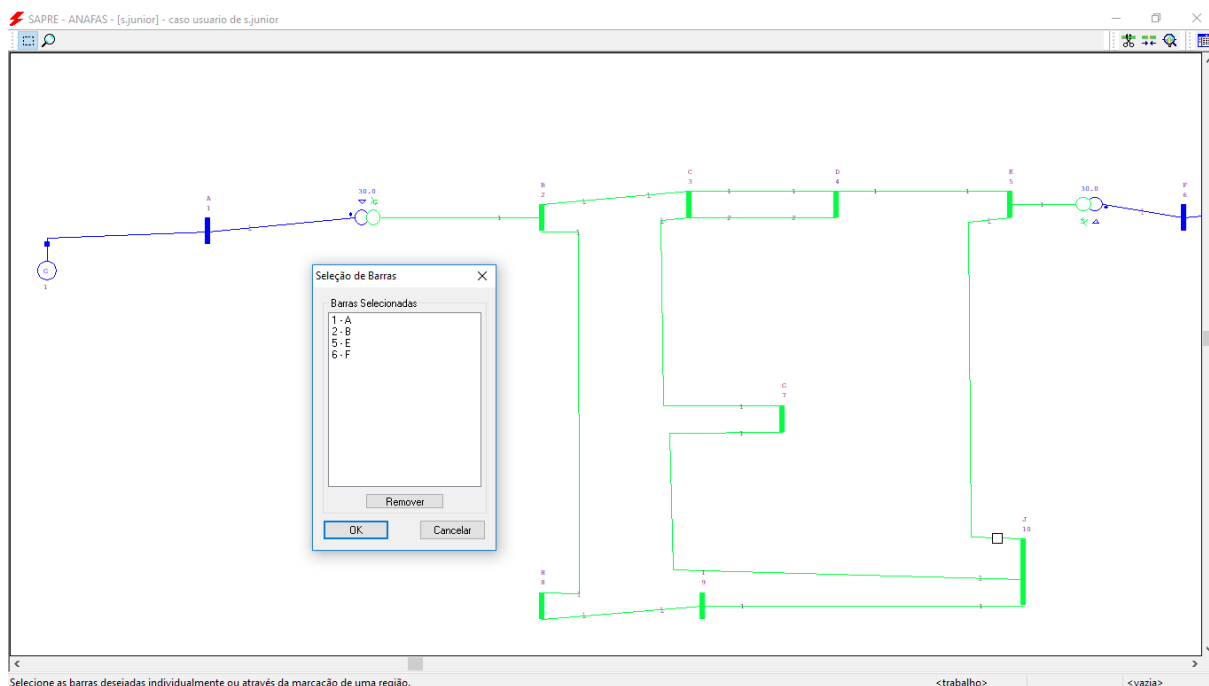


Figura 104 - Seleção de barras retidas

Após selecionar, basta clicar em “OK” e depois em “Executar”, da **Figura 103**. O relatório de Estatísticas de Equivalente é mostrado, resumindo os dados equivalentados. A **Figura 105** mostra o relatório de Estatísticas de Equivalente.

ESTATISTICAS DO EQUIVALENTE			
Criados	1 circuitos serie, desprezados	0	
Criados	0 circuitos shunt, desprezados	2	
SAPRE - REDE:<vazia> CASO:<trabalho>			
TOTAIS DO EQUIVALENTE			
=====			
Barras	->	2 internas + 2 fronteira =	4
Circuitos	->	2 internos + 5 fronteira =	7
Grupos	->	0 internos + 0 fronteira =	0
NAO HA DIFERENCAS DE IMPEDANCIA DE BARRA MAIORES			
QUE 0.005 % (MODULO) E 0.005 gr (ANGULO)			
(OBS.: sistema equivalente criado como um novo Caso da Rede vazia)			

Figura 105 - Relatório de Estatísticas de Equivalente

O resultado da equivalência entre duas barras, no diagrama, é mostrado na **Figura 106**.



Figura 106 - Circuito equivalentado

Nessa “abertura” entre as barras 2 e 5, apesar de não mostrar o desenho do equivalente, contém dados elétricos associados. Através do comando “Exibir Elementos Não Desenhados” é possível ver uma “hachura” nas barras de fronteira, isso indica que existem elementos não desenhados no local. A **Figura 107** mostra a indicação de elementos não desenhados.

