

Capítulo IX

Simulação de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais - Parte I

Igor Amariz Pires*

Este capítulo tem como objetivo avaliar o estado atual de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais, no que diz respeito ao seu nível de distorção de tensão, a partir da interação das correntes harmônicas dos aparelhos eletrodomésticos e dos consumidores residenciais e comerciais. Para tal, várias simulações foram conduzidas a partir das medições apresentadas nos capítulos anteriores.

As simulações iniciaram com cenários harmônicos encontrados em residências e estabelecimentos comerciais, devido à interação de suas cargas. Ou seja, foram simuladas as interações das correntes harmônicas de vários eletrodomésticos presentes nos consumidores residenciais e comerciais, avaliando seu resultado no padrão de medição. Depois, simulou-se uma rede secundária do sistema de distribuição que alimentava os consumidores residenciais apresentados no Capítulo VI, em três situações de carga: baixa, média e alta. Por fim, estes resultados foram extrapolados para o circuito primário e, assim, simulou-se o sistema de distribuição de média tensão, também nas situações de cargas descritas.

As simulações foram realizadas com o programa computacional ATP (do inglês, Alternative Transient Program). O trabalho Power Quality Analysis using Electromagnetic Transient Programs, que consta nas Referências, as possibilidades de simulação que o ATP/EMTP fornece para a temática de qualidade de energia elétrica, tais como avaliação de sag/swell, harmônicos, dentre outros. Já o trabalho Simulation of Power Quality Problems on a University Distribution System, também utilizado como referência para este capítulo, apresenta um estudo de caso de um sistema de distribuição de uma universidade utilizando o ATP.

Como o ATP é um simulador baseado em modelos temporais e não no domínio da frequência, uma vantagem na sua utilização é a capacidade de interação entre os ângulos de fase das correntes harmônicas produzidas por várias cargas não lineares. Além disso, os modelos de elementos do sistema de distribuição e fontes de tensão e corrente já existem no ATP. Bastava, então, modelar as cargas não lineares e seus conjuntos. Estas foram modeladas como fonte de correntes harmônicas.

Esta modelagem é precisa desde que as distorções de tensão nas fontes de harmônicos sejam menores que 10%. Na referência Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, esta modelagem é apresentada principalmente para cargas eletrônicas. Várias referências utilizam esta modelagem tendo um ramo paralelo R-L para representar o conteúdo de potência do ambiente e fontes de correntes harmônicas para o conteúdo não linear.

Na modelagem das cargas, o ramo paralelo R-L foi utilizado para representar a corrente fundamental. Isso permitiu suprimir algumas oscilações que estavam ocorrendo quando se utilizavam apenas fontes de corrente em simulações no ATP. Em algumas cargas, principalmente nas cargas eletrônicas, a corrente fundamental teve de ser representada por um ramo paralelo R-C devido ao ângulo da fundamental. Nos harmônicos, as fontes de correntes harmônicas tiveram seus módulos e ângulos inseridos. Os resultados, somente com fontes de harmônicos ou fontes e paralelo R-L, eram exatamente os mesmos.

As fontes harmônicas eram reproduzidas até o harmônico que apresentava módulo acima de

1% em relação à corrente fundamental, no máximo até o 31º, devido a este ser o limite de medição. Esta escolha foi feita (1% sendo o limite mínimo de representação de fontes harmônicas) para reproduzir o mais fielmente possível as ondas de corrente, conforme as medições apresentadas nos capítulos anteriores. A Figura 1 apresenta a modelagem realizada, no caso de uma carga com até o 11º harmônico.

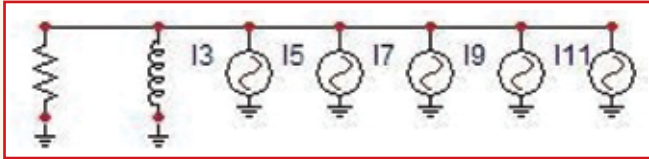


Figura 1 – Modelagem de cargas por fonte de correntes harmônicas e ramo paralelo R-L.

