



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Perdas de energia elétrica em manobras de paralelismo de alimentadores de distribuição

Alexandre B. J. Soares	Ernesto Ruppert Filho	Fuji Sato	Dirceu Bueno Camargo
FEEC/UNICAMP	FEEC/UNICAMP	FEEC/UNICAMP	ELEKTRO
alesoare@dsce.fee.unicamp.br	ruppert@fee.unicamp.br	sato@dsee.fee.unicamp.br	dcamargo@elektro.com.br

Palavras-chave: Operação em paralelo, perdas de energia, potências ativa e reativa, transferência de carga.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre perdas de energia elétrica em alimentadores de distribuição em manobras de paralelismo. A motivação para a realização deste estudo surgiu do interesse de se investigar o comportamento do sistema de distribuição durante manobras de paralelismo entre alimentadores sob o enfoque das perdas de energia e da transferência de carga entre eles. O estudo foi realizado com dados reais de dois alimentadores de distribuição, pertencentes a uma mesma subestação, através de simulações com o Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

1. Introdução

As redes de distribuição primária operam normalmente de forma radial entretanto, manobras de paralelismo de alimentadores para transferência de cargas, em condições de contingências, ou devido a manutenções corretivas ou preventivas fazem parte da rotina de operação de subestações de distribuição [2]. Situações de operação contínua com alimentadores conectados em paralelo também podem ser consideradas, entretanto, na literatura não se encontrou muita informação sobre o assunto, principalmente sobre o comportamento do sistema em relação às perdas. Durante a operação em paralelo ocorrem variações nos fluxos das potências ativas e reativas pelos alimentadores, devido à transferência de carga entre eles, e conseqüentemente uma variação nas perdas do sistema. Neste contexto, o enfoque do estudo foi o de analisar estas perdas quando os alimentadores estão operando radialmente e em paralelo.

Nos sistemas de transmissão e distribuição as perdas de energia não podem ser medidas diretamente porque são inerentes aos processos de transmissão e distribuição [1], mas podem ser estimadas por modelos matemáticos [5] ou por simulações computacionais. Neste trabalho para realizar o cálculo das perdas utilizou-se simulações em computador digital onde a modelagem matemática utilizada foi apresentada na biblioteca SimPowerSystems do software Matlab/Simulink.

2. Sistema de Distribuição

O sistema estudado é constituído por dois alimentadores A e B, derivados de transformadores de 25 e 15 MVA, respectivamente, de mesmas tensões nominais de 138:13,8 kV, ambos situados na mesma subestação.

A Figura 1 apresenta o modelo do sistema implementado no Matlab/Simulink com a biblioteca SimPowerSystems.