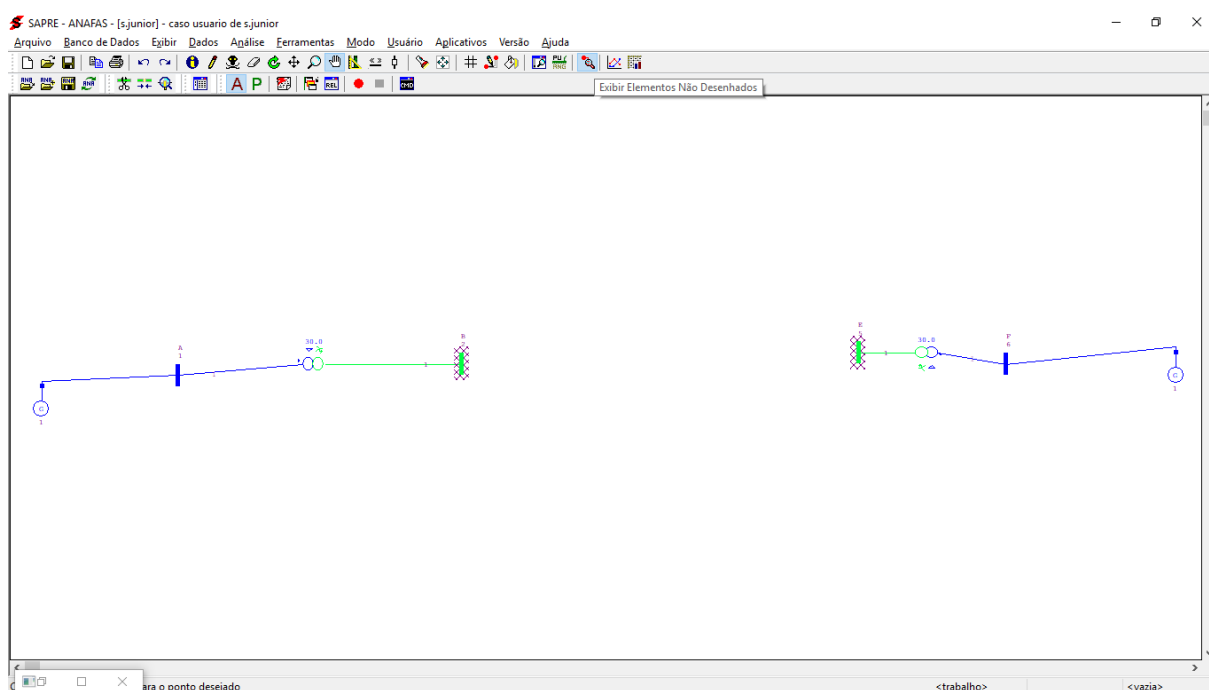


Figura 107 - Elementos não desenhados

É possível desenhar os elementos não desenhados com a ferramenta de desenho, bastando informar os dados do elemento não desenhado na tela de especificação de parâmetros do elemento. Uma forma de checar os elementos do circuito é através da ferramenta “Gerenciador de Dados”.

Essa ferramenta permite checar os elementos do circuito. O formato de lista desta função, organiza os dados de forma que é possível tomar ciência dos elementos do circuito com mais facilidade. Essa ferramenta pode ser acessada pelo menu **[Dados > Gerenciador de**

Dados] ou pelo ícone na barra de ferramentas. A **Figura 108** mostra o ícone do Gerenciador de Dados na Barra de Ferramentas destacado em vermelho.