Formas de ondas de conjunto de eletrodomésticos em consumidores residenciais e comerciais

O objetivo desta simulação era encontrar as correntes nos padrões de medição destes consumidores, analisando a não linearidade que estes consumidores produzem na rede de distribuição. Assim, cada eletrodoméstico foi modelado conforme a Figura 1, produzindo um “bloco” de fontes de correntes harmônicas. A modelagem dos eletrodomésticos foi realizada a partir das medições apresentadas anteriormente. Cargas

lineares, principalmente aquelas responsáveis por algum tipo de aquecimento, foram modeladas com um simples resistor.

Para a simulação, com cada eletrodoméstico representado por um “bloco”, estes foram postos em um barramento de uma fase com uma fonte de tensão ideal. A corrente demandada deste grupo de eletrodomésticos foi o foco nestas simulações. A Tabela 1 traz as situações simuladas com seus respectivos resultados: corrente eficaz e THD de corrente. A tabela está organizada pela distorção de corrente, iniciando pela menor.

As simulações executadas não serão todas aqui detalhadas. Todos os resultados das simulações (formas de onda e seus conteúdos harmônicos) serão apresentados no Capítulo XI. Algumas merecem destaque, como a simulação de número 23, em que havia um aparelho de televisão em um ambiente iluminado por uma lâmpada incandescente de 100 W, tem sua forma de onda de corrente apresentada na Figura 2.

Esta figura é bem parecida com a Figura 11 do Capítulo VI, que retrava a situação no consumidor residencial de consumo médio 1 às 21 horas. A diferença na Figura 11 do Capítulo IV para a Figura 2 deste é que a porção não linear era muito maior que na simulada aqui, o que explica a maior distorção de corrente (65,90% na Figura 11 do Capítulo VI contra 49,67% na Figura 2 deste capítulo). Outra simulação que merece destaque é a de número 20 (computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com mais um

TABELA I
SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS HARMÔNICOS EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS E COMERCIAIS

Nº	Situação	I_{rms}	THD _i
1	Chuveiro (4400 W) com ambiente iluminado por lâmpada fluorescente com reator eletromagnético de 1x40 W, secador de cabelo (1000 W) com ambiente iluminado por LFC de 25 W.	42,92	0,45
2	Chuveiro com lâmpada fluorescente com reator eletrônico 1x40 W, freezer, geladeira, aparelho de som e secador de cabelos com LFC 25 W	47,06	0,58
3	Chuveiro, freezer e geladeira	38,53	1,18
4	Ferro de passar (1000 W), tanquinho, geladeira e televisão	11,38	4,86
5	Telefone sem fio, geladeira e freezer	6,48	7,00
6	Freezer, geladeira e televisão	6,70	7,14
7	Telefone sem fio e geladeira	1,89	7,29
8	Freezer, geladeira, micro-ondas e lavadora de roupas	20,84	8,24
9	Ar condicionado 10500 BTU, televisão e videocassete com LFC de 25 W, geladeira	10,74	11,60
10	Ar condicionado, televisão e LFC de 25 W	7,868	12,55
11	Lavadora de roupas, liquidificador, micro-ondas e televisão	17,83	13,06
12	Tanquinho, compressor da geladeira ligado e televisão	4,223	13,18
13	Televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40 W.	2,729	13,51
14	Ar-condicionado 10500 BTU, televisão e videocassete com LFC de 25W	9,05	13,66
15	Freezer, geladeira e micro-ondas	14,91	
16	Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e alguém jantando na cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40 W.	2,420	16,88
17	Freezer, geladeira, micro-ondas e fluorescente de reator eletrônico 2 (1x40 W) e televisão com LFC 25 W	15,63	17,52
18	Micro-ondas com iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40 W e compressor da geladeira ligado	12,06	18,74
19	Micro-ondas com iluminação fluorescente de reator eletrônico 1x40 W	10,75	23,69
20	Computador, em ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com mais um ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado	2,993	28,07 33,70
21	Ventilador de teto, televisão e videocassete com LFC de 25 W	1,780	35,86
22	Computador, com ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 60 W e televisão, com ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 100 W	2,501	43,90
23	Televisão em ambiente iluminado por lâmpada incandescente de 100 W	1,319	49,67
24	Televisão e videocassete com LFC de 25 W e aparelho de som com LFC de 25 W	1,484	71,12
25	Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W	0,906	79,95
26	Computador, com ambiente iluminado por LFC de 25 W e televisão, com ambiente iluminado por LFC de 25 W	1,646	80,19
27	Televisão, com o ambiente iluminado por LFC de 25 W	0,744	81,36
28	Televisão e videocassete com LFC de 25 W e computador com LFC de 25 W, telefone sem fio	1,843	81,97
29	Televisão e videocassete com LFC de 25 W e computador com LFC de 25 W	1,826	82,75
30	Televisão e videocassete com LFC de 25 W, televisão e vídeo game com LFC de 25 W	1,656	91,38

ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado). A Figura 3 apresenta a forma de onda obtida na simulação que é compatível com a Figura 29 do Capítulo VI (consumidor

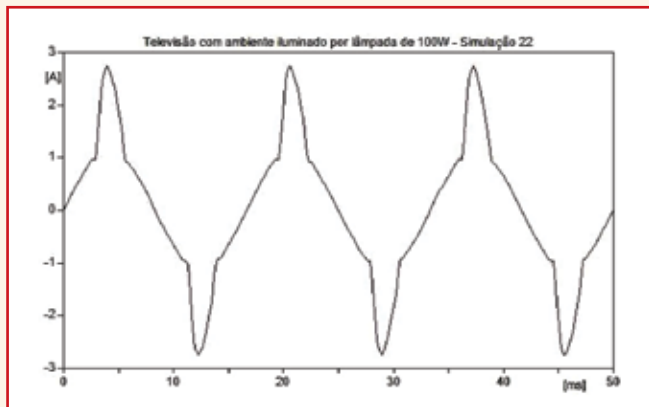


Figura 2 – Forma de onda de corrente da simulação 23 (televisão em ambiente iluminado por lâmpada de 100 W).

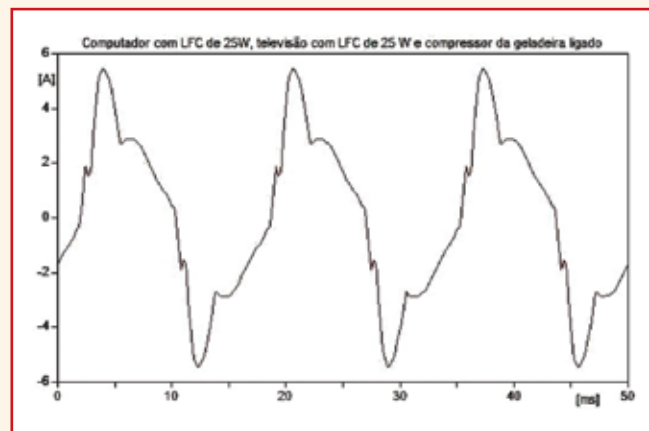


Figura 3 – Forma de onda de corrente da simulação 20 (computador em ambiente iluminado por LFC de 25 W mais televisão, com mais um ambiente iluminado por LFC de 25 W e compressor da geladeira ligado).

residencial de alto consumo às 21h). Na Figura 29 do Capítulo VI, as fases B e C têm as formas de onda bastante parecidas com a apresentada na Figura 3.

Outra forma de onda que foi bastante encontrada na medição de consumidores residenciais foi a da simulação de número 13 (televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40 W).

A Figura 4 mostra a forma de onda obtida na simulação. Esta senoide distorcida com dois picos aparece tanto na Figura 19 do Capítulo VI (consumidor residencial de consumo médio 2 às 12h) quanto na Figura 28 do Capítulo VI (consumidor residencial de consumo alto às 18h, fase B).