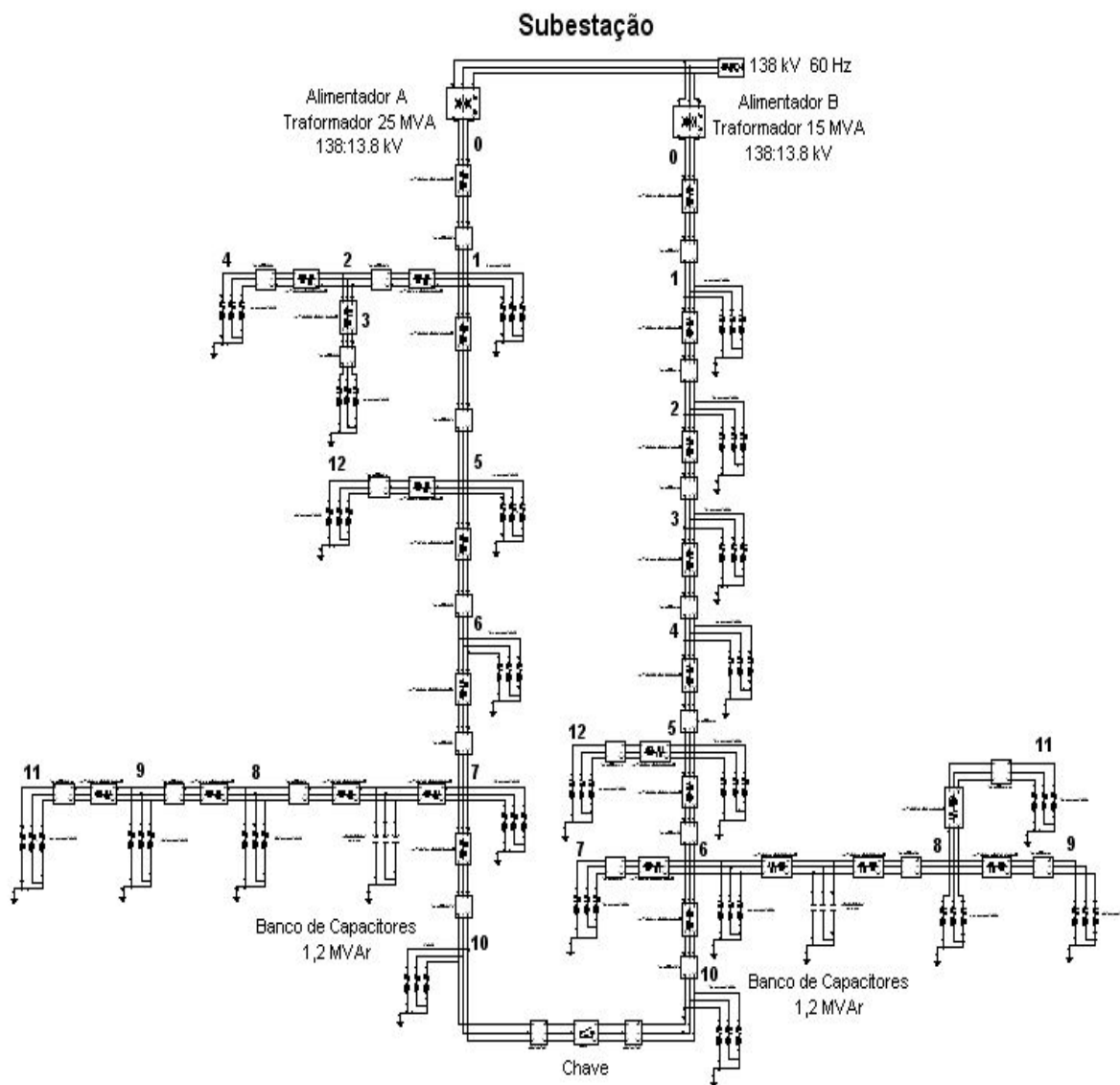


Figura 1. Modelo do sistema implementado no Matlab/Simulink

O modelo da Figura 1 foi implementado com base nas informações das Tabelas 1 a 4 que apresentam os parâmetros reais dos transformadores e de elementos de rede dos alimentadores A e B.

Tabela 1. Parâmetros do transformador de 25 MVA do alimentador A

Valores Nominais			Ensaio em Vazio			
V_1 (kV)	V_2 (kV)	S_n (MVA)	V_0 (kV)	I_0 (A)	P_0 (kW)	
144,9	13,8	25	13,8	1,2	19,91	
Ensaio de Curto Circuito			Parâmetros em (pu)			
V_{cc} (kV)	I_{cc} (A)	P_{cc} (kW)	r_{cc}	x_d	r_{fe}	x_m
15,52	99,61	75,64	0,003	0,1071	1255,9	1210,6

Tabela 2. Parâmetros do transformador de 15 MVA do alimentador B

Valores Nominais			Ensaio em Vazio			
V_1 (kV)	V_2 (kV)	S_n (MVA)	V_0 (kV)	I_0 (A)	P_0 (kW)	
144,9	13,8	15	13,8	4,068	23,63	
Ensaio de Curto Circuito			Parâmetros em (pu)			
V_{cc} (kV)	I_{cc} (A)	P_{cc} (kW)	r_{cc}	x_d	r_{fe}	x_m
12,49	59,77	72,38	0,0048	0,0861	634,89	159,03

Tabela 3. Parâmetros de rede do alimentador A

Ramo	Ponto	Potência Instalada (kVA)	Máxima Demanda (kVA)	Fator de Potência	Cabo (AWG)	Comprimento (m)
SE-00	00	0,0	0,0	0,956	240 mm ²	30
00-01	01	75,0	56,0	0,956	CC - 4/0	283
01-02	02	0,0	0,0	0,956	CC - 4/0	70
02-03	03	45,0	38,0	0,956	CC - 4/0	140
02-04	04	225,0	152,0	0,956	CC - 4/0	506
01-05	05	345,0	74,0	0,956	CC - 4/0	494
05-06	06	5038,0	675,0	0,956	CC - 4/0	580
06-07	07	645,0	76,0	0,956	CC - 4/0	164
07-08	08	1763,0	260,0	0,956	CC - 4/0	143
08-09	09	4850,0	720,0	0,956	CC - 4/0	700
07-10	10	150,0	28,0	0,956	CC - 4/0	90
09-11	11	6012,0	1147,0	0,956	CC - 4/0	211
05-12	12	1762,0	290,0	0,956	CC - 4/0	206

