

**VANESSA MALACO DOS SANTOS**

**ESTUDO DE CASO DE  
CURTO-CIRCUITO EM UM  
SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

**ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior**

São Carlos  
2009



## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tabelas.....	iv
Lista de Símbolos .....	vi
Resumo	ix
Abstract	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos .....	2
1.2 Organização do Documento .....	2
2 Cálculo de Curto-Circuito .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Curto-Circuito Equilibrado .....	7
2.3 Curto-Circuito Desequilibrado.....	7
2.3.1 Teorema de Fortescue .....	8
2.4 Correntes de Curto-Circuito.....	9
2.4.1 Comportamento das correntes de curto-circuito .....	10
3 Métodos para Cálculo de Curto-Circuito.....	13
3.1 Método Clássico.....	13
3.2 Normas para Cálculo de Curto-Circuito.....	18
3.2.1 ANSI - <i>American National Standards Institute</i> .....	19
3.2.2 IEC - <i>International Electrotechnical Commission</i> .....	20
4 Disjuntores.....	23
4.1 Princípio de Funcionamento.....	23
4.2 Classe de Tensão Disjuntores.....	24
4.3 Sistema de Interrupção de Arco dos Disjuntores .....	25
4.4 Sistema de Acionamento .....	25
4.5 Características elétricas dos disjuntores .....	26
4.6 Vida Útil.....	28
4.7 Dimensionamento dos disjuntores .....	28
5 Modelagem do Sistema Elétrico.....	31
5.1 DIGSILENT PowerFactory .....	31
5.2 Sistema Elétrico.....	34
6 Resultados.....	37
6.1 Metodologia de Execução do Estudo .....	37
6.2 Análise dos Resultados.....	38
6.2.1 Análise dos Tipos de Curto-Circuito.....	40
6.3 Análise de Superação dos Disjuntores Existentes .....	52
6.4 Especificação dos Novos Disjuntores .....	53
7 Conclusões.....	55
8 Referências Bibliográficas.....	57
Anexo 1 - Dados do sistema elétrico.....	59

Anexo 2 - Resultados do Caso 1: Simulação de curto-circuito trifásico franco – Todos os geradores ligados.....	65
Anexo 3 - Resultados do Caso 2: Simulação de curto-circuito trifásico franco - Gerador 2.4 desligado .....	71
Anexo 4 - Resultados do Caso 3: Simulação de curto-circuito trifásico franco - Geradores 2.3 e 2.4 desligados .....	77
Anexo 5 - Resultados do Caso 4: Simulação de curto-circuito trifásico franco - Geradores 2.3 e 2.4 desligados e reator ligado .....	83
Anexo 6 - Resultados do Caso 1: Simulação curto-circuito bifásico-terra - Todos geradores ligados .....	89
Anexo 7 - Resultados do Caso 1: Simulação curto-circuito bifásico - Todos os geradores ligados .....	99
Anexo 8 - Resultados do Caso 1: Simulação curto-circuito monofásico – Todos os geradores ligados .....	109

## Lista de Figuras

Figura 1 - Curto-circuito trifásico.....	5
Figura 2 - Curto-circuito entre duas fases.....	6
Figura 3 - Curto-circuito monofásico. ....	6
Figura 4 - Componentes simétricos: da esquerda para a direita - seqüência positiva, seqüência negativa, seqüência zero.....	8
Figura 5 - Corrente de curto-circuito.....	10
Figura 6 - Circuito ilustrativo para cálculo de curto-circuito. ....	13
Figura 7 – Obtenção da impedância equivalente. ....	14
Figura 8 - Curto-circuito bifásico na barra k. ....	15
Figura 9 - Conexão das redes de seqüência positiva e negativa para um curto-circuito bifásico na barra k. ....	16
Figura 10 - Curto-circuito fase-terra na barra k. ....	17
Figura 11 - Conexão das redes de seqüência positiva, negativa e zero para um curto-circuito fase-terra na barra k. ....	18
Figura 12 - Esquema de funcionamento de um disjuntor [15].....	24
Figura 13 - Interface gráfica do programa DIgSILENT PowerFactory.....	31
Figura 14 - Exemplo de uma biblioteca criada pelo usuário. ....	32
Figura 15 - Janela de edição do equipamento.....	33
Figura 16 - Execução do cálculo de curto-circuito. ....	34
Figura 17 - Sistema elétrico.....	36
Figura 18 - Resultados do Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito trifásico franco.....	41
Figura 19 - Resultados do Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico-terra franco.....	42
Figura 20 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico franco. ....	43
Figura 21 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito monofásico franco. ....	44
Figura 22 - Resultados do Caso 2 (gerador 2.4 desligado) – curto-circuito trifásico franco. ....	47
Figura 23 - Resultados do Caso 3 (geradores 2.3 e 2.4 desligados) – curto-circuito trifásico franco.....	49
Figura 24 - Resultados do Caso 4 (geradores 2.3 e 2.4 desligados - reator em operação) – curto-circuito trifásico franco.....	51

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Fator de correção da tensão.....	21
Tabela 2 - Características dos disjuntores existentes. ....	36
Tabela 3 – Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito trifásico franco. ....	45
Tabela 4 – Resultados do Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico-terra franco.....	45
Tabela 5 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico franco. ....	45
Tabela 6 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito monofásico franco .....	45
Tabela 7 – Resultados do Caso 2 (gerador 2.4 desligado) – curto-circuito trifásico franco. ....	46
Tabela 8 - Resultados do Caso 3 (geradores 2.3 e 2.4 desligados) – curto-circuito trifásico franco.....	48
Tabela 9 - Resultados do Caso 4 (geradores 2.3 e 2.4 desligados - reator em operação) – curto-circuito trifásico franco.....	50
Tabela 10 - Análise de superação dos disjuntores existentes – tipo Masterpact, modelo NW [18]. ....	52
Tabela 11 - Especificação básica dos novos disjuntores.....	53
Tabela 1.1 - Parâmetros elétricos dos geradores. ....	61
Tabela 1.2 - Parâmetros elétricos das linhas. ....	61
Tabela 1.3 - Parâmetros elétricos dos transformadores.....	62
Tabela 1.4 – Parâmetros elétricos das barras. ....	62
Tabela 1.5 - Parâmetros elétricos das cargas EQ1, EQ2 e EQ3.....	62
Tabela 1.6 – Parâmetros elétricos do reator. ....	62
Tabela 1.7 – Parâmetros elétricos dos motores .....	63
Tabela 2.1 - Simulação curto-circuito trifásico – Caso 1: todos geradores ligados e reator desligado.....	68
Tabela 3.1 - Simulação curto-circuito trifásico – Caso 2: gerador 2.4 desligado e reator desligado.....	74
Tabela 4.1 - Simulação curto-circuito trifásico – Caso 3: geradores 2.3 e 2.4 desligados e reator desligado.....	80
Tabela 5.1 - Simulação curto-circuito trifásico – Caso 4: geradores 2.3 e 2.4 desligados e reator ligado.....	86
Tabela 6.1 - Simulação curto-circuito bifásico-terra – Todos geradores ligados e reator desligado.....	92
Tabela 7.1 - Simulação curto-circuito bifásico – Todos geradores ligados Todos geradores ligados e reator desligado. ....	102

Tabela 8.1 - Simulação curto-circuito monofásico – Todos geradores ligados Todos geradores ligados e reator desligado. ....	112
---	-----

## Lista de Símbolos

$V_a$	Tensão na fase a
$V_b$	Tensão na fase b
$V_c$	Tensão na fase c
$V_{ao}$	Componente de sequencia zero da tensão da fase a
$V_{a1}$	Componente de sequencia positiva da tensão da fase a
$V_{a2}$	Componente de sequencia negativa da tensão da fase a
$a$	$e^{2\pi/3}$
$i(t)_{\text{assimétrica}}$	Componente assimétrica da corrente de curto-circuito
$i(t)_{\text{simétrica}}$	Componente simétrica da corrente de curto-circuito
$i(t)_{\text{contínua}}$	Componente contínua da corrente de curto-circuito
$I^*_{\text{curto}}$	Corrente total fasorial de curto-circuito
$IM$	Valor máximo da componente simétrica, que permanece no circuito até a extinção do curto-circuito
$I_0$	Componente que cai exponencialmente de acordo com a constante de tempo circuito $\tau$
$\tau$	$L/R$
$L$	Impedância de falta
$R$	Resistência de falta
$fa$	fator de assimetria
$I_{\text{curto}}$	Correntes de curto-circuito
$V_{pf}$	Tensão equivalente pré-falta, em V.
$c$	Fator de correção da tensão.
$U_n$	Tensão nominal fase-fase do sistema, em V.
$K_G$	Fator de correção da impedância do gerador
$U_m$	Tensão nominal do circuito
$U_{rG}$	Tensão nominal do gerador
$c_{\text{Max}}$	Fator de correção da tensão
$x''_d$	Reatância subtransitória do gerador
$\phi_{rG} :$	Ângulo entre $U_{rG} \cdot \frac{\sqrt{3}}{I_r G}$
$K_T$	Fator de correção da impedância do transformador
$x_t$	Reatância relativa do transformador
$K_{TAB}$	Fator de correção da impedância do transformador (para enrolamentos A e B)
$K_{TAC}$	Fator de correção da impedância do transformador (para enrolamentos A e C)
$K_{TBC}$	Fator de correção da impedância do transformador (para enrolamentos B e C)

$X_{TAB}$	Reatância relativa do transformador (para enrolamentos A e B)
$X_{TAC}$	Reatância relativa do transformador (para enrolamentos A e C)
$X_{TBC}$	Reatância relativa do transformador (para enrolamentos B e C)
TRT	Tensão de restabelecimento transitória
TCTRT	Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória
$S_k''$	Potência inicial de curto-circuito
$I_k''$	Corrente eficaz sub-transitória simétrica de curto-circuito
$U_{sc}$	Tensão subtransitória de curto-circuito
$I_p$	Corrente de pico assimétrico de curto-circuito
$S_b$ ou $S_a$	Potência transitória sim. de interrupção de curto-circuito
$I_b$ ou $I_a$	Corrente eficaz transitória simétrica de interrupção de curto-circuito em 100 ms
$I_k$	Corrente eficaz de regime de curto-circuito
$I_{th}$	Corrente térmica equivalente de 1 segundo
$I_o$	Corrente de seqüência negativa
$Z_f$	Resistência de falta
$Z'$	Resistência entre linhas
$V_{a1}$	Tensão na fase a, de seqüência positiva
$V_{b1}$	Tensão na fase b, de seqüência positiva
$V_{c1}$	Tensão na fase c, de seqüência positiva
$V_{a2}$	Tensão na fase a, de seqüência negativa
$V_{b2}$	Tensão na fase b, de seqüência negativa
$V_{c2}$	Tensão na fase c, de seqüência negativa
$V_{a0}$	Tensão na fase a, de seqüência zero
$V_{b0}$	Tensão na fase b, de seqüência zero
$V_{c0}$	Tensão na fase c, de seqüência zero
$\omega$	Velocidade angular



## Resumo

dos Santos, V. M. **Estudo de Caso de Curto-Circuito em um Sistema Elétrico Industrial**. 2009. 117f. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

A simulação de curto-circuito em um sistema elétrico tem enorme importância para o planejamento e operação do mesmo, ao permitir antever as conseqüências danosas dos defeitos simulados. Este conhecimento possibilita a tomada de medidas necessárias para minimizar essas conseqüências, com a mínima perturbação possível ao sistema elétrico. Isto inclui não somente a inserção de dispositivos que promovam a interrupção dos circuitos defeituosos, mas também garantir que todos os seus componentes, percorridos pelas correntes de defeito, possam suportar seus efeitos enquanto elas persistirem. Nesta monografia, abordam-se os curtos-circuitos trifásico, bifásico, bifásico-terra e monofásico em uma planta industrial que sofreu uma expansão em seu sistema elétrico, com a inserção de novos geradores e motores. Tal expansão provocou um aumento significativo das correntes de curto-circuito de forma que os equipamentos da instalação necessitaram ser avaliados em relação à sua capacidade de suportar essas correntes de falta. Para tanto, vários casos foram simulados computacionalmente, ligando/desligando os geradores presentes, utilizando o programa DIGSILENT PowerFactory como ferramenta de cálculo de curto-circuito. Estas simulações tiveram o objetivo de encontrar a melhor situação de operação do sistema, ou seja, encontrar a situação na qual as corrente máximas de curto-circuito que as barras suportam não sejam excedidas. Para encontrar a melhor situação descrita anteriormente, foi convenientemente inserido um reator a fim de diminuir esta corrente de curto-circuito. A título de complementação para o estudo, foram definidos alguns disjuntores de média tensão, baseados nos resultados das simulações.

**Palavras-chave:** curto-circuito, disjuntores, planejamento, sistemas elétricos industriais, corrente simétrica de curto-circuito, corrente assimétrica de curto-circuito.



## Abstract

dos Santos, V. M. **Study Case of Short-Circuit in an Industrial Electrical System**. 2008. 117f . Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

The simulation of short-circuit in an electrical system has enormous importance for its planning and operation, since it allows foreseeing some damaging consequences of the simulated faults. This knowledge makes possible to take measures necessary to minimize such consequences, minimizing possible disturbances to the electrical system. This not only includes the insertion of devices that promote the interruption of the faulted circuits, but also guarantees that all its components can support the fault currents effects while they persist. In this work, we calculate the three-phase to ground, two-phase, two-phase to ground and one-phase short-circuit in an industrial plant, which suffered expansion with the installation of new generators and motors. As a result of this expansion, the short-circuit level has increased significantly so that the existing equipment needed to be evaluated regarding their withstanding capability against the new fault currents. To do that, some cases have been simulated, connecting and disconnect the generators, using the software DlgSILENT PowerFactory as the tool to calculate the short-circuits. These simulations had the objective to find out the best system operating condition, in which the busbars nominal short-circuit currents are not exceeded. To find the best situation previously described, a reactor was considered in order to keep the short-circuit currents below the acceptable levels. Moreover, the medium voltage circuit-breakers were selected.

**Keywords:** short circuit, circuit-breakers, planning, industrial electrical systems, symmetrical short circuit current, asymmetrical short circuit current.



# 1 Introdução

Um curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental, em geral de baixa impedância, entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos. Como consequência, resulta uma corrente elétrica que pode atingir valores muito elevados, dependendo do tipo de curto-circuito. A esta corrente dá-se o nome de corrente de curto-circuito ou corrente de falta e os tipos de curto-circuito podem ser classificados em dez itens [1]-[3]:

1. Curto-circuito trifásico;
2. Curto-circuito entre a fase A e terra (fase-terra ou monofásico);
3. Curto-circuito entre a fase B e terra (fase-terra ou monofásico);
4. Curto-circuito entre a fase C e terra (fase-terra ou monofásico);
5. Curto-circuito entre as fases A e B (bifásico);
6. Curto-circuito entre as fases A e C (bifásico);
7. Curto-circuito entre as fases B e C (bifásico);
8. Curto-circuito entre as fases A, B e terra (bifásico-terra);
9. Curto-circuito entre as fases A, C e terra (bifásico-terra);
10. Curto-circuito entre as fases B, C e terra (bifásico-terra).

Os dez tipos de curto-circuito relacionados anteriormente podem ainda ser classificados em função de haver ou não uma impedância de falta, ou seja, uma impedância situada entre os pontos de potenciais diferentes que sofrerão o curto-circuito. Quando não existe tal impedância, os curtos-circuitos são referenciados como curtos-circuitos francos ou sólidos.

A análise de curto-circuito é imprescindível tanto para o planejamento quanto para a operação de um sistema elétrico, pois visa atingir os seguintes objetivos [1], [4]:

- Determinação da capacidade dos equipamentos em suportar elevadas correntes de falta;
- Cálculo dos ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente (relés e disjuntores de baixa tensão);
- Seleção de reatores limitadores de corrente, fusíveis, transformadores de corrente;
- Cálculo dos esforços mecânicos dos elementos estruturais dos equipamentos;
- Dimensionamento do sistema de aterramento;
- Seleção e análise de superação de disjuntores e outros equipamentos de seccionamento.

Em sistemas elétricos é necessário atualizar o estudo de curto-circuito sempre que ocorrerem alterações nos mesmos, decorrentes de mudanças topológicas, expansão, interligação com outros sistemas elétricos e instalação de novos equipamentos, sobretudo geradores e motores de corrente alternada.

No contexto exposto anteriormente, este trabalho visa a realização de um estudo de caso de curto-circuito em um sistema elétrico industrial que sofreu uma ampliação significativa com a

instalação de dois novos geradores síncronos e de oito novos motores de indução. O foco desse estudo é dividido nos seguintes itens [4]:

- Calcular as máximas correntes simétricas de curto-circuito para avaliar as capacidades de interrupção dos disjuntores existentes e selecionar disjuntores para a nova porção do sistema;
- Calcular as máximas correntes de pico de curto-circuito para avaliar as capacidades dos disjuntores e barramentos de suportar os esforços dinâmicos dessas correntes.

Este estudo foi realizado com o auxílio do programa DIGSILENT PowerFactory [5] e cálculos de curto-circuito foram executados de acordo com a norma IEC 60909 [5], [6].

## 1.1 Objetivos

A meta deste trabalho é efetuar um estudo de caso de curto-circuito em um sistema elétrico industrial que opera de forma isolada da concessionária, pois o mesmo encontra-se distante das redes de distribuição, e sofreu uma expansão significativa de geração e carga de forma a elevar sua capacidade produtiva. Para alcançar tal meta, os seguintes objetivos devem ser cumpridos:

- A execução de cálculos de curto-circuito, considerando os dez tipos mencionados anteriormente, em todas as barras do sistema elétrico para determinação dos maiores valores de correntes de curto-circuito simétrica e de pico;
- A escolha da condição operativa mais adequada, considerando o sistema expandido, de maneira a não violar as capacidades dos barramentos em suportar os níveis de curto-circuito;
- Avaliar as capacidades térmicas e dinâmicas dos disjuntores existentes de suportar as máximas correntes de curto-circuito (simétrica e de pico) e especificar os novos disjuntores. Tanto esta avaliação quanto a especificação dos novos disjuntores considerarão apenas as capacidades dos equipamentos em suportar as correntes de curto-circuito. Outros critérios, como por exemplo, tensão suportável à frequência industrial e ao impulso não serão considerados neste trabalho. Portanto, ter-se-á uma especificação básica dos disjuntores;
- Propor métodos para limitar as correntes de curto-circuito, caso elas sejam muito elevadas considerando as condições operativas desejadas, as quais serão definidas posteriormente.

## 1.2 Organização do Documento

Este documento está organizado como segue:

- No Capítulo 2 encontra-se uma breve explicação sobre a teoria de cálculo de curto-circuito e das correntes de curto-circuito;
- No Capítulo 3 serão apresentados, de forma resumida, os principais métodos e normas empregados para o cálculo de curto-circuito;
- No Capítulo 4 há uma descrição sobre disjuntores: classe de tensão, parâmetros elétricos, entre outros;
- O Capítulo 5 é um capítulo dedicado ao programa DIgSILENT PowerFactory e á apresentação do sistema elétrico analisado;
- No Capítulo 6 encontra-se a metodologia utilizada na análise de curto-circuito para o sistema elétrico e também são apresentados e discutidos todos os resultados das simulações;
- No Capítulo 7 serão apresentadas as conclusões deste trabalho.



## 2 Cálculo de Curto-Circuito

### 2.1 Introdução

Nos sistemas elétricos podem ocorrer vários fenômenos, acidentais ou não, que colocam em risco a confiabilidade e funcionamento do sistema. Dependendo da velocidade destes fenômenos eles podem ser agrupados em [1]:

- **Transitórios Ultra-Rápidos (Fenômenos de Surto)**

Causados por descargas atmosféricas nas linhas de transmissão expostas ou pelas mudanças abruptas na rede resultantes de operações de chaveamento. Esses transitórios são de natureza inteiramente elétrica sendo caracterizados por uma onda eletromagnética que se reflete nos terminais na linha de transmissão. Os fenômenos associados a essas ondas ocorrem nos primeiros milissegundos após o seu início.

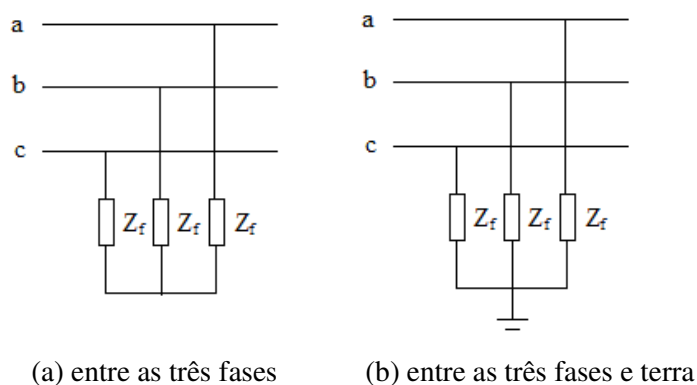
A maior razão de estudar os transitórios ultra-rápidos é obter uma base para a escolha do nível de isolamento do equipamento da linha.

- **Transitórios Meio-Rápidos (Fenômeno de Curto-Circuito)**

Transitórios causados por mudanças estruturais abruptas e anormais chamadas de curto-circuito no sistema. Por ordem de gravidade podem ser divididas em:

- Curto-circuito nas três fases (trifásico).

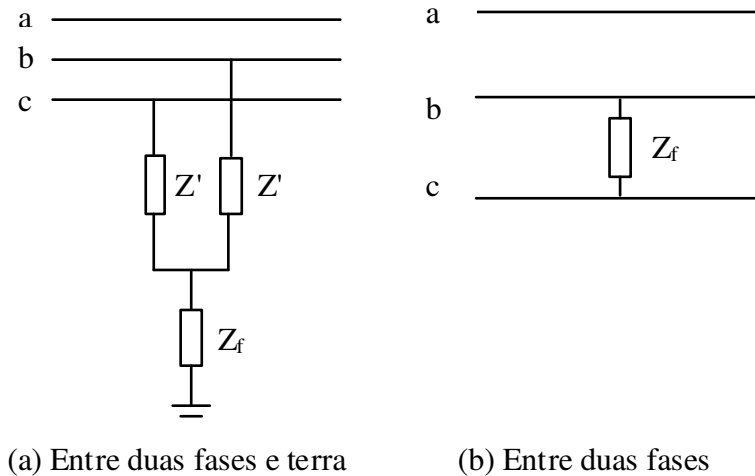
A Figura 1 a seguir, mostra como se dá o curto-circuito entre as três fases e a terra, conhecido como curto-circuito trifásico. Observa-se que as três fases são levadas à terra por meio de uma impedância, conhecida como impedância de falta  $Z_f$ . Caso não exista impedância de falta, diz-se que o curto-circuito é franco.



**Figura 1 - Curto-circuito trifásico.**

- Curto-circuito entre duas fases (bifásico)

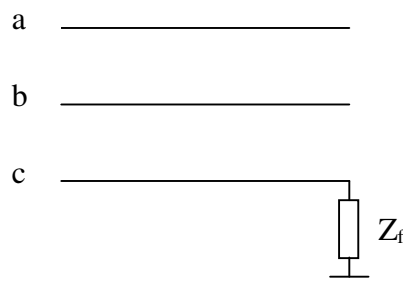
A Figura 2 mostra o curto-circuito bifásico que pode se dar entre duas fases e a terra (a) ou entre duas fases (b). A impedância de falta entre as fases é denotada como  $Z'$  e a impedância de falta como  $Z_f$ .



**Figura 2 - Curto-circuito entre duas fases.**

- Curto-circuito fase-terra (monofásico)

A Figura 3 mostra o curto-circuito de uma fase a terra, conhecido como curto-circuito monofásico. Assim como nos casos anteriores,  $Z_f$  denota impedância de falta.



**Figura 3 - Curto-circuito monofásico.**

O curto-circuito mais comum é o monofásico sendo o trifásico mais difícil de ocorrer: 80% das faltas são monofásicas, 15% bifásicas e apenas 5% são trifásicas [7].

As principais causas dessas faltas são [7]:

- Defeito mecânico (quebra de condutores, contato entre duas fases causado acidentalmente como, por exemplo, algum tipo de ferramenta ou animal);
- Danos nos equipamentos devido à umidade e corrosão;

- Posição (dentro ou fora de uma máquina ou de um painel de comando elétrico);
- Entre outros.