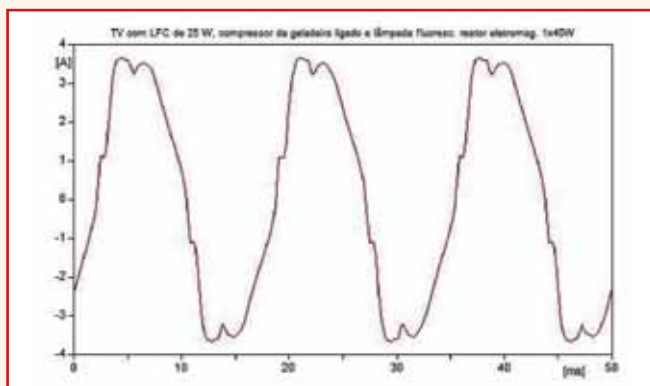


Figura 4 – Forma de onda de corrente da simulação 13 (televisão, em ambiente iluminado por LFC de 25 W, compressor da geladeira ligado e cozinha utilizando iluminação fluorescente de reator eletromagnético 1x40 W).

As comparações dos resultados simulados de eletrodomésticos com as medições indicam a ideia de configuração de eletrodomésticos ligados no instante de medição, podendo esta ideia ser mais generalizada. Como exemplo desta generalização, a Figura 2 foi o resultado da

Sistema de um alimentador de distribuição secundário

O alimentador de distribuição secundário (220 V), que alimenta os consumidores residenciais, foi modelado e simulado para se identificar as distorções de tensão na rede secundária devido ao fluxo de correntes harmônicas provocadas por estes consumidores. Este alimentador é atendido por um transformador trifásico de 45 kVA 11,4 kV/220 V alimentando 39 consumidores residenciais. Cada vão de linha do alimentador foi modelado na configuração PI.

Os condutores da linha têm condutores de fase em bitola 2/0 AWG e neutro 4/0 AWG em uma configuração vertical e espaçamento de 20 cm por condutor, tendo o condutor mais próximo do solo uma distância de 8 m. O condutor mais alto é o condutor neutro, seguido das fases A, B e C. A modelagem do sistema foi realizada em três fases, sendo apresentado seu esquema unifilar na Figura 5. A fonte de tensão utilizada foi uma fonte ideal.

Três situações de carga (leve, média e pesada) foram simuladas duas vezes: a primeira vez sem uma distorção harmônica de rede primária que alimenta o transformador (pré-distorção) e uma segunda vez com essa distorção de tensão. Esta pré-distorção foi feita por meio de fontes harmônicas de tensão.

Pela medição realizada no transformador dos consumidores residenciais (Capítulo VI), os horários para carga leve, média e pesada foram identificados como às 12h, 2h da madrugada e 21h. A explicação de ser às 12h o horário de carga leve é devido à ausência de iluminação, TV e chuveiro.

As residências foram divididas em casas com consumo baixo, médio 1, médio 2 e alto. No caso para o sistema estudado, foram registradas 14 residências com consumo baixo, 13 com consumo médio 1, oito com consumo médio

