

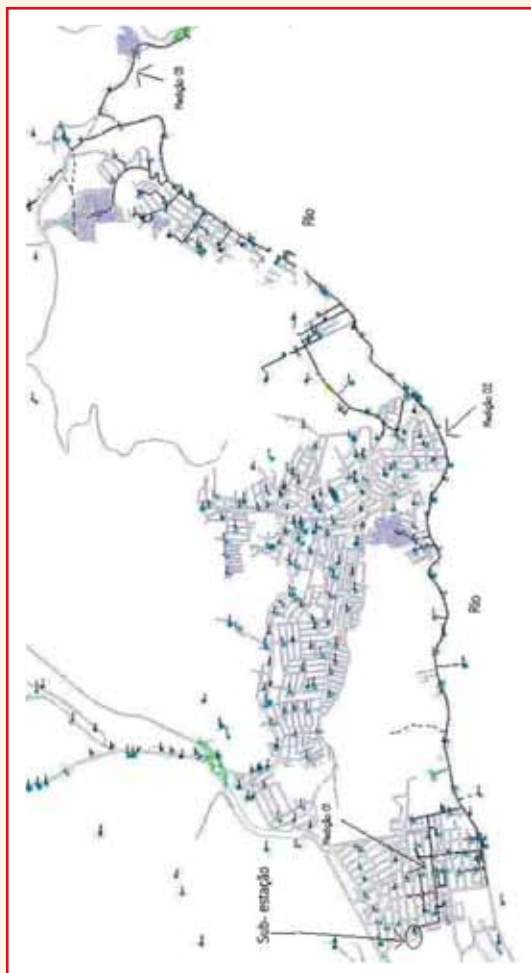
## Capítulo X

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

Igor Amariz Pires\*

### *Simulação de distribuição primária*

O sistema de distribuição de média tensão (rede primária – 11,4 kV), que alimentava o sistema de distribuição secundário, foi modelado e simulado para também se ter uma noção de como as correntes harmônicas circulantes distorcem a forma de onda



**Figura 1 - Mapa mostrando o percurso do alimentador primário – 11,4 kV**

de tensão. Este alimentador primário pode ser visualizado na Figura 1.

Para se atingir este objetivo, primeiro era preciso saber quais eram as correntes harmônicas circulantes na média tensão, já que haviam apenas simulações e medições destas correntes no sistema de baixa tensão.

A rede primária tinha um comprimento de 11 km, com condutores típicos 3/0 AWG. Dispostos horizontalmente, o espaçamento entre condutores era de um metro. A maior parte dos transformadores era de 45 kVA (15 unidades), 75 kVA (35 unidades) e 112,5 kVA (13 unidades). O transformador que alimentava a rede primária era de 30 MVA, 69/11,4 kV.

De consumidores residenciais, havia 3.519 unidades que consumiam 546.817 kWh/mês, o que dava uma média por consumidor de 155 kWh/mês. Já de consumidores comerciais havia 341 com um consumo mensal de 272.757 kWh, dando uma média por consumidor de 800 kWh/mês. O número de consumidores industriais era de 184, com um consumo de 569.949 kWh/mês, sendo que a média por consumidor era de 3.098 kWh/mês.

No que diz respeito ao nível de curto circuito na subestação, para uma falta trifásica simétrica, a potência de curto-circuito era de 224,9 MVA, sendo a corrente da falta simétrica igual a 8,66 kA. A relação X/R nesta falta era de 3,73. Por fim, havia um banco de capacitores de 600 kVAr que se localizava no meio da rede, conectado em estrela.

Os transformadores de distribuição tinham a configuração triângulo-estrela aterrada. Esta configuração de transformador, em um sistema equilibrado, eliminaria os harmônicos de ordem tripla, quando seus valores forem iguais nas três fases.

Entretanto, as correntes e seus harmônicos não eram equilibrados. Assim, para saber quais harmônicos haveria na média tensão, o transformador delta-estrela foi simulado com as correntes do secundário. Para se determinar os parâmetros (R,X) dos transformadores, foram usados os valores de correntes de excitação e perdas estabelecidos pela norma NBR 5440.

A Tabela 1 mostra os valores retirados da norma que representam os valores máximos permitidos em transformadores de distribuição. Utilizaram-se tanto os resultados de simulação das residências uniformemente distribuídas quanto a medição de corrente no transformador.

| Potência (kVA) | Corrente de excitação (%) | Perdas máximas (W) |
|----------------|---------------------------|--------------------|
| 45             | 3,7                       | 884                |
| 75             | 3,1                       | 1300               |
| 112,5          | 2,8                       | 1759               |

As simulações mostraram que o transformador na configuração triângulo-estrela aterrado promove uma diminuição na distorção de corrente, pois serve como um bloqueio para alguns harmônicos. Algumas correntes secundárias que tinham uma distorção média de 10%, iam para 5% no lado de média tensão (transformadores de 75 kVA e 112,5 kVA).