Tabela 4. Parâmetros de rede do alimentador B

Ramo	Ponto	Potência Instalada (kVA)	Máxima Demanda (kVA)	Fator de Potência	Cabo (AWG)	Comprimento (m)
SE-00	00	-	-	-	CA - 336	30
00-01	01	112,5	92,0	0,962	CC - 4/0	518
01-02	02	75,0	64,0	0,962	CC - 4/0	364
02-03	03	90,0	67,0	0,962	CC - 4/0	215
03-04	04	825,0	178,0	0,962	CC - 4/0	605
04-05	05	5388,0	1675,0	0,962	CC - 4/0	285
05-06	06	4800,0	1149,0	0,962	CC - 4/0	232
06-07	07	675,0	64,0	0,962	CC - 4/0	158
06-08	08	10584,0	1650,0	0,962	CC - 4/0	276
08-09	09	6430,0	840,0	0,962	CC - 4/0	127
06-10	10	225,0	54,0	0,962	CC - 4/0	65
08-11	11	4957,0	631,0	0,962	CC - 4/0	356
05-12	12	1375,0	321,0	0,962	CC - 4/0	143

As Figuras 2 e 3 apresentam partes do diagrama da Figura 1 implementado no aplicativo Matlab/Simulink.

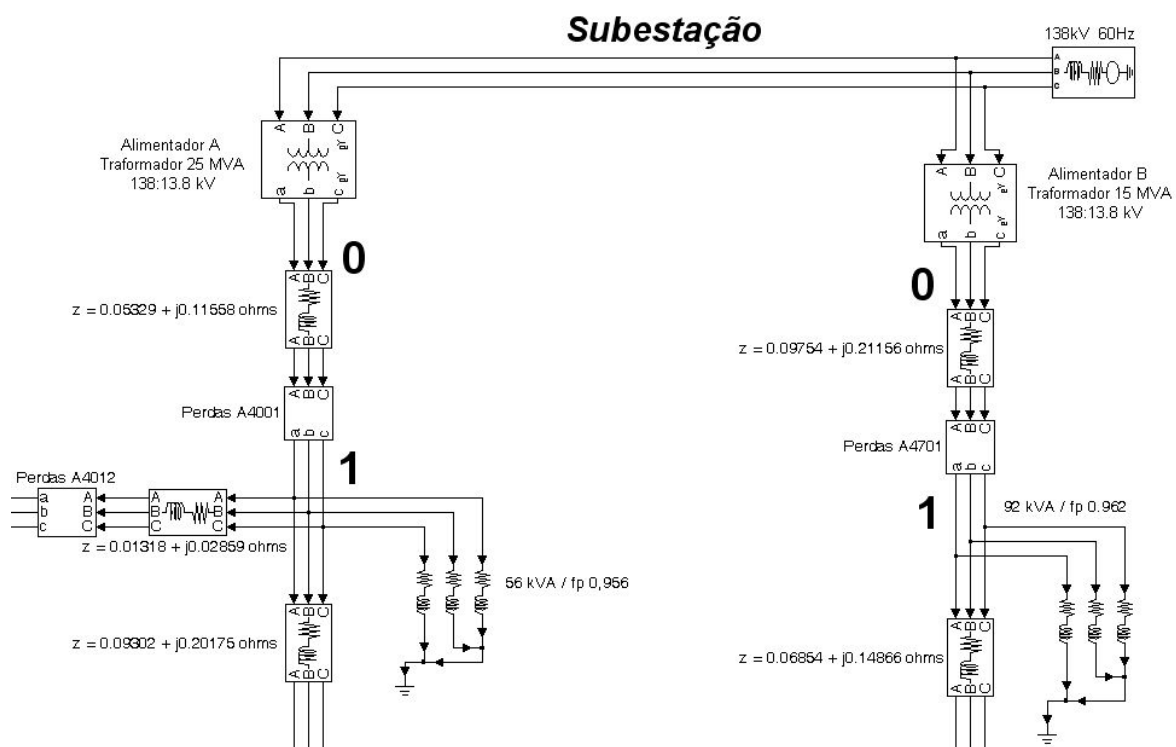


Figura 2. Detalhe dos transformadores e das linhas

A Figura 2 apresenta em detalhes a subestação de 138 kV 60 Hz e seus transformadores de 25 e 15 MVA que suprem, respectivamente, os alimentadores A e B, as linhas de distribuição representadas pelo modelo de linha com parâmetros concentrados, porque, os alimentadores são curtos (aproximadamente 3,5 km de ramal principal cada um), e os equivalentes das cargas distribuídas ao longo dos alimentadores representadas pelas suas potências aparentes e fatores de potência.