Principais conseqüências [7]:

- Possível presença de arcos elétricos;
- Danos à isolação dos condutores;
- Possível presença de fogo, perigo à vida;
- Aumento das perdas Joule;
- Danos em redes próximas;
- Instabilidade dinâmica e/ou a perda de sincronização de máquinas síncronas;
- Distúrbios em circuitos do controle/monitoração;
- Danos físicos em equipamentos;

- **Transitórios Lentos (Estabilidade Transitória)**

Caso a parte faltosa não seja rapidamente desligada, a situação vai evoluir para o tipo mais perigoso de situação transitória: oscilações mecânicas nos rotores das máquinas síncronas. Esses transitórios eletromecânicos podem tirar algumas ou todas as máquinas do sincronismo. Diz-se que o sistema atingiu o seu limite de estabilidade transitória neste caso.

## **2.2 Curto-Circuito Equilibrado**

Dentre os diversos tipos de fenômenos nocivos aos sistemas elétricos abordados na seção anterior, este trabalho se concentra nos transitórios meio rápidos: os curtos-circuitos equilibrados e desequilibrados.

O curto-circuito é dito equilibrado quando há uma completa simetria ou equilíbrio entre suas fases antes e após a ocorrência do defeito. Neste caso, as impedâncias, os módulos das tensões e das correntes de curto-circuito são iguais para as três fases. Isto permite a representação monofásica do sistema.

Dentre todos os tipos de curto-circuito apenas o trifásico é equilibrado, ou seja, apresenta somente componentes de seqüência positiva. Mais detalhes sobre componentes de seqüência (positiva, negativa e zero) serão abordados no item 2.3.

## **2.3 Curto-Circuito Desequilibrado**

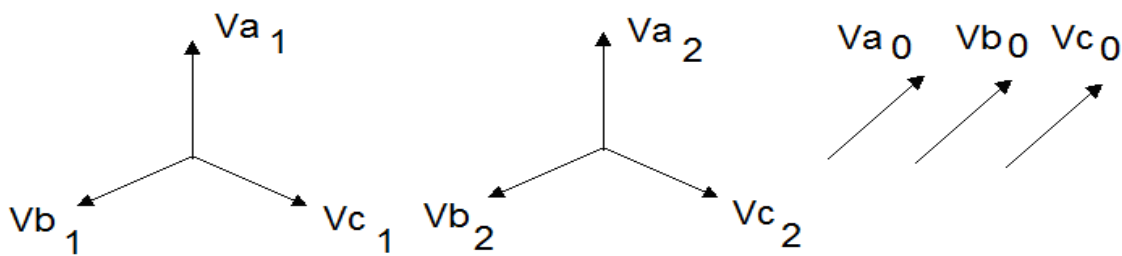
Se as cargas do sistema são desequilibradas, as impedâncias, tensões e correntes de curto-circuito não são iguais para as três fases, o curto-circuito é dito desequilibrado. Neste caso não pode ser aplicada a representação monofásica do sistema elétrico.

Excetuando-se o curto-circuito trifásico, os demais tipos de curto-circuito (monofásico, bifásico e bifásico-terra) são desequilibrados.

Um método que auxilia o cálculo de curtos-circuitos desequilibrados se baseia no Teorema de Fortescue, apresentado a seguir.

### 2.3.1 Teorema de Fortescue

Em 1918, Fortescue apresentou o seguinte teorema [2]: “Um sistema desequilibrado de  $n$  fasores relacionados, pode ser convertido em  $n$  sistemas equilibrados de fasores, chamados componentes simétricas dos fasores originais. Os  $n$  fasores de cada conjunto de componentes, são iguais em amplitude e os ângulos entre fasores adjacentes de cada conjunto, são iguais”. O Teorema de *Fortescue* aplicado ao sistema elétrico proporciona facilidades para se determinar inúmeros cálculos [8]. Este teorema decompõe um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos de três fasores balanceados chamados de componentes simétricos de sequência positiva, negativa, e zero, conforme mostra a Figura 4.



**Figura 4 - Componentes simétricos: da esquerda para a direita - sequência positiva, sequência negativa, sequência zero.**

O sistema de sequência positiva, mostrado na Figura 4, possui três fasores ( $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{c1}$ ) balanceados de mesmo módulo e com defasagem de  $120^\circ$ . Esse sistema de fasores possui sequência de fase igual ao do sistema original (sequência ABC), possuindo, portanto, o mesmo sentido de rotação e por isso chamado também de sequência direta.

O sistema de sequência negativa, mostrado na Figura 4, assim como o de positiva, possui três fasores balanceados ( $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  e  $V_{c2}$ ) e de mesmo módulo com suas defasagens de  $120^\circ$ . Porém, o sentido de rotação é inverso (sequência ACB) ao do sistema original, sendo também designado de sequência inversa.

O terceiro sistema é chamado de sequência zero, em que os três fasores ( $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$ ,  $V_{c0}$ ) têm o mesmo módulo, porém estão em fase, possuindo a mesma sequência de fase que o sistema original.

Tais fasores podem ser representados na forma matricial como na equação a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para encontrar as componentes  $V_{a0}$ ,  $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$  basta aplicar a matriz inversa como mostrado pela equação a seguir:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

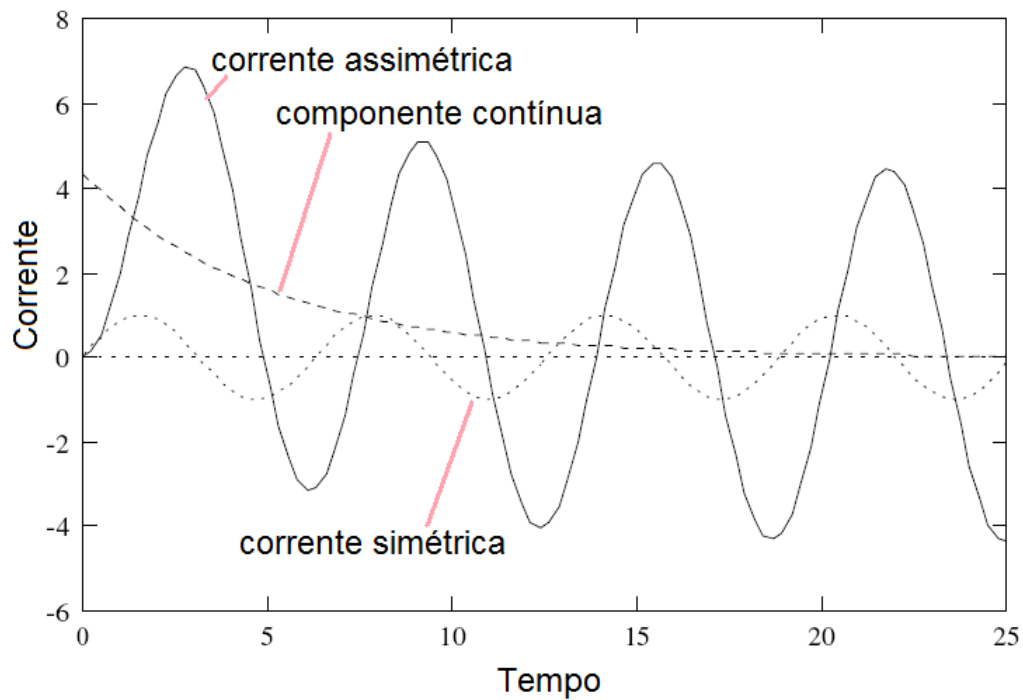
Sendo  $a = e^{\frac{2\pi}{3}}$ , representando a defasagem de  $120^\circ$  entre as tensões.

As equações matriciais (1) e (2) também são válidas para as correntes. Maiores detalhes sobre a aplicação da Teoria dos Componentes Simétricos no cálculo de curtos-circuitos são apresentados na seção 3.1.

## 2.4 Correntes de Curto-Circuito

A corrente alternada assimétrica é composta por uma componente alternada (corrente simétrica) e por uma componente contínua, conforme expresso na equação (3) e ilustrado na Figura 5.

$$i(t)_{\text{assimétrica}} = i(t)_{\text{simétrica}} + i(t)_{\text{contínua}} \quad (3)$$



**Figura 5 - Corrente de curto-circuito.**

Os valores assimétricos das correntes de curtos-circuitos são empregados para a determinação da capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos dinâmicos das correntes de falta. Já os valores simétricos são usados para determinar as capacidades de interrupção dos dispositivos de seccionamento (por exemplo, disjuntores), as capacidades de suportar os efeitos térmicos produzidos pelas correntes de falta, e para definir os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente [9].

#### 2.4.1 Comportamento das correntes de curto-circuito

No domínio do tempo a corrente de um curto-circuito pode ser dividida em três partes: subtransitória, transitória e regime [2].

Durante os períodos subtransitório e transitório essa corrente é assimétrica, tendendo a se tornar simétrica à medida em que o tempo evolui, uma vez que se tem a atenuação da componente contínua da corrente de curto-circuito. Passado esses períodos, a corrente total entra em regime permanente, tornando-se simétrica. Devido a estas características, é comum representá-la pela equação abaixo.

$$I_{\text{curto}} = I_M \cos(\omega t) + I_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

Em que:

$I_M$  : Valor máximo da componente simétrica, que permanece no circuito até a extinção do curto-circuito

$I_0$  : Componente que cai exponencialmente de acordo com a constante de tempo do circuito  $\tau$ , que é função dos parâmetros:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5)$$

Os parâmetros L e R dependem do local da falta e das componentes de seqüências positiva, negativa e zero das impedâncias envolvidas no curto-circuito.

O valor máximo da componente assimétrica, na prática, é determinada multiplicando-se o valor eficaz da componente simétrica pelo fator de assimetria ( $f_a$ ) calculado, geralmente, em função da relação X/R, estimado no ponto da falta [1], [2], [10].

$$i(t)_{\text{assimétrica}} = f_a \times i(t)_{\text{simétrica}} \quad (6)$$



### 3 Métodos para Cálculo de Curto-Circuito

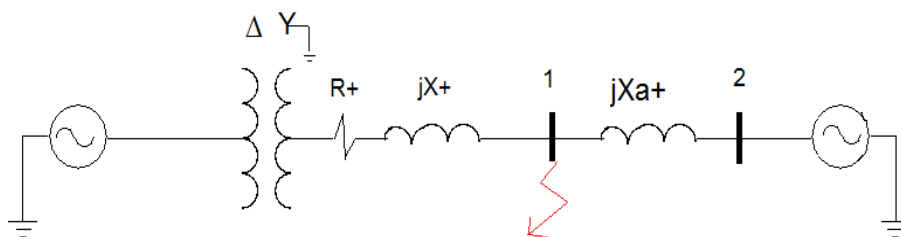
Este capítulo aborda os principais métodos e normas para cálculo de curto-circuito.

#### 3.1 Método Clássico

No método clássico são adotadas as seguintes simplificações:

- Todas as máquinas síncronas do sistema operando com tensões  $1,0 \angle 0^\circ$  pu.
- Motores são considerados como fontes de tensão e reatância.
- Cargas estáticas do sistema são desprezadas.
- As capacitâncias das linhas de transmissão são ignoradas.
- Bancos de capacitores e reatores são desprezados.
- Consideram-se todos os transformadores operando no tap nominal.
- A impedância da rede de sequência negativa é idêntica à da rede de sequência positiva.

Segue um exemplo simples de como estas simplificações auxiliam no cálculo de curto-circuito. Seja o sistema elétrico da Figura 6 composto por duas fontes de tensão alternada, um transformador com impedância  $jX$ , um ramo de impedância  $R_+ + jX_+$  e um ramo “a” de impedância  $jX_{a+}$ . Para efeito de simplificação, as impedâncias internas das fontes de tensão serão desprezadas e considera-se o sistema equilibrado. O exemplo desenvolvido considerará uma curto-circuito equilibrado, portanto, a representação monofásica do sistema elétrico é suficiente para essa análise.

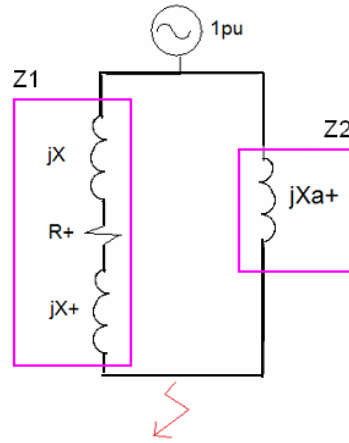


**Figura 6 - Circuito ilustrativo para cálculo de curto-circuito.**

Admitindo a ocorrência de um curto-circuito trifásico franco na Barra 1 (identificado pela seta vermelha), a corrente de curto-circuito (valor eficaz simétrico) pode ser calculada como segue:

- Inicialmente considera-se uma fonte de tensão equivalente, cuja tensão de pré-falta seja  $1,0 \angle 0^\circ$  pu;

- Determina-se a impedância equivalente entre a fonte de tensão equivalente e o local onde ocorreu o curto-circuito. Esta determinação equivale à obtenção da impedância equivalente de Thévenin “vista” do ponto onde ocorreu a falta. A Figura 7 apresenta o circuito equivalente para o cálculo da corrente de curto-circuito, considerando a fonte de tensão e a impedância equivalente.



**Figura 7 – Obtenção da impedância equivalente.**

- Finalmente, para o cálculo da corrente de curto-circuito ( $I_{curto}$ ) basta resolver o circuito da Figura 7, conforme mostra a expressão (7), em que o símbolo “//” representa a associação em paralelo das impedâncias  $Z1$  e  $Z2$ :

$$\dot{I}_{curto} = \frac{1 \angle 0}{Z1 // Z2} \quad (7)$$

O exemplo anterior é perfeitamente válido quando o curto-circuito é trifásico, portanto equilibrado. Por outro lado, no caso de curtos-circuitos desequilibrados algumas modificações no procedimento anterior devem ser introduzidas. Para exemplificar tais modificações, os casos de curtos-circuitos bifásicos e monofásicos são apresentados a seguir, sendo que para o curto-circuito bifásico-terra a análise é semelhante. Maiores detalhes podem ser encontrados em [1], [2] e [5].

- **Curto-circuito bifásico**

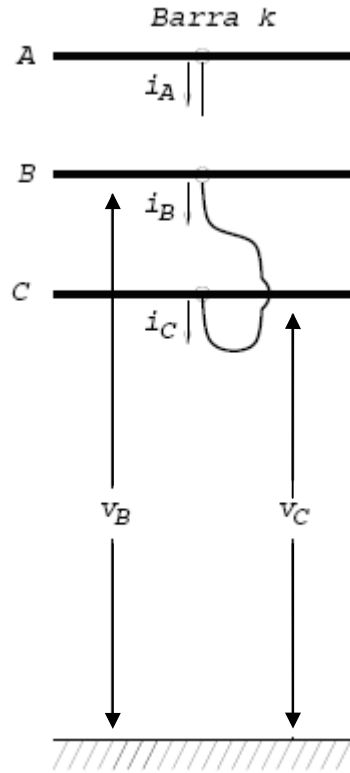
Seja a ocorrência de um curto-circuito entre as fases B e C em uma barra  $k$  qualquer, conforme ilustrado na Figura 8. Para esse tipo de falta, as seguintes condições de contorno são verdadeiras [1], [2], [5]:

$$i_A = 0$$

$$i_B = -i_C$$

$$V_B = V_C$$

Sendo  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  os fasores das correntes das fases A, B e C, e  $V_B$  e  $V_C$  os fasores das tensões de fase das fases B e C.



**Figura 8 - Curto-circuito bifásico na barra k.**

Aplicando a equação matricial de análise das correntes e considerando as condições de contorno, tem-se:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_B \\ -i_B \end{bmatrix} \quad (8)$$

Em que  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_0$  são os componentes de seqüência positiva, negativa e zero da corrente, respectivamente. Da equação matricial (8) resultam as seguintes equações:

$$i_1 = \frac{1}{3} (ai_B - a^2 i_B) = j \frac{\sqrt{3}}{3} i_B \quad (9)$$

$$i_2 = \frac{1}{3} (a^2 i_B - ai_B) = -j \frac{\sqrt{3}}{3} i_B \quad (10)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_B - i_B) = 0 \quad (11)$$

A análise das equações de (9) a (11) permite concluir que:

- $i_1 = i_2$
- Não há corrente e tensão de seqüência zero para o curto-circuito bifásico.

Dadas as conclusões anteriores e as condições de contorno, pode-se obter a equação matricial das tensões conforme apresentado a seguir:

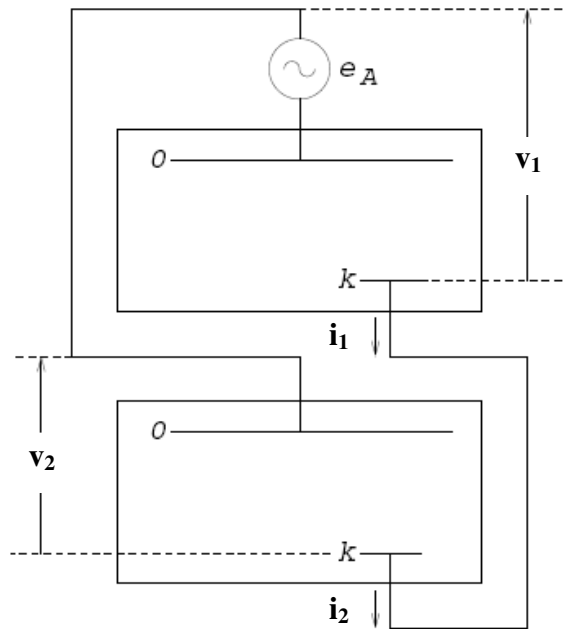
$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

Em que  $v_1$  e  $v_2$  são os componentes de seqüência positiva e negativa da tensão, respectivamente. De (12) resultam:

$$v_1 = \frac{1}{3}(v_A - v_B) \quad (13)$$

$$v_2 = \frac{1}{3}(v_A - v_B) \quad (14)$$

Da análise das expressões de (8) a (14) é possível concluir que para calcular o curto-circuito bifásico é preciso obter o diagrama de impedâncias de seqüência positiva e negativa do sistema elétrico e associá-los em paralelo, conforme ilustrado na Figura 9. Nesta figura, a barra 0 representa a barra de referência do sistema. Finalmente, para obter a corrente de curto-circuito obtém-se a impedância equivalente, tal como descrito no exemplo da Figura 6. Nesse caso, a corrente de curto-circuito e as tensões serão obtidas em componentes de seqüência e a conversão para componentes de fase deve ser feita conforme explicado na seção 2.3.

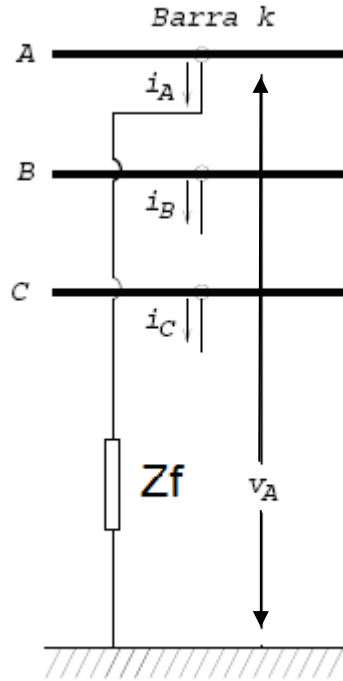


**Figura 9 - Conexão das redes de seqüência positiva e negativa para um curto-circuito bifásico na barra k.**

- **Curto-circuito fase-terra**

Seja a ocorrência de um curto-circuito fase-terra na fase A da barra  $k$ , conforme ilustrado na Figura 10. Na figura,  $r_F$  é a resistência de falta. Neste caso, as condições de contorno são:

$$i_B = i_C = 0$$



**Figura 10 - Curto-circuito fase-terra na barra k.**

Procedendo à transformação das componentes de fase em componentes de seqüência, tem-se:

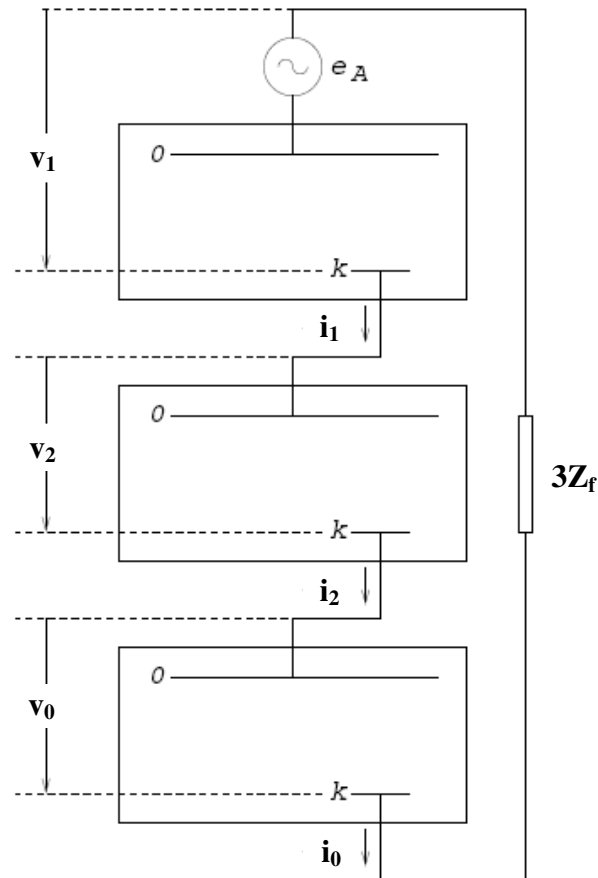
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$i_1 = \frac{1}{3}(i_A) \quad (16)$$

$$i_2 = \frac{1}{3}(i_A) \quad (17)$$

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_A) \quad (18)$$

Pela análise das expressões de (16) a (18) observa-se que a corrente de curto-circuito na fase A é igual á soma das correntes de seqüência positiva, negativa e zero. Além disso, as correntes de seqüência positiva, negativa e zero são iguais. Isso equivale a conectar os diagramas de impedância de seqüência positiva, negativa e zero em série, conforme ilustra a Figura 11.



**Figura 11 - Conexão das redes de sequência positiva, negativa e zero para um curto-circuito fase-terra na barra  $k$ .**

O cálculo da corrente de curto-circuito implica em encontrar a impedância equivalente do circuito da Figura 11, de maneira semelhante ao exemplo da Figura 6.

Para o cálculo de curtos-circuitos com conexão à terra é muito importante considerar a maneira como são conectados os enrolamentos dos transformadores trifásicos, pois isso define a existência de um circuito para a circulação da corrente para a terra. Por exemplo, um transformador cujos ambos os enrolamentos estão conectados em  $\Delta$  não provê qualquer conexão com a terra, portanto não há circulação de corrente de sequência zero no ramo do circuito em que ele esteja instalado [1], [2]. Portanto, cada tipo de conexão dos enrolamentos implica em um circuito de sequência zero diferente. A relação completa entre as conexões dos enrolamentos dos transformadores com os circuitos de sequência zero é apresentada em [1] e [2].

### 3.2 Normas para Cálculo de Curto-Circuito

Existem diversas metodologias para o cálculo de curto-circuito em sistemas elétricos: metodologias ANSI, IEC e VDE, impedância fixa e variável dos elementos da rede elétrica, simulação dinâmica do tipo de transitórios eletromagnéticos, entre outras [11]-[14]. Nesta seção

serão brevemente explicadas duas metodologias elaboradas por dois institutos de normatização mundialmente conhecidos: ANSI (norte americano) e IEC (europeu). A razão dessa escolha deve-se ao fato de estas serem as principais normas utilizadas em todo o mundo e que servem de embasamento para a elaboração de outras normas. No Brasil, por exemplo, não existe uma padronização rígida com relação ao cálculo de curto-circuito, dessa forma há indústrias que utilizam tanto a norma elaborada pelo ANSI quanto a elaborada pelo IEC.

### 3.2.1 ANSI - American National Standards Institute

ANSI – *American National Standards Institute* (ou Instituto Americano de Padronização) é uma organização particular sem fins lucrativos, sediada nos Estados Unidos, cujo objetivo é facilitar a padronização dos trabalhos dos seus membros. Para tanto, o instituto elabora, promulga e aplica várias normas e guias técnicos que têm impacto direto nos mais diversos setores produtivos: desde a produção de dispositivos acústicos até a de equipamentos de grande porte, desde normas para reger o setor agropecuário até normas para a distribuição de energia elétrica e muitos outros setores [11].

