

ANÁLISE DO REGIME ESTÁTICO EM CONDIÇÃO ANORMAL

6.1. INTRODUÇÃO

Na análise do regime estático em condição anormal são tipicamente realizados os estudos de curto-circuito e outras condições de desequilíbrio com a finalidade de calcular tensões e correntes num sistema durante uma condição de defeito. Um defeito do tipo curto-circuito acontece sempre que a condição de isolamento entre fases ou entre fase e terra é deteriorada. Isso pode ser causado pela ionização do ar em torno da cadeia de isoladores, devido por exemplo, a uma sobretensão causada por uma descarga atmosférica, ou a queda de uma linha de transmissão devido à ação do vento, que coloca as fases em contato direto com a terra.

Um curto-circuito produz corrente elevada, geralmente muito acima dos valores nominais dos componentes do sistema, que podem ser danificados se a proteção não atuar imediatamente. É importante isolar uma seção sob curto-circuito, tão rápido quanto possível, de modo a minimizar o super aquecimento do equipamento e/ou o surgimento de oscilações mecânicas não controladas nos geradores. Portanto, uma das principais finalidades do estudo de curto-circuito é determinar a capacidade de interrupção necessária para os disjuntores do sistema.

Os valores de corrente e tensão de curto-circuito determinados num estudo, são usados para o ajuste e calibração dos relés, dimensionamento dos disjuntores usados para isolar a parte do sistema onde ocorreu o defeito e definição das características dos equipamentos componentes do sistema de potência. A resposta do conjunto relé/disjuntor acontece numa escala de tempo de uns poucos ciclos ($1 \text{ ciclo} = 1/60 \text{ segundo}$). Portanto, os parâmetros subtransitórios e transitórios das máquinas síncronas devem ser usados.

Um estudo de curto-circuito envolve a simulação dos tipos de defeito mostrado na Tabela 6.1, em diferentes barras do sistema com a rede completa (condição mais severa),

podendo ser repetido para diferentes configurações do sistema com a rede alterada (linhas abertas ou fora de serviço). O cálculo do curto-circuito pode ser determinado a partir das condições da rede em situação de pré-defeito, solucionada através dos estudos de fluxo de potência. Na ausência desses estudos é usual admitir o sistema operando sem carga (sem corrente), com tensões de todos os barramentos iguais a unidade, inclusive as tensões internas das máquinas. Trata-se de uma aproximação razoável, pois normalmente a rede opera com tensões próximas à nominal e as correntes no sistema em condições normais de carga são bem inferiores às de curto-circuito.

Tabela 6.1 – Tipos de defeitos

Defeito	Tipo
Fase-Terra	Monofásico
Fase-Fase-Terra	Bifásico-Terra
Fase-Fase-Fase-Terra	Trifásico-Terra
Fase-Fase	Bifásico
Fase-Fase-Fase	Trifásico

Este capítulo tem como objetivo utilizar os sistemas-teste elaborados em aplicações realistas, abordando problemas típicos estudados nas empresas sob o enfoque de regime estático em condição anormal.

6.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O programa de curto-circuito utilizado para análise dos sistemas-teste foi o ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) [24], que é voltado para realização de estudos de análise de defeitos em sistemas elétricos, permitindo a modelagem fiel do sistema (carregamento pré-defeito, representação da capacitância das linhas e de cargas) e simulação de diversos tipos de defeito.

O programa possui vários outros recursos que permitem a realização de estudos mais específicos e avançados de curto-circuito, podendo-se destacar a ferramenta de “evolução do nível de curto”, que realiza a comparação entre configurações de dois anos distintos do

mesmo sistema, além de vários formatos e tipos de relatórios para apresentação de resultados.

6.3. PROCEDIMENTOS

Os arquivos para estudos de curtos-circuitos mantêm correspondência com os arquivos de fluxo de potência apenas no que diz respeito à topologia e os parâmetros das linhas e transformadores. Adicionalmente a estas informações, são necessárias a inclusão da rede de seqüência zero, as indutâncias mútuas das linhas paralelas e as reatâncias subtransitória dos geradores.

Os transformadores elevadores das usinas foram conectados em ligação Delta – Estrela com neutro aterrado. Esta ligação permite a circulação da corrente de seqüência positiva e bloqueia a circulação da corrente de seqüência zero. Na Figura 6.1 é mostrada a representação utilizada nos casos de fluxo de potência para os transformadores elevadores de usinas, e na Figura 6.2 a representação desse mesmo transformador utilizada nos casos de curto-circuito, tomando como exemplo ilustrativo a UHE de Luiz Carlos Barreto.

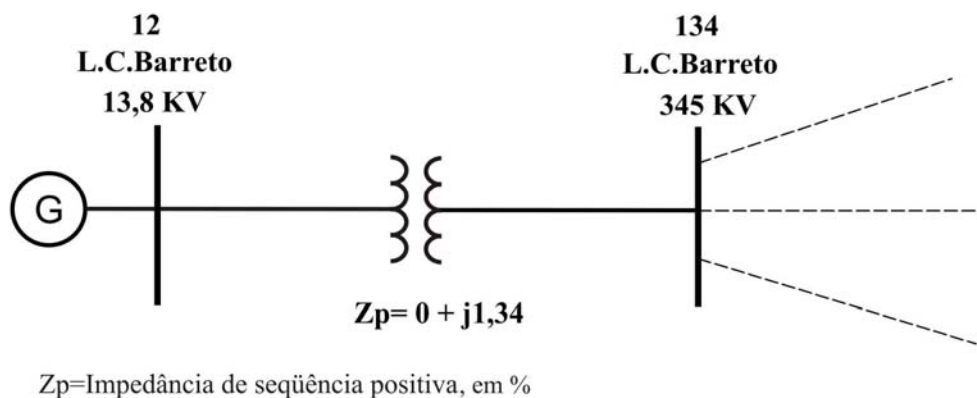


Figura 6.1 – Representação de transformador elevador de usina no fluxo de potência

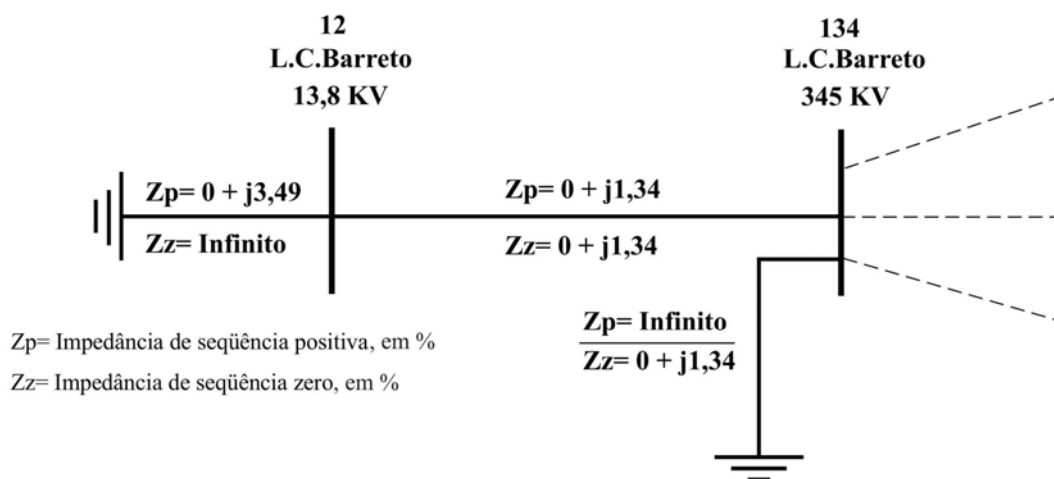


Figura 6.2 – Representação de transformador elevador de usina no curto-circuito

Os transformadores de três enrolamentos foram conectados em ligação Estrela com neutro aterrado – Estrela com neutro aterrado. A Figura 6.3 apresenta um exemplo ilustrativo, utilizando o transformador de 500/345/13,8kV de Adrianópolis, mostrando a representação utilizada nos casos de curto-circuito para os transformadores de três enrolamentos, onde são representadas apenas as barras do lado do primário e do secundário, o terciário foi omitido.

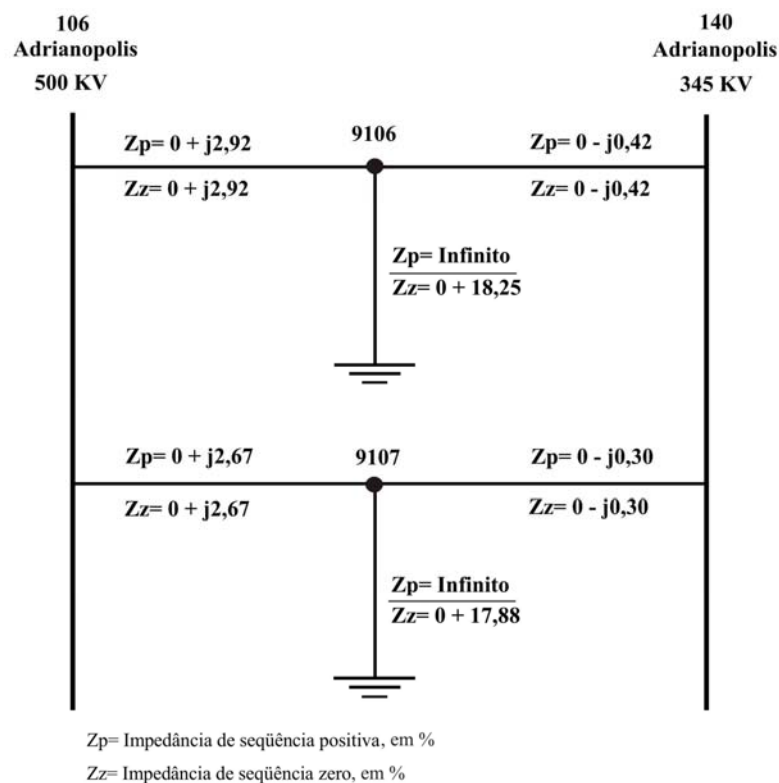


Figura 6.3 – Representação de transformador de três enrolamentos

6.3.1. Localização do Curto-Circuito

Num sistema elétrico de potência, qualquer elemento está sujeito a curtos-circuitos. Em linhas gerais, um sistema elétrico de potência pode ser visto como um conjunto contendo geração, transmissão e distribuição. Seus principais elementos são: os geradores que geram potência ativa e reativa, os transformadores que acoplam sistemas de corrente alternada de tensões diferentes e as linhas de transmissão que conectam subestações e transportam a potência ativa e reativa fornecidas pelos geradores.