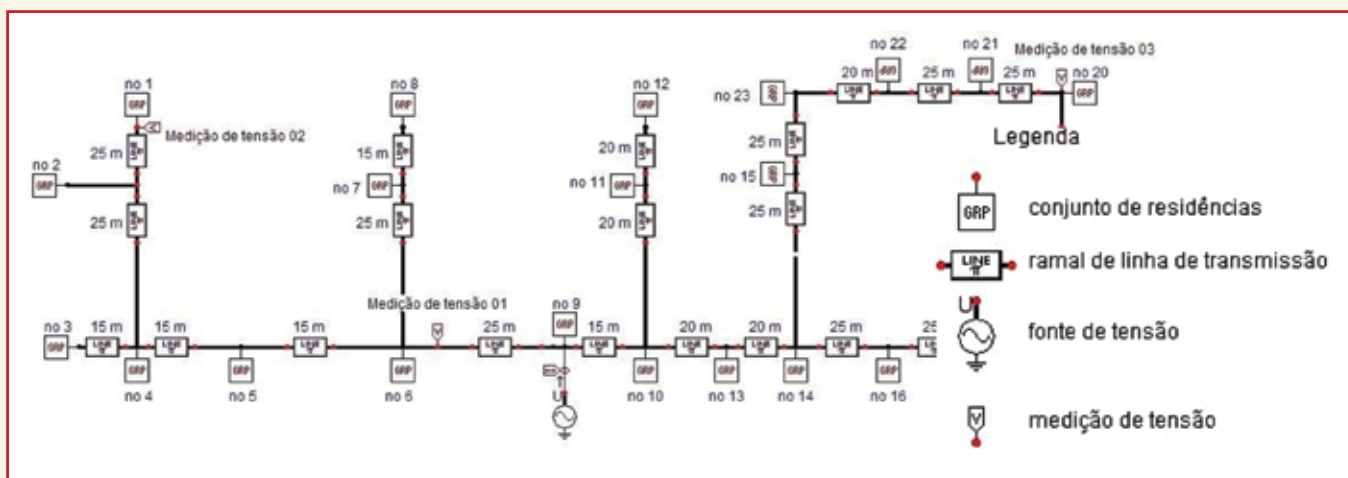


Figura 5 – Sistema de distribuição secundário.

interação entre uma televisão e uma lâmpada incandescente. Porém, esta forma de onda é encontrada na interação de uma carga resistiva com um aparelho eletrônico.

2 e quatro de consumo alto. Os consumos das residências, fornecidos pela concessionária, estão listados na Tabela 2, ordenados pelo consumo mensal.

TABELA 2 CONSUMO RESIDENCIAL			
Índice	Casa (referência Figura 5)	Consumo (kWh/mês)	Divisão por consumo
1	11	41	Baixo
2	17	54	
3	5	64	
4	13	65	
5	14	74	
6	3	86	
7	1	89	
8	38	100	
9	33	101	
10	30	105	
11	2	120	
12	16	120	
13	29	125	
14	6	127	
15	24	136	Médio 1
16	22	144	
17	21	161	
18	32	162	
19	26	166	
20	9	171	
21	8	174	
22	34	177	
23	15	182	
24	28	215	
25	10	223	
26	31	236	
27	20	250	
28	25	253	Médio 2
29	36	271	
30	4	278	
31	18	278	
32	27	293	
33	35	296	
34	12	303	
35	23	349	
36	19	529	Alto
37	37	680	
38	7	943	
39	39	1315	

Com a localização de cada residência na topografia do alimentador secundário e o tipo de residência (consumo baixo, médio 1, médio 2 ou alto), modelou-se as residências conforme as medições realizadas (Capítulo VI) e distribuiu-se, uniformemente, suas cargas pelas fases. A modelagem seguiu o indicado pela Figura 1.

Com todas as casas representadas, às 21h não se conseguia atingir a potência indicada no transformador. Para completar esta potência, acrescentaram-se chuveiros de 4400 W. Ainda às 21h e 2h também foram incluídas lâmpadas de vapor de sódio de 70 W como iluminação pública.

Na Figura 5, há três indicativos de onde foram feitas as medições de tensão nas simulações: um próximo ao transformador (medição de tensão 1), um em cada uma das duas extremidades do alimentador (medições de tensão 2 e 3).

A Figura 6 mostra o exemplo de um bloco com quatro residências de consumo baixo (baixo_A, 2 baixo_B e 2 baixo_C),

uma de consumo médio 1 (medio1_C) e duas de consumo médio 2 (medio2_A, medio2_B). Este conjunto é representado no bloco 2 da Figura 5. Assim, cada bloco de Figura 5 continha um elemento chamado “splitter” que expandia o ramal unifilar em três fases, em que eram conectados às residências.

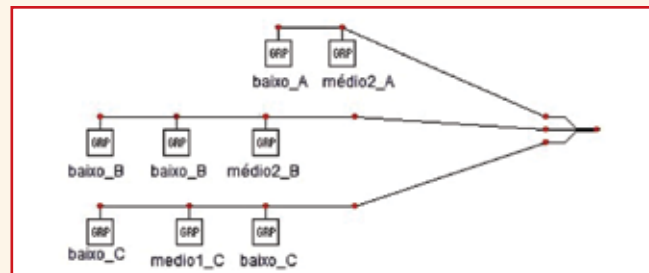


Figura 6 – Bloco número 2 da Figura 5 “splitter” com os blocos de casas monofásicas representadas.