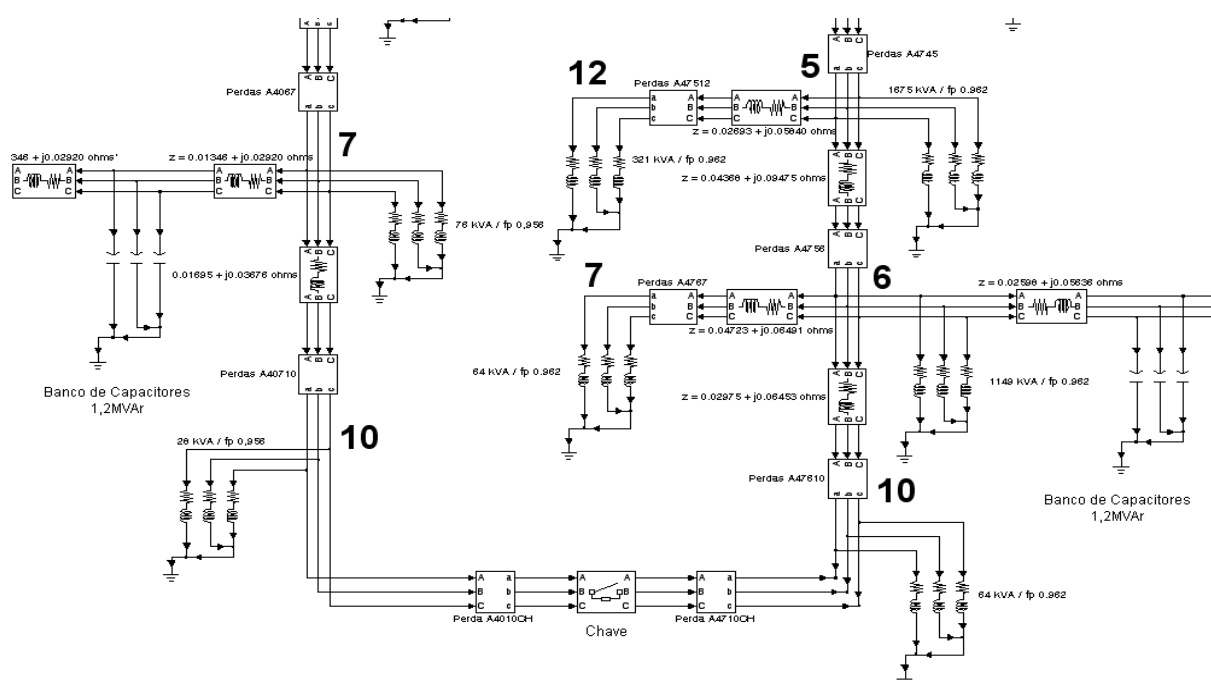


Figura 3. Detalhe da chave de manobra e dos bancos de capacitores

A Figura 3 apresenta em detalhes a chave de manobra interligando os alimentadores A e B e os dois bancos de capacitores de 1,2 MVar em ambos os alimentadores.

Além dos elementos do sistema pode-se observar, Figura 2, blocos entre os ramos das linhas dos alimentadores. Esses blocos são subsistemas onde são realizados os cálculos das potências ativa e reativa e das perdas de energia, conforme apresentado na Figura 4.