Porém os dois pontos que estão mais sujeitos a curtos-circuitos são:

- Os barramentos, por serem os pontos aonde chegam e saem todas as linhas de uma subestação, diferindo nos tipos de arranjos existentes. Nesses barramentos ocorrem as manobras operativas, de manutenção ou não, que alteram a configuração do sistema.
- As linhas de transmissão, por possuírem grandes extensões e atravessarem regiões.

Ocorrendo um curto-circuito em uma linha de transmissão, entre duas subestações (meio da linha), a proteção irá atuar desligando a linha. O que diferencia um defeito do outro, em relação à localização do curto, é basicamente o valor das correntes de contribuição de curto-circuito que vem de cada um dos lados da linha em direção ao ponto de curto.

6.3.2. Tipos de Curto-Circuito

Em ordem de gravidade, em geral, os curtos-circuitos podem ser divididos nos seguintes tipos:

- curto-circuito trifásico;
- curto-circuito bifásico (aterrado ou não);
- curto-circuito monofásico.

As estatísticas feitas pelas empresas de energia elétrica sobre ocorrências em seus sistemas mostram que o tipo de curto-circuito monofásico é o que ocorre com maior

freqüência [25, 42]. Existem ainda os denominados curtos-circuitos evolutivos que espelham a ocorrência temporal de uma combinação dos tipos supracitados.

6.3.3. Duração do Curto-Circuito

O tempo de isolamento do elemento em curto é calculado considerando o tempo de abertura do disjuntor, pela atuação da proteção, acrescido do tempo de atuação do relé. Na ausência de informações para a realização de estudos, a referência [11] apresenta os seguintes tempos típicos de isolamento do curto conforme o nível de tensão que estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Tempos típicos de eliminação de defeitos

Tensão (kV)	Tempo de Eliminação (milisegundos)	
	Sem falha no Disjuntor	Com falha no Disjuntor
750	80	200
500	100	250
440	100	250
345	100	400
230	150	500
138	150	500
69	800	1000

6.3.4. Sensibilidade à Localização do Defeito

O curto-circuito tem efeito local. As contribuições mais significativas ocorrem até 3 ou 4 ramos (trechos ou vizinhanças) adiante do ponto de defeito. A partir daí, o valor da contribuição começa a ficar pequena, se aproximando do valor da corrente de carga.

6.3.5. Sensibilidade ao Tipo de Defeito

Um sistema elétrico deve possuir um sistema de proteção com sensibilidade adequada para detectar defeitos e velocidade para desligar o elemento defeituoso a tempo de evitar danos térmicos aos equipamentos, além de outras consequências indesejadas como prejuízo à qualidade de energia fornecida e à segurança dos consumidores.

Um sistema de proteção com tal requisito envolve entre outras coisas, o uso de sistemas de comunicação através de fibra ótica, o uso de relés microprocessados com elementos múltiplos, o uso de terminais remotos para aquisição de dados do sistema SCADA, provendo informações do estado operativo do sistema.

A distinção com relação ao tipo de defeito é feita através de zonas de proteção, onde os relés são ajustados para vários níveis de sensibilidade com temporizações maiores ou menores. Portanto, os dispositivos de proteção devem ser ajustados com sensibilidade suficiente para detectar defeito do tipo monofásico, bifásico ou trifásico no alcance necessário.

6.4. ESTUDOS DE PROBLEMAS TÍPICOS

Nesta seção foram feitas as seguintes análises, com a utilização dos sistemas-teste elaborados:

- *Comparação dos níveis de curto-circuito;*
- *Verificação da capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito;*
- *Cálculo do reator de curto-circuito para uso nas simulações de estabilidade;*
- *Curto-circuito em linhas paralelas;*
- *Comparação entre curto bifásico e curto bifásico-terra*

6.4.1. Comparação dos Níveis de Curto-Circuito

Neste estudo o objetivo é comparar os níveis de curto-circuito envolvendo os tipos de curto trifásico e monofásico, demonstrando que o curto-circuito trifásico nem sempre é o mais severo. Em alguns casos, como aqueles em barras de usinas ou próxima delas, o curto monofásico possui um valor mais alto que o curto trifásico. A importância disso está no dimensionamento de disjuntores, mostrando que para a definição da potência de curto deve-se analisar tanto o curto trifásico quanto o monofásico.

Para demonstrar esta situação, foi utilizado o **sistema-teste de 107 barras**, que possui um número maior de elementos, fornecendo valores mais próximos dos sistemas reais. A Tabela 6.3 apresenta os valores obtidos para este sistema na simulação de níveis de curto-circuito monofásico e trifásico.

Tabela 6.3 – Níveis de curto-circuito do sistema-teste 107 barras

BARRA	NOME	TENSÃO	CURTO TRIFÁSICO		CURTO MONOFÁSICO		FT>3F?
			POTÊNCIA		POTÊNCIA		
			MÓDULO	ÂNGULO	MÓDULO	ÂNGULO	
			MVA	GRAU	MVA	GRAU	
12	UHE L.C.BARRETO	13,8	6.397,81	-89,2	7.999,40	-89,3	25,0
16	UHE FURNAS	13,8	5.787,14	-89,0	6.935,52	-89,1	19,8
18	UHE ITUMBIARA	13,8	11.787,13	-89,3	14.160,65	-89,4	20,1
20	UHE MARIMBONDO	13,8	8.303,40	-89,4	10.040,23	-89,4	20,9
21	UHE MANSO	13,8	501,76	-86,4	634,12	-86,9	26,4
22	UHE M.MORAES	13,8	1.783,34	-89,7	2.277,83	-89,7	27,7
35	UHE CORUMBÁ	13,8	2.497,49	-89,2	2.910,78	-89,2	16,5
48	CS IBIÚNA	13,8	7.217,57	-88,9	8.782,00	-89,1	21,7
86	IBIÚNA	345	7.423,67	-88,1	8.914,60	-88,4	20,1
100	MARIMBONDO	500	10.509,88	-88,0	11.843,32	-88,2	12,7
101	ARARAQUARA	500	6.854,59	-87,2	4.119,89	-84,3	
102	POÇOS DE CALDAS	500	4.939,32	-87,4	3.821,97	-85,3	
103	CAMPINAS	500	6.277,15	-87,0	4.795,10	-84,2	
104	CACHOEIRA PAULISTA	500	4.105,28	-86,8	3.333,10	-85,4	
106	ADRIANÓPOLIS	500	3.290,13	-86,6	2.754,86	-85,2	
120	POÇOS DE CALDAS	345	5.942,02	-86,8	4.688,37	-83,9	
122	IBIÚNA	500	7.555,83	-87,5	9.496,10	-87,7	25,7
123	CAMPINAS	345	3.523,00	-87,4	3.197,92	-86,3	
126	GUARULHOS	345	5.478,15	-87,2	3.260,85	-80,3	
131	M. DE MORAES	345	6.070,48	-86,9	5.557,21	-85,8	
134	L.C. BARRETO	345	8.754,01	-87,9	10.417,64	-87,8	19,0
136	FURNAS	345	7.146,80	-87,3	8.266,68	-87,3	15,7
138	ITUTINGA	345	3.092,19	-85,9	1.755,91	-77,9	
140	ADRIANÓPOLIS	345	2.930,87	-86,7	2.665,37	-85,7	
210	ITUMBIARA	500	13.028,44	-88,5	15.923,86	-88,4	22,2
213	MARIMBONDO	345	4.558,53	-87,9	4.518,01	-88,2	
216	PORTO COLÔMBIA	345	5.416,75	-86,8	3.884,95	-85,1	
217	ITUMBIARA	345	8.790,55	-88,5	10.028,13	-88,5	14,1
218	BANDEIRANTES	345	3.932,92	-86,4	2.055,25	-83,5	
219	BRÁSÍLIA SUL	345	4.412,78	-86,8	3.617,76	-84,8	
220	CORUMBÁ	345	4.104,70	-86,8	4.329,16	-86,5	5,5
225	ITUMBIARA	230	4.524,69	-89,0	5.133,72	-89,1	13,5
228	BRÁSÍLIA SUL	230	1.705,31	-88,8	1.815,37	-88,1	6,5
231	RIO VERDE	230	1.271,39	-83,6	670,56	-74,1	
233	SAMAMBAIA	500	5.055,24	-86,9	3.988,81	-85,0	
234	SAMAMBAIA	345	4.725,23	-87,0	3.977,17	-85,4	
300	EMBORCAÇÃO	13,8	6.831,15	-89,3	8.193,97	-89,4	20,0
301	JAGUARA	13,8	4.126,89	-89,6	3.513,66	-89,2	
302	NOVA PONTE	13,8	4.372,75	-89,3	5.191,25	-89,3	18,7
303	SÃO SIMÃO	13,8	9.537,31	-89,4	7.602,71	-89,1	
305	VOLTA GRANDE	13,8	3.753,98	-89,0	4.362,17	-89,1	16,2
320	EMBORCAÇÃO	500	8.949,01	-88,1	10.315,50	-87,9	15,3
325	JAGUARA	500	8.412,78	-88,2	8.724,74	-87,3	3,7
326	JAGUARA	345	8.247,29	-87,9	8.830,93	-86,8	7,1
360	NOVA PONTE	500	7.577,26	-87,9	8.441,20	-87,5	11,4
370	SÃO SIMÃO	500	10.454,67	-88,4	11.090,73	-88,0	6,1
396	VOLTA GRANDE	345	6.365,30	-87,2	7.016,91	-87,1	10,2
500	ÁGUA VERMELHA	13,8	6.979,19	-89,1	8.586,45	-89,2	23,0
535	ÁGUA VERMELHA	500	8.586,64	-88,1	10.359,32	-88,2	20,6
536	ÁGUA VERMELHA	440	3.467,14	-89,2	4.250,77	-89,3	22,6
800	G.B.MUNHOZ	13,8	10.622,90	-89,6	6.975,14	-89,0	
808	SALTO CAXIAS	13,8	9.447,66	-89,3	7.770,31	-89,0	
810	SALTO SEGREDO	13,8	12.302,98	-89,5	9.170,15	-89,2	
814	BATEIAS	230	5.262,39	-87,7	6.044,90	-87,4	14,9
824	G.B.MUNHOZ	500	12.987,49	-87,8	13.160,24	-87,0	1,3