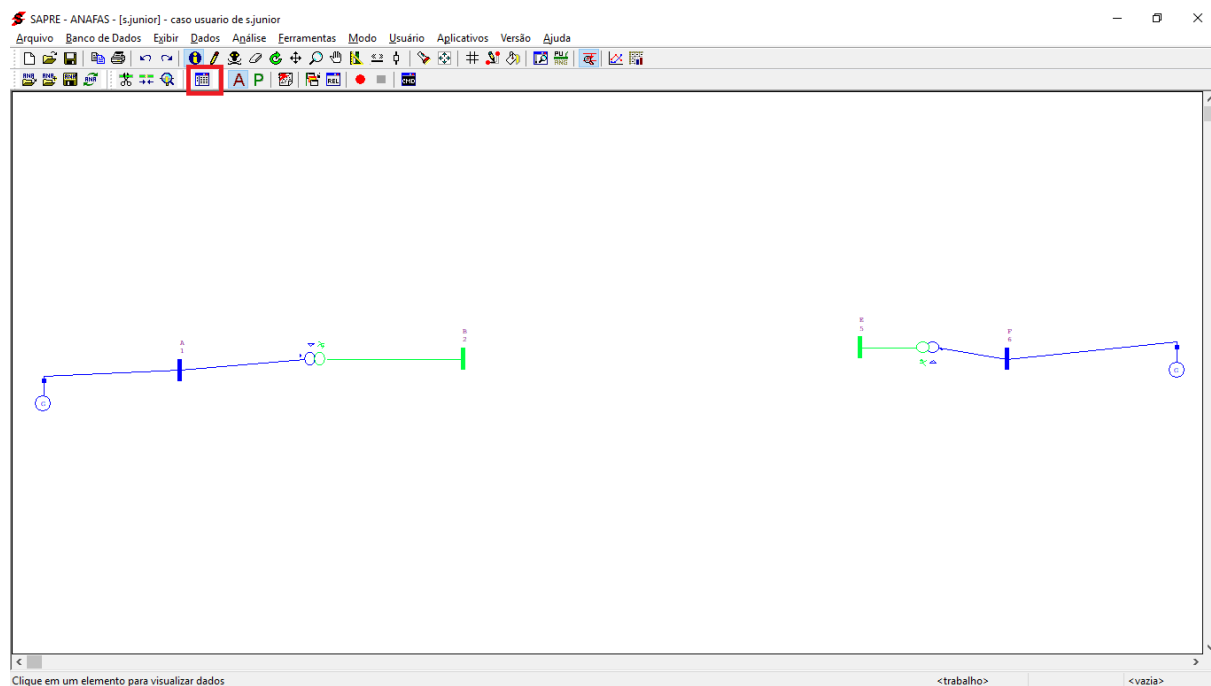


Figura 108 - Ícone do Gerenciador de Dados

Ao selecionar essa função, o Gerenciador de Dados é aberto. Nele é possível adicionar elementos no circuito, excluir elementos, visualizar elementos por categoria, etc. A **Figura 109** mostra o Gerenciador de Dados.

Equipamento	Quantidade
Barra	4
Linha	1
Transformador	2
Gerador	2
Carga	0
Motor	0
Shunt de Barra	0
Shunt de Linha	0
Capacitor Série	0
CER	0

Figura 109 - Gerenciador de Dados

Na **Figura 109**, está destacado o elemento “Linha” e a quantidade desse elemento no circuito. Relacionando essa informação com o desenho do circuito equivalentado, conclui-se que realmente existe uma linha não desenhada entre as barras de fronteira, que representa a impedância equivalente da porção do circuito equivalentada. Para desenhá-la basta inserir um desenho de linha entre as barras, e na janela de configuração da linha, procurar pelos dados da linha equivalente. A **Figura 110** mostra os dados da linha equivalente, que representam a impedância equivalente da porção do circuito equivalentado.

Figura 110 - Linha equivalente

Os valores mostrados na **Figura 110** referentes às impedâncias de sequência, são os valores das reatâncias equivalentes calculados pelo software.

5.7.2- REDUÇÃO À UMA IMPEDÂNCIA SIMPLES (THÉVENIN)

Outra configuração de equivalentes, permite determinar a impedância equivalente entre o gerador equivalente e o ponto de curto. Por exemplo: caso queiramos simular um curto na barra 2, com o circuito equivalentado, contendo apenas a barra de curto e a impedância equivalente, juntamente com a representação do gerador equivalente, basta reter a barra a que se deseja atribuir o ponto de falta e equivalentar todo o resto. A **Figura 111** mostra o resultado da retenção da barra 2.