Em relação ao cálculo de curto-circuito, existem duas normas pertencentes ao ANSI que determinam padrões para dimensionamento de equipamentos baseados nas correntes de falta. Tais normas são [11], [12]:

- ANSI/IEEE C37.010 - *IEEE application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis*: para ser aplicada em sistemas com tensões superiores a 1000 V;
- ANSI/IEEE C37.13 - *IEEE Standard for low-voltage AC power circuit breakers used in enclosures* para ser aplicada em sistemas com tensões inferiores a 1000 V.

Ambas as normas previamente citadas, estabelecem o cálculo de curto-circuito baseando-se, principalmente, no cálculo de reatâncias subtransitórias utilizando fatores de correção. Por este motivo as normas ANSI relacionadas ao cálculo de curto-circuito são comumente conhecidas como normas baseadas em cálculo de impedâncias [12].

O método de cálculo de curto-circuito proveniente nas normas ANSI divide o sistema elétrico para o cálculo das impedâncias de falta em três classes de impedâncias: a impedância na baixa tensão, impedância momentânea na média/alta tensão e impedância de interrupção na média/alta tensão [12]. A seguir tem-se um detalhamento de cada uma destas divisões.

A rede de baixa impedância requer que todas as máquinas, incluindo as de pequeno porte, sejam incluídas na impedância da rede. Caso a relação X/R do local de curto-circuito exceder um valor de 6,6, então um fator de correção é aplicado. A norma, para esta classe de tensão, permite desprezar motores com potência menor que 50 HP e máquinas monofásicas.

Para a rede de média/alta tensão a impedância momentânea (reatância subtransitória) é calculada utilizando-se um fator de correção de 1,2 para motores de 50 - 1000 HP a 1800 rpm e de 50-250 HP a 3600 rpm. A norma, assim como para a classe de baixa tensão, despreza motores com potência menor que 50 HP e motores monofásicos.

Para a rede de média/alta tensão a impedância de interrupção é calculada utilizando-se um fator de correção de 1,5 para motores acima de 1000 HP a 1800 rpm e de 50 – 250 HP a 3600 rpm. Fator de correção igual a 3,0 é utilizado para os demais motores.

É importante salientar que essas impedâncias são utilizadas no cálculo da corrente total de curto-circuito. Mais detalhes podem ser encontrados em [12].

### 3.2.2 IEC - International Electrotechnical Commission

De forma semelhante ao ANSI, a IEC é uma organização européia que regulamenta, por meio de normas e guias técnicos, as atividades dos diversos setores produtivos relacionados à eletricidade e eletrônica [13]. A norma IEC relacionada ao cálculo de curto-circuito é a IEC60909 [5], [6], [12].

A norma IEC 60909 [5], [6], considera fatores importantes que contribuem para análises mais precisas, tais como:

- Contribuição dos motores assíncronos para o curto-circuito;
- Decaimento da componente CA da corrente de curto-circuito nas proximidades de motores e geradores síncronos;
- Assimetria CC da corrente de curto-circuito.

Em linhas gerais, o cálculo de curto-circuito segundo a IEC 60909 emprega o conceito de fonte de tensão de pré-falta equivalente, cujo valor é obtido por (19):

$$V_{pf} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \text{ [V]} \quad (19)$$

em que:

$V_{pf}$  = Tensão equivalente de pré-falta, em V.

$c$  = Fator de correção da tensão.

$U_n$  = Tensão nominal fase-fase do sistema, em V.

A tensão de pré-falta equivalente é considerada como a única fonte de tensão para o cálculo das correntes de curto-circuito no local de incidência da falta. Dessa forma, as fontes de tensão internas dos geradores são curto-circuitadas. O fator de correção da tensão é apresentado na Tabela 1 e seu objetivo é considerar, de maneira conservadora, eventuais variações de tensão desprezadas pelo método da fonte de tensão de pré-falta equivalente. Para tanto, o fator  $c$  está relacionado aos

seguintes fatores, os quais não são explicitamente considerados no cálculo das correntes de curto-circuito [5], [6], [12]:

- Variações no perfil de tensão em regime permanente decorrentes de variações da geração e da carga ao longo do dia;
- Variações dos taps dos transformadores;
- Cargas e capacitâncias que foram desprezadas na obtenção da fonte de tensão pré-falta equivalente;
- Comportamento transitório dos geradores e motores.

**Tabela 1 - Fator de correção da tensão.**

Tensão Nominal	Fator de Correção da Tensão (c)	
	Para máxima corrente de curto-circuito	Para mínima corrente de curto circuito
	$c_{máx}$	$c_{mín}$
100 – 1000 V	1,05	0,95
> 1000 – 35 kV	1,10	1,00
> 35 kV		

Em determinadas situações, geradores podem sofrer uma variação de tensão de curto-circuito maior que 10% (por exemplo, quando as reatâncias subtransitórias do gerador são elevadas), assim como prevê a correção de tensão mostrada na Tabela 1. Para a correção deste problema, a norma IEC 60909 faz uso de mais um fator de correção, o da impedância.

O fator de correção de impedância, para geradores, pode ser calculado por:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{máx}}{(1 + x''_d \cdot \sin \phi_{rg})} \quad (20)$$

Em que:

$K_G$  : fator de correção da impedância do gerador

$U_n$  : tensão nominal do circuito

$U_{rG}$  : tensão nominal do gerador

$c_{máx}$  : fator de correção da tensão

$x''_d$  : reatância subtransitória do gerador

$\phi_{rG}$  : ângulo entre  $U_{rG}$  e  $I_{rG}$

Os transformadores, na norma IEC 60909, em determinadas situações (por exemplo, o lado de baixa tensão do transformador possui tensão diferente do que o gerador que está conectado a

ele) também utilizam fatores de correção da impedância [6]. Esse fator de correção pode ser calculado por:

- Para transformadores de dois enrolamentos:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{m\acute{a}x}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (21)$$

- Para transformadores de três enrolamentos:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{m\acute{a}x}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (22)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{m\acute{a}x}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (23)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{m\acute{a}x}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (24)$$

Em que:

$K_T$  : fator de correção da impedância do transformador

$c_{m\acute{a}x}$  : fator de correção da tensão

$x_t$  : reatância relativa do transformador

$K_{TAB}$  : fator de correção da impedância do transformador (para enrolamentos A e B)

$K_{TAC}$  : fator de correção da impedância do transformador (para enrolamentos A e C)

$K_{TBC}$  : fator de correção da impedância do transformador (para enrolamentos B e C)

$x_{TAB}$  : reatância relativa do transformador (para enrolamentos A e B)

$x_{TAC}$  : reatância relativa do transformador (para enrolamentos A e C)

$x_{TBC}$  : reatância relativa do transformador (para enrolamentos B e C)

Uma vez determinada a fonte de tensão equivalente, calcula-se a impedância equivalente entre esta fonte e o local da incidência do curto-circuito. Finalmente, determina-se a corrente de falta. Maiores detalhes sobre o cálculo das correntes de curto-circuito equilibrados e desequilibrados, a influência dos motores de indução e os fatores da assimetria das formas de onda da corrente tratados segundo a norma IEC 60909 são apresentados em [5], [6] e [12].

## 4 Disjuntores

Disjuntor é um dispositivo eletromecânico que permite proteger uma determinada instalação elétrica contra curto-circuitos ou sobrecargas, e também atua no restabelecimento da corrente elétrica no circuito no qual se encontra instalado. Sua principal característica é a capacidade de se rearmar (manual ou eletricamente), quando estes tipos de defeitos ocorrem, diferindo do fusível que tem a mesma função, mas que fica inutilizado depois de proteger a instalação. Assim, o disjuntor deve interromper a corrente de falta em uma instalação elétrica antes que os efeitos térmicos e dinâmicos desta corrente possam se tornar perigosos às próprias instalações. Por esse motivo, ele pode atuar tanto como dispositivo de manobra como de proteção de circuitos elétricos.

Ao disjuntor pode ser acoplado um relé que atua como elemento responsável pela detecção de condições anormais no circuito (variações excessivas na tensão ou corrente, por exemplo) e pelo envio do sinal de abertura do disjuntor. Um disjuntor instalado sem o relé, transforma-se numa chave de manobra, sem qualquer função de proteção. Algumas características que são importantes para o dimensionamento dos disjuntores são: tensão nominal, corrente nominal, corrente máxima de interrupção do disjuntor, número de pólos (unipolar, bipolar ou tripolar), etc [15], [16], [17].

### 4.1 Princípio de Funcionamento

O funcionamento de um disjuntor, mostrado esquematicamente na Figura 12, consiste em um mecanismo movimentado por uma força externa (alavanca ou motor), acionando um bloco de contato, ao mesmo tempo em que distende um jogo de molas (M). Ao fim do curso dos contatos, uma trava mantém os contatos fechados e o conjunto de molas se distendidas. Qualquer comando no disparador retira a trava, liberando o mecanismo, que provocará a separação brusca dos contatos, por efeito de liberação das molas. Na interrupção da corrente que ocorre durante o período de abertura, existe um valor máximo eficaz denominado “capacidade de interrupção do disjuntor” que é um valor sempre em kA, que representa o maior valor eficaz simétrico que o disjuntor pode interromper com plena segurança para o operador e equipamento [15], [17].

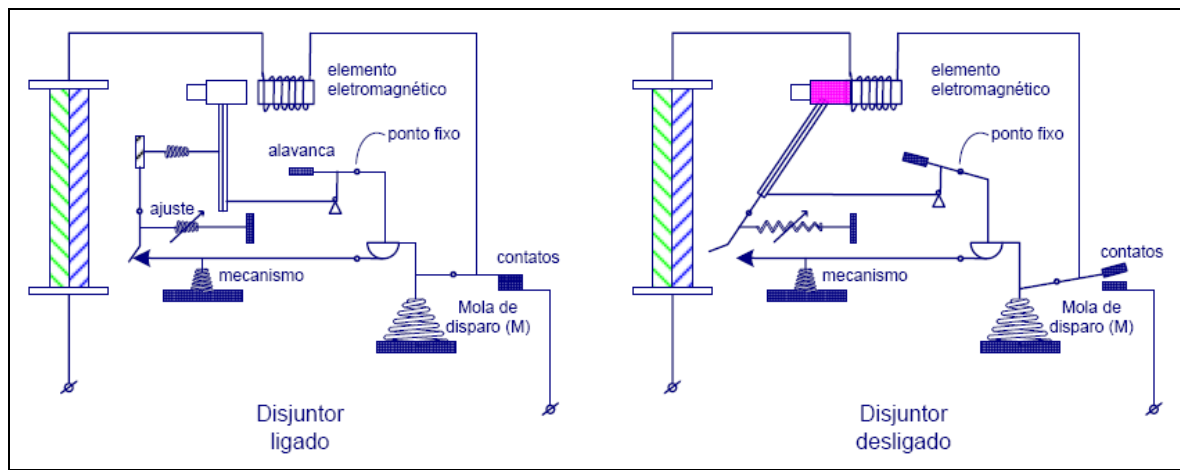


Figura 12 - Esquema de funcionamento de um disjuntor [15].

## 4.2 Classe de Tensão Disjuntores

Os disjuntores podem ser divididos de acordo com a tensão do sistema elétrico no qual serão inseridos [15], [17]:

- **Disjuntores de alta/média tensão**

Para a interrupção de altas correntes, especialmente na presença de circuitos indutivos, são necessários mecanismos especiais para a interrupção do arco voltaico (ou arco elétrico), resultante na abertura dos pólos. Para aplicações de grande potência, a corrente de curto-circuito pode alcançar valores de 100 kA. Após a interrupção, o disjuntor deve isolar e resistir às tensões do sistema. Por fim, o disjuntor deve atuar quando comandado, ou seja, deve haver um alto grau de confiabilidade.

Alguns tipos de disjuntores de alta tensão:

- Disjuntor a grande volume de óleo,
- Disjuntor a pequeno volume de óleo,
- Disjuntor a ar comprimido,
- Disjuntor a vácuo,
- Disjuntor a hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ).

- **Disjuntor de baixa tensão**

Os disjuntores de baixa tensão mais comuns operam com disparadores térmicos e eletromagnéticos e por isso são conhecidos por disjuntores termomagnéticos. Neles, a atuação dos disparadores térmicos é geralmente caracterizada por um limiar bastante próximo da corrente nominal ou de ajuste, permitindo detectar sobrecorrentes de pequena intensidade. Por sua vez, os

disparadores eletromagnéticos atuam, em geral, em uma faixa de sobrecorrentes cujo limite inferior é maior que as correntes de sobrecarga usuais e cujo limite superior é igual à capacidade de interrupção do disjuntor.

Os disjuntores termomagnéticos são usualmente classificados em três categorias: disjuntores lentos, rápidos e limitadores, com base no tempo de abertura (ou tempo de pré-arco), que é o tempo decorrido a partir do instante em que se manifesta a sobrecorrente e tem início a abertura dos contatos até o instante em que os contatos se separam, dando início ao arco.

Os pequenos disjuntores termomagnéticos em caixa moldada são hoje utilizados na proteção da grande maioria dos circuitos terminais, em todos os tipos de instalação. Sua importância é decisiva na proteção da instalação, uma vez que os incêndios de origem elétrica geralmente se iniciam a partir de problemas nos circuitos terminais ou nos equipamentos a eles ligados, como por exemplo, em uma fiação em canaleta, em uma tomada de corrente, em uma derivação para a ligação de um equipamento etc.

### **4.3 Sistema de Interrupção de Arco dos Disjuntores**

Os tipos construtivos dos disjuntores dependem dos meios que utilizam para a extinção do arco. Existe no mercado uma grande quantidade de marcas e tipos de disjuntores empregando as mais variadas técnicas, às vezes particulares para certas situações. Os tipos mais comuns são relacionados a seguir [17]:

1. Disjuntores a óleo
  - Disjuntores a grande volume de óleo (GVO)
  - Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO)
    - Disjuntores de construção aberta
    - Disjuntores de construção tipo extraível
2. Disjuntores a sopro magnético
3. Disjuntores a vácuo
4. Disjuntores a SF<sub>6</sub>
  - Dupla pressão
  - Autocompressão
  - Arco gigante
5. Disjuntores a ar comprimido

### **4.4 Sistema de Acionamento**

Caso uma corrente anormal seja detectada, os contatos dentro do disjuntor devem abrir, utilizando alguma energia mecânica armazenada (como molas ou ar comprimido), para interromper o circuito. Seguem os tipos de acionamentos utilizados nos disjuntores [16]:

1. Sistema de mola
  - Fechamento automático
  - Fechamento a mola pré-programada
2. Sistema de solenóide
3. Sistema a ar comprimido
4. Sistema hidráulico

#### **4.5 Características elétricas dos disjuntores**

Nesta seção serão abordados os principais parâmetros elétricos que caracterizam os disjuntores. Estas características podem ser encontradas mais detalhadamente em [16].

- **Tensão nominal**

É o valor eficaz da tensão pela qual o disjuntor é designado, e ao qual são referidos os outros valores nominais. A tensão nominal do disjuntor deve ser igual à máxima tensão de operação do sistema no qual o disjuntor é inserido.

- **Nível de isolamento**

É o conjunto de valores de tensões nominais suportáveis que caracterizam o isolamento de um disjuntor em relação à sua capacidade de suportar esforços dielétricos.

O nível de isolamento de um isolamento no ar é função da altitude em que o referido equipamento será instalado. A maioria das normas especifica que equipamentos podem ser instalados até uma altitude de 1000 m sem nenhuma restrição. Porém, nesta altitude, a redução do nível de isolamento no ar é cerca de 10%, valor já considerado no projeto dos fabricantes.

- **Tensão suportável de frequência industrial**

É o valor eficaz da tensão senoidal de frequência industrial que um disjuntor deve suportar, em condição de ensaio especificada.

- **Tensão suportável ao impulso**

É o valor de impulso normalizado, atmosférico pleno ou de manobra, que um disjuntor deve suportar em condições diversas de ensaio.

- **Tensão de restabelecimento**

É a tensão que aparece entre os terminais de um pólo do disjuntor depois da interrupção da corrente. Essa tensão é responsável pela reignição do arco entre os terminais de um pólo do disjuntor.

- **Tensão de restabelecimento transitória (TRT)**

É a tensão que aparece entre os contatos de um pólo do disjuntor, logo após a primeira interrupção da corrente, no intervalo de tempo que caracteriza o período transitório, antes do amortecimento das oscilações.

- **Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória (TCTRT)**

É a relação entre o valor de crista da TRT e o tempo gasto para atingir esta tensão. A TCTRT mais comumente encontrada na prática é:

- Abertura de transformador em vazio:  $\leq 0,1 \text{ kV}/\mu \text{ s}$ .
- Abertura de transformador em carga:  $\leq 0,2 \text{ kV}/\mu \text{ s}$ .
- Abertura de circuito de motores em carga:  $\leq 0,2 \text{ kV}/\mu \text{ s}$ .
- Abertura do circuito em condições de defeito:  $\leq 1 \text{ kV}/\mu \text{ s}$ .

- **Corrente nominal**

É o valor eficaz da corrente em regime contínuo que o disjuntor deve ser capaz de conduzir indefinidamente sem que a elevação de temperatura das suas diferentes partes exceda os valores determinados nas condições especificadas nas normas.

- **Corrente de interrupção**

É a corrente em um pólo do disjuntor, no início do arco, durante uma operação de abertura.

- **Corrente de interrupção simétrica nominal**

É o valor eficaz da componente alternada da corrente de interrupção nominal em um curto-circuito. Esse valor exprime a capacidade de ruptura do disjuntor e é um dos parâmetros básicos para o seu dimensionamento em função do nível de curto-circuito atual e futuro da instalação considerada.

- **Corrente de estabelecimento**

É o valor de crista da primeira alternância da corrente em um determinado pólo do disjuntor, durante o período transitório que segue ao instante do estabelecimento da corrente, em uma operação de fechamento.

- **Corrente suportável de curta duração**

É o valor eficaz da corrente que um disjuntor pode suportar, na posição fechada, durante um breve intervalo de tempo especificado nas condições prescritas de emprego e funcionamento.

- **Duração nominal da corrente de curto-circuito**

É o tempo que o disjuntor deve suportar, enquanto fechado, a corrente de interrupção simétrica nominal.

## 4.6 Vida Útil

A vida útil de um disjuntor refere-se ao número de operações mecânicas que podem ser esperadas do mesmo. Uma operação mecânica consiste em uma abertura e um fechamento dos contatos do disjuntor. Tradicionalmente, para instalações dentro de ambientes fechados, a norma ANSI determinou que o número de operações deve ser em função da corrente e da tensão do disjuntor [17].

O número exigido de operações varia de 1500 para disjuntores de 38kV, 10000 operações para os disjuntores de 4,16kV e 15kV, que possuem como corrente máxima de interrupção igual a 31,5kA. Todos os disjuntores instalados em ambientes abertos possuem um número de operações por volta de 2000 [17].

## 4.7 Dimensionamento dos disjuntores

O dimensionamento completo dos disjuntores deve ser baseado em um conjunto de informações apresentado na seção 4.5. Neste trabalho, será realizada uma especificação básica dos disjuntores baseada apenas nas características de operação nominal e em situações de falta dos mesmos. Assim, as seguintes características serão determinadas, para os novos disjuntores e avaliadas para os disjuntores antigos:

- Tensão nominal do disjuntor: deve ser maior ou igual à máxima tensão de operação do circuito;
- Corrente nominal do disjuntor: deve ser maior ou igual à corrente de projeto do circuito;

- Corrente de estabelecimento: para determinar esta característica será utilizada a máxima corrente assimétrica de curto-circuito a que o disjuntor está sujeito. Assim, a corrente de restabelecimento do disjuntor deve ser superior à máxima corrente assimétrica de falta. Esse valor representa a capacidade do disjuntor de suportar os esforços mecânicos decorrentes de um curto-circuito.
- Corrente de interrupção simétrica nominal: deve ser superior à máxima corrente simétrica inicial eficaz de curto-circuito. Está relacionada à capacidade do disjuntor em suportar esforços térmicos decorrentes de um curto-circuito.



## 5 Modelagem do Sistema Elétrico

Este capítulo descreve as principais características do programa DIgSILENT PowerFactory em relação à entrada de dados do sistema elétrico para o cálculo de curto-circuito, e também apresenta as características do sistema elétrico sob estudo.

### 5.1 DIgSILENT PowerFactory

O DIgSILENT PowerFactory foi desenvolvido como um pacote avançado, integrado e interativo de programas dedicados a estudos de sistemas elétricos de potência, a fim de se atingirem os objetivos principais da otimização do planejamento e da operação dos mesmos. O programa para cálculos DIgSILENT, componente integrante do pacote PowerFactory, é uma ferramenta computacional da engenharia, projetada para analisar sistemas elétricos envolvendo geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O nome DIgSILENT provém de "**DI**gital **SI**mu**L**ation and **E**lectrical **NeT**work calculation program" (programa para cálculos e simulações digitais e redes de energia). O DIgSILENT versão 7 foi o primeiro programa comercial de análise de sistemas de potência no mundo a integrar uma interface gráfica baseada no diagrama unifilar [5]. A Figura 13 ilustra a interface gráfica do programa, onde se observa à esquerda o espaço destinado a construir o diagrama do sistema elétrico e, à direita, todos os componentes elétricos disponíveis no programa.

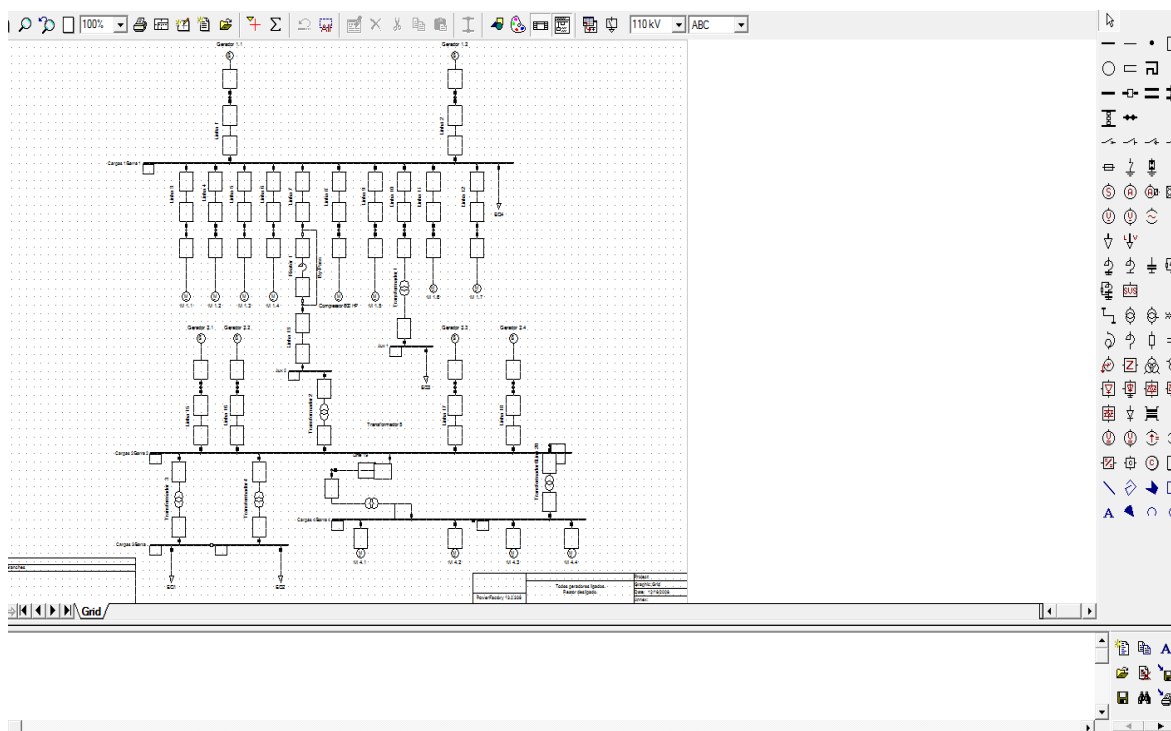


Figura 13 - Interface gráfica do programa DIgSILENT PowerFactory.