BARRA	NOME	TENSÃO	CURTO TRIFÁSICO		CURTO MONOFÁSICO		FT>3F?
			POTÊNCIA		POTÊNCIA		
			MÓDULO	ÂNGULO	MÓDULO	ÂNGULO	
			MVA	GRAU	MVA	GRAU	
834	SÃO MATEUS	230	1.373,70	-80,4	938,47	-76,8	
839	CASCADEL	230	4.031,96	-86,2	3.461,75	-81,8	
840	CASCADEL	138	1.720,60	-88,4	1.740,03	-86,6	1,1
848	FOZ DO CHOPIM	138	1.083,75	-88,4	1.123,21	-88,1	3,6
856	SEGREDO	500	14.289,60	-88,3	15.029,75	-87,8	5,2
895	BATEIAS	500	7.867,48	-86,5	7.900,66	-85,8	0,4
896	CASCADEL OESTE	500	6.269,04	-87,1	6.114,06	-85,4	
897	SALTO CAXIAS	500	9.402,15	-88,1	10.520,46	-87,9	11,9
898	FOZ DO CHOPIM	230	3.478,54	-85,0	3.305,54	-83,5	
904	ITÁ	13,8	10.268,79	-89,4	7.740,23	-88,9	
915	MACHADINHO	13,8	8.888,37	-89,6	5.518,68	-88,7	
919	SALTO OSÓRIO	13,8	4.865,37	-88,3	4.130,83	-88,6	
925	SALTO SANTIAGO	13,8	11.089,00	-89,7	7.435,74	-88,9	
933	AREIA	500	13.565,13	-87,8	13.775,87	-86,9	1,6
934	AREIA	230	5.938,30	-87,9	5.897,11	-87,6	
938	BLUMENAU	500	5.381,24	-85,9	6.065,86	-86,0	12,7
939	BLUMENAU	230	4.564,21	-86,3	5.195,19	-86,5	13,8
955	CAMPOS NOVOS	500	9.462,01	-87,3	7.785,87	-83,3	
959	CURITIBA	500	7.602,12	-86,4	7.996,44	-85,7	5,2
960	CURITIBA	230	5.453,55	-86,9	5.826,51	-86,6	6,8
964	CAXIAS	500	5.497,90	-87,0	5.904,03	-86,1	7,4
965	CAXIAS	230	4.114,14	-87,7	4.779,65	-87,3	16,2
976	GRAVATAÍ	500	4.537,97	-86,7	5.239,37	-86,6	15,5
995	ITÁ	500	10.780,12	-88,1	11.404,47	-87,5	5,8
1015	JOINVILLE	230	2.771,08	-82,5	2.043,88	-75,5	
1030	MACHADINHO	500	9.976,86	-87,9	9.591,17	-86,6	
1047	SALTO OSÓRIO	230	4.332,27	-86,3	4.945,32	-86,7	14,2
1060	SALTO SANTIAGO	500	14.103,07	-88,3	14.048,25	-87,1	
1210	GRAVATAI	230	3.787,50	-87,2	4.590,81	-87,3	21,2
1503	ITAJUBÁ	500	3.946,65	-86,9	3.437,41	-86,4	
1504	ITAJUBÁ	138	1.388,61	-88,9	1.812,24	-88,9	30,5
2458	CASCADEL	230	4.380,45	-87,2	4.793,38	-86,5	9,4
4501	BARRA DO PEIXE	230	956,83	-83,3	544,61	-75,7	
4521	ITIQUEIRA	230	673,36	-83,0	770,25	-83,5	14,4
4522	RONDONÓPOLIS	230	1.063,98	-84,1	1.221,59	-83,9	14,8
4523	ITIQUEIRA	13,8	430,26	-87,6	507,27	-87,9	17,9
4530	COXIPÓ-CE	12	460,33	-89,2	488,13	-89,2	6,0
4532	COXIPÓ	230	1.346,28	-87,6	1.615,30	-87,5	20,0
4533	COXIPÓ	138	1.442,72	-88,1	1.910,81	-88,2	32,4
4542	NOBRES	230	699,43	-84,8	677,40	-82,1	
4552	NOVA MUTUM	230	394,30	-82,9	233,28	-78,4	
4562	SORRISO	230	253,05	-82,1	144,96	-77,8	
4572	LUCAS RIO VERDE	230	295,40	-82,3	170,84	-78,0	
4582	SINOP	230	212,77	-81,8	120,80	-77,7	
4592	MANSO	230	569,65	-84,9	753,21	-85,4	32,2
4596	UTE CUIABÁ-GÁS	13,8	1.763,86	-88,9	1.771,04	-89,2	0,4
4623	RONDONÓPOLIS	138	811,11	-84,6	1.024,55	-84,9	26,3
4703	CUIABÁ	138	1.232,87	-85,2	1.165,63	-82,5	
4804	GUAPORÉ	13,8	705,52	-88,4	882,09	-88,7	25,0
4805	GUAPORÉ	138	649,35	-86,3	797,47	-86,7	22,8
4807	JAURU	138	686,63	-86,6	746,30	-86,4	8,7
4862	JAURU	230	726,26	-86,3	726,19	-86,2	

FT = Curto fase-terra 3F = Curto trifásico

Na última coluna da Tabela 6.3 foi feita uma comparação entre os tipos de curto, indicando percentualmente aqueles onde o valor do curto monofásico ficou maior que o trifásico, chegando por exemplo a 32,4% na barra de 138kV de Coxipó, o que demonstra que em certas situações o curto monofásico é mais severo.

Os níveis de curto calculados na Tabela 6.3 referem-se à potência de curto-circuito. Esta grandeza é usada para definir a severidade do curto, e é indicada nos dispositivos de corte de corrente de defeito.

6.4.2. Verificação da Capacidade de Interrupção de Corrente de Curto-Circuito

O objetivo deste estudo é verificar situações onde a capacidade de interrupção de corrente de curto-circuito dos disjuntores possa estar superada ou próxima da superação. Para realizar esse teste, foi considerado que todos os disjuntores do sistema têm um valor nominal de interrupção de corrente igual a 15kA.

A partir dos valores da Tabela 6.3, obtidos na simulação do item 6.4.1, foi calculado o valor da corrente de curto, que é a grandeza utilizada no dimensionamento de disjuntores. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Potência e corrente de curto-circuito do sistema-teste 107 barras