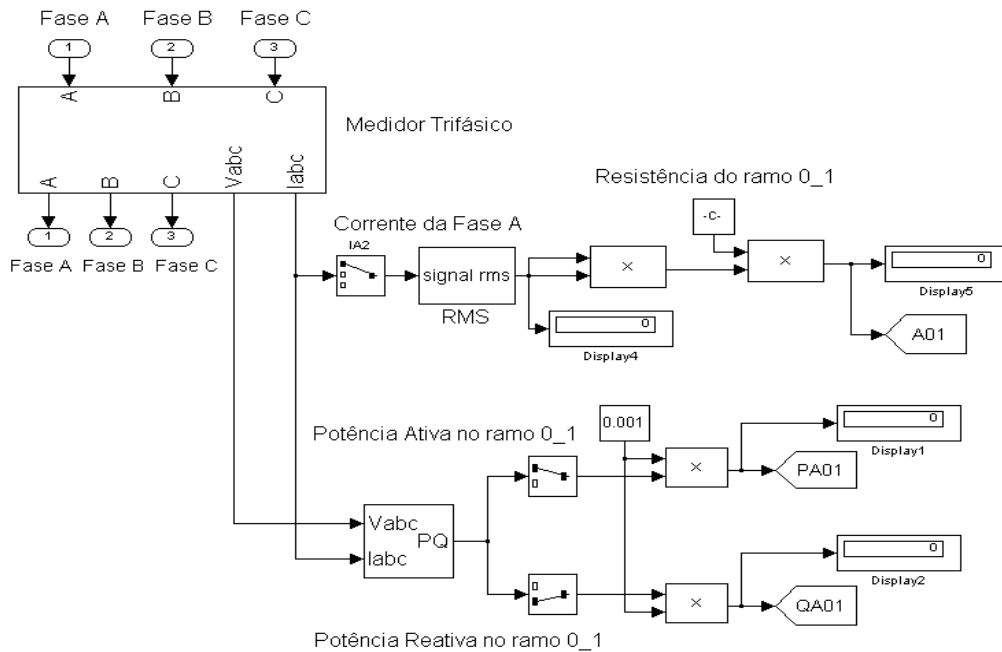


Figura 4. Subsistema para calcular as perdas e as potências ativa e reativa

Os cálculos das perdas de energia e das potências ativa e reativa em cada ramo das redes dos alimentadores foram realizados da seguinte forma: com um medidor trifásico, da biblioteca SimPowerSystems, ligado em série com um ramo da rede foram obtidas as correntes (I_{ABC}) e as tensões (V_{ABC}) trifásicas deste ramo. Com estes valores de I_{ABC} e V_{ABC} foi utilizado um medidor de potência ativa e reativa, da biblioteca SimPowerSystems, que calcula diretamente os valores das potências ativa e reativa no ramo, com (1) e (2).

$$P = V_A I_A + V_B I_B + V_C I_C \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_{BC} I_A + V_{CA} I_B + V_{AB} I_C}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Onde:

V_A, V_B, V_C tensões instantâneas de fase.

I_A, I_B, I_C correntes instantâneas de fase.

V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} tensões instantâneas de linha.

Para calcular as perdas nos ramos, com (3) é utilizado o valor eficaz da corrente de uma das fases.

$$Perdas_{ij} = 3R_{ij} I_{ij}^2(t) \quad (3)$$

Onde:

I corrente no ramo da rede entre os nós i e j no instante t .

R resistência elétrica do ramo da linha entre os nós i e j .

As Tabelas 5 e 6 apresentam os valores das perdas e das potências medidas nos ramos dos alimentadores em um dado instante, durante o regime permanente, quando os alimentadores estavam operando radialmente e em paralelo.

Tabela 5. Alimentadores operando radialmente em regime permanente

Operando radialmente							
Alimentador A				Alimentador B			
Ramo	Perdas (W)	P (kW)	Q (kVAr)	Ramo	Perdas (W)	P (kW)	Q (kVAr)
00-01	2839,40	4645,59	2427,92	00-01	21752,96	6059,87	815,86
01-02	2,25	163,92	50,32	01-02	14887,39	5967,07	761,46
02-03	0,18	32,79	10,06	02-03	8631,48	5904,59	727,45
02-04	10,43	131,12	40,24	03-04	23822,07	5824,59	659,83
01-05	4297,37	2807,14	-201,58	04-05	10648,54	5666,19	594,80
05-12	15,42	249,54	76,58	05-12	12,51	265,19	-75,30
05-06	4018,18	2489,87	-306,45	05-06	4313,42	4012,72	117,33
06-07	701,15	1909,59	-485,82	06-07	0,87	52,76	14,97
07-08	563,12	1820,03	-513,82	06-08	2800,10	2958,60	-184,52
08-09	2154,97	1594,55	489,77	08-09	75,71	690,62	196,01
09-11	245,09	979,18	300,48	08-11	119,72	518,71	147,45
07-10	0,06	24,04	7,37	06-10	0,55	52,75	14,98
10-CH	0,00	0,00	0,00	10-CH	0,00	0,00	0,00
Total (kW)	14,85			Total (kW)	87,06		