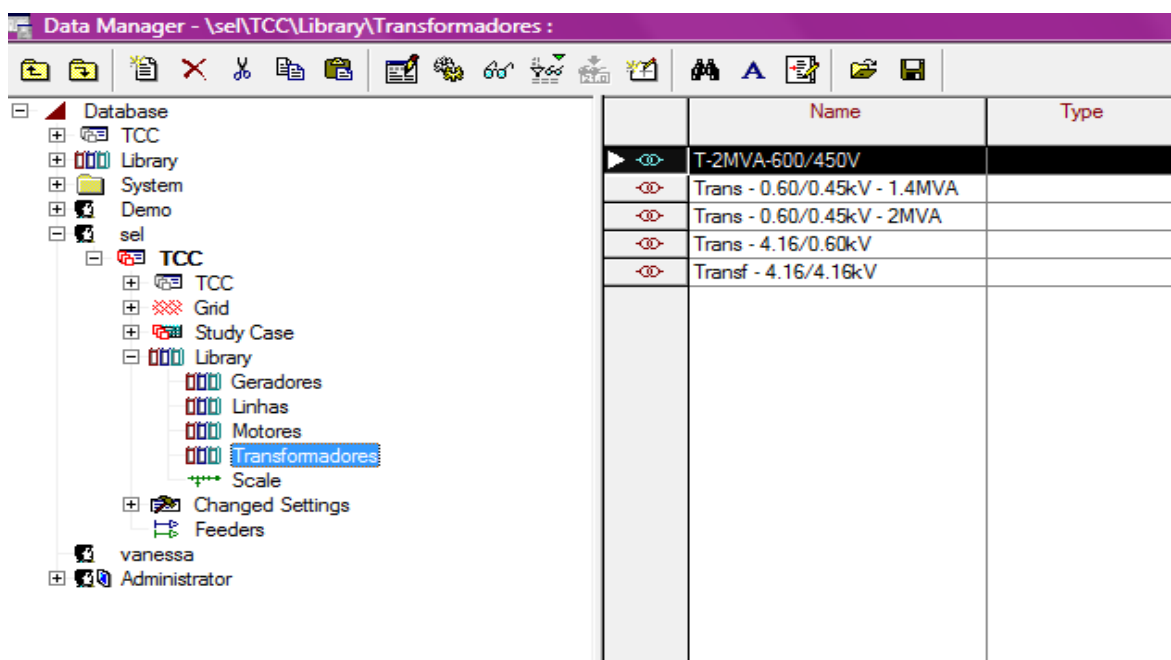
Os itens seguintes descrevem sucintamente os passos para a utilização do programa.

- **Inserção dos equipamentos.**

Os equipamentos que compõem o diagrama unifilar devem ser inseridos a partir da coluna da direita na Figura 13: deve-se clicar no símbolo do equipamento e arrastá-lo para a área do diagrama. O equipamento deve ser conectado a algum nó de um barramento, ou a outro equipamento.

- **Inserção dos parâmetros dos equipamentos**

Os dados de entrada dos equipamentos devem ser inseridos quando o equipamento é colocado no diagrama. Pode-se fazer uso de dados existentes para equipamentos novos, ou seja, o PowerFactory possibilita que o usuário crie uma biblioteca com os dados nominais de vários tipos de equipamentos. Por exemplo, se já existe um modelo definido para um transformador e tal transformador será utilizado  $n$  vezes em um sistema elétrico, basta referenciar cada um desses  $n$  transformadores ao modelo previamente definido. Portanto, não é necessário entrar com os dados nominais  $n$  vezes. A Figura 14 apresenta uma biblioteca de transformadores definida pelo usuário.

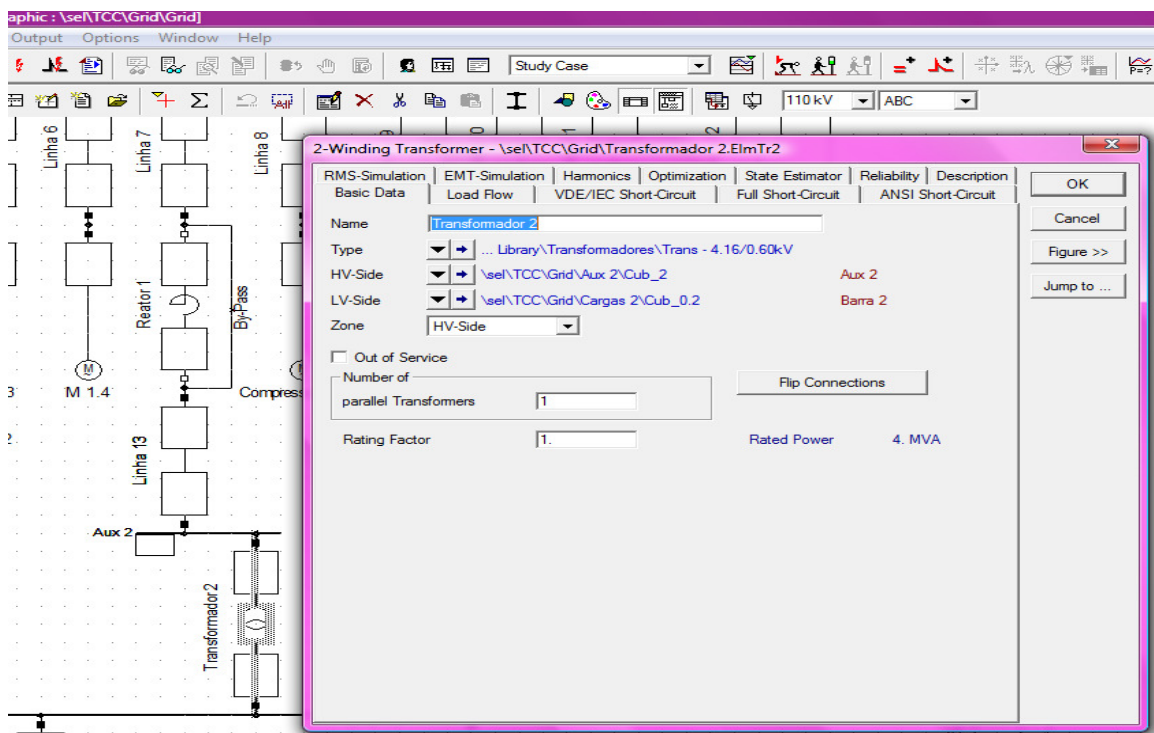


**Figura 14 - Exemplo de uma biblioteca criada pelo usuário.**

Na biblioteca podem ser inseridos vários dados como, por exemplo, geradores, linhas, motores e transformadores. Na coluna da direita da Figura 14, aparecem os tipos de transformadores já inseridos no programa. Estes tipos podem ser adotados como modelos para quaisquer outros transformadores, facilitando e agilizando a inserção de dados para os equipamentos.

- **Edição dos parâmetros dos equipamentos**

Após a inserção do equipamento, se o usuário desejar a alteração de alguma característica, basta acessar a janela de edição clicando duas vezes no símbolo do equipamento. A Figura 15 mostra a janela de edição do transformador. Todos os dados do equipamento podem ser acessados a partir dessa janela.

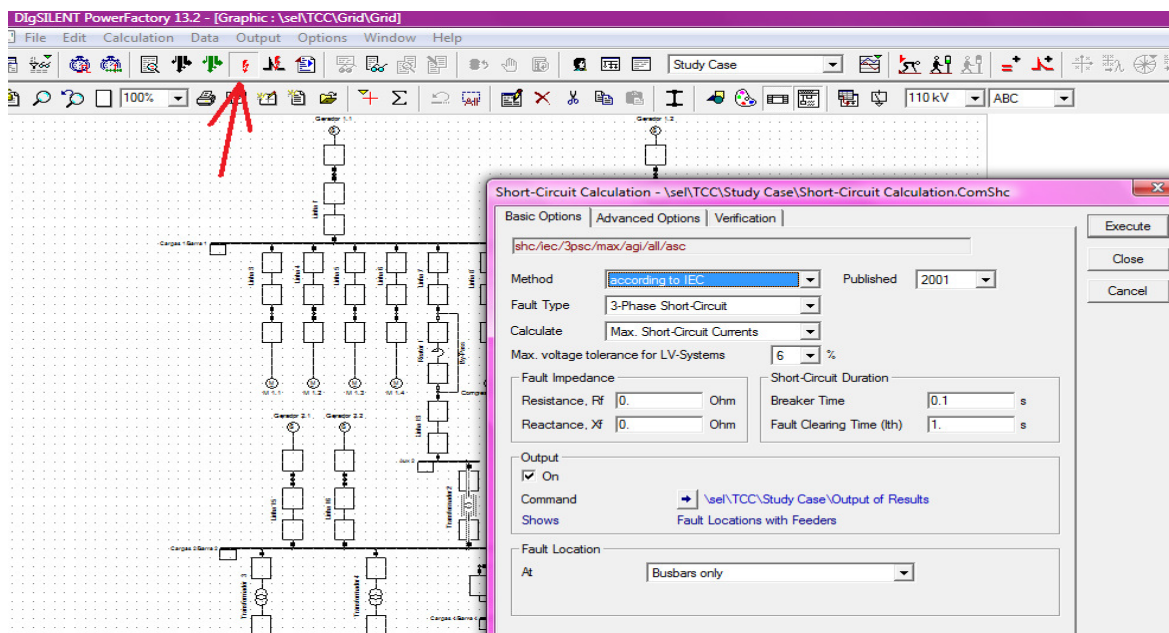


**Figura 15 - Janela de edição do equipamento.**

Outra alternativa para ativar a janela de edição é clicar com o botão direito do *mouse* no símbolo do equipamento e escolher a opção *Edit Data*.

Após a inserção de todos os dados dos equipamentos do sistema elétrico, pode-se seguir com a simulação de curto-circuito clicando no botão indicado na Figura 16. Nesta janela é possível escolher o método de cálculo de curto-circuito (IEC 60909 ou ANSI), qual o tipo de falta que se deseja calcular e o local de incidência do curto-circuito. O programa permite também a exibição, no próprio diagrama unifilar, dos resultados de cálculos de curtos-circuitos em duas ou mais barras simultaneamente. Porém ressalta-se que apenas os resultados são apresentados simultaneamente, sendo os cálculos realizados considerando as barras de forma independente.

Neste trabalho, o DigSILENT será empregado para a realização de cálculos de curtos-circuitos, tendo como base a norma IEC 60909 [5], [6].



**Figura 16 - Execução do cálculo de curto-circuito.**

Após a simulação, o PowerFactory emite relatórios em formato texto com vários dados do sistema faltoso, conforme segue :

- $Sk''$  [MVA]: Potência inicial de curto-circuito. ( $Sk'' = \sqrt{3} * V_n * Ik''$ );
- $Ik''$  [kA]: Corrente eficaz subtransitória simétrica de curto-circuito;
- $Usc$  [kV ou pu]: Tensão subtransitória de curto-circuito;
- $Ip$  [kA<sub>pico</sub>]: Corrente de pico assimétrico de curto-circuito;
- $Sb$  ou  $Sa$  [MVA]: Potência transitória sim. de interrupção de c.c. ( $Sb = \sqrt{3} * V_n * Ib$ );
- $Ib$  ou  $Ia$  [kA]: Corrente eficaz transitória simétrica de interrupção de c.c. em 100 ms;
- $Ik$  [kA]: Corrente eficaz de regime de curto-circuito;
- $Ith$  [kA]: Corrente térmica equivalente de 1 segundo.

## 5.2 Sistema Elétrico

O sistema elétrico sob estudo é um sistema baseado em dados reais. Originalmente, era composto por quatro geradores de 2,15 MVA – 600 V, dois transformadores de 1,4 MVA – 600/450 V, dois transformadores de 2 MVA – 600/450 V e cargas compostas tanto por motores de indução quanto por outras cargas estáticas. Este sistema sofreu uma expansão significativa, em que foi adicionado um novo sistema elétrico em 4,16 kV composto por dois geradores síncronos de 3,7 MVA – 4,16 kV, oito motores de indução de 4,16 kV e um ramo contendo um transformador ( $\Delta - \Delta$ ) que o interliga ao sistema existente. Todos os parâmetros elétricos desse sistema são apresentados no Anexo 1. Ressalta-se que esse sistema elétrico pode ser considerado como “parâmetro de entrada” para os estudos realizados neste trabalho. A especificação dos seus componentes (linhas, geradores, transformadores e motores) bem como a definição do sistema de

aterramento, de esquema de ligação dos enrolamentos dos transformadores e geradores não foram incluídas como escopo de atividades deste trabalho.

Devido à expansão do sistema elétrico, o nível das correntes de curto-circuito pode aumentar consideravelmente, uma vez que dois novos geradores síncronos e oito novos motores de indução foram introduzidos. Portanto, é imprescindível a realização do estudo de curto-circuito no sistema elétrico em questão para avaliar se os equipamentos do sistema existente continuam a suportar as correntes de curto-circuito após a expansão. Os dados dos equipamentos a analisar são os seguintes:

- Barramento “Cargas 1/Barra 1” – 4,16 kV – Corrente nominal de 1250 A – Corrente nominal de curto-circuito (corrente inicial eficaz simétrica) igual a 10 kA.
- Barramento “Cargas2/Barra 2” – 600 V – Corrente nominal de 4600 A - Corrente nominal de curto-circuito (corrente inicial eficaz simétrica) igual a 50 kA.
- Barramentos “Cargas3/Barra 3” – 450 V – Corrente nominal de 2800 A - Corrente nominal de curto-circuito (corrente inicial eficaz simétrica) igual a 40 kA.
- Barramentos “Cargas4/Barra 4” – 450 V – Corrente nominal de 4500 A - Corrente nominal de curto-circuito (corrente inicial eficaz simétrica) igual a 42 kA.

A Figura 17 mostra o sistema elétrico a ser estudado: a área pontilhada em azul mostra a parcela já existente do sistema elétrico, a área pontilhada em verde mostra os novos equipamentos inseridos e o retângulo pontilhado vermelho marca onde um reator pode ser inserido caso haja necessidade de limitar a corrente que passa pelo ramo. Observa-se a existência de uma chave de *bypass* em paralelo com o reator, para que o mesmo possa ser inutilizado, caso necessário. Observa-se ainda no diagrama unifilar, a existência de pequenos quadrados na conexão dos elementos com as barras e na conexão de duas barras. Estes quadrados representam dispositivos de seccionamento (chaves, disjuntores etc) e quando estão pintados em preto significa que estão fechados, caso contrário, estão abertos. Anexado ao lado esquerdo de cada barra encontra-se um retângulo que contém o valor nominal da tensão da mesma.

A parte existente (ou seja, aquela presente antes da expansão) do sistema elétrico conta com alguns disjuntores, modelo Masterpact NW [18], cujas características são apresentadas na Tabela 2: tensão nominal, corrente nominal, corrente de interrupção (ou seja, corrente de abertura do disjuntor) e corrente de pico nominal (máxima corrente que o disjuntor suporta). Todos estes parâmetros serão avaliados posteriormente ao estudo para averiguar se os disjuntores estão operando de acordo com os novos parâmetros na situação de curto-circuito, caso contrário, novos disjuntores serão dimensionados.

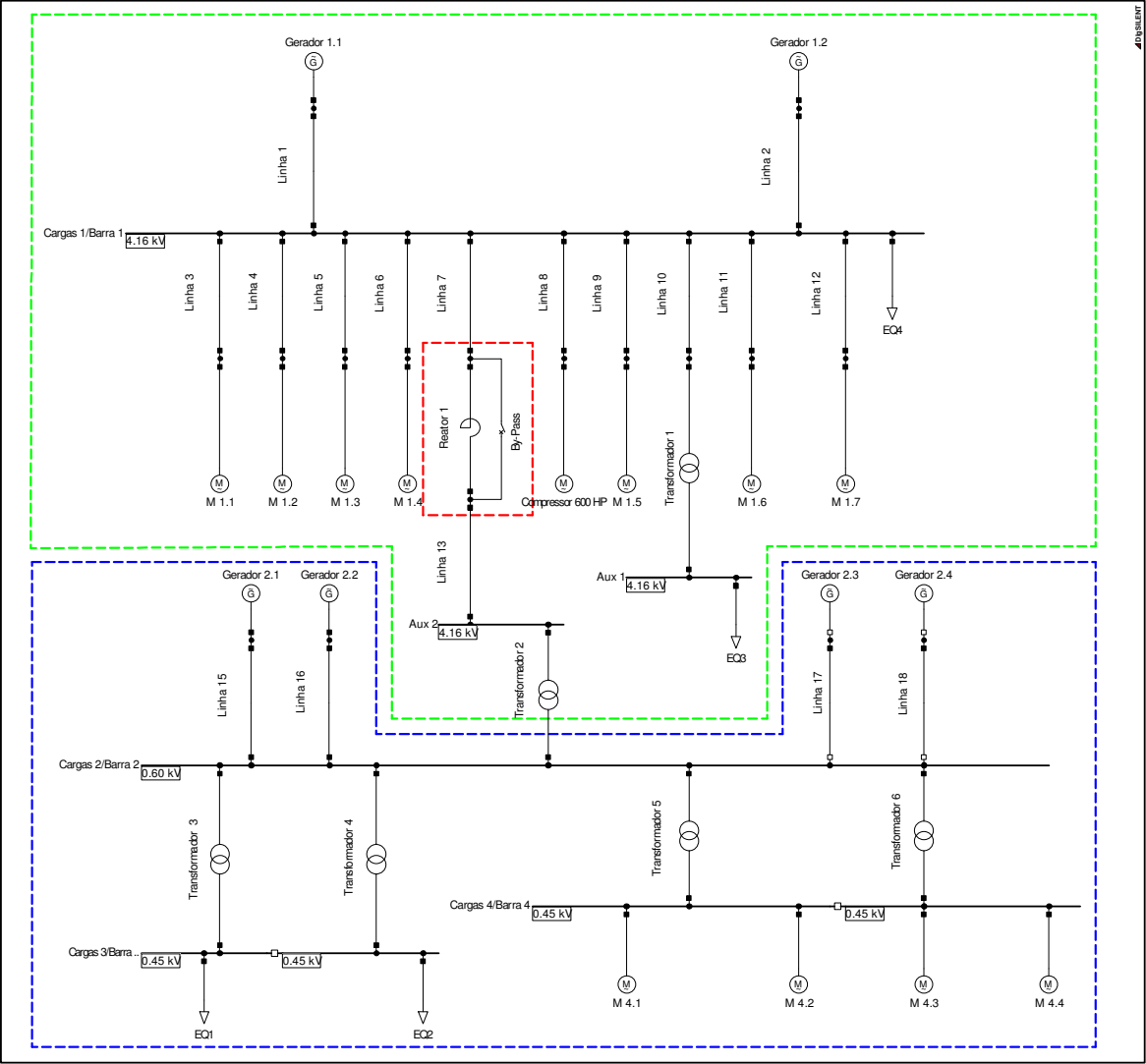


Figura 17 - Sistema elétrico.

Tabela 2 - Características dos disjuntores existentes.

Localização	Tensão Nominal [V]	Corrente Nominal [A]	Corrente de interrupção nominal [kA]	Corrente de pico nominal [kA]
Geradores 2.1/ 2.2/ 2.3/ 2.4	690	2500	65	143
Primário Transformadores 3/ 4	690	1600	65	143
Primário Transformadores 5/ 6	690	2000	65	143
Cargas3 / Barra 3	525	2000	65	143
Cargas 4 / Barra 4	525	2500	65	143

## 6 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados do estudo de curto-circuito para o sistema elétrico em questão. Inicialmente, será apresentada a metodologia definida para conduzir o estudo. Todos os resultados serão apresentados de forma simplificada no diagrama unifilar do sistema elétrico, mas as tabelas completas dos resultados são apresentadas nos anexos 2 a 8.

### 6.1 Metodologia de Execução do Estudo

A instalação dos novos geradores e dos novos motores no sistema elétrico certamente provocará o aumento nas correntes de curto-circuito do sistema elétrico, podendo superar as capacidades nominais de curto-circuito dos equipamentos. Portanto, é necessário determinar a configuração operativa mais adequada do ponto de vista de curto-circuito. Esta configuração foi identificada tomando como base o atendimento simultâneo dos seguintes requisitos:

- Ambos os geradores novos de 3,7 MVA devem estar em operação;
- Todos os novos motores devem estar em operação;
- No máximo dois geradores antigos podem ser desligados;
- Existe a possibilidade da instalação de um reator interligando as áreas antiga e nova para limitar a corrente de curto-circuito, caso necessário.

Para atender os objetivos propostos neste trabalho, a seguinte metodologia foi considerada:

- Inicialmente, todos os tipos de curto-circuito foram simulados, em todas as barras, de forma a identificar aqueles que resultassem as maiores correntes de curto-circuito. Nessa etapa, todos os geradores foram considerados ligados e o reator desativado;
- Uma vez determinado(s) o(s) tipo(s) de curto-circuito mais severos, apenas este(s) será(ão) utilizado(s) no prosseguimento do estudo. Isso pode ser justificado pelo fato de que para atingir os objetivos deste estudo, somente os máximos valores das correntes de curto-circuito são necessários. A partir deste ponto, casos sucessivos de curto-circuito serão executados, considerando todos os geradores conectados e desligando-se um gerador antigo por vez até que os limites de curto-circuito dos barramentos sejam atendidos. Esta etapa tem o objetivo de identificar qual(is) configuração(ões) operativa(s) é(são) possível(eis) sem que os limites de curto-circuito dos equipamentos sejam violados.
- Caso, no passo anterior, os limites de curto-circuito dos barramentos forem violados para todas as configurações operativas, procede-se ao dimensionamento do reator a fim de limitar a corrente de curto-circuito. Ressalta-se que, para este

caso, apenas a configuração mínima é válida, ou seja, aquela em que é permitido o desligamento de apenas dois geradores antigos. Foi descartado o dimensionamento do reator para outras condições operativas devido a questões econômicas, visto que o mesmo deverá ser maior para elas do que para a configuração mínima.

- Havendo ou não a necessidade de um reator, procede-se à verificação das capacidades de interrupção de curto-circuito dos disjuntores novos e à especificação básica dos novos disjuntores.

Ressalta-se que em alguns sistemas elétricos é possível que a máxima corrente de curto-circuito fase-terra seja superior à máxima corrente de curto-circuito trifásico no mesmo ponto. Isso ocorre, por exemplo, no secundário de transformadores  $\Delta$ -Y aterrado. Neste trabalho, os curtos-circuitos fase-terra serão calculados mesmo sabendo que, na parte nova de 4,16 kV, os neutros dos geradores possuem resistência de aterramento para limitar a máxima corrente de curto-circuito fase-terra em 10 A. Além disso, a conexão da parte nova com a parte antiga do sistema elétrico é realizada por meio de um transformador cujos ambos os enrolamentos estão ligados em triângulo. Dessa forma, não há contribuições de corrente de falta fase-terra de um sistema caso ocorra esse tipo de falta no outro sistema. Estas simulações têm o objetivo de confirmar, diante da situação descrita acima, que o curto-circuito trifásico é o mais severo, portanto, ao dimensionar disjuntores para esta situação está-se também protegendo o sistema contra as faltas fase-terra, bifásica e bifásica-terra.

## 6.2 Análise dos Resultados

Para um melhor entendimento dos resultados, valem os seguintes esclarecimentos:

- As figuras com os resultados apresentados nos diagramas unifilares mostram os resultados de cálculo de curto-circuito em todas as barras do sistema elétrico, no entanto, as faltas não são simultâneas, ou seja, cada barra é curto-circuitada separadamente, porém, os resultados de cada uma destas simulações são mostrados simultaneamente;
- As caixas de resultado diretamente acopladas às barras mostram os seguintes valores (de cima para baixo):
  - Para as simulações de curto-circuito trifásico:
    - $S_k''$  em MVA
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz)
    - $I_p$  em kA, valor de pico
  - Para as simulações de curto-circuito bifásico-terra:
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase A
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase B
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase C

- $3 \times I_0$  em kA
- Para as simulações de curto-circuito bifásico:
  - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase A
  - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase B
  - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase C
  - $S_k''$  em MVA da fase B
  - $S_k''$  em MVA da fase C
- Para as simulações de curto-circuito monofásico:
  - $S_k''$  em MVA da fase A
  - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase A
  - $I_p$  em kA, valor de pico da fase A
  - $3 \times I_0$  em kA
- As caixas de resultados adjacentes às barras representam as contribuições de corrente provenientes dos ramos nela conectados, para um curto-circuito na mesma. Estas caixas de resultados mostram os seguintes valores (de cima para baixo):
  - Para as simulações de curto-circuito trifásico:
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz)
    - $I_p$  em kA, valor de pico
    - $I_b$  em kA (valor eficaz).
  - Para as simulações de curto-circuito bifásico-terra:
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase A
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase B
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase C
  - Para as simulações de curto-circuito bifásico:
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase A
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase B
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase C
  - Para as simulações de curto-circuito monofásico:
    - $I_k''$  em kA (valor eficaz) da fase A
    - $I_p$  em kA, valor de pico da fase A
    - $3 \times I_0$  em kA

### 6.2.1 Análise dos Tipos de Curto-Circuito

O objetivo desta seção é definir qual ou quais os tipos de curto-circuito mais severos em todas as barras. Para tanto, foram simulados os curtos-circuitos trifásico, monofásico, bifásico-terra e bifásico desprezando a impedância de falta em todos eles. Para executar tal análise, considerou a seguinte configuração operativa do sistema elétrico: todos os geradores ligados sem a presença de reator, configuração que foi denominada Caso 1.