BARRA	NOME	TENSÃO kV	CURTO TRIFÁSICO			CURTO MONOFÁSICO			MAX kA	DISJ kA	VF
			POTÊNCIA		CORREN	POTÊNCIA		CORREN			
			MÓD	ÂNG	MÓD	MÓD	ÂNG	MÓD			
			MVA	GRAU	kA	MVA	GRAU	kA			
12	UHE L.C.BARRETO	13,8	6.397,81	-89,2	267,665	7.999,40	-89,3	334,671	334,7	x	
16	UHE FURNAS	13,8	5.787,14	-89,0	242,116	6.935,52	-89,1	290,161	290,2	x	
18	UHE ITUMBIARA	13,8	11.787,13	-89,3	493,138	14.160,65	-89,4	592,439	592,4	x	
20	UHE MARIMBONDO	13,8	8.303,40	-89,4	347,389	10.040,23	-89,4	420,053	420,1	x	
21	UHE MANSO	13,8	501,76	-86,4	20,992	634,12	-86,9	26,530	26,5	x	
22	UHE M.MORAES	13,8	1.783,34	-89,7	74,610	2.277,83	-89,7	95,298	95,3	x	
35	UHE CORUMBÁ	13,8	2.497,49	-89,2	104,487	2.910,78	-89,2	121,778	121,8	x	
48	CS IBIÚNA	13,8	7.217,57	-88,9	301,961	8.782,00	-89,1	367,412	367,4	x	
86	IBIÚNA	345	7.423,67	-88,1	12,423	8.914,60	-88,4	14,918	14,9	15,0	VF
100	MARIMBONDO	500	10.509,88	-88,0	12,136	11.843,32	-88,2	13,675	13,7	15,0	VF
101	ARARAQUARA	500	6.854,59	-87,2	7,915	4.119,89	-84,3	4,757	7,9	15,0	
102	POÇOS DE CALDAS	500	4.939,32	-87,4	5,703	3.821,97	-85,3	4,413	5,7	15,0	
103	CAMPINAS	500	6.277,15	-87,0	7,248	4.795,10	-84,2	5,537	7,2	15,0	
104	C.PAULISTA	500	4.105,28	-86,8	4,740	3.333,10	-85,4	3,849	4,7	15,0	
106	ADRIANÓPOLIS	500	3.290,13	-86,6	3,799	2.754,86	-85,2	3,181	3,8	15,0	
120	POÇOS DE CALDAS	345	5.942,02	-86,8	9,944	4.688,37	-83,9	7,846	9,9	15,0	
122	IBIÚNA	500	7.555,83	-87,5	8,725	9.496,10	-87,7	10,965	11,0	15,0	
123	CAMPINAS	345	3.523,00	-87,4	5,896	3.197,92	-86,3	5,352	5,9	15,0	
126	GUARULHOS	345	5.478,15	-87,2	9,168	3.260,85	-80,3	5,457	9,2	15,0	
131	M. DE MORAES	345	6.070,48	-86,9	10,159	5.557,21	-85,8	9,300	10,2	15,0	

BARRA	NOME	TENSÃO kV	CURTO TRIFÁSICO			CURTO MONOFÁSICO			MAX kA	DISJ kA	VF
			POTÊNCIA		CORREN	POTÊNCIA		CORREN			
			MÓD	ÂNG		MÓD	ÂNG				
			MVA	GRAU		kA	MVA				
134	L.C.BARRETO	345	8.754,01	-87,9	14,650	10.417,64	-87,8	17,434	17,4	15,0	VF
136	FURNAS	345	7.146,80	-87,3	11,960	8.266,68	-87,3	13,834	13,8	15,0	VF
138	ITUTINGA	345	3.092,19	-85,9	5,175	1.755,91	-77,9	2,938	5,2	15,0	
140	ADRIANÓPOLIS	345	2.930,87	-86,7	4,905	2.665,37	-85,7	4,460	4,9	15,0	
210	ITUMBIARA	500	13.028,44	-88,5	15,044	15.923,86	-88,4	18,387	18,4	15,0	VF
213	MARIMBONDO	345	4.558,53	-87,9	7,629	4.518,01	-88,2	7,561	7,6	15,0	
216	P.COLÔMBIA	345	5.416,75	-86,8	9,065	3.884,95	-85,1	6,501	9,1	15,0	
217	ITUMBIARA	345	8.790,55	-88,5	14,711	10.028,13	-88,5	16,782	16,8	15,0	VF
218	BANDEIRANTES	345	3.932,92	-86,4	6,582	2.055,25	-83,5	3,439	6,6	15,0	
219	BRÁSILIA SUL	345	4.412,78	-86,8	7,385	3.617,76	-84,8	6,054	7,4	15,0	
220	CORUMBÁ	345	4.104,70	-86,8	6,869	4.329,16	-86,5	7,245	7,2	15,0	
225	ITUMBIARA	230	4.524,69	-89,0	11,358	5.133,72	-89,1	12,887	12,9	15,0	
228	BRÁSILIA SUL	230	1.705,31	-88,8	4,281	1.815,37	-88,1	4,557	4,6	15,0	
231	RIO VERDE	230	1.271,39	-83,6	3,191	670,56	-74,1	1,683	3,2	15,0	
233	SAMAMBAIA	500	5.055,24	-86,9	5,837	3.988,81	-85,0	4,606	5,8	15,0	
234	SAMAMBAIA	345	4.725,23	-87,0	7,908	3.977,17	-85,4	6,656	7,9	15,0	
300	EMBORCAÇÃO	13,8	6.831,15	-89,3	285,795	8.193,97	-89,4	342,811	342,8	x	
301	JAGUARA	13,8	4.126,89	-89,6	172,657	3.513,66	-89,2	147,001	172,7	x	
302	NOVA PONTE	13,8	4.372,75	-89,3	182,943	5.191,25	-89,3	217,186	217,2	x	
303	SÃO SIMÃO	13,8	9.537,31	-89,4	399,012	7.602,71	-89,1	318,074	399,0	x	
305	VOLTA GRANDE	13,8	3.753,98	-89,0	157,055	4.362,17	-89,1	182,500	182,5	x	
320	EMBORCAÇÃO	500	8.949,01	-88,1	10,333	10.315,50	-87,9	11,911	11,9	15,0	
325	JAGUARA	500	8.412,78	-88,2	9,714	8.724,74	-87,3	10,074	10,1	15,0	
326	JAGUARA	345	8.247,29	-87,9	13,802	8.830,93	-86,8	14,778	14,8	15,0	VF
360	NOVA PONTE	500	7.577,26	-87,9	8,749	8.441,20	-87,5	9,747	9,7	15,0	
370	SÃO SIMÃO	500	10.454,67	-88,4	12,072	11.090,73	-88,0	12,806	12,8	15,0	
396	VOLTA GRANDE	345	6.365,30	-87,2	10,652	7.016,91	-87,1	11,743	11,7	15,0	
500	A.VERMELHA	13,8	6.979,19	-89,1	291,988	8.586,45	-89,2	359,231	359,2	x	
535	A.VERMELHA	500	8.586,64	-88,1	9,915	10.359,32	-88,2	11,962	12,0	15,0	
536	A.VERMELHA	440	3.467,14	-89,2	4,549	4.250,77	-89,3	5,578	5,6	15,0	
800	G.B.MUNHOZ	13,8	10.622,90	-89,6	444,430	6.975,14	-89,0	291,819	444,4	x	
808	SALTO CAXIAS	13,8	9.447,66	-89,3	395,262	7.770,31	-89,0	325,086	395,3	x	
810	SALTO SEGREDO	13,8	12.302,98	-89,5	514,719	9.170,15	-89,2	383,651	514,7	x	
814	BATEIAS	230	5.262,39	-87,7	13,210	6.044,90	-87,4	15,174	15,2	15,0	VF
824	G.B.MUNHOZ	500	12.987,49	-87,8	14,997	13.160,24	-87,0	15,196	15,2	15,0	VF
834	SÃO MATEUS	230	1.373,70	-80,4	3,448	938,47	-76,8	2,356	3,4	15,0	
839	CASCADEL	230	4.031,96	-86,2	10,121	3.461,75	-81,8	8,690	10,1	15,0	
840	CASCADEL	138	1.720,60	-88,4	7,198	1.740,03	-86,6	7,280	7,3	15,0	
848	FOZ DO CHOPIN	138	1.083,75	-88,4	4,534	1.123,21	-88,1	4,699	4,7	15,0	
856	SEGREDO	500	14.289,60	-88,3	16,500	15.029,75	-87,8	17,355	17,4	15,0	VF
895	BATEIAS	500	7.867,48	-86,5	9,085	7.900,66	-85,8	9,123	9,1	15,0	
896	CASCADEL OESTE	500	6.269,04	-87,1	7,239	6.114,06	-85,4	7,060	7,2	15,0	
897	SALTO CAXIAS	500	9.402,15	-88,1	10,857	10.520,46	-87,9	12,148	12,1	15,0	
898	FOZ DO CHOPIN	230	3.478,54	-85,0	8,732	3.305,54	-83,5	8,298	8,7	15,0	
904	ITÁ	13,8	10.268,79	-89,4	429,615	7.740,23	-88,9	323,828	429,6	x	
915	MACHADINHO	13,8	8.888,37	-89,6	371,863	5.518,68	-88,7	230,885	371,9	x	
919	SALTO OSÓRIO	13,8	4.865,37	-88,3	203,552	4.130,83	-88,6	172,821	203,6	x	
925	SALTO SANTIAGO	13,8	11.089,00	-89,7	463,930	7.435,74	-88,9	311,089	463,9	x	
933	AREIA	500	13.565,13	-87,8	15,664	13.775,87	-86,9	15,907	15,9	15,0	VF
934	AREIA	230	5.938,30	-87,9	14,906	5.897,11	-87,6	14,803	14,9	15,0	VF
938	BLUMENAU	500	5.381,24	-85,9	6,214	6.065,86	-86,0	7,004	7,0	15,0	
939	BLUMENAU	230	4.564,21	-86,3	11,457	5.195,19	-86,5	13,041	13,0	15,0	
955	CAMPOS NOVOS	500	9.462,01	-87,3	10,926	7.785,87	-83,3	8,990	10,9	15,0	
959	CURITIBA	500	7.602,12	-86,4	8,778	7.996,44	-85,7	9,233	9,2	15,0	
960	CURITIBA	230	5.453,55	-86,9	13,690	5.826,51	-86,6	14,626	14,6	15,0	VF
964	CAXIAS	500	5.497,90	-87,0	6,348	5.904,03	-86,1	6,817	6,8	15,0	
965	CAXIAS	230	4.114,14	-87,7	10,327	4.779,65	-87,3	11,998	12,0	15,0	
976	GRAVATAÍ	500	4.537,97	-86,7	5,240	5.239,37	-86,6	6,050	6,0	15,0	
995	ITÁ	500	10.780,12	-88,1	12,448	11.404,47	-87,5	13,169	13,2	15,0	
1015	JOINVILLE	230	2.771,08	-82,5	6,956	2.043,88	-75,5	5,131	7,0	15,0	
1030	MACHADINHO	500	9.976,86	-87,9	11,520	9.591,17	-86,6	11,075	11,5	15,0	
1047	SALTO OSÓRIO	230	4.332,27	-86,3	10,875	4.945,32	-86,7	12,414	12,4	15,0	
1060	SALTO SANTIAGO	500	14.103,07	-88,3	16,285	14.048,25	-87,1	16,222	16,3	15,0	VF
1210	GRAVATAÍ	230	3.787,50	-87,2	9,507	4.590,81	-87,3	11,524	11,5	15,0	