Tabela 6. Alimentadores operando em paralelo em regime permanente

Operando em paralelo							
Alimentador A				Alimentador B			
Ramo	Perdas (W)	P (kW)	Q (kVAr)	Ramo	Perdas (W)	P (kW)	Q (kVAr)
00-01	8718,06	7532,10	5188,22	00-01	8830,98	3915,01	258,25
01-02	2,23	162,53	49,89	01-02	5954,05	3830,05	222,93
02-03	0,18	32,51	9,97	02-03	3415,36	3771,86	199,99
02-04	10,34	130,01	39,89	03-04	9318,77	3705,33	163,58
01-05	14005,45	5039,28	324,74	04-05	4035,30	3550,09	111,93
05-12	15,23	246,51	75,64	05-12	12,83	271,98	-77,23
05-06	14459,83	4715,37	198,33	05-06	934,84	1857,78	-370,22
06-07	3154,36	4142,17	16,56	06-07	0,89	54,20	15,39
07-08	553,54	1788,18	-505,78	06-08	2876,01	3039,34	-188,49
08-09	2116,89	1566,37	481,02	08-09	77,78	709,53	201,42
09-11	240,76	961,88	295,11	08-11	123,00	532,92	151,52
07-10	554,47	2289,06	500,90	06-10	907,11	-2211,20	-478,26
10-CH	542,87	2265,47	493,66	10-CH	952,82	2265,47	493,66
Total (kW)	44,37			Total (kW)	37,44		

Conforme pode ser observado na Tabela 5, operando radialmente o alimentador B apresenta valores de potência ativa e reativa maiores de que os do alimentador A, devido à maior demanda solicitada pelas cargas instaladas neste alimentador. Como consequência as perdas na rede deste alimentador também

são maiores. Nestas condições o transformador do alimentador B, de 15 MVA, opera com um carregamento maior do que o transformador do alimentador A, de 25 MVA, que opera com um carregamento menor que 50% da sua potência aparente nominal.

Na operação em paralelo, Tabela 6, já em regime permanente, os fluxos de potência ativa e reativa se estabilizam, as perdas no ramal principal do alimentador A são maiores em comparação as apresentadas quando este alimentador estava operando radialmente. Entretanto, o transformador deste alimentador opera agora com carregamento de 50% da sua potência nominal aparente, podendo-se observar pelo ramo 06_10 do alimentador B que ocorreu uma inversão nos sinais das potências ativa e reativa deste ramo, agora negativas, indicando que este ramo esta recebendo energia vinda do alimentador A. No alimentador B, ocorre um alívio no carregamento do seu transformador, devido à transferência de carga entre os alimentadores. Observa-se que os valores das potências ativa e reativa e conseqüentemente das perdas no seu ramal principal diminuem e que o transformador passa a operar com um carregamento de aproximadamente 50% da sua potência nominal aparente.

Para uma melhor visualização do comportamento das perdas na rede durante os processos descritos anteriormente, a Figura 5 apresenta as perdas totais na rede nos alimentadores A e B.