Ressalta-se que o programa DlgSILENT PowerFactory considera que o curto-circuito monofásico ocorre na fase A, e o bifásico e bifásico-terra, nas fases B e C.

Todos os resultados são apresentados na Figura 18 à Figura 21 e sumarizados na Tabela 3 à Tabela 6.

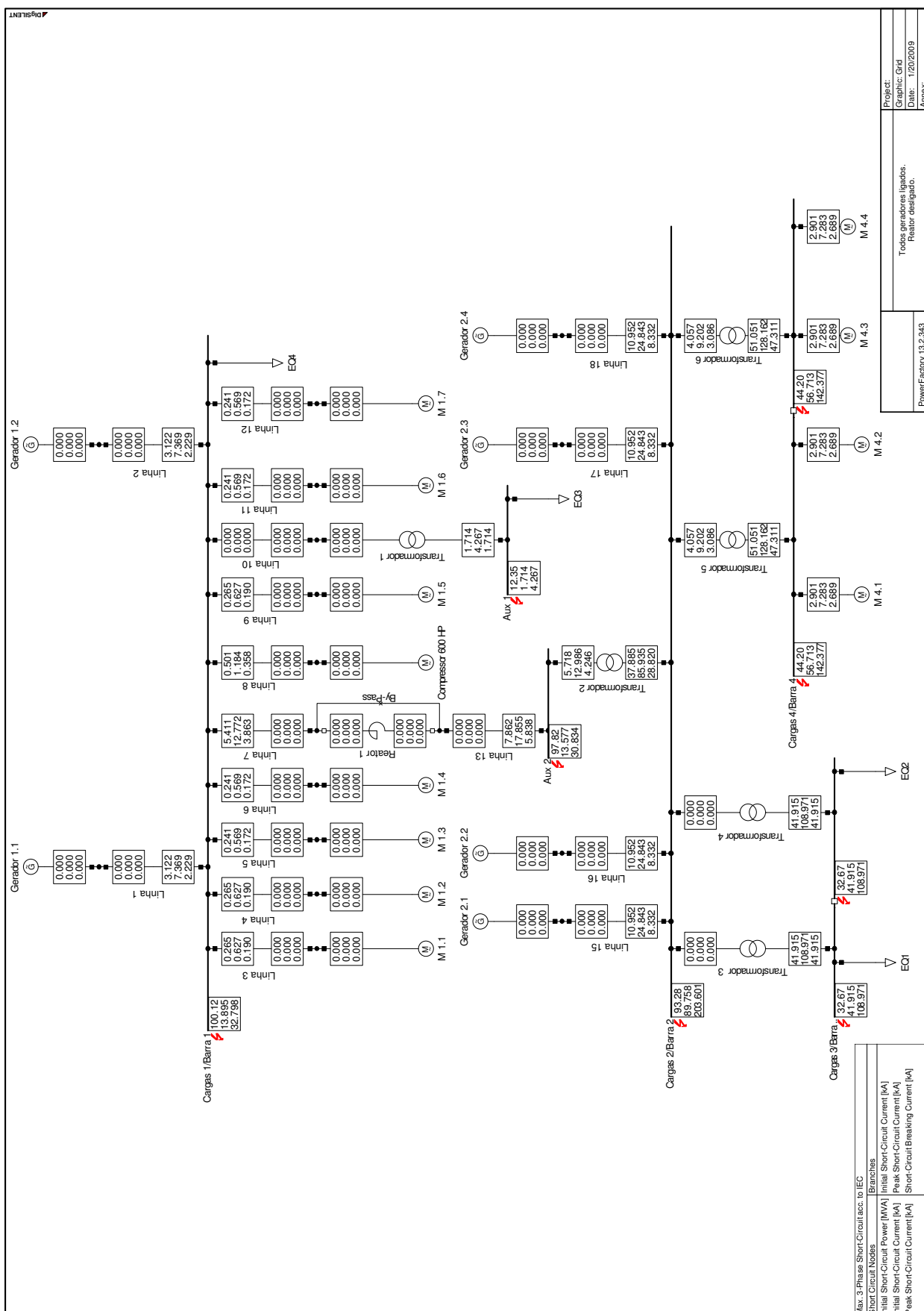


Figura 18 - Resultados do Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito trifásico franco.

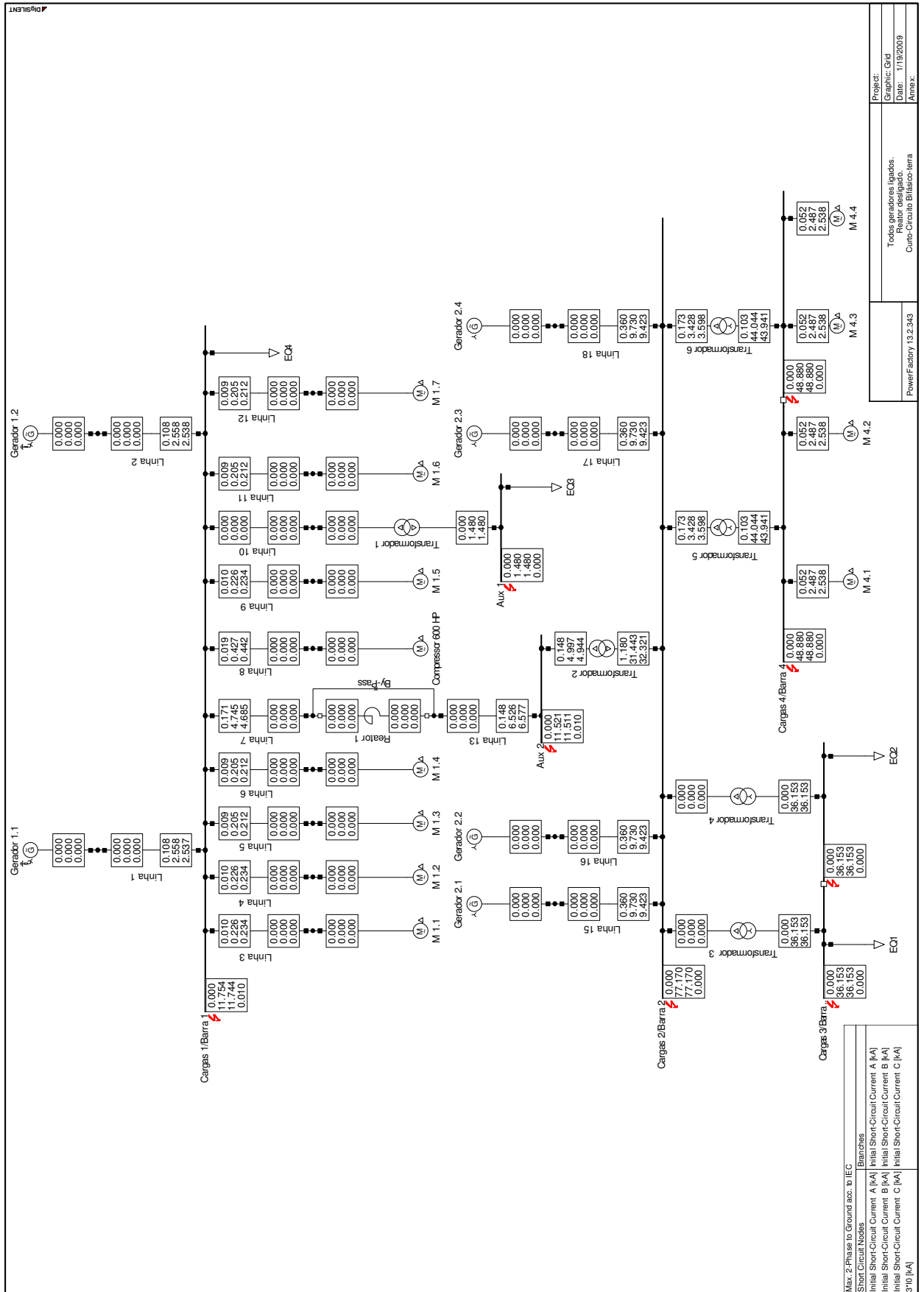
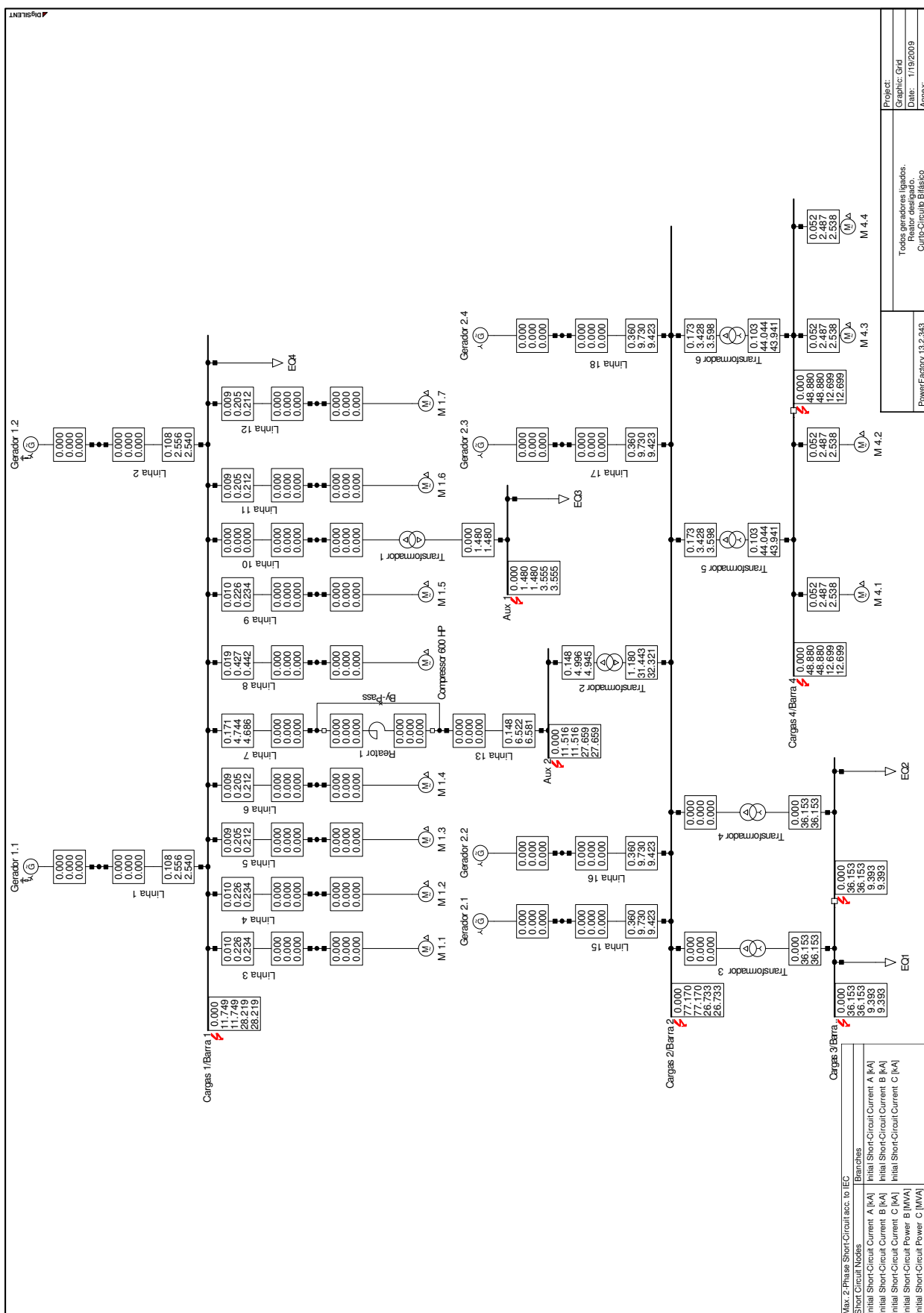


Figura 19 - Resultados do Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico-terra franco.



**Figura 20 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico franco.**

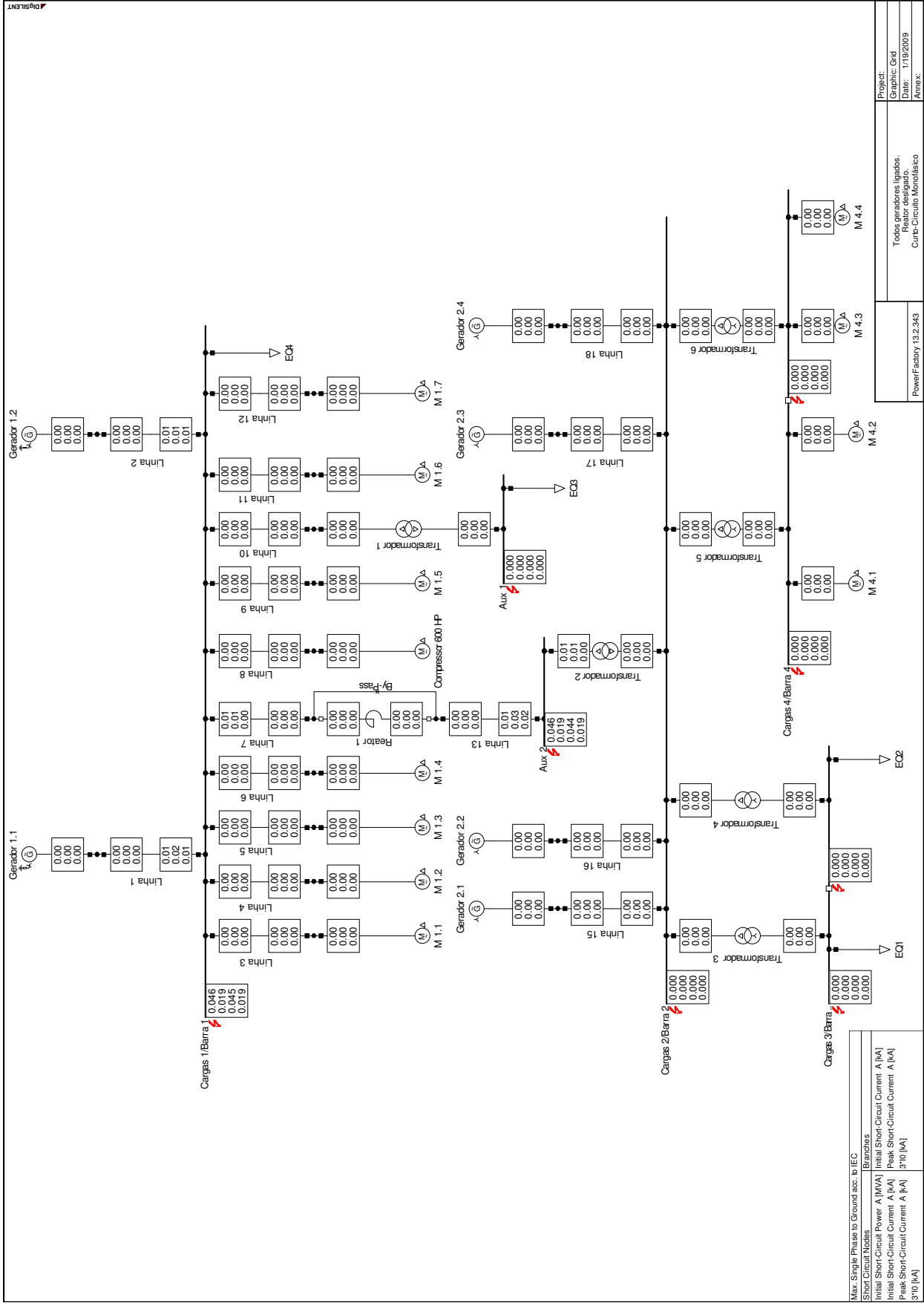


Figura 21 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito monofásico franco.

**Tabela 3 – Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito trifásico franco.**

	Sk'' [MVA]	Ik'' [kA]	Ip [kApico]
Carga 1/Barra 1	100,12	13,895	32,798
Carga 2/Barra 2	93,28	89,75	203,601
Carga 3/Barra 3	32,67	41,915	108,971
Carga 4/Barra 4	44,20	56,713	142,377

**Tabela 4 – Resultados do Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico-terra franco.**

	Ik'' fase A[MVA]	Ik'' fase B [kA]	Ik'' fase C [kApico]	3×I0 [kA]
Carga 1/Barra 1	0,000	11,754	11,754	0,010
Carga 2/Barra 2	0,000	77,170	77,170	0,000
Carga 3/Barra 3	0,000	36,153	36,153	0,000
Carga 4/Barra 4	0,000	48,880	48,880	0,000

**Tabela 5 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito bifásico franco.**

	Ik'' fase A [kA]	Ik'' fase B [kA]	Ik'' fase C [kA]	Sk'' fase C [MVA]	Sk'' fase C [MVA]
Carga 1/Barra 1	0,000	11,749	11,749	28,219	28,219
Carga 2/Barra 2	0,000	77,170	77,170	26,733	26,733
Carga 3/Barra 3	0,000	36,153	36,153	9,393	9,393
Carga 4/Barra 4	0,000	48,880	48,880	12,699	12,699

**Tabela 6 - Resultados Caso 1 (todos geradores ligados) - curto-circuito monofásico franco**

	Sk'' fase A [MVA]	Ik'' fase A [kA]	Ip fase A [kApico]	3×I0 [kA]
Carga 1/Barra 1	0,046	0,019	0,045	0,019
Carga 2/Barra 2	0,000	0,000	0,000	0,000
Carga 3/Barra 3	0,000	0,000	0,000	0,000
Carga 4/Barra 4	0,000	0,000	0,000	0,000

Observa-se que as correntes de curto-circuito trifásico franco nas barras violam significativamente os limites de curto-circuito das mesmas, e são muito maiores que as correntes dos demais curtos-circuitos simulados. Logo, o curto-circuito trifásico franco foi considerado o mais severo, pois, o Caso 1 é a situação de maior carga do sistema elétrico, de acordo com a metodologia apresentada na seção 6.1. Os resultados completos do cálculo de curto-circuito nas

condições apresentadas anteriormente são apresentados em forma de tabelas nos anexos, organizados da seguinte maneira:

- Curto-circuito trifásico franco com todos os geradores ligados: Anexo 2, Tabela 2.1.
- Curto-circuito bifásico-terra franco com todos os geradores ligados: Anexo 6, Tabela 6.1.
- Curto-circuito bifásico franco com todos os geradores ligados: Anexo 7, Tabela 7.1.
- Curto-circuito monofásico franco com todos os geradores ligados: Anexo 8, Tabela 8.1.

Os itens seguintes apresentam os resultados dos cálculos de curto-circuito executados para identificar a configuração operativa mais adequada, levando em conta o curto-circuito trifásico franco. Foram considerados quatro casos, a saber:

- Caso 1: todos os geradores ligados;
- Caso 2: apenas um gerador antigo desligado;
- Caso 3: apenas dois geradores antigos desligados;
- Caso 4: idem Caso 3 com o reator limitador instalado entre os sistemas antigo e novo.

Lembrando que os resultados para o curto-circuito trifásico considerando o Caso 1 encontram-se apresentados anteriormente (Figura 18 e Tabela 3).

#### 6.2.1.1 Caso 2: Gerador 2.4 Desligado

Os resultados do Caso 2 são apresentados na Figura 22 e resumidos na Tabela 7. A tabela completa dos resultados deste caso é apresentada no Anexo 3, Tabela 3.1. Observa-se que o desligamento de apenas um dos geradores existentes não foi suficiente para reduzir as correntes de curto-circuito máximas abaixo dos limites permitidos nas barras. Não houve alteração significativa no nível de curto-circuito da barra “Cargas 1/Barra 1” entre os casos 1 e 2, e verificou-se uma redução mais intensa no nível de curto-circuito das barras de baixa tensão. Isso era esperado, pois o gerador desligado estava conectado diretamente na barra de 600 V (barra “Cargas 2/Barra 2”).

**Tabela 7 – Resultados do Caso 2 (gerador 2.4 desligado) – curto-circuito trifásico franco.**

	$Sk''$ [MVA]	$Ik''$ [kA]	$Ip$ [kApico]
Carga 1/Barra 1	94,06	13,054	30,97
Carga 2/Barra 2	81,90	78,809	179,492
Carga 3/Barra 3	31,16	39,977	103,395
Carga 4/Barra 4	41,77	53,588	133,790

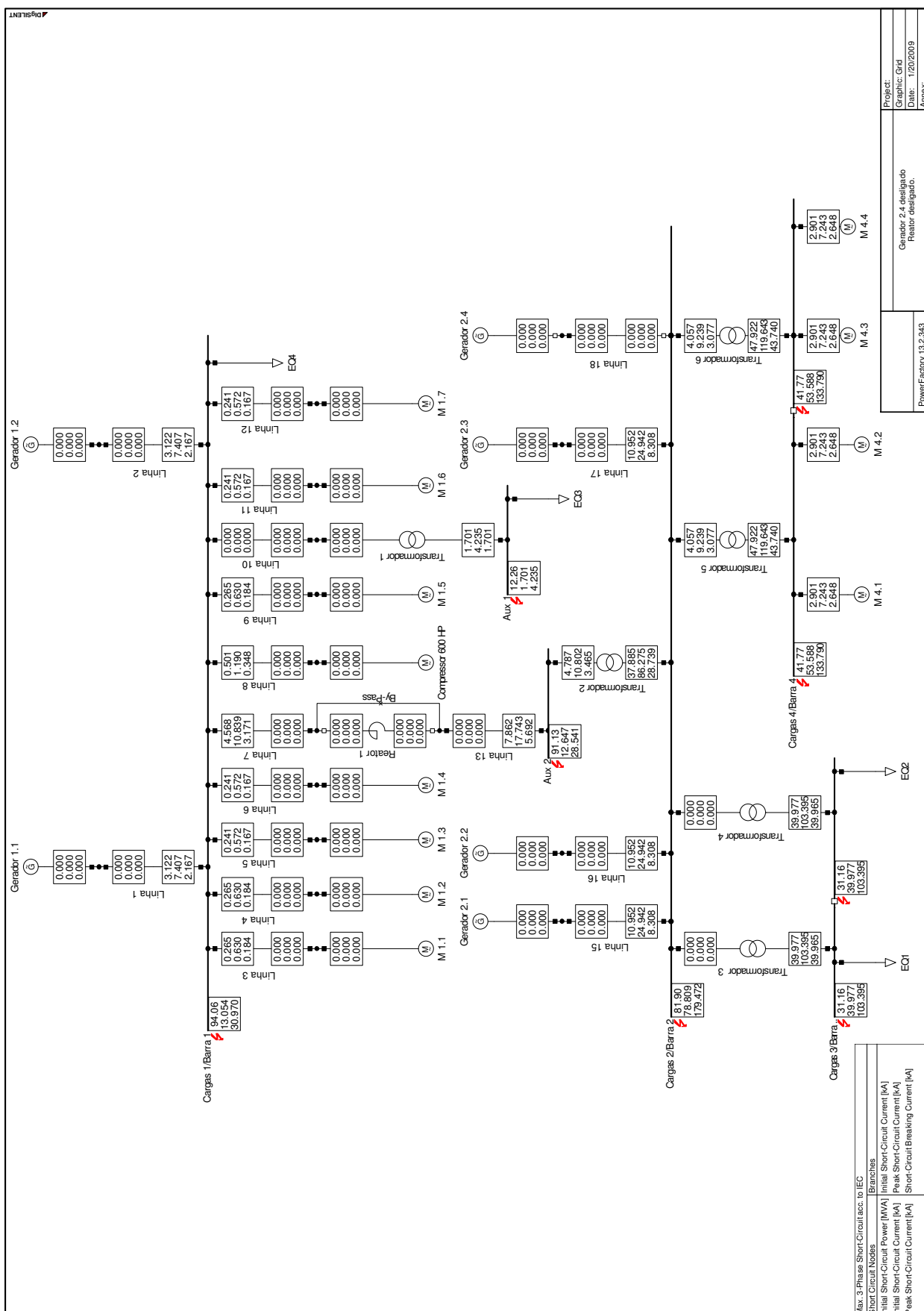


Figura 22 - Resultados do Caso 2 (gerador 2.4 desligado) – curto-circuito trifásico franco.