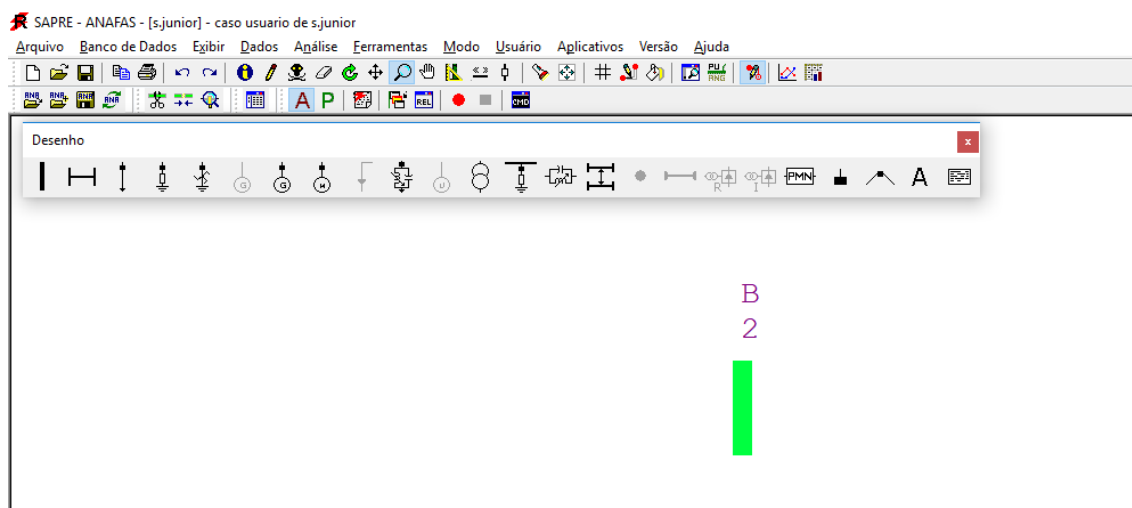


Figura 111 - Retenção da barra 2 no cálculo de equivalentes

Para gerar a representação do gerador basta seguir o mesmo procedimento da inserção da barra equivalente, consultando os dados pelo Gerenciador de Dados e desenhando o gerador através da barra de desenhos, especificando os dados encontrados no gerenciador. A **Figura 112** mostra o gerador equivalente e a barra 2 e as impedâncias equivalentes na janela de dados do gerador.

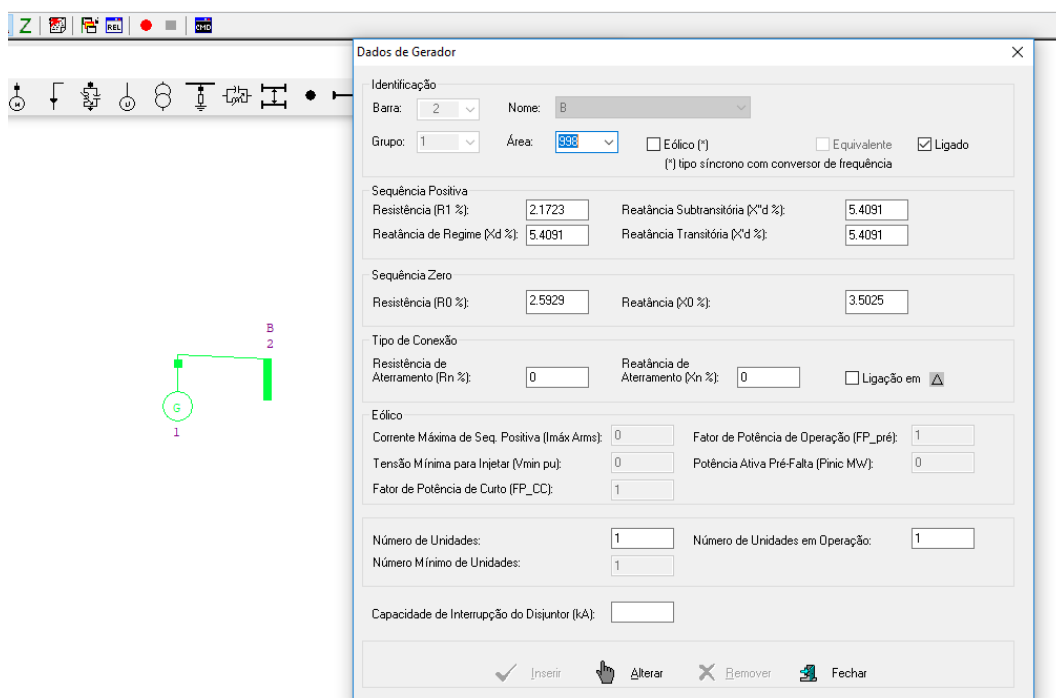


Figura 112 - Dados de equivalente e representação gráfica

5.7.3- CURTO-CIRCUITO EM REDE EQUIVALENTADA

Os equivalentes de curto-circuito devem oferecer resultados o mais próximo possível daqueles encontrados com a rede original. O cálculo de curto-circuito em uma rede equivalentada segue os mesmos procedimentos dos curtos em redes não equivalentadas.

A partir das configurações de curto do subitem 5.4, especificamente da configuração geradora dos resultados obtidos na **Tabela 7** (Curto trifásico com impedância de falta na barra 3), simularemos a mesma situação, porém com a rede equivalentada.