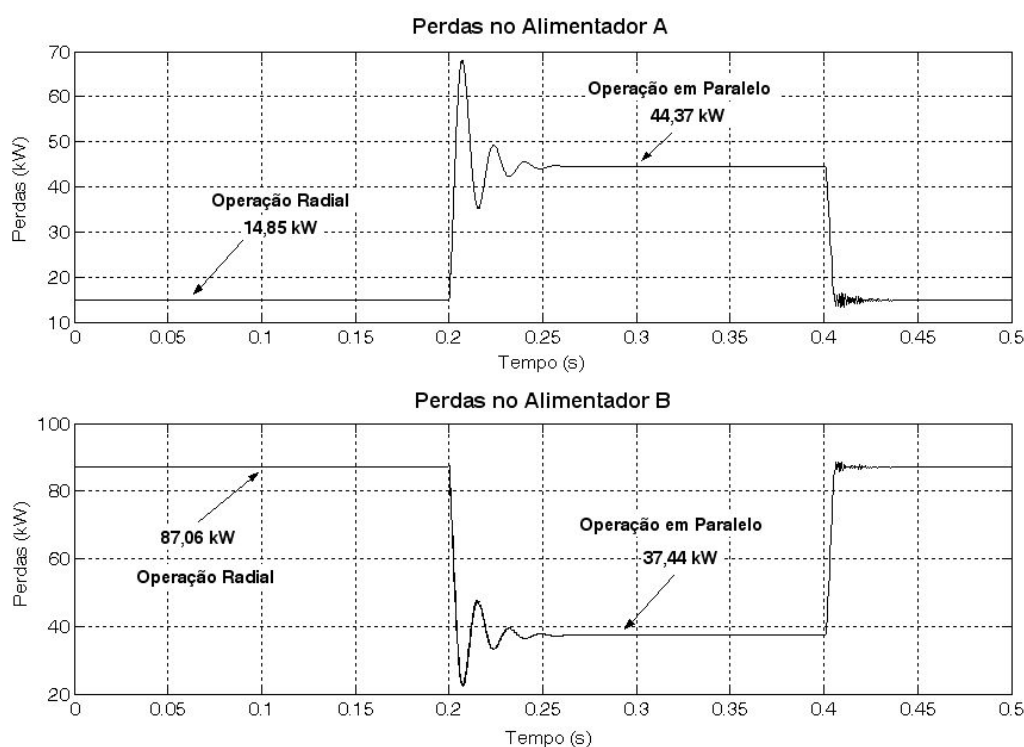


Figura 5. Perdas totais na rede nos alimentadores A e B

A operação em paralelo, para o caso estudado, traria benefícios para os alimentadores. Como pode ser visto na Figura 5 a soma das perdas totais quando os alimentadores estão operando radialmente é de 101,91 kW contra 81,81 kW quando operando em paralelo, o que representa uma diminuição de 19,72% nas perdas totais do sistema. Outro fator importante já mencionado anteriormente é o alívio que ocorre no alimentador B durante a operação em paralelo: as perdas diminuem de um patamar de 87,06 kW para 37,44 kW (redução de 57%). Entretanto operando em paralelo as perdas no alimentador A passam de 14,85 kW para 44,37 kW, o que representa um aumento de 198% nas perdas deste alimentador. Deve-se levar em consideração que o transformador deste alimentador, 25 MVA, opera normalmente com carregamento abaixo de 50% da sua potência aparente nominal, operação esta prejudicial ao rendimento deste transformador, e este aumento nas perdas não representam um esforço

adicional ao transformador, pelo contrario, já que o mesmo passa a operar com um carregamento de 50% da sua potência aparente nominal considerado um carregamento bom para um transformador. A Figura 6 apresenta as variações nas potências ativa e reativa fornecidas dos alimentadores A e B operando radialmente e em paralelo, decorrentes da transferência de carga entre eles.