Primeiro serão apresentadas as correntes totais por fase deste sistema de distribuição. Tanto no caso sem ou com pré-distorção a corrente resultante no transformador é a mesma, pois a modelagem foi feita por fontes de correntes harmônicas. As Figuras 7, 8 e 9 trazem as correntes resultantes às 12h (carga leve), 2h (carga média) e 21h (carga pesada).

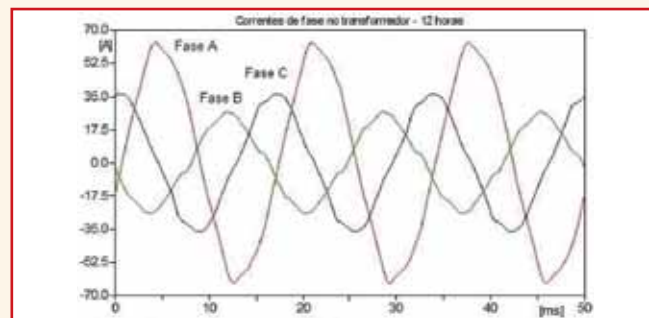


Figura 7 – Correntes resultantes de simulação no transformador – 12h.

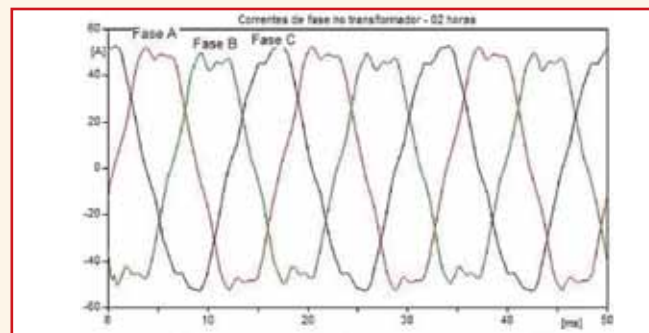


Figura 8 – Correntes resultantes de simulação no transformador – 2h.

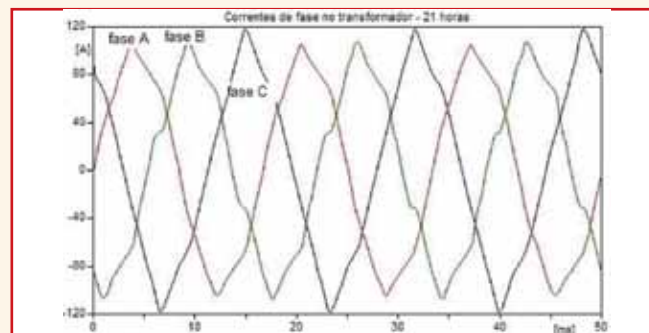


Figura 9 – Correntes resultantes de simulação no transformador – 21h.

Das Figuras 7, 8 e 9, apenas as correntes de fase à 12h ficaram fortemente desbalanceadas. Isso se explica na modelagem das residências. A carga da residência de consumo alto estava fortemente desequilibrada nas três fases, com uma corrente de valor alto na fase A, fazendo a resultante ser alta nesta fase. Os conteúdos harmônicos das formas de onda estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5.

TABELA 3
CONTEÚDO HARMÔNICO DAS FORMAS DE ONDA DE CORRENTE DA FIGURA 7 (12H)

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 43,47 \text{ A}$		$I_{rms} = 17,72 \text{ A}$		$I_{rms} = 25,02 \text{ A}$	
	THD _i = 4,05%		THD _i = 8,34%		THD _i = 6,74%	
	Fator de crista = 1,47		Fator de crista = 1,52		Fator de crista = 1,46	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-15,62	100,00	-168,84	100,00	82,42
3	1,85	-145,58	6,24	61,15	4,87	64,56
5	3,32	17,67	4,49	147,75	4,27	-98,47
7	0,87	-151,52	2,88	124,09	1,07	-23,93
9	0,94	26,83	0,52	-146,37	1,20	10,57
11	0,59	-166,19	1,39	-57,83	0,94	85,32