BARRA	NOME	TENSÃO kV	CURTO TRIFÁSICO			CURTO MONOFÁSICO			MAX kA	DISJ kA	VF
			POTÊNCIA		CORREN	POTÊNCIA		CORREN			
			MÓD	ÂNG		MÓD	ÂNG				
			MVA	GRAU		kA	MVA				
1503	ITAJUBÁ	500	3.946,65	-86,9	4,557	3.437,41	-86,4	3,969	4,6	15,0	
1504	ITAJUBÁ	138	1.388,61	-88,9	5,810	1.812,24	-88,9	7,582	7,6	15,0	
2458	CASCADEL	230	4.380,45	-87,2	10,996	4.793,38	-86,5	12,032	12,0	15,0	
4501	BARRA DO PEIXE	230	956,83	-83,3	2,402	544,61	-75,7	1,367	2,4	15,0	
4521	ITIQUEIRA	230	673,36	-83,0	1,690	770,25	-83,5	1,933	1,9	15,0	
4522	RONDONÓPOLIS	230	1.063,98	-84,1	2,671	1.221,59	-83,9	3,066	3,1	15,0	
4523	ITIQUEIRA	13,8	430,26	-87,6	18,001	507,27	-87,9	21,223	21,2	x	
4530	COXIPÓ-CE	12	460,33	-89,2	22,148	488,13	-89,2	23,485	23,5	x	
4532	COXIPÓ	230	1.346,28	-87,6	3,379	1.615,30	-87,5	4,055	4,1	15,0	
4533	COXIPÓ	138	1.442,72	-88,1	6,036	1.910,81	-88,2	7,994	8,0	15,0	
4542	NOBRES	230	699,43	-84,8	1,756	677,40	-82,1	1,700	1,8	15,0	
4552	NOVA MUTUM	230	394,30	-82,9	0,990	233,28	-78,4	0,586	1,0	15,0	
4562	SORRISO	230	253,05	-82,1	0,635	144,96	-77,8	0,364	0,6	15,0	
4572	LUCAS RIO VERDE	230	295,40	-82,3	0,742	170,84	-78,0	0,429	0,7	15,0	
4582	SINOP	230	212,77	-81,8	0,534	120,80	-77,7	0,303	0,5	15,0	
4592	MANSO	230	569,65	-84,9	1,430	753,21	-85,4	1,891	1,9	15,0	
4596	UTE CUIABÁ -GÁS	13,8	1.763,86	-88,9	73,795	1.771,04	-89,2	74,095	74,1	x	
4623	RONDONÓPOLIS	138	811,11	-84,6	3,393	1.024,55	-84,9	4,286	4,3	15,0	
4703	CUIABÁ	138	1.232,87	-85,2	5,158	1.165,63	-82,5	4,877	5,2	15,0	
4804	GUAPORÉ	13,8	705,52	-88,4	29,517	882,09	-88,7	36,904	36,9	x	
4805	GUAPORÉ	138	649,35	-86,3	2,717	797,47	-86,7	3,336	3,3	15,0	
4807	JAURU	138	686,63	-86,6	2,873	746,30	-86,4	3,122	3,1	15,0	
4862	JAURU	230	726,26	-86,3	1,823	726,19	-86,2	1,823	1,8	15,0	

VF = Verificar MAX = Corrente máxima DISJ = Disjuntor

Para auxiliar nessa análise, foram criadas três colunas na extremidade à direita da Tabela 6.4. A primeira (MAX) indicando o valor máximo da corrente (em kA) considerando os tipos de curto trifásico e monofásico. Outra coluna (DISJ) onde foi colocado o valor da capacidade dos disjuntores considerados (15 kA), exceto nas barras de usinas, síncronos ou estáticos nas quais foi posto um “x” para indicar que aquela barra não será avaliada. Em geral não se instala disjuntor neste tipo de barra pelo elevado nível de curto-circuito, sendo a eliminação de defeito feita pelo disjuntor de alta tensão do transformador elevador. Na última coluna é verificado se o valor máximo da corrente de curto na barra, aumentada de 10% de margem de segurança, supera a capacidade do menor disjuntor ligado à barra. Os casos onde esse valor superou o valor do disjuntor, foram indicados com o *status* VF (verificar). Esses disjuntores são selecionados para serem acompanhados em detalhes, e verificados sobre o aspecto das correntes de contribuição de curto, conforme o exemplo apresentado na Figura 6.4 para a subestação de Marimbondo 500kV, que possui corrente total de curto de 13,675 kA.

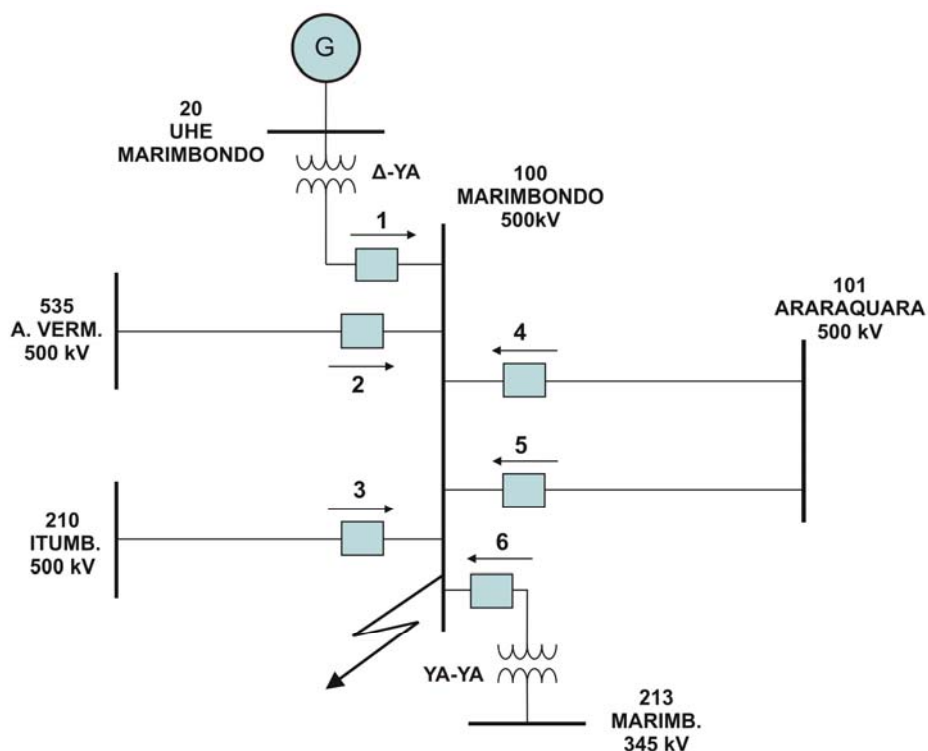


Figura 6.4 – Curto-circuito na barra de 500kV de Marimbondó

Supondo um curto-circuito monofásico na barra de 500kV de Marimbondó, as correntes de contribuição vindas dos diferentes pontos, e que passam pelos respectivos disjuntores, estão mostradas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Contribuição das correntes de curto-circuito para a barra de Marimbondó-500kV

Contribuição de curto			
Barras	Circuito	Corrente (A)	Nº Disjuntor
101 – 100	LT Araraquara-Marimbondó C1	967	4
101 – 100	LT Araraquara-Marimbondó C2	974	5
210 – 100	LT Itumbiara-Marimbondó	2208	3
535 – 100	LT A. Vermelha-Marimbondó	2209	2
13 – 100	TR 500/345kV Marimbondó	1198	6
20 – 100	UHE Marimbondó	3853	1
0	Referência	2272	
Total		13681	

Analisando as contribuições, observa-se que nesta situação, curto na barra, os módulos das correntes que passam pelos disjuntores não superam a sua capacidade de interrupção.

A contribuição vinda da referência se deve à ligação dos transformadores elevadores da usina de Marimbondo, que faz com que o curto fase-terra seja maior que o trifásico.

A Figura 6.5 mostra uma situação mais crítica, com o curto-circuito ocorrendo na LT 500kV Marimbondo-Araraquara C.2, após o disjuntor.