### 6.2.1.2 Caso 3: Geradores 2.3 e 2.4 Desligados

Os resultados do Caso 3 são apresentados na Figura 23 e resumidos na Tabela 8. A tabela completa dos resultados desse caso é apresentada no Anexo 4, Tabela 4.1. Observa-se uma redução significativa do nível de curto-circuito nas barras de baixa tensão, no entanto os limites dessas barras ainda são violados. Conforme já mencionado, esta configuração corresponde ao número mínimo de geradores que deve ser mantido em operação para suprir toda a carga do sistema elétrico. Como os limites de curto-circuito dos barramentos continuam violados, torna-se necessário adotar certos procedimentos para viabilizar a operação do sistema elétrico. Adotou-se então, a idéia de instalar um reator interligando as partes antiga e nova. Maiores detalhes são abordados na seção seguinte.

**Tabela 8 - Resultados do Caso 3 (geradores 2.3 e 2.4 desligados) – curto-circuito trifásico franco.**

	$Sk''$ [MVA]	$Ik''$ [kA]	$Ip$ [kApico]
Carga 1/Barra 1	87,09	12,087	28,863
Carga 2/Barra 2	70,52	67,860	155,346
Carga 3/Barra 3	29,30	37,670	96,894
Carga 4/Barra 4	38,93	49,94	123,99

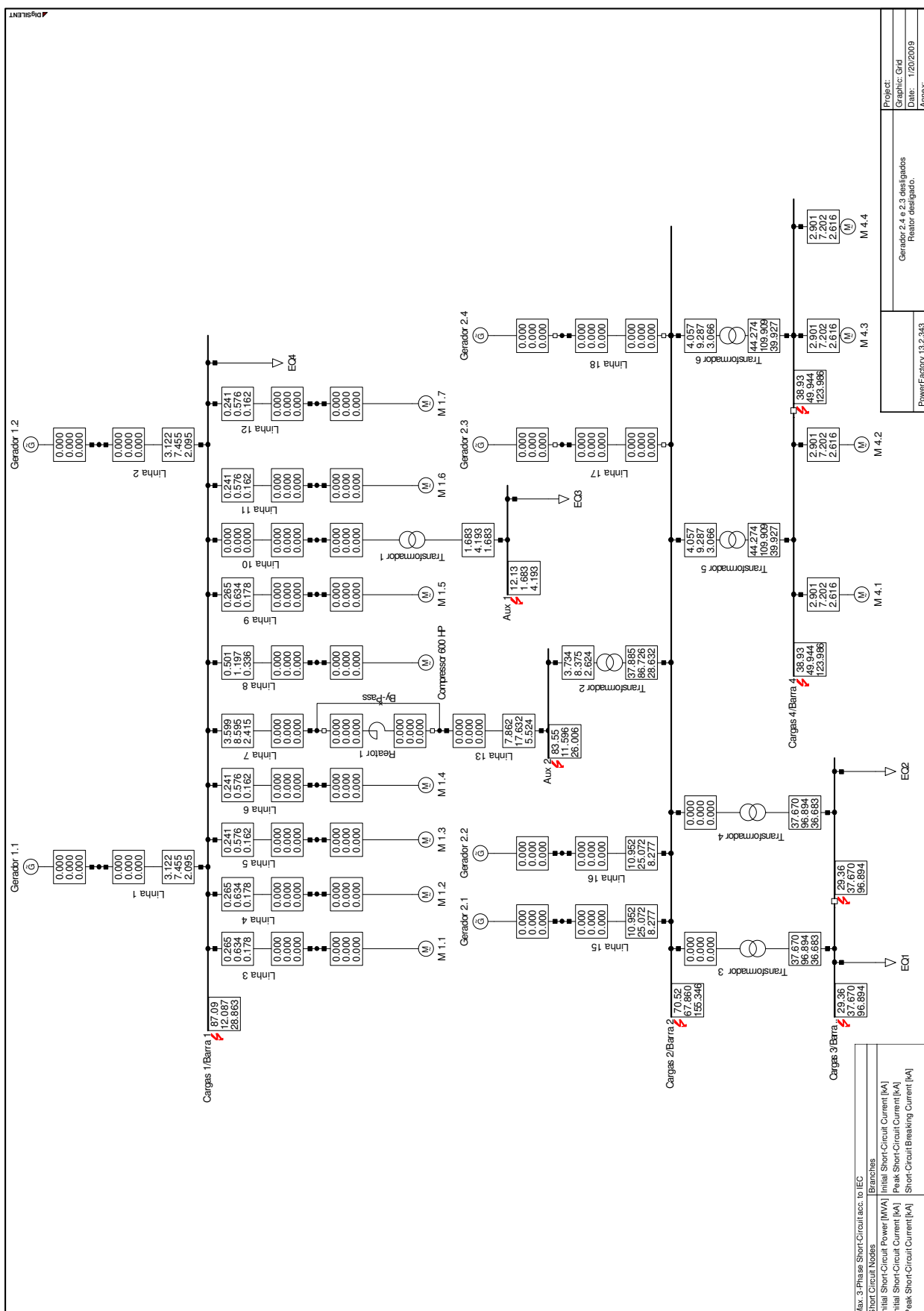


Figura 23 - Resultados do Caso 3 (geradores 2.3 e 2.4 desligados) – curto-circuito trifásico franco.

#### 6.2.1.3 Caso 4: Geradores 2.3 e 2.4 Desligados e Reator em Operação

Nesta seção, inicialmente dimensiona-se o reator da interligação para que os níveis de curto-circuito atendam aos limites dos barramentos.

##### Dimensionamento do Reator

O reator foi dimensionado considerando que o módulo da corrente de falta para um curto-circuito trifásico franco na barra “Cargas 2/Barra 2” não ultrapasse 50 kA (valor inicial, eficaz), estando os geradores 2.3 e 2.4 desligados. Com o auxílio do programa DIgSILENT PowerFactory determinou-se o reator desejado, cuja especificação nominal encontra-se a seguir:

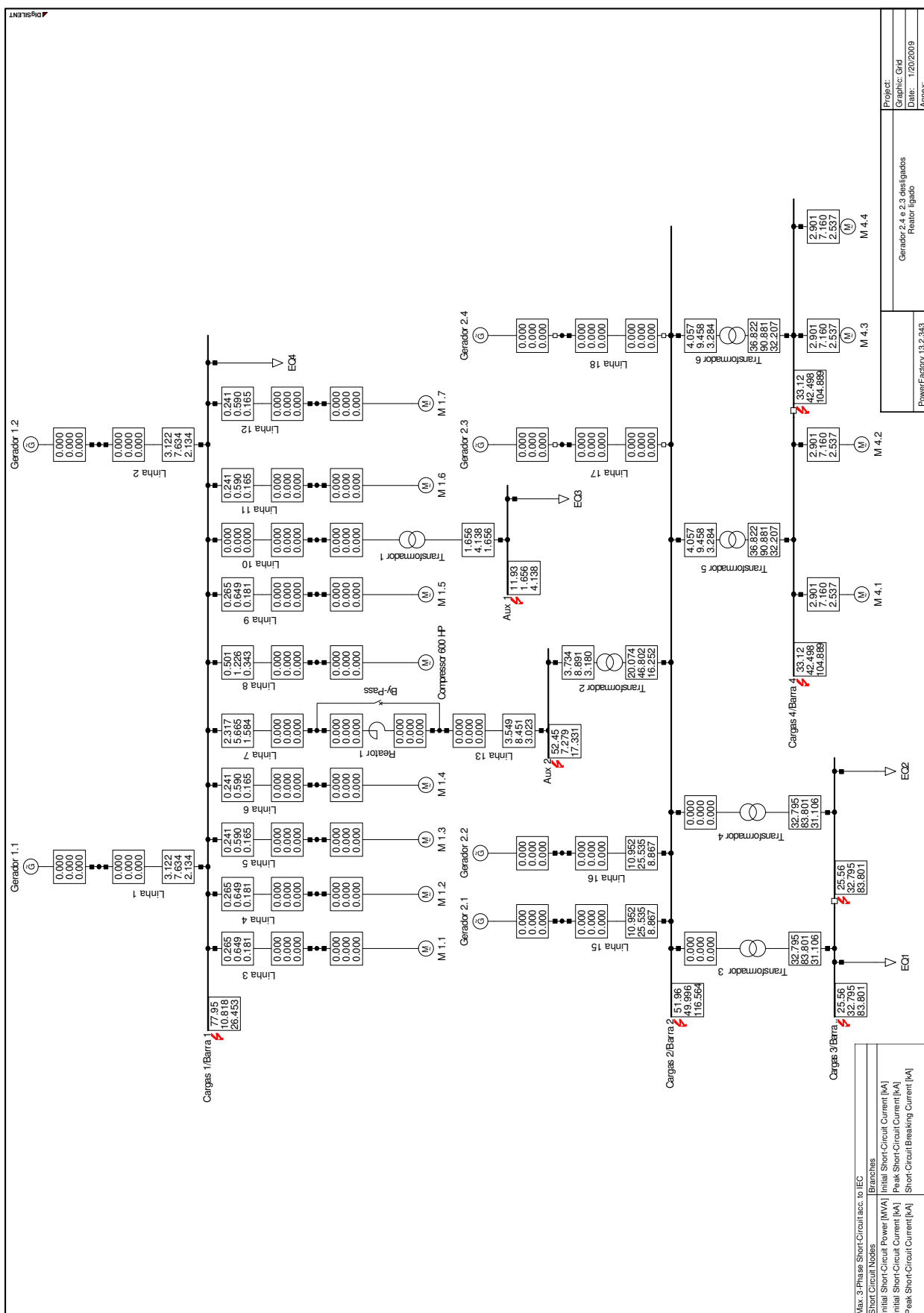
- Tensão nominal: 4,16 kV
- Potência nominal: 4000 kVA (especificada em função do fluxo de potência aparente esperado no ramo de interligação entre as áreas antiga e nova. Foi configurado também para suportar a situação máxima do primário do transformador do ramo que é 4 MVA)
- Impedância: 9,5 % (inicialmente, com 5,4% e foi-se alterando esta porcentagem, na área de edição das características dos equipamento, até que a corrente de curto-circuito na barra 2 não ultrapasse os 50 kA).

##### Resultados do Caso 4

Os resultados do caso 4 são apresentados na Figura 24 e resumidos na Tabela 9. A tabela completa dos resultados desse caso é apresentada no Anexo 5, Tabela 5.1. Observa-se que no caso da barra “Cargas 2/Barra 2” a máxima corrente inicial eficaz simétrica de curto-circuito ( $I''_k$ ) foi limitada a 50 kA, conforme desejado. No entanto, observa-se que nas barras “Cargas 1/Barra 1” e “Cargas 4/Barra 4”, cujos limites de curto-circuito são 10 kA e 42 kA, respectivamente, houve ligeiras violações. Essas violações são muito pequenas e insuficientes para condenar a operação do sistema elétrico nessas condições, pois como o cálculo de curto-circuito prevê algumas hipóteses conservadoras [5], [6], o valor real de uma corrente de falta nesses barramentos certamente estarão dentro dos limites.

**Tabela 9 - Resultados do Caso 4 (geradores 2.3 e 2.4 desligados - reator em operação) – curto-circuito trifásico franco.**

	$S_{k''}$ [MVA]	$I''_k$ [kA]	$I_p$ [kApico]
Carga 1/Barra 1	77,95	10,82	26,45
Carga 2/Barra 2	51,96	50,00	116,56
Carga 3/Barra 4	25,56	32,80	83,80
Carga 4/Barra 4	33,12	42,50	104,89



**Figura 24 - Resultados do Caso 4 (geradores 2.3 e 2.4 desligados - reator em operação) – curto-circuito trifásico franco.**

### 6.3 Análise de Superação dos Disjuntores Existentes

Dispondo dos valores máximos das correntes de curto-circuito e da configuração operativa do sistema elétrico (Caso 4) é necessário verificar se as capacidades nominais de curto-circuito dos disjuntores existentes continuam sendo respeitadas. Essa análise é apresentada na Tabela 10, em que todos os valores de curto-circuito calculados foram obtidos do Caso 4. Para se fazer uma análise mais conservadora (a favor da segurança) utilizaram-se as correntes de falta nas barras as quais os disjuntores estão conectados. A Tabela 10 apresenta as características nominais dos disjuntores existentes e os valores das correntes máximas de curto-circuito nas barras em que os equipamentos estão instalados. Vale lembrar que as correntes de falta máximas foram obtidas para o curto-circuito trifásico franco.

Para a análise de superação dos disjuntores existentes, os seguintes valores da Tabela 10 devem ser comparados:

- Se a corrente de interrupção nominal (parâmetro elétrico do disjuntor) possuir um valor menor que a máxima corrente simétrica inicial de curto-circuito (valor obtido através das simulações) um novo disjuntor deve ser escolhido ou outro método de limitação de corrente de curto-circuito deve ser adotado, pois o atual poderá ser danificado no caso da ocorrência de uma falta dessa magnitude;
- Se a corrente de pico nominal (parâmetro elétrico do disjuntor) possuir um valor menor que a máxima corrente de pico (valor obtido através das simulações) o disjuntor deve ser substituído ou outro método de limitação de corrente de curto-circuito deve ser adotado, pelos mesmos motivos explicados anteriormente.

Analisando os resultados da Tabela 10 conclui-se que nenhum dos disjuntores está inadequado.

**Tabela 10 - Análise de superação dos disjuntores existentes – tipo Masterpact, modelo NW [18].**

Localização	Tensão Nominal (V)	Corrente Nominal (A)	Corrente de Interrupção Nominal (kA)	Corrente de Pico Nominal (kA)	Máxima Corrente de Curto-Circuito Inicial Simétrica (kA)	Máxima Corrente de Pico (kA pico)	Situação
Geradores 2.1/2.2/2.3/2.4	690	2500	65	143	50,00	116,56	<b>OK</b>
Primário Transformadores 3/4	690	1600	65	143	50,00	116,56	<b>OK</b>
Primário Transformadores 5/6	690	2000	65	143	50,00	116,56	<b>OK</b>
Cargas 3/Barra 3	525	2000	65	143	32,80	83,80	<b>OK</b>
Cargas 4/Barra 4	525	2500	65	143	42,50	104,89	<b>OK</b>

A próxima etapa é especificar os novos disjuntores a partir da corrente nominal dos circuitos e das correntes de curto-circuito.

#### 6.4 Especificação dos Novos Disjuntores

A Tabela 11 fornece as informações sobre a especificação básica dos novos disjuntores. O disjuntor de baixa tensão foi especificado de acordo com as características do modelo Masterpact NW [18] e todos os disjuntores de 4,16 kV foram especificados de acordo com as características do modelo 5ADV36, da fabricação da ABB [19]. De acordo com os parâmetros elétricos para o dimensionamento de disjuntores, mencionados na seção 4.7, foram escolhidos os novos disjuntores. A Tabela 11 fornece informações sobre o circuito no qual o disjuntor encontra-se instalado e informações sobre as características do disjuntor selecionado, com relação às correntes nominal e de curto-circuito (interrupção e de pico).

**Tabela 11 - Especificação básica dos novos disjuntores.**

Localização	Circuito				Disjuntor especificado			
	Tensão Nominal do Circuito (V)	Corrente Nominal do Circuito (A)	Corrente de Curto-Circuito Inicial Simétrica (kA)	Máxima Corrente de Pico (kA pico)	Tensão Nominal (V)	Corrente Nominal (A)	Corrente de Interrupção Nominal (kA)	Corrente de Pico Nominal (kA pico)
Geradores 1.1/1.2	4160	513,51	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.1	4160	47,07	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.2	4160	47,07	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.3	4160	54,93	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.4	4160	54,93	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.5	4160	47,07	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.6	4160	54,93	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Motor M1.7	4160	54,93	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Compressor 600 HP	4160	82,50	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Linha 7	4160	555,14	10,82	26,45	4,16	1200	34,7	97
Primário Transformador 2	4160	555,14	7,29	17,33	4,16	1200	34,7	97
Secundário Transformador 2	600	3849,00	50,00	116,56	690	4000	65	143

A escolha dos disjuntores foi feita analisando-se os resultados obtidos nas simulações:

1. Tensão nominal do disjuntor deve ser maior ou igual à tensão nominal do circuito. Caso a tensão nominal do disjuntor seja menor que a tensão do circuito, este equipamento não pode ser inserido no sistema, pois não suporta a tensão de funcionamento do mesmo.

2. Corrente nominal do disjuntor deve ser maior ou igual à corrente nominal do circuito. Caso a corrente nominal do disjuntor seja menor que a corrente do circuito, este equipamento não pode ser inserido no sistema, pois não suporta a corrente de funcionamento do mesmo.

3. Corrente de interrupção do disjuntor deve ser maior que a corrente inicial simétrica de curto-circuito .

4. Corrente de pico nominal do disjuntor deve ser maior que a máxima corrente de pico de curto-circuito verificada no sistema elétrico.

## 7 Conclusões

A partir das simulações para curto-circuito trifásico franco, bifásico franco, bifásico e monofásico foi selecionada a melhor configuração do sistema elétrico para que as capacidades de curto-circuito dos equipamentos não fossem superadas. Para o sistema elétrico analisado, o caso da ocorrência da falta mais severa, foi o curto-circuito trifásico franco. A configuração utilizada nas análises corresponde ao Caso 4: dois geradores desligados e o reator com impedância percentual de 9,5% ligado para o caso da falta trifásica. Este reator teve sua impedância calculada para que as correntes de curto do sistema não excedam as correntes pré-determinadas para as barras. Neste caso as correntes iniciais simétricas excedem os valores de corrente de curto-circuito nominais, das Cargas 1/Barra 1 e Cargas 4/Barra 4, porém os valores dessas correntes estão muito próximos aos valores nominais das barras de forma que foi considerado, neste estudo, que as mesmas não se encontravam superadas. Tal consideração é justificada pelas hipóteses conservadoras que a norma IEC 60909 se utiliza para determinar as correntes de curto-circuito. Um exemplo, é o fator de sobretensão para corrigir a tensão pré-falta, o qual pode variar de 105% para tensões inferiores a 1 kV a 110% para tensões superiores a 1 kV. Retomando os resultados obtidos para as barras 1/Barra 1 e Cargas 4/Barra 4 e desconsiderando o fator c, observa-se no desenvolvimento a seguir que as mesmas não estão superadas:

- Barra Cargas 1/ Barra 1:

$$I \text{ barra 1} - (\text{fator de correção da tensão} \times I \text{ barra 1}) = 10,82 \text{ kA} - (0,10 \times 10,82 \text{ kA}) = 9,738 \text{ kA} \rightarrow 9,738 \text{ kA} < 10,000 \text{ kA} \text{ (corrente de curto-circuito que a barra suporta)}$$

- Barra Cargas 4/Barra 4:

$$I \text{ barra 4} - (\text{fator de correção da tensão} \times I \text{ barra 4}) = 42,50 \text{ kA} - (0,05 \times 42,50 \text{ kA}) = 40,375 \text{ kA} \rightarrow 40,375 < 42,000 \text{ kA} \text{ (corrente de curto-circuito que a barra suporta)}$$

Diante da situação descrita acima, as correntes, em determinadas barras, estão muito próximas às correntes de curto-circuito pré-determinadas para as mesmas, indicando que o sistema está em seu limite operacional, ou seja, cargas com potencial contribuição a curtos-circuitos não devem ser adicionadas. Caso contrário, provavelmente o sistema não obedecerá às correntes de curto-circuito pré-estabelecidas, sendo necessária a adoção de outras medidas para limitar as correntes de curto-circuito neste sistema elétrico.

Finalmente, com a realização deste trabalho, ficou evidente a importância de tal estudo para os dias atuais, em que o crescimento da indústria é acelerado e a necessidade de aumento dos sistemas elétricos é imprescindível. No entanto, porém esta expansão não pode nunca colocar em risco a integridade dos equipamentos, funcionamento do sistema e segurança das pessoas que, direta ou indiretamente, lidam com ele.



## 8 Referências Bibliográficas

- [1] W. D. Stevenson Jr. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978.
- [2] G. Kindermann. *Curto-Circuito*. Editora Sagra Luzzato, 2ª edição, 1997.
- [3] M. Oleskovicz , D. V. Coury, R. K. Aggarwal. *O Emprego de Redes Neurais Artificiais na Detecção, Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão*. Revista Controle & Automação, vol.14, no.2, Abril/ Maio/ Junho 2003
- [4] T. P. Smith. *Power System Studies for Cement Plants*. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 13, no. 14, pp. 56-65. Jul/Aug. 2007.
- [5] DIGSILENT PowerFactory, *User Manual*. Disponível em <<<http://www.digsilent.de>>>. Acesso em outubro 2008.
- [6] I. Kasikci. *Short-Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC-60909*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.
- [7] B. de Metz-Noblat, F Dumas, C. Poulain. *Calculation of Short-Circuit Currents*. Colection Technique, Schneider Electric. No. 158, September 2005
- [8] E. Biasotto, P. S. de Oliveira, M. Oleskovicz, D. Coury. *A detecção e classificação de situações causadoras de desequilíbrios nas formas de onda utilizando componentes simétricas e sistemas fuzzy*. Disponível em <<[http://www4.fct.unesp.br/dmec/dincon2008/artigos/09/16-Biasotto\\_E.pdf](http://www4.fct.unesp.br/dmec/dincon2008/artigos/09/16-Biasotto_E.pdf)>>. Acesso em Janeiro de 2009.
- [9] *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Std 242-2001, 2001.
- [10] J. Merrel. *The Importance of the X/R Ratio in Low-Voltage Short Circuit Studies*. November, 1999. Disponível em << <http://www.powerstudies.com/articles/ImportanceofX-over-RRatios.pdf>>>. Acesso em Janeiro de 2009.
- [11] *American National Standards Institute*. Disponível em <<<http://www.ansi.org/>>>. Acesso em janeiro de 2009.
- [12] G. Knight, H. Sieling. *Comparison of ANSI and IEC 60909 Short-Circuit Current Calculation Procedure*. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, no. 3, May/June 1993.
- [13] *International Electrotechnical Comission*. Disponível em << <http://www.iec.ch>>>. Acesso em janeiro de 2009.
- [14] D. Nedic, G. Bathurst e J. Heath. *A Comparison of Short-Circuit Calculation Methods and Guidelines for Distribution Networks*. In: 19<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution, Vienna, May 2007.
- [15] W. A. Moura. *Proteção Elétrica*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Mato Grosso Disponível em <<[http://www.getec.cefetmt.br/~walterley/Protecao\\_Eletrica.pdf](http://www.getec.cefetmt.br/~walterley/Protecao_Eletrica.pdf)>>. Acesso em Janeiro de 2009.

- [16] J. Mamede F. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Editora LTC, 3ª edição, 2005.
- [17] R. D. Garzon. *High Voltage Circuit Breakers*. Second Edition, 2002.
- [18] Schneider Electric. Masterpact NT e NW. *Manual Técnico*. Disponível em <<<http://www.schneider-electric.com.br>>>. Acesso em Novembro de 2008.
- [19] ABB. ADVAC® - Advanced Design Vacuum Circuit Breakers. *Technical Guide*. Disponível em <<<http://www.abb.com>>>. Acesso em Novembro de 2008.

## **Anexo 1 - Dados do sistema elétrico**



Tabela 1.1 - Parâmetros elétricos dos geradores.

Equipamento	Potência aparente [VA]	Tensão [kV]	Reatância (pu)	Fator de Potência	Ligação	Resistência de aterramento [ohm]	Reatância de aterramento [ohm]
<b>Gerador 1.1</b>	3,70 M	4,16	0,18	0,80	Y aterrado	240,178	0,00
<b>Gerador 1.2</b>	3,70 M	4,16	0,18	0,80	Y aterrado	320,238	0,00
<b>Gerador 2.1</b>	2,15 M	0,6	0,20	0,70	Y		
<b>Gerador 2.2</b>	2,15 M	0,6	0,20	0,70	Y		
<b>Gerador 2.3</b>	2,15 M	0,6	0,20	0,70	Y		
<b>Gerador 2.4</b>	2,15 M	0,6	0,20	0,70	Y		

Tabela 1.2 - Parâmetros elétricos das linhas.