A **Figura 113** mostra o equivalente para o curto na barra 3 e os dados do circuito equivalente. O procedimento de retenção desta barra é idêntico ao descrito no subitem 5.7.2.

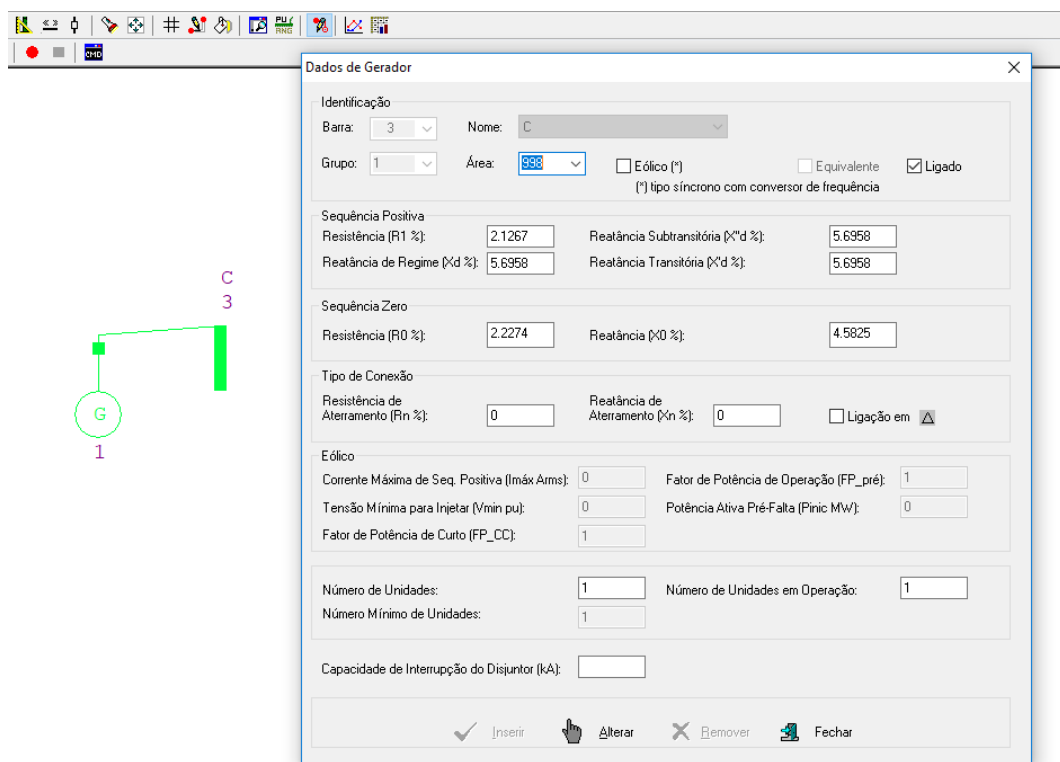


Figura 113 - Circuito equivalente e dados de impedância equivalente

A **Figura 113** mostra que a impedância equivalente para a sequência positiva é $(0,021267 + j0,056958)$ p.u. e a impedância de sequência zero é $(0,022274 + j0,045825)$ p.u..

A impedância de falta utilizada na simulação é a mesma utilizada no subitem 5.4, que vale $(0,1 + j0,3)$ p.u.

Os resultados no diagrama para essa simulação são exibidos na **Figura 114**.

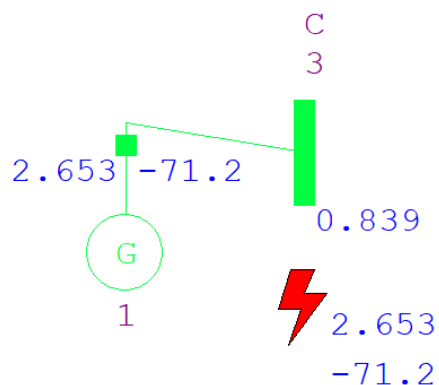


Figura 114 - Resultados no diagrama, do curto trifásico em rede equivalentada

A corrente de curto encontrada foi de **2,653 p.u.** e é exatamente a mesma corrente de curto para a rede não equivalentada (rede original).

A **Tabela 7** referente aos cálculos da rede original é mostrada a seguir.