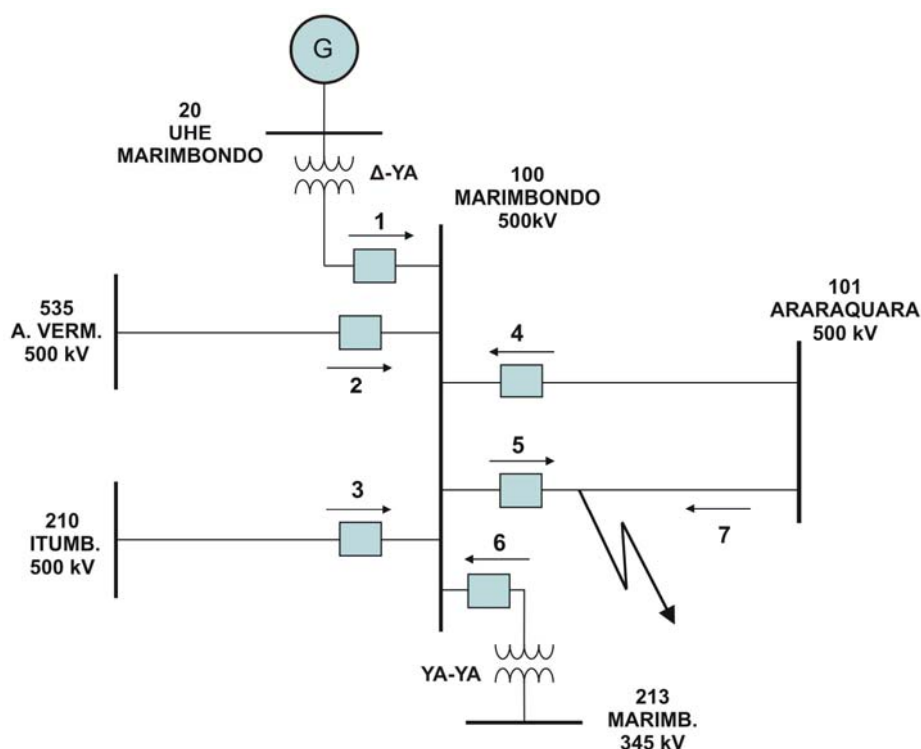


Figura 6.5 – Curto depois do disjuntor nº 5 da LT 500kV Marimbondo-Araraquara

Nesta situação, o disjuntor 5 tem que ser capaz de interromper as correntes de curto vindas dos pontos 1, 2, 3, 4, 6 e da referência ou o curto total na barra menos a contribuição vinda do ponto 7. Da Tabela 6.4 obtemos os valores de cada uma delas, e seu total corresponde a 12.707 A. Neste caso, o valor está abaixo do valor nominal do disjuntor, o que demonstra que ainda não ocorreu superação da capacidade de nenhum disjuntor no barramento de 500kV desta subestação.

6.4.3. Cálculo do Reator de Curto-Circuito para Uso nas Simulações de Estabilidade

Neste estudo será exemplificado o cálculo do reator equivalente de curto-circuito para utilização no programa ANATEM em simulação dinâmica de defeitos no sistema.

Este procedimento é realizado devido ao fato do sistema utilizado nos estudos de fluxo de potência possuir apenas representação da rede de sequência positiva. Para simular as redes de sequência negativa e zero recorre-se ao procedimento a seguir, que é válido em virtude da potência elétrica em componentes de fase ser igual à potência elétrica em componente de sequência. Uma justificativa dessa afirmação pode ser encontrada na referência [25].

Para o cálculo dos reatores de curto foram utilizadas as equações abaixo. O uso das mesmas é a seguir exemplificado para a barra de Ibiúna (vide primeira linha da Tabela 6.6):

$$\text{Impedância } Z = (Z_2 + Z_0) \text{ pu} \quad (6.4.3.1)$$

$$\text{Mas } (Z_2 = Z_1), \text{ então } Z = (Z_1 + Z_0) \text{ pu e } Z = R + jX$$

$$\text{Como a potência } S = VI \text{ e a corrente } I = \frac{V}{Z}, \text{ substituindo fica: } S = \frac{V^2}{Z} \quad (6.4.3.2)$$

$$\text{Com } V = 1 \text{ pu e } S_{\text{Base}} = 100 \text{ MVA}$$

$$S = \frac{(1)^2}{(Z_1 + Z_0)} \text{ pu} \quad (6.4.3.3)$$

$$S^* (\text{MVA}) = 100 \times \frac{(1)^2}{(Z_1 + Z_0)} \quad (6.4.3.4)$$

$$Z_1 = Z_1 \times \cos(\theta_1) + j Z_1 \times \sin(\theta_1) \quad (6.4.3.5)$$

$$Z_0 = Z_0 \times \cos(\theta_0) + j Z_0 \times \sin(\theta_0) \quad (6.4.3.6)$$

$$Z_1 + Z_0 = (Z_1 \times \cos(\theta_1) + Z_0 \times \cos(\theta_0)) + j(Z_1 \times \sin(\theta_1) + Z_0 \times \sin(\theta_0)) \quad (6.4.3.7)$$

$$Z_1 + Z_0 = R + jX \quad (6.4.3.8)$$

$$S^*(MVA) = \frac{100}{(R + jX)} = \frac{100 \times (R - jX)}{(R + jX) \times (R - jX)} \quad (6.4.3.9)$$

$$S^*(MVA) = \frac{100 \times (R - jX)}{R^2 + X^2} \quad (6.4.3.10)$$

$$S^*(MVA) = \frac{100 \times R}{R^2 + X^2} - j \frac{100 \times X}{R^2 + X^2} \quad (6.4.3.11)$$

Como desejamos calcular o reator equivalente de curto, será utilizada apenas a parte imaginária da expressão 6.4.3.11, conforme exemplificado para a barra de Ibiúna 345 kV.

$$\text{Reator (Mvar)} = \frac{100 \times 0,02718835}{(0,00074287^2 + 0,02718835^2)} = 3675,3 \text{ Mvar}$$

A seguir são mostrados na Tabela 6.6 os valores das impedâncias de curto obtidas para o sistema-teste de 107 barras. Nesta mesma tabela, são calculados os valores dos reatores equivalentes para aplicação de curtos monofásicos em programas que são utilizados na simulação de defeito nos estudos de estabilidade transitória.

Tabela 6.6 – Impedâncias de curto-circuito do sistema-teste 107 Barras

BARRA	NOME	TENSÃO	SEQUÊNCIA POSITIVA		SEQUÊNCIA NEGATIVA		R ₁₀	X ₁₀	REATOR DE CURTO
			IMPEDÂNCIA		IMPEDÂNCIA				
			MÓD	ÂNG	MÓD	ÂNG			
			kV	PU	GRÁU	PU			
86	IBIÚNA	345,0	0,0173	87,98	0,0099	89,23	0,00074287	0,02718835	3675,3
100	MARIMBONDO	500,0	0,0095	88,05	0,0063	88,49	0,00048929	0,01579231	6326,1
101	ARARAQUARA	500,0	0,0146	87,24	0,0438	82,34	0,00654139	0,05799221	1702,7
102	POÇOS	500,0	0,0204	87,37	0,0383	83,13	0,00551748	0,05840352	1697,1
103	CAMPINAS	500,0	0,0156	87,05	0,0308	81,24	0,00549362	0,04602004	2142,4
104	CACH. PAULISTA	500,0	0,0247	86,85	0,0434	83,67	0,00614241	0,06779808	1463,0
106	ADRIANÓPOLIS	500,0	0,0358	86,48	0,0526	83,92	0,00776935	0,08803657	1127,1
120	POÇOS DE CALDAS	345,0	0,0173	86,88	0,0306	80,71	0,00588146	0,04747300	2074,6
122	IBIÚNA	500,0	0,0118	87,59	0,0045	89,22	0,00055747	0,01628915	6131,9
123	CAMPINAS	345,0	0,0284	87,47	0,0371	84,51	0,00480316	0,06530213	1523,1
126	GUARULHOS	345,0	0,0211	87,18	0,0573	76,14	0,01476441	0,07670608	1257,1
131	M. MORAES	345,0	0,0165	86,89	0,0211	84,06	0,00307880	0,03746241	2651,4
134	L.C.BARRETO	345,0	0,0115	87,93	0,0060	87,31	0,00069700	0,01748588	5709,8
136	FURNAS	345,0	0,0142	87,34	0,0083	87,52	0,00101818	0,02247692	4439,9
138	ITUTINGA	345,0	0,0337	85,91	0,1080	73,17	0,03367332	0,13698828	688,4
140	ADRIANÓPOLIS	345,0	0,0381	86,45	0,0475	84,37	0,00701918	0,08529775	1164,5
210	ITUMBIARA	500,0	0,0077	88,46	0,0035	88,36	0,00030712	0,01119578	8925,2
213	MARIMBONDO	345,0	0,0219	87,94	0,0225	88,83	0,00124670	0,04438115	2251,4
216	P.COLOMBIA	345,0	0,0185	86,77	0,0403	83,56	0,00556260	0,05851631	1693,6
217	ITUMBIARA	345,0	0,0114	88,51	0,0072	88,43	0,00049372	0,01859344	5374,5
218	BANDEIRANTES	345,0	0,0254	86,35	0,0952	81,95	0,01494869	0,11961038	823,2
219	BRASÍLIA SUL	345,0	0,0227	86,84	0,0377	82,25	0,00633528	0,06002112	1647,7