Comparando os valores simulados com os valores medidos de corrente no transformador (Tabelas 2, 3 e 4 do Capítulo VIII), os valores resultantes da simulação ficaram mais equilibrados do que os encontrados nas medições. Os valores de THD de corrente também apresentaram diferença, que pode ser explicada pela diferença de correntes harmônicas de cada residência. Como para a simulação foi considerado um

conjunto de residenciais com a mesma corrente harmônica e mais chuveiros para completar a potência medida no transformador, as diferenças podem ter ocorrido devido a esse tipo de modelagem.

TABELA 4
CONTEÚDO HARMÔNICO DAS FORMAS DE ONDA DE CORRENTE DA FIGURA 8 (2H)

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 38,13 \text{ A}$		$I_{rms} = 36,34 \text{ A}$		$I_{rms} = 37,28 \text{ A}$	
	THD _i = 8,90%		THD _i = 11,51%		THD _i = 7,66%	
	Fator de crista = 1,38		Fator de crista = 1,38		Fator de crista = 1,41	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-14,28	100,00	-136,25	100,00	94,92
3	4,00	-48,13	6,54	-53,12	5,09	9,08
5	7,68	92,33	9,16	-143,81	5,27	-43,38
7	1,33	-5,04	1,02	-94,44	1,39	95,13
9	0,26	-126,63	0,49	142,73	0,45	-51,72
11	1,32	-88,59	1,17	41,90	1,50	144,52

TABELA 5
CONTEÚDO HARMÔNICO DAS FORMAS DE ONDA DE CORRENTE DA FIGURA 9 (21H)

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$I_{rms} = 70,23 \text{ A}$		$I_{rms} = 67,99 \text{ A}$		$I_{rms} = 73,01 \text{ A}$	
	THD _i = 5,50%		THD _i = 10,05%		THD _i = 9,22%	
	Fator de crista = 1,48		Fator de crista = 1,57		Fator de crista = 1,67	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	-1,33	100,00	-119,12	100,00	117,61
3	2,34	-39,95	3,21	164,59	6,69	-154,02
5	4,19	67,07	9,04	-154,53	6,19	-60,66
7	1,17	-114,20	0,28	-28,30	1,42	-26,50
9	0,27	-151,42	1,49	1,59	0,89	32,32
11	1,12	-93,51	1,77	70,20	0,88	154,85

As distorções de tensão nos três pontos indicados na Figura 5 foram determinados com duas suposições: sem e com pré-distorção. No caso com uma pré-distorção as tensões utilizadas foram aquelas medidas na saída do alimentador da subestação nos horários de carga leve, média e pesada.

As distorções de tensão, em todos os casos, tinham o 5º harmônico como o maior harmônico do espectro. Como a distorção é baixa em todos os casos, representá-las até o 7º harmônico retrata bem a forma de onda de tensão naqueles instantes. Os conteúdos harmônicos das tensões nos momentos mencionados são mostrados nas Tabelas 6, 7 e 8.

TABELA 6
CONTEÚDO HARMÔNICO DAS TENSÕES ÀS 12H (CARGA LEVE) UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$	
	$THD_v = 1,08\%$		$THD_v = 0,99\%$		$THD_v = 0,95\%$	
	Fator de crista = 1,43		Fator de crista = 1,43		Fator de crista = 1,43	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	0,00	100,00	-119,74	100,00	120,36
3	0,40	111,34	0,45	95,89	0,18	-144,76
5	0,87	-38,48	0,73	91,47	0,80	-155,99
7	0,47	-143,75	0,47	97,98	0,42	-14,93

Os resultados das distorções de tensão são apresentados na Tabela 9.