Linhas	Tipo	R [ohm/km]	X [ohm/km]	Comprimento [km]	In [kA]
Linha 1	EPR 3,6/6k	0,0754	0,072	0,06	0,411
Linha 2	EPR 3,6/6k	0,0754	0,072	0,06	0,411
Linha 3	EPR 3,6/6k	1,54	0,174	0,065	0,104
Linha 4	EPR 3,6/6k	1,54	0,174	0,065	0,104
Linha 5	EPR 3,6/6k	1,47	0,171	0,07	0,121
Linha 6	EPR 3,6/6k	1,47	0,171	0,07	0,121
Linha 7	EPR 3,6/6k	0,197	0,125	0,15	0,411
Linha 8	EPR 3,6/6k	1,47	0,171	0,06	0,121
Linha 9	EPR 3,6/6k	1,54	0,174	0,065	0,104
Linha 10	EPR 3,6/6k	1,47	0,171	0,08	0,121
Linha 11	EPR 3,6/6k	1,47	0,171	0,07	0,121
Linha 12	EPR 3,6/6k	1,47	0,171	0,07	0,121
Linha 13	EPR 3,6/6k	0,197	0,125	0,016	0,411
Linha 15	EPR 0,6/1k	0,0754	0,072	0,025	0,615
Linha 16	EPR 0,6/1k	0,0754	0,072	0,025	0,615
Linha 17	EPR 0,6/1k	0,0754	0,072	0,025	0,615
Linha 18	EPR 0,6/1k	0,0754	0,072	0,025	0,615
Linha 19	EPR 0,6/1k	0,047	0,0716	0,27	0,818
Linha 20	EPR 0,6/1k	0,047	0,0716	0,18	0,818

Tabela 1.3 - Parâmetros elétricos dos transformadores.

Equipamento	Potência Aparente [VA]	Tensão [kV]	Reatância (pu)	Enrolamento de Alta Tensão	Enrolamento de Baixa Tensão
Transformador 1	0,40 M	4,16 / 4,16	0,03	Δ	Y
Transformador 2	4,00 M	4,16 / 0,60	0,03	Δ	Δ
Transformador 3	1,40 M	0,60 k / 0,45	0,03	Δ	Y
Transformador 4	1,40 M	0,60 / 0,45	0,03	Δ	Y
Transformador 5	2,00 M	0,60 / 0,45	0,03	Δ	Y
Transformador 6	2,00 M	0,60 / 0,45	0,03	Δ	Y

Tabela 1.4 – Parâmetros elétricos das barras.

Barras	Tensão [V]	Corrente de curto- circuito simétrica inicial nominal [A]
Barra 1	4,16 k	10,00 k
Barra 2	0,60 k	50,00 k
Barra 3	0,45 k	40,00 k
Barra 4	0,45 k	42,00 k
Aux 1	4,16 k	Não especificado
Aux 2	4,16 k	Não especificado

Tabela 1.5 - Parâmetros elétricos das cargas EQ1, EQ2 e EQ3.

Carga	Potência ativa [MW]	Potência reativa [Mvar]
EQ 1	0,51	0,38
EQ 2	0,59	0,44
EQ 3	0,2	0

Tabela 1.6 – Parâmetros elétricos do reator.

Equipamento	Potência Aparente [VA]	Tensão [kV]	Reatância [pu]
Reator	4,00 M	4,16	0,095

Tabela 1.7 – Parâmetros elétricos dos motores

<b>Equipamento</b>	<b>Potência Aparente [kVA]</b>	<b>Tensão [kV]</b>	<b>Corrente de partida (pu)</b>	<b>Fator de Potência</b>	<b>R/X rotor bloqueado</b>
<b>Motor 1.1</b>	339,18	4,16	5,14	0,90	0,15
<b>Motor 1.2</b>	339,18	4,16	5,14	0,90	0,15
<b>Motor 1.3</b>	396,00	4,16	4,00	0,89	0,15
<b>Motor 1.4</b>	396,00	4,16	4,00	0,89	0,15
<b>Motor 1.5</b>	339,18	4,16	5,14	0,90	0,15
<b>Motor 1.6</b>	396,00	4,16	4,00	0,89	0,15
<b>Motor 1.7</b>	396,00	4,16	4,00	0,89	0,15
<b>Motor 4.1</b>	430,71	0,45	5,00	0,80	0,42
<b>Motor 4.2</b>	430,71	0,45	5,00	0,80	0,42
<b>Motor 4.3</b>	430,71	0,45	5,00	0,80	0,42
<b>Motor 4.4</b>	430,71	0,45	5,00	0,80	0,42
<b>Compressor (600 HP)</b>	549,44	4,16	6,00	0,86	0,10



## **Anexo 2 - Resultados do Caso 1: Simulação de curto-circuito trifásico franco – Todos os geradores ligados**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito trifásico em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 1, ou seja, todos os geradores ligados e o reator fora de operação.

Os resultados estão agrupados por barra. Por exemplo, as primeiras 14 linhas após o cabeçalho correspondem aos resultados do curto-circuito na barra Cargas 1/Barra 1. A linha que se inicia com o nome “Barra 1” apresenta todas as grandezas calculadas pelo programa, relativas ao curto-circuito na barra. As linhas subseqüentes mostram os valores das contribuições das correntes e das potências de curto-circuito em cada ramo conectado à barra Cargas 1/Barra 1.

O bloco de dados seguinte, que tem início na 15ª linha após o cabeçalho corresponde aos resultados relativos ao curto-circuito na barra Cargas 2/Barra 2 e respectivas contribuições. Os resultados para as demais barras seguem o mesmo formato.

**Tabela 2.1: Simulação curto-circuito trifásico – Caso 1: todos geradores ligados e reator desligado.**

		Curto-circuito trifásico Todos geradores ligados Reator desligado						DigSILENT PowerFactory 13.2.339	Project: ----- Date: 11/12/2008					
Fault Locations with Feeders						3-Phase Short-Circuit				/ Max. Short-Circuit Currents				
Short-Circuit Calculation according to IEC														
Asynchronous Motors always considered						Grid Identification automatic			Short-Circuit Duration Breaker Time Fault Clearing Time (Ith)					
Decaying Aperiodic Component Using Method B						Conductor Temperature Userdefined No			c-Voltage Factor Userdefined No					
Grid: Grid		System Stage: Grid						Annex: / 1						
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
Cargas 1														
Barra 1		4.16	0.00	0.00	1.10	100.12 MVA	13.89 kA	-81.85	32.80 kA	9.92	71.48	10.79	12.85	
Linha 1	Terminal 1					22.49 MVA	3.12 kA	94.77	7.37 kA					
Linha 10	Terminal 1					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Linha 11	Terminal 1					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.57 kA					
Linha 12	Terminal 1					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.57 kA					
Linha 2	Terminal 2					22.49 MVA	3.12 kA	94.77	7.37 kA					
Linha 3	Terminal 3					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.63 kA					
Linha 4	Terminal 4					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.63 kA					
Linha 5	Terminal 5					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.57 kA					
Linha 6	Terminal 6					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.57 kA					
Linha 7	Terminal 7					38.99 MVA	5.41 kA	101.88	12.77 kA					
Linha 8	Terminal 8					3.61 MVA	0.50 kA	96.65	1.18 kA					
Linha 9	Terminal 9					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.63 kA					
Cargas 2														
Barra 2		0.60	0.00	0.00	1.05	93.28 MVA	89.76 kA	-79.92	203.60 kA	68.28	70.96	71.58	83.41	
Linha 15	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	24.84 kA					
Linha 16	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	24.84 kA					
Linha 17	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	24.84 kA					
Linha 18	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	24.84 kA					
Transformador	Cargas 3					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Transformador 2	Aux 2					39.37 MVA	37.88 kA	97.96	85.94 kA					

	Transformador 4	Cargas 3				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	Transformador 5	Cargas 4				4.22 MVA	4.06 kA	103.41	9.20 kA				
	Transformador 6	Cargas 4				4.22 MVA	4.06 kA	103.41	9.20 kA				
	Cargas 3												
-----													
	Grid: Grid		System Stage: Grid								Annex:	/ 2	
		rtd.V.	Voltage	c-		Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	Ik	Ith
		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]
	B1.0	0.45	0.00	0.00	1.05	32.67 MVA	41.91 kA	-86.49	108.97 kA	41.91	32.67	33.43	39.77
	S3.0	Barra 3				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	Transformador 4	Cargas 2				32.67 MVA	41.91 kA	93.51	108.97 kA				
	Barra 3	0.45	0.00	0.00	1.05	32.67 MVA	41.91 kA	-86.49	108.97 kA	41.91	32.67	33.43	39.77
	S3.0	B1.0				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	Transformador	Cargas 2				32.67 MVA	41.91 kA	93.51	108.97 kA				
	Cargas 4												
	B1.0	0.45	0.00	0.00	1.05	44.20 MVA	56.71 kA	-84.60	142.38 kA	52.56	40.97	42.64	52.43
	S3.0	Barra 4				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	Transformador 6	Cargas 2				39.79 MVA	51.05 kA	94.41	128.16 kA				
	M 4.3					2.26 MVA	2.90 kA	95.71	7.28 kA				
	M 4.4					2.26 MVA	2.90 kA	112.78	7.28 kA				
	Barra 4	0.45	0.00	0.00	1.05	44.20 MVA	56.71 kA	-84.60	142.38 kA	52.56	40.97	42.64	52.43
	S3.0	B1.0				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	Transformador 5	Cargas 2				39.79 MVA	51.05 kA	94.41	128.16 kA				
	M 4.1					2.26 MVA	2.90 kA	95.71	7.28 kA				
	M 4.2					2.26 MVA	2.90 kA	112.78	7.28 kA				
	Aux 1	4.16	0.00	0.00	1.10	12.35 MVA	1.71 kA	-84.62	4.27 kA	1.71	12.35	1.33	1.60
	Transformador 1	Terminal 1				12.35 MVA	1.71 kA	95.38	4.27 kA				
	Aux 2	4.16	0.00	0.00	1.10	97.82 MVA	13.58 kA	-80.10	30.83 kA	10.08	72.64	10.60	12.54
	Transformador 2	Cargas 2				41.20 MVA	5.72 kA	98.44	12.99 kA				
	Linha 13	Terminal 1				56.65 MVA	7.86 kA	100.97	17.86 kA				



### **Anexo 3 - Resultados do Caso 2: Simulação de curto-circuito trifásico franco - Gerador 2.4 desligado**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito trifásico em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 2, ou seja, um dos geradores antigos desligados e o reator fora de operação.

A explicação para interpretação dos resultados do relatório são as mesmas do Anexo 2.

**Tabela 3.1: Simulação curto-circuito trifásico – Caso 2: gerador 2.4 desligado e reator desligado.**

		Curto-circuito trifásico				DigSILENT		Project:			
		Gerador 2.4 desligado				PowerFactory		-----			
		Reator desligado				13.2.339		Date:		11/12/2008	
-----											
Fault Locations with Feeders											
Short-Circuit Calculation according to IEC											
3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents											
-----											
Asynchronous Motors				Grid Identification				Short-Circuit Duration			
always considered				automatic				Breaker Time			
								0.10 s			
								Fault Clearing Time (Ith)			
								1.00 s			
Decaying Aperiodic Component				Conductor Temperature				c-Voltage Factor			
Using Method				Userdefined				Userdefined			
B				No				No			
-----											
Grid: Grid											
System Stage: Grid											
Annex:											
/ 1											
-----											
rtd.V. Voltage c- Sk" Ik" ip Ib Sb Ik Ith											
[kV] [kV] [deg] Factor [MVA/MVA] [kA/kA] [deg] [kA/kA] [kA] [MVA] [kA] [kA]											
-----											
Cargas 1											
Barra 1											
4.16 0.00 0.00 1.10 94.06 MVA 13.05 kA -82.09 30.97 kA 9.06 65.29 9.89 12.00											
Linha 1											
Terminal 1											
22.49 MVA 3.12 kA 94.77 7.41 kA											
Linha 10											
Terminal 1											
0.00 MVA 0.00 kA 0.00 0.00 kA											
Linha 11											
Terminal 1											
1.74 MVA 0.24 kA 99.05 0.57 kA											
Linha 12											
Terminal 1											
1.74 MVA 0.24 kA 99.05 0.57 kA											
Linha 2											
Terminal 2											
22.49 MVA 3.12 kA 94.77 7.41 kA											
Linha 3											
Terminal 3											
1.91 MVA 0.27 kA 99.09 0.63 kA											
Linha 4											
Terminal 4											
1.91 MVA 0.27 kA 99.09 0.63 kA											
Linha 5											
Terminal 5											
1.74 MVA 0.24 kA 99.05 0.57 kA											
Linha 6											
Terminal 6											
1.74 MVA 0.24 kA 99.05 0.57 kA											
Linha 7											
Terminal 7											
32.92 MVA 4.57 kA 101.91 10.84 kA											
Linha 8											
Terminal 8											
3.61 MVA 0.50 kA 96.65 1.19 kA											
Linha 9											
Terminal 9											
1.91 MVA 0.27 kA 99.09 0.63 kA											
Cargas 2											
Barra 2											
0.60 0.00 0.00 1.05 81.90 MVA 78.81 kA -80.09 179.47 kA 59.78 62.13 60.64 72.52											
Linha 15											
Terminal 1											
11.38 MVA 10.95 kA 101.29 24.94 kA											
Linha 16											
Terminal 1											
11.38 MVA 10.95 kA 101.29 24.94 kA											
Linha 17											
Terminal 1											
11.38 MVA 10.95 kA 101.29 24.94 kA											
Transformador											
Cargas 3											
0.00 MVA 0.00 kA 0.00 0.00 kA											
Transformador 2											
Aux 2											
39.37 MVA 37.88 kA 97.96 86.28 kA											





**Anexo 4 - Resultados do Caso 3: Simulação de curto-circuito trifásico franco - Geradores 2.3 e 2.4 desligados**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito trifásico em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 3, ou seja, dois geradores antigos desligados e o reator fora de operação.

A explicação para interpretação dos resultados do relatório são as mesmas do Anexo 2

**Tabela 4.1: Simulação curto-circuito trifásico – Caso 3: geradores 2.3 e 2.4 desligados e reator desligado.**

				Curto-circuito trifásico				DigSILENT		Project:			
				Gerador 2.4 e 2.3 desligados				PowerFactory		-----			
				Reator desligado				13.2.339		Date: 11/12/2008			
-----													
Fault Locations with Feeders													
Short-Circuit Calculation according to IEC						3-Phase Short-Circuit				/ Max. Short-Circuit Currents			
-----													
Asynchronous Motors				Grid Identification				Short-Circuit Duration					
always considered				automatic				Breaker Time 0.10 s					
								Fault Clearing Time (Ith) 1.00 s					
Decaying Aperiodic Component				Conductor Temperature				c-Voltage Factor					
Using Method B				Userdefined No				Userdefined No					
-----													
-----													
Grid: Grid		System Stage: Grid								Annex:		/ 1	
-----													
		rtd.V.	Voltage	c-	Sk"		Ik"		ip	Ib	Sb	Ik	Ith
		[kV]	[kV]	[deg]	[MVA/MVA]		[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]
-----													
Cargas 1													
Barra 1		4.16	0.00	0.00	1.10	87.09 MVA	12.09 kA	-82.38	28.86 kA	8.11	58.43	8.86	11.01
Linha 1	Terminal 1					22.49 MVA	3.12 kA	94.77	7.46 kA				
Linha 10	Terminal 1					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
Linha 11	Terminal 1					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.58 kA				
Linha 12	Terminal 1					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.58 kA				
Linha 2	Terminal 2					22.49 MVA	3.12 kA	94.77	7.46 kA				
Linha 3	Terminal 3					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.63 kA				
Linha 4	Terminal 4					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.63 kA				
Linha 5	Terminal 5					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.58 kA				
Linha 6	Terminal 6					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.58 kA				
Linha 7	Terminal 7					25.93 MVA	3.60 kA	101.99	8.59 kA				
Linha 8	Terminal 8					3.61 MVA	0.50 kA	96.65	1.20 kA				
Linha 9	Terminal 9					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.63 kA				
Cargas 2													
Barra 2		0.60	0.00	0.00	1.05	70.52 MVA	67.86 kA	-80.31	155.35 kA	51.29	53.30	49.69	61.58
Linha 15	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	25.07 kA				
Linha 16	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	25.07 kA				
Transformador	Cargas 3					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
Transformador 2	Aux 2					39.37 MVA	37.88 kA	97.96	86.73 kA				
Transformador 4	Cargas 3					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
Transformador 5	Cargas 4					4.22 MVA	4.06 kA	103.41	9.29 kA				

Transformador 6		Cargas 4				4.22 MVA	4.06 kA	103.41	9.29 kA				
Cargas 3													
B1.0		0.45	0.00	0.00	1.05	29.36 MVA	37.67 kA	-85.98	96.89 kA	36.68	28.59	27.58	34.79
S3.0		Barra 3				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
-----													
Grid: Grid		System Stage: Grid								Annex:		/ 2	
		rtd.V.	Voltage	c-		Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	Ik	Ith
		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]		[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]
Transformador 4		Cargas 2				29.36 MVA	37.67 kA	94.02	96.89 kA				
Barra 3		0.45	0.00	0.00	1.05	29.36 MVA	37.67 kA	-85.98	96.89 kA	36.68	28.59	27.58	34.79
S3.0		B1.0					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador		Cargas 2				29.36 MVA	37.67 kA	94.02	96.89 kA				
Cargas 4													
B1.0		0.45	0.00	0.00	1.05	38.93 MVA	49.94 kA	-84.03	123.99 kA	45.04	35.11	34.48	44.94
S3.0		Barra 4				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
Transformador 6		Cargas 2				34.51 MVA	44.27 kA	94.90	109.91 kA				
M 4.3						2.26 MVA	2.90 kA	95.71	7.20 kA				
M 4.4						2.26 MVA	2.90 kA	112.78	7.20 kA				
Barra 4		0.45	0.00	0.00	1.05	38.93 MVA	49.94 kA	-84.03	123.99 kA	45.04	35.11	34.48	44.94
S3.0		B1.0					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5		Cargas 2				34.51 MVA	44.27 kA	94.90	109.91 kA				
M 4.1						2.26 MVA	2.90 kA	95.71	7.20 kA				
M 4.2						2.26 MVA	2.90 kA	112.78	7.20 kA				
Aux 1		4.16	0.00	0.00	1.10	12.13 MVA	1.68 kA	-84.64	4.19 kA	1.68	12.13	1.23	1.54
Transformador 1		Terminal 1				12.13 MVA	1.68 kA	95.36	4.19 kA				
Aux 2		4.16	0.00	0.00	1.10	83.55 MVA	11.60 kA	-79.43	26.01 kA	8.15	58.71	8.50	10.51
Transformador 2		Cargas 2				26.91 MVA	3.73 kA	99.74	8.37 kA				
Linha 13		Terminal 1				56.65 MVA	7.86 kA	100.97	17.63 kA				



**Anexo 5 - Resultados do Caso 4: Simulação de curto-circuito trifásico franco - Geradores 2.3 e 2.4 desligados e reator ligado**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito trifásico em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 4, ou seja, dois geradores antigos desligados e o reator em operação.

A explicação para interpretação dos resultados do relatório são as mesmas do Anexo 2.

**Tabela 5.1: Simulação curto-circuito trifásico – Caso 4: geradores 2.3 e 2.4 desligados e reator ligado.**

		Curto-circuito trifásico					DigSILENT		Project:				
		Gerador 2.4 e 2.3 desligados					PowerFactory		-----				
		Reator ligado (9.5% impedância)					13.2.339		Date: 11/14/2008				
-----													
Fault Locations with Feeders													
Short-Circuit Calculation according to IEC						3-Phase Short-Circuit				/ Max. Short-Circuit Currents			
-----													
Asynchronous Motors					Grid Identification			Short-Circuit Duration					
always considered					automatic			Breaker Time 0.10 s					
								Fault Clearing Time (Ith) 1.00 s					
Decaying Aperiodic Component					Conductor Temperature			c-Voltage Factor					
Using Method B					Userdefined No			Userdefined No					
-----													
-----													
Grid: Grid		System Stage: Grid							Annex:		/ 1		
-----													
		rtd.V.	Voltage		c-	Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	Ik	Ith
		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]
-----													
Cargas 1													
Barra 1		4.16	0.00	0.00	1.10	77.95 MVA	10.82 kA	-83.73	26.45 kA	7.40	53.28	7.93	9.89
Linha 1	Terminal 1					22.49 MVA	3.12 kA	94.77	7.63 kA				
Linha 10	Terminal 1					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
Linha 11	Terminal 1					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.59 kA				
Linha 12	Terminal 1					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.59 kA				
Linha 2	Terminal 2					22.49 MVA	3.12 kA	94.77	7.63 kA				
Linha 3	Terminal 3					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.65 kA				
Linha 4	Terminal 4					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.65 kA				
Linha 5	Terminal 5					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.59 kA				
Linha 6	Terminal 6					1.74 MVA	0.24 kA	99.05	0.59 kA				
Linha 7	Terminal 7					16.69 MVA	2.32 kA	98.12	5.67 kA				
Linha 8	Terminal 8					3.61 MVA	0.50 kA	96.65	1.23 kA				
Linha 9	Terminal 9					1.91 MVA	0.27 kA	99.09	0.65 kA				
Cargas 2													
-----													
Barra 2		0.60	0.00	0.00	1.05	51.96 MVA	50.00 kA	-80.98	116.56 kA	40.48	42.06	36.57	45.42
Linha 15	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	25.53 kA				
Linha 16	Terminal 1					11.38 MVA	10.95 kA	101.29	25.53 kA				
Transformador	Cargas 3					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
Transformador 2	Aux 2					20.86 MVA	20.07 kA	94.78	46.80 kA				

Transformador 4	Cargas 3				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Transformador 5	Cargas 4				4.22 MVA	4.06 kA	103.41	9.46 kA					
Transformador 6	Cargas 4				4.22 MVA	4.06 kA	103.41	9.46 kA					
Cargas 3													
B1.0	0.45	0.00	0.00	1.05	25.56 MVA	32.79 kA	-85.57	83.80 kA	31.11	24.24	23.99	30.21	
S3.0	Barra 3				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Transformador 4	Cargas 2				25.56 MVA	32.79 kA	94.43	83.80 kA					

Grid: Grid		System Stage: Grid						Annex: / 2					
	rtd.V.	Voltage	c-	Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	Ik	Ith		
	[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]	
Barra 3	0.45	0.00	0.00	1.05	25.56 MVA	32.79 kA	-85.57	83.80 kA	31.11	24.24	23.99	30.21	
S3.0	B1.0				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Transformador	Cargas 2				25.56 MVA	32.79 kA	94.43	83.80 kA					
Cargas 4													
B1.0	0.45	0.00	0.00	1.05	33.12 MVA	42.50 kA	-83.60	104.89 kA	37.17	28.97	29.30	38.19	
S3.0	Barra 4				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Transformador 6	Cargas 2				28.70 MVA	36.82 kA	95.18	90.88 kA					
M 4.3					2.26 MVA	2.90 kA	95.71	7.16 kA					
M 4.4					2.26 MVA	2.90 kA	112.78	7.16 kA					
Barra 4	0.45	0.00	0.00	1.05	33.12 MVA	42.50 kA	-83.60	104.89 kA	37.17	28.97	29.30	38.19	
S3.0	B1.0				0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA					
Transformador 5	Cargas 2				28.70 MVA	36.82 kA	95.18	90.88 kA					
M 4.1					2.26 MVA	2.90 kA	95.71	7.16 kA					
M 4.2					2.26 MVA	2.90 kA	112.78	7.16 kA					
Aux 1	4.16	0.00	0.00	1.10	11.93 MVA	1.66 kA	-84.81	4.14 kA	1.66	11.93	1.21	1.52	
Transformador 1	Terminal 1				11.93 MVA	1.66 kA	95.19	4.14 kA					
Aux 2	4.16	0.00	0.00	1.10	52.45 MVA	7.28 kA	-82.28	17.33 kA	6.20	44.67	5.33	6.63	
Transformador 2	Cargas 2				26.91 MVA	3.73 kA	99.74	8.89 kA					
Linha 13	Terminal 1				25.57 MVA	3.55 kA	95.60	8.45 kA					



## **Anexo 6 - Resultados do Caso 1: Simulação curto-circuito bifásico-terra - Todos geradores ligados**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito bifásico-terra franco em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 1, ou seja, todos os geradores ligados e o reator fora de operação.