BARRA	NOME	TENSÃO	SEQUÊNCIA POSITIVA		SEQUÊNCIA NEGATIVA		R ₁₀	X ₁₀	REATOR
			IMPEDÂNCIA		IMPEDÂNCIA				DE
			MÓD	ÂNG	MÓD	ÂNG			CURTO
		kV	PU	GRÁU	PU	GRÁU	PU	PU	Mvar
220	CORUMBÁ	345,0	0,0244	86,80	0,0206	85,68	0,00291383	0,04490342	2217,7
225	ITUMBIARA	230,0	0,0221	88,98	0,0142	89,28	0,00057190	0,03629538	2754,5
228	BRASÍLIA SUL	230,0	0,0586	88,78	0,0480	86,41	0,00425340	0,10649252	937,5
231	RIO VERDE	230,0	0,0787	83,57	0,2933	69,11	0,11339736	0,35222524	257,2
233	SAMAMBAIA	500,0	0,0198	86,85	0,0357	82,99	0,00544500	0,05520322	1794,0
234	SAMAMBAIA	345,0	0,0212	86,97	0,0331	83,38	0,00493657	0,05404966	1834,8
320	EMBORCAÇÃO	500,0	0,0112	88,12	0,0067	86,97	0,00072161	0,01788460	5582,3
325	JAGUARA	500,0	0,0119	88,16	0,0106	85,42	0,00122854	0,02246001	4439,1
326	JAGUARA	345,0	0,0121	87,88	0,0097	84,26	0,00141778	0,02174308	4579,7
360	NOVA PONTE	500,0	0,0132	87,92	0,0091	86,16	0,00108855	0,02227087	4479,5
370	SÃO SIMAO	500,0	0,0096	88,41	0,0079	87,07	0,00067021	0,01748598	5710,5
396	VOLTA GRANDE	345,0	0,0157	87,16	0,0113	87,05	0,00135947	0,02696574	3699,0
535	A.VERMELHA	500,0	0,0116	88,12	0,0057	88,45	0,00053476	0,01729167	5777,6
536	A.VERMELHA	440,0	0,0288	89,24	0,0129	89,53	0,00048788	0,04169703	2397,9
814	BATEIAS	230,0	0,0187	87,68	0,0116	86,49	0,00146721	0,03026291	3296,6
824	G. B. MUNHOZ	500,0	0,0076	87,78	0,0074	85,40	0,00088789	0,01497046	6656,4
834	SÃO MATEUS	230,0	0,0727	80,42	0,1746	73,77	0,06089896	0,23932782	392,4
839	CASCADEL	230,0	0,0248	86,18	0,0374	75,86	0,01078883	0,06101173	1589,3
840	CASCADEL	138,0	0,0581	88,37	0,0563	83,05	0,00846528	0,11396279	872,7
848	FOZ DO CHOPIM	138,0	0,0923	88,44	0,0826	87,17	0,00659117	0,17476504	571,4
856	SEGREDO	500,0	0,0070	88,24	0,0060	86,63	0,00056771	0,01298632	7685,7
895	BATEIAS	500,0	0,0124	86,49	0,0126	84,21	0,00203031	0,02491246	3987,6
896	CASCADEL OESTE	500,0	0,0159	87,10	0,0172	82,17	0,00314770	0,03291927	3010,2
897	SALTO CAXIAS	500,0	0,0106	88,10	0,0072	87,09	0,00071699	0,01778489	5613,6
898	FOZ DO CHOPIM	230,0	0,0287	84,98	0,0333	80,92	0,00776661	0,06147262	1601,2
904	ITÁ	13,8	0,0097	89,40	0,0193	88,43	0,00063040	0,02899222	3447,6
933	AREIA	500,0	0,0073	87,80	0,0070	84,84	0,00090981	0,01426625	6981,2
934	AREIA	230,0	0,0168	87,88	0,0172	87,16	0,00147373	0,03396737	2938,5
938	BLUMENAU	500,0	0,0184	85,86	0,0123	86,43	0,00209430	0,03062812	3249,8
939	BLUMENAU	230,0	0,0217	86,25	0,0139	87,06	0,00213223	0,03553524	2804,0
955	CAMPOS NOVOS	500,0	0,0105	87,32	0,0175	78,36	0,00402182	0,02762862	3544,3
959	CURITIBA	500,0	0,0129	86,31	0,0112	84,16	0,00196986	0,02401513	4136,2
960	CURITIBA	230,0	0,0181	86,93	0,0148	85,78	0,00205848	0,03283390	3033,7
964	CAXIAS	500,0	0,0182	86,96	0,0145	83,87	0,00251362	0,03259148	3050,1
965	CAXIAS	230,0	0,0243	87,73	0,0142	86,01	0,00195061	0,03844651	2594,3
976	GRAVATAI	500,0	0,0220	86,68	0,0132	86,40	0,00210295	0,03513703	2835,8
995	ITÁ	500,0	0,0093	88,11	0,0078	86,09	0,00083862	0,01707678	5841,8
1015	JOINVILLE	230,0	0,0359	82,43	0,0756	68,91	0,03193293	0,10612312	864,1
1030	MACHADINHO	500,0	0,0100	87,85	0,0112	84,24	0,00149924	0,02113641	4707,5
1047	SALTO OSÓRIO	230,0	0,0231	86,31	0,0145	87,91	0,00201553	0,03754246	2656,0
1060	SALTO SANTIAGO	500,0	0,0071	88,28	0,0072	84,84	0,00086067	0,01426762	6983,5
1210	GRAVATAI	230,0	0,0264	87,23	0,0125	87,40	0,00184291	0,03885628	2567,8
1503	ITAJUBÁ	500,0	0,0256	86,96	0,0374	85,65	0,00419448	0,06285623	1583,9
1504	ITAJUBÁ	138,0	0,0723	88,92	0,0216	88,81	0,00181145	0,09388250	1064,8
2458	CASCADEL	230,0	0,0228	87,18	0,0169	84,73	0,00267403	0,03960095	2513,7
4501	BARRA DO PEIXE	230,0	0,1045	83,26	0,3448	71,05	0,12423637	0,42989031	214,7
4521	ITIQUEIRA	230,0	0,1485	83,04	0,0925	85,02	0,02602473	0,23955649	412,6
4522	RONDONÓPOLIS	230,0	0,0940	84,08	0,0576	83,11	0,01660522	0,15068270	655,7
4532	COXIPÓ	230,0	0,0743	87,62	0,0372	86,76	0,00518808	0,11137644	895,9
4533	COXIPÓ	138,0	0,0693	88,09	0,0184	88,72	0,00272088	0,08765690	1139,7
4542	NOBRES	230,0	0,1430	84,84	0,1578	77,16	0,04792916	0,29627455	328,9
4552	NOVA MUTUM	230,0	0,2536	82,94	0,7814	75,39	0,22826976	1,00781050	94,4
4562	SORRISO	230,0	0,3952	82,06	1,2827	75,21	0,38203703	1,63161242	58,1
4572	LUCAS RIO VERDE	230,0	0,3385	82,33	1,0822	75,26	0,32052781	1,38205634	68,7
4582	SINOP	230,0	0,4700	81,81	1,5474	75,16	0,46327774	1,96099219	48,3
4592	MANSO	230,0	0,1755	84,90	0,0473	88,89	0,01651752	0,22209631	447,8
4623	RONDONÓPOLIS	138,0	0,1233	84,64	0,0463	86,39	0,01443333	0,16896897	587,5
4703	CUIABÁ	138,0	0,0811	85,19	0,0956	77,95	0,02675854	0,17430788	560,5
4805	GUAPORÉ	138,0	0,1540	86,26	0,0682	88,67	0,01162852	0,22185364	449,5
4807	JAURU	138,0	0,1456	86,63	0,1107	85,75	0,01676304	0,25574379	389,3
4862	JAURU	230,0	0,1377	86,25	0,1377	86,04	0,01851593	0,27477639	362,3

6.4.4. Curto-Circuito em Linha Paralela

Neste estudo foi investigado o efeito da indutância mútua numa linha de transmissão com dois circuitos que correm em paralelo ao longo de toda a linha, mostrado na Figura 6.6. Um dos circuitos está desligado para manutenção numa das torres localizada no ponto M, conforme mostra a Figura 6.7. Ocorrendo um curto-circuito monofásico no circuito que está em operação, aparece uma circulação de corrente de curto na linha que está em manutenção.

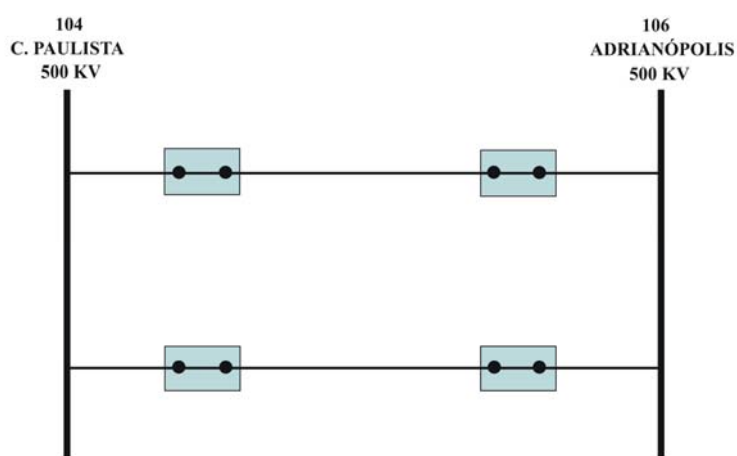


Figura 6.6 – LT 500kV C.Paulista-Adrianópolis C.1 e C.2 em operação

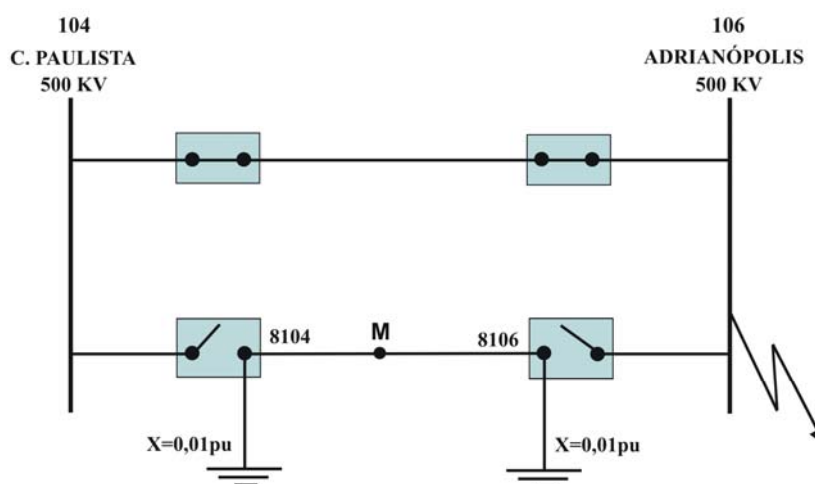


Figura 6.7 – LT 500kV C.Paulista-Adrianópolis C.2 em manutenção

A simulação foi feita no **sistema-teste de 107 barras**, com a LT 500kV Cachoeira Paulista-Adrianópolis C.2 desconectada do sistema nas duas extremidades e aterradas através de uma reatância de seqüência zero muito pequena para não influenciar o resultado. Para demonstrar esse efeito, criou-se as barras 8104 e 8106 onde o circuito 2 foi conectado e essas barras foram ligadas à referência (terra). Também foi representada a indutância mútua com a nova numeração.