Estes resultados de simulações podem ser comparados com os THDs de tensão medidos nas residências e apresentados no Capítulo VI (Figuras 3, 10, 17 e 26). O ponto de medição 3 na

TABELA 7
CONTEÚDO HARMÔNICO DAS TENSÕES ÀS 2H (CARGA MÉDIA) UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$	
	$THD_v = 1,31\%$		$THD_v = 1,43\%$		$THD_v = 1,20\%$	
	Fator de crista = 1,41		Fator de crista = 1,42		Fator de crista = 1,40	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	0,00	100,00	-119,93	100,00	120,23
3	0,49	69,64	0,72	130,80	0,14	-152,90
5	1,16	-91,61	1,17	27,27	1,14	149,24
7	0,36	-143,18	0,38	101,16	0,35	-16,50

TABELA 8
CONTEÚDO HARMÔNICO DAS TENSÕES ÀS 21H (CARGA PESADA) UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$		$V_{rms} = 6,58 \text{ kV}$	
	$THD_v = 1,19\%$		$THD_v = 1,27\%$		$THD_v = 1,11\%$	
	Fator de crista = 1,40		Fator de crista = 1,42		Fator de crista = 1,40	
	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)	Módulo (%)	Ângulo (graus)
1	100,00	0,00	100,00	-119,95	100,00	120,34
3	0,34	84,36	0,58	96,00	0,22	-151,85
5	1,07	-49,56	1,05	71,85	1,02	-169,04
7	0,41	-169,51	0,42	74,06	0,39	-43,39

simulação é a localização do circuito de entrada da residência de consumo alto.

Os valores de simulação que se aproximam com os valores medidos estão na situação com pré-distorção (diferença média na ordem de 10%). A tendência de variabilidade do THD conforme o horário, encontrada na simulação, pode também ser constatada na medição.

TABELA 9
DISTORÇÕES DE TENSÃO NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIO

Ponto de medição 1 – próximo ao transformador						
Carga/horário	Sem pré-distorção			Com pré-distorção		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	0,33	0,26	0,27	1,28	1,15	1,07
Média / 2h	0,57	0,70	0,45	1,05	1,10	1,35
Pesada / 21h	0,69	1,48	1,11	1,57	2,04	2,00
Ponto de medição 2 – ponta do sistema de distribuição secundário						
Carga/horário	Sem pré-distorção			Com pré-distorção		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	0,42	0,34	0,33	1,35	1,20	1,08
Média / 2h	0,60	0,80	0,51	1,05	1,12	1,42
Pesada / 21h	0,76	1,76	1,44	1,61	2,24	2,29
Ponto de medição 3 – ponta do sistema de distribuição secundário						
Carga/horário	Sem pré-distorção			Com pré-distorção		
	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)	Va (%)	Vb (%)	Vc (%)
Leve / 12h	0,33	0,20	0,33	1,25	1,10	1,18
Média / 2h	0,79	0,95	0,67	1,35	1,20	1,08
Pesada / 21h	0,89	1,67	1,16	1,67	2,11	2,06

Referências

IEEE std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
 MARTINEZ, J. A. Power Quality Analysis Using Electromagnetic Transient Programs, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP '98, Oct. 14-16 1998, Athens, Greece.
 JUN, W.; SAHA, T. K. Simulation of Power Quality Problems on a University Distribution System, IEEE Power Engineering Society General Meeting 16-20 July 2000 Page(s): 2326 – 2331, v. 4.

UMEH, K. C et al. Determining Harmonic Characteristics of Typical Single Phase Non-Linear Loads, Proceeding of Student Conference on Research and Development (Scored), 2003, Putrajaya, Malaysia.

Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks – Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 1, Jan. 1996.

Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, Test Systems for Harmonic Modeling and Simulation, IEEE Transaction on Power Delivery, v. 14, n. 2, Apr. 1999.

WANG, Y. et al. Modeling and Prediction of Distribution System Voltage Distortion Caused by Nonlinear Residential Loads, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 4, Oct. 2001.

BASS, R. et al. Residential Harmonic Loads and EV Charging, IEEE Transactions, 2001.

NBR-5440 – Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição. Padronização, ABNT, Jul. 1999.

**IGOR AMARIZ PIRES é engenheiro eletricista, mestre e doutorando em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com ênfase em qualidade da energia elétrica.*

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
 Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atituedeeditorial.com.br