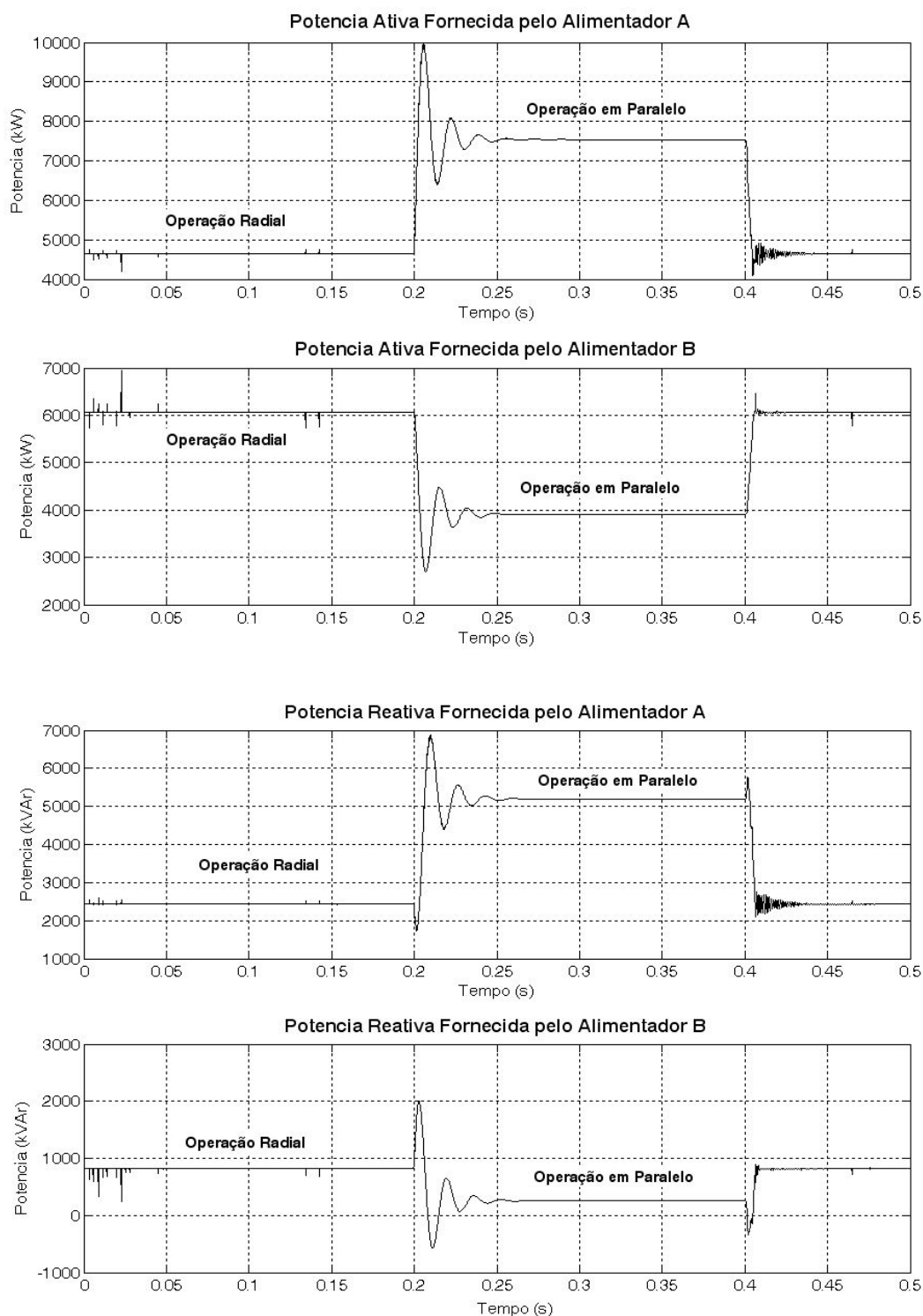


Figura 6. Potências ativas e reativas fornecidas pelos alimentadores A e B

Conforme pode ser observado na Figura 6, no fechamento do paralelismo ocorre uma transferência de carga entre os alimentadores. Os fluxos de potência ativa e reativa do alimentador A, Tabela 6, aumentam e conseqüentemente as perdas no seu ramal principal também aumentam, isto porque, o

transformador deste alimentador possui uma reserva maior que a do transformador do alimentador B, e passa a fornecer energia para este alimentador, isto pode ser comprovado pelos valores dos fluxos de potência ativa e reativa e pelas perdas no ramal principal do alimentador que diminuem e principalmente por dois fatores, as perdas no ramo da chave do lado deste alimentador aumentam e o valor do fluxo de potência reativa aparece com sinal negativo indicando que o alimentador B está absorvendo a energia enviada pelo alimentador A (Tabela 6).

Como se mostrou neste trabalho a operação em paralelo continuada, para o caso estudado, traria benefícios para os alimentadores A e B, uma vez que, sob o enfoque das perdas e das potências haveria melhorias na operação dos alimentadores.

3. Conclusão

Manobras operativas de operação em paralelo de alimentadores de distribuição são vistas como soluções temporárias para transferência de cargas ou manutenção de equipamentos. Entretanto para certos casos, como o apresentado neste estudo, a operação em paralelo de alimentadores por longos períodos de tempo traria benefícios para os alimentadores tanto sobre o enfoque das perdas de energia e dos seus carregamentos quanto sob o enfoque operativo do sistema. Obviamente que cada sistema tem as suas particularidades e estas devem ser consideradas em trabalhos futuros, como por exemplo, o comportamento das proteções e os níveis dos transitórios tanto na chave de manobra quanto nos transformadores. Como se demonstrou, neste estudo, a operação em paralelo pode ser uma aliada em casos em que os alimentadores já estão saturados e existe pouca reserva para um aumento na demanda, muito comum em cidades em que ocorre um aumento sazonal da carga.

4. Agradecimentos

A ELEKTRO – Eletricidade e Serviços SA pela oportunidade propiciada para o desenvolvimento do trabalho e ao CNPq pelo apoio financeiro oferecido através de bolsa de estudos.

5. Referências bibliográficas

- 1 CODI – Comitê de Distribuição. Método para Determinação, análise e otimização das perdas técnicas em sistemas de distribuição. Doc. Técnico CODI-3.2.19.34.0, Agosto 1996.
- 2 KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. 1ª ed, Ed. Edgard Blücher Ltda, 2005, São Paulo.
- 3 MONTICELLI, A.J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Ed. Edgard Blücher, São Paulo 1983.
- 4 OLIVEIRA, C.; KAGAN, N.; MEFFE, A.; JONATHAN, S.; COPARROS, S.; CAVARETI, I. A New Method for the computation of technical losses in electric power distribution systems. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED 2001, Amsterdam, Holanda, 2001.
- 5 SOARES, A. B. J; MARTINS, G. M. Models to the technical energy losses in distribution systems. INDUSCOM 2006.
- 6 STEVENSON JR, W. D. Elementos de análise de sistemas de potência. 2ª ed., Ed. McGraw-Hill, São Paulo 1986.
- 7 THOMSON, M. Automatic voltage control relays and embedded generation part 1 and 2. Power Engineering Journal, April 2000, pp. 71-99.