Em seguida foi aplicado um curto-circuito fase-terra na barra de Adrianópolis 500kV na fase A do circuito 1, que provocou no circuito desligado, uma tensão e uma corrente induzida pelo circuito ligado que corre em paralelo, conforme mostrado na Figura 6.8.

Observa-se que a linha desconectada para manutenção, no momento do curto, passa a ter tensão de 288,7 kV induzida, e circula uma corrente induzida de 83 A da barra 8106 para a barra 8104.

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica											
ANAFAS - Programa de Análise de Faltas Simultâneas											
Sistema Teste - 107 Barras											
T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O											
Bar.8104 (C.PAUL2 -500) TEN.(kV)											
mod.		ang.		mod.		ang.					
A	288.7	0.0	Z	0.0	0.0						
B	288.7	-120.0	P	288.7	0.0						
C	288.7	120.0	N	0.0	0.0						
Bar.8106 (ADRIAN2--500) TEN.(kV) Cir. 2 () CORR.(A) p/8104											
mod.		ang.		mod.		ang.		mod.		ang.	
A	288.7	0.0	Z	0.0	0.0	A	83	-91.9	Z	83	-91.9
B	288.7	-120.0	P	288.7	0.0	B	83	-91.9	P	0	0.0
C	288.7	120.0	N	0.0	0.0	C	83	-91.9	N	0	0.0

Figura 6.8 – Tensão e corrente induzidas pela LT 500 kV C.Paulista-Adrianopolis C.1

Este exemplo demonstra uma situação prática que pode ocorrer durante procedimentos de manutenção, exigindo cuidado da equipe que vai realizar o serviço em seguir os procedimentos de segurança. Tais procedimentos incluem o aterramento das extremidades da linha em manutenção e do ponto onde será feita a intervenção.

6.4.5. Comparação entre curto-bifásico e curto bifásico-terra

Neste item foi feita uma comparação entre estes dois tipos de curto-circuito, buscando mostrar as diferenças entre eles. Embora ambos sejam assimétricos e provoquem circulação de corrente desequilibrada no sistema, no curto-circuito bifásico envolvendo a terra surge a presença da corrente de seqüência zero, enquanto que, no curto bifásico, sem a participação da terra, ela não ocorre. Para ilustrar esta situação, foi utilizado o **sistema-teste de 9 barras**.

A Figura 6.9 mostra os resultados do cálculo de um curto-circuito bifásico, sem a participação da terra, nas fases B e C da barra 9. Nela são apresentados os valores de tensão em kV e corrente em A, em componentes de seqüência (Z, P, N) zero, positiva e negativa, e em valores de fase (A, B, C).

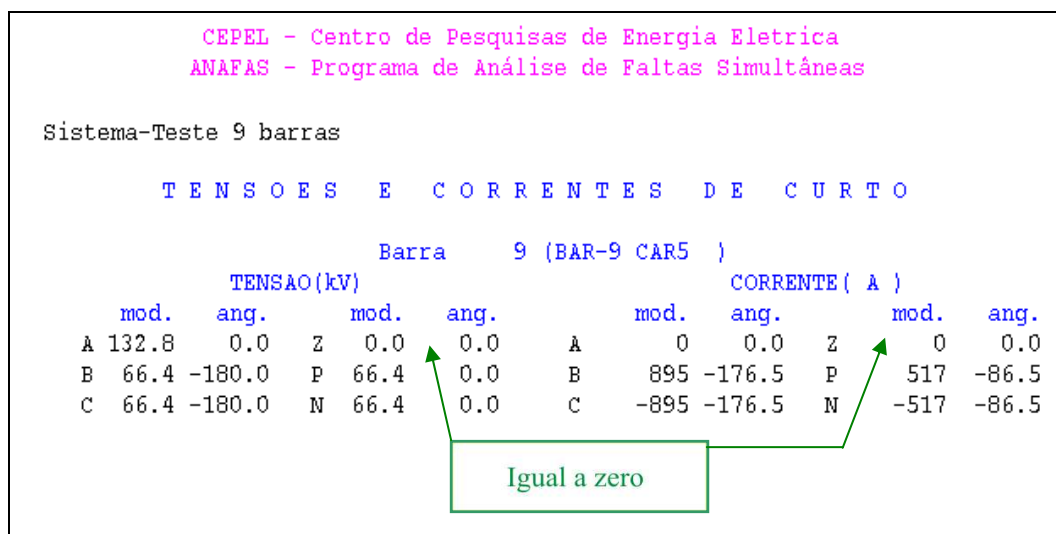


Figura 6.9 – Tensão e corrente para curto bifásico na barra 9 – fases B e C

A Figura 6.10 exibe de modo semelhante para fins de comparação o cálculo de um curto-circuito bifásico, agora com a participação da terra.

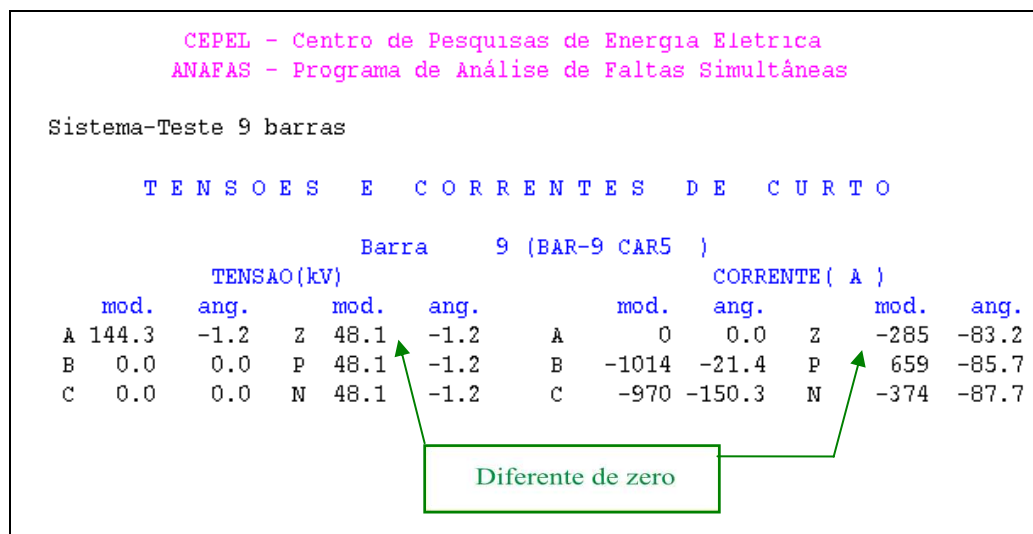


Figura 6.10 – Tensão e corrente para curto bifásico-terra na barra 9 – fases B e C

Conforme indicado nas respectivas figuras, quando o curto-circuito é bifásico para terra, aparece a componente de seqüência zero. Esta diferença entre os dois tipos de curto-circuito, contribui para que o curto bifásico à terra seja mais severo em termos de valores de corrente de curto e tensão na fase sem defeito.

6.5. SUMÁRIO

Um fator importante notado nos estudos de curto-circuito foi que o valor de curto monofásico nos barramentos das usinas pode superar o valor de curto trifásico, pelo fato de que os transformadores elevadores dessas usinas são ligados na sua maioria em delta / estrela aterrado elevando o valor do curto monofásico por se ter uma menor impedância vista pelo defeito. Logo, pode ocorrer que os disjuntores dessas subestações devam ser projetados para interromper uma corrente de curto monofásica ao invés da trifásica.

Um outro fator relevante constatado foi a importância de possuir arquivos de curto-circuito perfeitamente compatíveis com os arquivos de fluxo de potência, para que a cada nova alternativa de expansão do sistema, alteração física ou topológica na configuração de linhas ou subestações possa-se imediatamente estudar as suas conseqüências sobre os níveis de curto-circuito. Os disjuntores são projetados para funcionar numa determinada corrente máxima de curto e sabe-se que nos sistemas a corrente de curto muda conforme a expansão do sistema (tais como a entrada das novas usinas). Esse fato pode provocar a

superação da capacidade de interrupção de curto pelos disjuntores, implicando em estudos de alternativas, tais como separação de barramentos ou mesmo troca de disjuntores.

Este capítulo exemplificou o uso dos sistemas-teste propostos de 9 e 107 barras em estudos de rede em condições anormal de operação. As simulações realizadas encontram-se registradas nos arquivos dentro da pasta “Capítulo 6” no CD em apenso.

* * *