A explicação para interpretação dos resultados do relatório é semelhante à apresentada no Anexo 2, só que neste caso, como o curto-circuito é assimétrico, são mostrados os valores para as três fases. Uma outra diferença é o parâmetro EFF na última coluna. Este parâmetro, mostrado apenas para as barras, é o fator de sobretensão que deve ser aplicado nas fases sãs. É calculado segundo a IEC60909 [5], [6].

**Tabela 6.1: Simulação curto-circuito bifásico-terra – Todos geradores ligados e reator desligado.**

		Curto-circuito bifásico franco						DigSILENT		Project:			
		Todos geradores ligados						PowerFactory		-----			
		Reator desligado						13.2.343		Date: 1/19/2009			
-----													
Fault Locations with Feeders													
Short-Circuit Calculation according to IEC						2-Phase to Ground				/ Max. Short-Circuit Currents			
-----													
Asynchronous Motors				Grid Identification				Short-Circuit Duration					
always considered				automatic				Breaker Time 0.10 s					
								Fault Clearing Time (Ith) 1.00 s					
				Conductor Temperature				c-Voltage Factor					
				Userdefined No				Userdefined No					
-----													
-----													
Grid: Grid		System Stage: Grid								Annex:		/ 1	
-----													
		rtd.V.	Voltage		c-	Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	EFF	
		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[-]	
-----													
Cargas 1													
Barra 1	A	4.16	4.06	1.65	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50	
	B		0.00	-120.00		28.23 MVA	11.75 kA	-173.60	27.75 kA	11.75	28.23	0.00	
	C		0.00	120.00		28.21 MVA	11.74 kA	6.40	27.72 kA	11.74	28.21	0.00	
-----													
Linha 1													
	A					0.26 MVA	0.11 kA	100.96	0.25 kA				
	B					6.14 MVA	2.56 kA	1.51	6.04 kA				
	C					6.09 MVA	2.54 kA	-176.08	5.99 kA				
-----													
Linha 10													
	A					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	B					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
	C					0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
-----													
Linha 11													
	A					0.02 MVA	0.01 kA	-30.12	0.02 kA				
	B					0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA				
	C					0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA				
-----													
Linha 12													
	A					0.02 MVA	0.01 kA	-30.12	0.02 kA				
	B					0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA				
	C					0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA				
-----													
Linha 2													
	A					0.26 MVA	0.11 kA	101.21	0.26 kA				

Linha 3	B	6.14 MVA	2.56 kA	1.51	6.04 kA							
	C	6.10 MVA	2.54 kA	-176.08	5.99 kA							
	A	0.02 MVA	0.01 kA	-30.09	0.02 kA							
Linha 4	B	0.54 MVA	0.23 kA	9.90	0.53 kA							
	C	0.56 MVA	0.23 kA	-171.69	0.55 kA							
	A	0.02 MVA	0.01 kA	-30.09	0.02 kA							
Linha 5	B	0.54 MVA	0.23 kA	9.90	0.53 kA							
	C	0.56 MVA	0.23 kA	-171.69	0.55 kA							
	A	0.02 MVA	0.01 kA	-30.12	0.02 kA							
Linha 6	B	0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA							
	C	0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA							
	A	0.02 MVA	0.01 kA	-30.12	0.02 kA							
Linha 7	B	0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA							
	C	0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA							
	A	0.41 MVA	0.17 kA	-100.95	0.40 kA							
Linha 8	B	11.40 MVA	4.74 kA	10.47	11.20 kA							
	C	11.25 MVA	4.68 kA	-171.48	11.06 kA							
	A	0.05 MVA	0.02 kA	-32.52	0.05 kA							
Linha 9	B	1.03 MVA	0.43 kA	7.46	1.01 kA							
	C	1.06 MVA	0.44 kA	-174.13	1.04 kA							
	A	0.02 MVA	0.01 kA	-30.09	0.02 kA							
Cargas 2 Barra 2	B	0.54 MVA	0.23 kA	9.90	0.53 kA							
	C	0.56 MVA	0.23 kA	-171.69	0.55 kA							
	A	0.60	0.55	2.38	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50
Cargas 2 Barra 2	B		0.00	-120.00	26.73 MVA	77.17 kA	-172.34	175.05 kA	77.17	26.73	0.00	
	C		0.00	120.00	26.73 MVA	77.17 kA	7.66	175.05 kA	77.17	26.73	0.00	

Grid: Grid		System Stage: Grid				Annex:				/ 2	
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
Linha 15				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Linha 16				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Linha 17				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Linha 18				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Transformador	Cargas 3			A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 2	Aux 2			A	0.41 MVA	1.18 kA	48.82	2.68 kA			
				B	10.89 MVA	31.44 kA	6.16	71.32 kA			
				C	11.20 MVA	32.32 kA	-172.42	73.32 kA			
Transformador 4	Cargas 3			A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5	Cargas 4			A	0.06 MVA	0.17 kA	2.44	0.39 kA			
				B	1.19 MVA	3.43 kA	13.69	7.78 kA			
				C	1.25 MVA	3.60 kA	-166.85	8.16 kA			
Transformador 6	Cargas 4			A	0.06 MVA	0.17 kA	2.44	0.39 kA			
				B	1.19 MVA	3.43 kA	13.69	7.78 kA			
				C	1.25 MVA	3.60 kA	-166.85	8.16 kA			
Cargas 3											
B1.0	A	0.45	0.41	0.82	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	1.50
	B		0.00	-120.00		9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA	36.15	9.39
	C		0.00	120.00		9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA	36.15	9.39

S3.0	Barra 3	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
Transformador 4	Cargas 2	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA							
		C	9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA							
Barra 3	A	0.45	0.41	0.82	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50	
	B		0.00	-120.00		9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA	36.15	9.39	0.00	
	C		0.00	120.00		9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA	36.15	9.39	0.00	
S3.0	B1.0	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
Transformador	Cargas 2	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA							
		C	9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA							
Cargas 4													
B1.0	A	0.45	0.41	0.99	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50	
	B		0.00	-120.00		12.70 MVA	48.88 kA	-175.59	122.71 kA	48.88	12.70	0.00	
	C		0.00	120.00		12.70 MVA	48.88 kA	4.41	122.71 kA	48.88	12.70	0.00	
S3.0	Barra 4	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
Transformador 6	Cargas 2	A	0.03 MVA	0.10 kA	178.35	0.26 kA							
		B	11.44 MVA	44.04 kA	3.29	110.57 kA							
		C	11.42 MVA	43.94 kA	-176.69	110.31 kA							

Grid: Grid		System Stage: Grid					Annex:					/ 3
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
M 4.3						A 0.01 MVA	0.05 kA	-10.19	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	5.88	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-174.45	6.37 kA			
M 4.4						A 0.01 MVA	0.05 kA	6.88	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	22.95	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-157.38	6.37 kA			
Barra 4	A	0.45	0.41	0.99	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50
	B		0.00	-120.00		12.70 MVA	48.88 kA	-175.59	122.71 kA	48.88	12.70	0.00
	C		0.00	120.00		12.70 MVA	48.88 kA	4.41	122.71 kA	48.88	12.70	0.00
S3.0		B1.0				A 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						B 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						C 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5		Cargas 2				A 0.03 MVA	0.10 kA	178.35	0.26 kA			
						B 11.44 MVA	44.04 kA	3.29	110.57 kA			
						C 11.42 MVA	43.94 kA	-176.69	110.31 kA			
M 4.1						A 0.01 MVA	0.05 kA	-10.19	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	5.88	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-174.45	6.37 kA			
M 4.2						A 0.01 MVA	0.05 kA	6.88	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	22.95	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-157.38	6.37 kA			
Aux 1	A	4.16	3.98	0.21	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50
	B		0.00	-120.00		3.55 MVA	1.48 kA	-174.83	3.68 kA	1.48	3.55	0.00
	C		0.00	120.00		3.55 MVA	1.48 kA	5.17	3.68 kA	1.48	3.55	0.00
Transformador 1						A 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						B 3.55 MVA	1.48 kA	5.17	3.68 kA			
						C 3.55 MVA	1.48 kA	-174.83	3.68 kA			
Aux 2	A	4.16	4.05	1.90	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.50
	B		0.00	-120.00		27.67 MVA	11.52 kA	-172.09	26.16 kA	11.52	27.67	0.00

	C	0.00	120.00		27.65 MVA	11.51 kA	7.91	26.14 kA	11.51	27.65	0.00
Transformador 2	Cargas 2			A	0.36 MVA	0.15 kA	-104.79	0.34 kA			
				B	12.00 MVA	5.00 kA	6.72	11.35 kA			
				C	11.87 MVA	4.94 kA	-174.88	11.23 kA			
Linha 13				A	0.36 MVA	0.15 kA	75.21	0.34 kA			
				B	15.67 MVA	6.53 kA	8.82	14.82 kA			
				C	15.80 MVA	6.58 kA	-169.99	14.94 kA			



## **Anexo 7 - Resultados do Caso 1: Simulação curto-circuito bifásico - Todos os geradores ligados**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito bifásico franco em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 1, ou seja, todos os geradores ligados e o reator fora de operação.

A explicação para interpretação dos resultados do relatório é semelhante à apresentada no Anexo 6.

**Tabela 7.1: Simulação curto-circuito bifásico – Todos geradores ligados Todos geradores ligados e reator desligado.**

		Curto-circuito bifásico Todos geradores ligados Reator desligado						DIgSILENT PowerFactory 13.2.343		Project: ----- Date: 1/19/2009			
-----													
Fault Locations with Feeders													
Short-Circuit Calculation according to IEC						2-Phase Short-Circuit				/ Max. Short-Circuit Currents			
-----													
Asynchronous Motors always considered					Grid Identification automatic				Short-Circuit Duration Breaker Time 0.10 s Fault Clearing Time (Ith) 1.00 s				
					Conductor Temperature Userdefined No				c-Voltage Factor Userdefined No				
-----													
-----													
Grid: Grid		System Stage: Grid						Annex: / 1					
-----													
		rtd.V.	Voltage		c-	Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	EFF	
		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[-]	
-----													
Cargas 1													
Barra 1		A	4.16	2.71	1.66	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	1.00	
		B		1.35	-178.34		28.22 MVA	11.75 kA	-173.60	27.73 kA	11.75	28.22	0.00
		C		1.35	-178.34		28.22 MVA	11.75 kA	6.40	27.73 kA	11.75	28.22	0.00
-----													
Linha 1					A	0.26 MVA	0.11 kA	101.57	0.26 kA				
					B	6.14 MVA	2.56 kA	1.51	6.03 kA				
					C	6.10 MVA	2.54 kA	-176.09	5.99 kA				
-----													
Linha 10					A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
					B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
					C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA				
-----													
Linha 11					A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.92	0.02 kA				
					B	0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA				
					C	0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA				
-----													
Linha 12					A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.92	0.02 kA				
					B	0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA				
					C	0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA				
-----													
Linha 2					A	0.26 MVA	0.11 kA	101.57	0.26 kA				
					B	6.14 MVA	2.56 kA	1.51	6.03 kA				

						C	6.10 MVA	2.54 kA	-176.09	5.99 kA				
Linha 3						A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.88	0.02 kA				
						B	0.54 MVA	0.23 kA	9.90	0.53 kA				
						C	0.56 MVA	0.23 kA	-171.69	0.55 kA				
Linha 4						A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.88	0.02 kA				
						B	0.54 MVA	0.23 kA	9.90	0.53 kA				
						C	0.56 MVA	0.23 kA	-171.69	0.55 kA				
Linha 5						A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.92	0.02 kA				
						B	0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA				
						C	0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA				
Linha 6						A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.92	0.02 kA				
						B	0.49 MVA	0.21 kA	9.86	0.48 kA				
						C	0.51 MVA	0.21 kA	-171.73	0.50 kA				
Linha 7						A	0.41 MVA	0.17 kA	-100.52	0.40 kA				
						B	11.39 MVA	4.74 kA	10.47	11.20 kA				
						C	11.25 MVA	4.69 kA	-171.48	11.06 kA				
Linha 8						A	0.05 MVA	0.02 kA	-32.32	0.05 kA				
						B	1.03 MVA	0.43 kA	7.46	1.01 kA				
						C	1.06 MVA	0.44 kA	-174.13	1.04 kA				
Linha 9						A	0.02 MVA	0.01 kA	-29.88	0.02 kA				
						B	0.54 MVA	0.23 kA	9.90	0.53 kA				
						C	0.56 MVA	0.23 kA	-171.69	0.55 kA				
Cargas 2														
Barra 2	A	0.60	0.37	2.38	1.05		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.00	
	B		0.18	-177.62			26.73 MVA	77.17 kA	-172.34	175.05 kA	77.17	26.73	0.00	
	C		0.18	-177.62			26.73 MVA	77.17 kA	7.66	175.05 kA	77.17	26.73	0.00	

Grid: Grid		System Stage: Grid				Annex:				/ 2	
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
Linha 15				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Linha 16				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Linha 17				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Linha 18				A	0.12 MVA	0.36 kA	-141.19	0.82 kA			
				B	3.37 MVA	9.73 kA	7.81	22.07 kA			
				C	3.26 MVA	9.42 kA	-173.32	21.37 kA			
Transformador	Cargas 3			A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 2	Aux 2			A	0.41 MVA	1.18 kA	48.82	2.68 kA			
				B	10.89 MVA	31.44 kA	6.16	71.32 kA			
				C	11.20 MVA	32.32 kA	-172.42	73.32 kA			
Transformador 4	Cargas 3			A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5	Cargas 4			A	0.06 MVA	0.17 kA	2.44	0.39 kA			
				B	1.19 MVA	3.43 kA	13.69	7.78 kA			
				C	1.25 MVA	3.60 kA	-166.85	8.16 kA			
Transformador 6	Cargas 4			A	0.06 MVA	0.17 kA	2.44	0.39 kA			
				B	1.19 MVA	3.43 kA	13.69	7.78 kA			
				C	1.25 MVA	3.60 kA	-166.85	8.16 kA			
Cargas 3											
B1.0	A	0.45	0.27	0.82	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	1.00
	B		0.14	-179.18		9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA	36.15	9.39
	C		0.14	-179.18		9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA	36.15	9.39

S3.0	Barra 3	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
Transformador 4	Cargas 2	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA							
		C	9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA							
Barra 3	A	0.45	0.27	0.82	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.00	
	B		0.14	-179.18		9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA	36.15	9.39	0.00	
	C		0.14	-179.18		9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA	36.15	9.39	0.00	
S3.0	B1.0	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
Transformador	Cargas 2	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	9.39 MVA	36.15 kA	2.68	93.99 kA							
		C	9.39 MVA	36.15 kA	-177.32	93.99 kA							
Cargas 4													
B1.0	A	0.45	0.27	0.99	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.00	
	B		0.14	-179.01		12.70 MVA	48.88 kA	-175.59	122.71 kA	48.88	12.70	0.00	
	C		0.14	-179.01		12.70 MVA	48.88 kA	4.41	122.71 kA	48.88	12.70	0.00	
S3.0	Barra 4	A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
		C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA							
Transformador 6	Cargas 2	A	0.03 MVA	0.10 kA	178.35	0.26 kA							
		B	11.44 MVA	44.04 kA	3.29	110.57 kA							
		C	11.42 MVA	43.94 kA	-176.69	110.31 kA							

Grid: Grid		System Stage: Grid					Annex:					/ 3
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
M 4.3						A 0.01 MVA	0.05 kA	-10.19	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	5.88	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-174.45	6.37 kA			
M 4.4						A 0.01 MVA	0.05 kA	6.89	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	22.95	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-157.38	6.37 kA			
Barra 4	A	0.45	0.27	0.99	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.00
	B		0.14	-179.01		12.70 MVA	48.88 kA	-175.59	122.71 kA	48.88	12.70	0.00
	C		0.14	-179.01		12.70 MVA	48.88 kA	4.41	122.71 kA	48.88	12.70	0.00
S3.0		B1.0				A 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						B 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						C 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5		Cargas 2				A 0.03 MVA	0.10 kA	178.35	0.26 kA			
						B 11.44 MVA	44.04 kA	3.29	110.57 kA			
						C 11.42 MVA	43.94 kA	-176.69	110.31 kA			
M 4.1						A 0.01 MVA	0.05 kA	-10.19	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	5.88	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-174.45	6.37 kA			
M 4.2						A 0.01 MVA	0.05 kA	6.89	0.13 kA			
						B 0.65 MVA	2.49 kA	22.95	6.24 kA			
						C 0.66 MVA	2.54 kA	-157.38	6.37 kA			
Aux 1	A	4.16	2.65	0.21	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.00
	B		1.33	-179.79		3.55 MVA	1.48 kA	-174.83	3.68 kA	1.48	3.55	0.00
	C		1.33	-179.79		3.55 MVA	1.48 kA	5.17	3.68 kA	1.48	3.55	0.00
Transformador 1						A 0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						B 3.55 MVA	1.48 kA	5.17	3.68 kA			
						C 3.55 MVA	1.48 kA	-174.83	3.68 kA			
Aux 2	A	4.16	2.70	1.91	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.00
	B		1.35	-178.09		27.66 MVA	11.52 kA	-172.09	26.15 kA	11.52	27.66	0.00

	C	1.35	-178.09		27.66 MVA	11.52 kA	7.91	26.15 kA	11.52	27.66	0.00
Transformador 2	Cargas 2			A	0.36 MVA	0.15 kA	-104.26	0.34 kA			
				B	12.00 MVA	5.00 kA	6.72	11.35 kA			
				C	11.88 MVA	4.94 kA	-174.88	11.23 kA			
Linha 13				A	0.36 MVA	0.15 kA	75.74	0.34 kA			
				B	15.66 MVA	6.52 kA	8.82	14.81 kA			
				C	15.81 MVA	6.58 kA	-169.99	14.95 kA			



## **Anexo 8 - Resultados do Caso 1: Simulação curto-circuito monofásico – Todos os geradores ligados**



O relatório a seguir mostra os resultados do cálculo de curto-circuito fase-terra franco em todas as barras do sistema elétrico, considerando o Caso 1, ou seja, todos os geradores ligados e o reator fora de operação.

A explicação para interpretação dos resultados do relatório é semelhante à apresentada no Anexo 6.

**Tabela 8.1: Simulação curto-circuito monofásico – Todos geradores ligados Todos geradores ligados e reator desligado.**

		Curto-circuito monofásico						DiGSILENT		Project:			
		Todos geradores ligados						PowerFactory		-----			
		Reator desligado						13.2.343		Date: 1/19/2009			
-----													
Fault Locations with Feeders													
Short-Circuit Calculation according to IEC						Single Phase to Ground / Max. Short-Circuit Currents							
Asynchronous Motors						Grid Identification				Short-Circuit Duration			
always considered						automatic				Breaker Time 0.10 s			
										Fault Clearing Time (Ith) 1.00 s			
						Conductor Temperature				c-Voltage Factor			
						Userdefined No				Userdefined No			
-----													
Grid: Grid		System Stage: Grid								Annex:		/ 1	
-----													
		rtd.V.	Voltage		c-	Sk"	Ik"		ip	Ib	Sb	EFF	
		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[-]	
-----													
Cargas 1													
Barra 1		A	4.16	0.00	0.00	1.10	0.05 MVA	0.02 kA	-0.10	0.05 kA	0.02	0.05 0.00	
		B		4.57	-150.04		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00 1.73	
		C		4.58	149.96		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00 1.73	
Linha 1						A	0.02 MVA	0.01 kA	178.32	0.02 kA			
						B	0.01 MVA	0.00 kA	179.97	0.01 kA			
						C	0.01 MVA	0.00 kA	-175.59	0.01 kA			
Linha 10						A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
						C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Linha 11						A	0.00 MVA	0.00 kA	-177.52	0.00 kA			
						B	0.00 MVA	0.00 kA	0.43	0.00 kA			
						C	0.00 MVA	0.00 kA	5.24	0.00 kA			
Linha 12						A	0.00 MVA	0.00 kA	-177.52	0.00 kA			
						B	0.00 MVA	0.00 kA	0.43	0.00 kA			
						C	0.00 MVA	0.00 kA	5.24	0.00 kA			
Linha 2						A	0.01 MVA	0.01 kA	178.06	0.01 kA			

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Grid: Grid		System Stage: Grid				Annex:				/ 2	
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
Linha 15				A	0.00 MVA	0.00 kA	134.89	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	136.80	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	133.65	0.00 kA			
Linha 16				A	0.00 MVA	0.00 kA	134.89	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	136.80	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	133.65	0.00 kA			
Linha 17				A	0.00 MVA	0.00 kA	134.89	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	136.80	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	133.65	0.00 kA			
Linha 18				A	0.00 MVA	0.00 kA	134.89	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	136.80	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	133.65	0.00 kA			
Transformador	Cargas 3			A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 2	Aux 2			A	0.00 MVA	0.00 kA	134.35	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	-43.75	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	-47.95	0.00 kA			
Transformador 4	Cargas 3			A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5	Cargas 4			A	0.00 MVA	0.00 kA	141.02	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	-40.17	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	-38.54	0.00 kA			
Transformador 6	Cargas 4			A	0.00 MVA	0.00 kA	141.02	0.00 kA			
				B	0.00 MVA	0.00 kA	-40.17	0.00 kA			
				C	0.00 MVA	0.00 kA	-38.54	0.00 kA			
Cargas 3											
B1.0	A	0.45	0.00	0.00	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00
	B		0.47	-150.00		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	1.73
	C		0.47	150.00		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	1.73

S3.0	Barra 3	A	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		B	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		C	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
Transformador 4	Cargas 2	A	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		B	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		C	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
Barra 3	A	0.45	0.00	0.00	1.05	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	0.00
	B		0.47	-150.00		0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	1.73
	C		0.47	150.00		0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	1.73
S3.0	B1.0	A	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		B	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		C	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
Transformador	Cargas 2	A	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		B	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		C	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
Cargas 4												
B1.0	A	0.45	0.00	0.00	1.05	0.00	MVA	0.00	kA	-44.78	0.00	0.00
	B		0.47	-150.00		0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	1.73
	C		0.47	150.00		0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	1.73
S3.0	Barra 4	A	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		B	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
		C	0.00	MVA	0.00	kA	0.00	0.00	kA			
Transformador 6	Cargas 2	A	0.00	MVA	0.00	kA	134.19	0.00	kA			
		B	0.00	MVA	0.00	kA	-46.03	0.00	kA			
		C	0.00	MVA	0.00	kA	-46.08	0.00	kA			

Grid: Grid		System Stage: Grid					Annex:				/ 3	
		rtd.V. [kV]	Voltage [kV]	c- [deg]	Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
M 4.3					A	0.00 MVA	0.00 kA	135.31	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	134.77	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	134.81	0.00 kA			
M 4.4					A	0.00 MVA	0.00 kA	138.22	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	132.80	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	132.93	0.00 kA			
Barra 4	A	0.45	0.00	0.00	1.05	0.00 MVA	0.00 kA	-44.78	0.00 kA	0.00	0.00	0.00
	B		0.47	-150.00		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.73
	C		0.47	150.00		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.73
S3.0	B1.0				A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Transformador 5	Cargas 2				A	0.00 MVA	0.00 kA	134.19	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	-46.03	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	-46.08	0.00 kA			
M 4.1					A	0.00 MVA	0.00 kA	135.31	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	134.77	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	134.81	0.00 kA			
M 4.2					A	0.00 MVA	0.00 kA	138.22	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	132.80	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	132.93	0.00 kA			
Aux 1	A	4.16	0.00	0.00	1.10	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	0.00
	B		4.58	-150.00		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.73
	C		4.58	150.00		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.73
Transformador 1					A	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
					B	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
					C	0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA			
Aux 2	A	4.16	0.00	0.00	1.10	0.05 MVA	0.02 kA	-0.10	0.04 kA	0.02	0.05	0.00
	B		4.57	-150.04		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.73

	C	4.58	149.96		0.00 MVA	0.00 kA	0.00	0.00 kA	0.00	0.00	1.73
Transformador 2	Cargas 2			A	0.01 MVA	0.01 kA	177.91	0.01 kA			
				B	0.01 MVA	0.00 kA	-4.52	0.01 kA			
				C	0.01 MVA	0.00 kA	0.28	0.01 kA			
Linha 13				A	0.03 MVA	0.01 kA	-179.30	0.03 kA			
				B	0.01 MVA	0.00 kA	175.48	0.01 kA			
				C	0.01 MVA	0.00 kA	-179.72	0.01 kA			