Tabela 7 - Curto trifásico com impedância de falta na barra 3

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,839	0,3	Z	0,000	0,0	A	2,653	-71,2	Z	0,000	0,0
B	0,839	-119,7	P	0,839	0,3	B	-2,653	-11,2	P	2,653	-71,2
C	0,839	120,3	N	0,000	0,0	C	-2,653	-131,2	N	0,000	0,0

A **Tabela 14** é a tabela com os resultados dos cálculos para a rede equivalentada. Os resultados se mostraram idênticos.

**Tabela 14 - Curto trifásico com impedância de falta na barra 3, com circuito
equivalentado**

Curto trifásico com impedância de falta – Barra 3											
Tensão (p.u.)						Corrente (p.u.)					
	Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo		Módulo	Ângulo
A	0,839	0,3	Z	0,000	0,0	A	2,653	-71,2	Z	0,000	0,0
B	0,839	-119,7	P	0,839	0,3	B	-2,653	-11,2	P	2,653	-71,2
C	0,839	120,3	N	0,000	0,0	C	-2,653	-131,2	N	0,000	0,0

6- CONCLUSÃO

A utilização de um sistema computacional é de extrema necessidade, devido à complexidade dos sistemas elétricos, tanto em termos de dimensão quanto em termos de operação. A partir disso, esse trabalho mostrou como o software ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) juntamente com o SAPRE (Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas), modela os sistemas elétricos, sempre com base nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e facilita as análises dos fenômenos elétricos. Isso é de grande importância, pois foi possível entender o comportamento da rede elétrica perante as faltas, bem como realizar variados tipos de simulações.

Nos capítulos 3 e 4 foram mostradas algumas ferramentas disponibilizadas pelo software, desde comandos para desenho de diagramas, especificações dos parâmetros de cada componente, e os modos de estudo e de solução. O intuito é facilitar a compreensão dos parâmetros ao leitor deste trabalho, bem como familiarizá-lo com utilização do programa.

No capítulo 5, foram mostrados alguns estudos de casos, com o intuito analisar o comportamento do circuito e de expor as facilidades e os recursos proporcionados pelo programa, bem como familiarizar o usuário com o formato dos resultados gerados.

Em suma, este trabalho objetivou trazer uma visão prática da utilização do software ANAFAS em integração com o SAPRE, explicando de forma simplória as funcionalidades e aplicando estudo de casos.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RESENDE, José Wilson. *Análise de Sistemas de Energia Elétrica*. Uberlândia, 2010
- [2] STEVENSON, William D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [3] KINDERMANN, Geraldo. *Curto-Circuito*. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.
- [4] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Relação dos Sistemas e Modelos Computacionais: Submódulo 18.2*. Brasília: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2018%2FSubm%C3%B3dulo%2018.2%2FSubm%C3%B3dulo%2018.2%202016.12.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [5] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos: Submódulo 23.3*. Brasília: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2023%2FSubm%C3%B3dulo%2023.3%2FSubm%C3%B3dulo%2023.3%202016.12.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [6] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. *SAPRE - Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas*. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/sapre-sistema-de-analise-e-projeto-de-redes-eletricas.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [7] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. *ANAFAS - Análise de Falhas Simultâneas*. 2018. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/anafas-analise-de-faltas-simultaneas.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [8] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. *CEPEL - Eletrobras*. Disponível em: <<http://www.cepel.br/>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [9] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. *FormCepel - Avaliação de Resultados de Aplicativos de Análise de Redes Elétricas*. Disponível em:

<<http://www.cepel.br/produtos/formcepel-avaliacao-de-resultados-de-aplicativos-de-analise-de-redes-eletricas.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

[10] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. EditCepel - Editor de Textos para Aplicativos de Análise de Redes Elétricas. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/editcepel-editor-de-textos-para-aplicativos-de-analise-de-redes-eletricas.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

[11] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas: Manual do Usuário. Versão 6.4. Rio de Janeiro: CEPEL, 2012.

[12] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. ANAREDE - Análise de Redes Elétricas. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/anarede-analise-de-redes-eletricas.htm>>. Acesso em: 29 jun. 2018.

[13] CEPEL, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. SAPRE - Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas: Manual do Usuário. Versão 2.2. Rio de Janeiro: CEPEL, 2011.

[14] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Estudos de Curto-Circuito: Submódulo 11.3. Brasília: [s.n.], 2002. Disponível em: <http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.3%2FSubm%C3%B3dulo%2011.3_Rev_0.0.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2018.

[15] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. Estudos de Curto-Circuito: Submódulo 11.3. Brasília: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.3%2FSubm%C3%B3dulo%2011.3%202017.11.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2018.