A Tabela 2 apresenta os THDs das correntes resultantes de medição no secundário e seus respectivos THDs no primário dos transformadores delta-estrela.

| Resultado das residências uniformemente distribuídas |                |       |      |              |      |      |
|--|----------------|-------|------|--------------|------|------|
| Horário  | Secundário (%) |       |      | Primário (%) |      |      |
|  | A              | B     | C    | A            | B    | C    |
| 12h  | 3,45           | 6,72  | 5,34 | 4,41         | 3,98 | 3,90 |
| 21h  | 5,50           | 10,05 | 9,19 | 6,26         | 7,45 | 6,05 |
| 2h   | 8,90           | 11,51 | 7,66 | 6,60         | 7,19 | 6,09 |

| Horário | Secundário (%) |       |       | Primário (%) |      |      |
|---------|----------------|-------|-------|--------------|------|------|
|         | A              | B     | C     | A            | B    | C    |
| 12h     | 10,52          | 12,97 | 16,15 | 9,42         | 6,50 | 8,51 |
| 21h     | 11,51          | 5,84  | 11,19 | 5,17         | 5,43 | 4,78 |
| 2h      | 5,56           | 7,92  | 5,35  | 2,89         | 5,59 | 5,12 |

| Horário | Secundário (%) |       |      | Primário (%) |      |      |
|---------|----------------|-------|------|--------------|------|------|
|         | A              | B     | C    | A            | B    | C    |
| 12h     | 12,66          | 11,35 | 9,33 | 5,09         | 8,08 | 6,21 |
| 21h     | 10,74          | 10,94 | 8,65 | 5,75         | 8,66 | 5,32 |
| 2h      | 8,79           | 5,79  | 9,15 | 4,27         | 5,99 | 5,79 |

| Horário | Secundário (%) |      |       | Primário (%) |      |      |
|---------|----------------|------|-------|--------------|------|------|
|         | A              | B    | C     | A            | B    | C    |
| 12h     | 12,09          | 7,97 | 11,47 | 5,37         | 4,96 | 9,42 |
| 21h     | 11,76          | 7,62 | 8,37  | 6,23         | 5,42 | 5,76 |
| 2h      | 8,70           | 4,52 | 3,72  | 4,94         | 4,59 | 3,21 |

Com os resultados das correntes nos primários nas situações das residências uniformemente distribuídas e dos transformadores, os horários de 12h, 21h e 2h foram simulados. Estes resultados foram modelados e distribuídos ao longo do alimentador, sendo o alimentador também modelado conforme as suas características físicas anteriormente apresentadas.

Houve duas simulações: uma simulação realizada com transformadores de 45 kVA, 75 kVA e 112,5 kVA, e uma segunda simulação com transformadores modelados a partir dos resultados da simulação das residências uniformemente distribuídas, ou seja, da simulação do sistema secundário de distribuição. Neste último caso, como o resultado da simulação do conjunto de residências era para um transformador de 45 kVA, este resultado foi extrapolado para os transformadores de 75 kVA e 112,5 kVA, por meio de uma regra de três simples.

Avaliou-se a tensão nas simulações em três pontos distintos (Figura 1): próximo à subestação (medição 1), meio do alimentador (medição 2) e no fim do alimentador (medição

3). Dos resultados encontrados, calculou-se o THD de tensão nestes pontos, que são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, os maiores valores de THDs de tensão são encontrados às 21h. Este instante é também o instante de maior carregamento nos transformadores e, por consequência, no alimentador dos três horários analisados nos resultados obtidos por meio de simulações.

Os momentos de maior carregamento no alimentador terão maior distorção na forma de onda. Isso é explicado por não haver uma variação muito brusca na distorção de corrente nos instantes analisados. Assim, quanto maior o valor de corrente, tão maior serão os valores absolutos dos harmônicos e da fundamental. Assim, as quedas de tensão devido aos harmônicos serão maiores e, por consequência, levarão a uma maior distorção na tensão.

Na Tabela 3, os THDs de tensão às 12h são menores do que às 2h. Já na Tabela 4 ocorre o inverso. Isso só acontece na Tabela 3 porque o alimentador tem somente as características dos transformadores de consumidores residenciais. Já na Tabela 3, os transformadores levaram em conta a contribuição dos consumidores comerciais, o que em um transformador que alimenta estes consumidores em conjunto com consumidores residenciais às 12h há uma maior carga que às 2h de madrugada, por isso, a distorção, às 12h, será maior.

### Conclusões gerais

Algumas simulações foram apresentadas neste e no capítulo anterior, que tiveram como objetivo mostrar como a corrente demandada em uma residência ou comércio fica alterada com a interação de vários eletrodomésticos. Além disso, também foram investigadas como as correntes harmônicas distorcem a tensão ao longo de um alimentador secundário e também ao longo de um alimentador primário.

Trinta simulações da interação de vários eletrodomésticos foram conduzidas. Os eletrodomésticos foram modelados e, a partir dessas simulações, percebeu-se também a correlação inversa entre a corrente eficaz e seu THD. Esta correlação é explicada por serem ainda as cargas lineares as cargas de maior potência em consumidores residenciais e comerciais, nos casos investigados.

A partir das medições de consumidores residenciais e comerciais e transformadores, foram realizadas simulações em um circuito de baixa tensão (220 V) e outra simulação em um circuito de média tensão (11,4 kV). A simulação de baixa tensão foi realizada sem e com uma pré-distorção na fonte de tensão.

Das simulações dos circuitos, pode-se perceber que a tensão vai ficando mais distorcida à medida que o circuito se distancia do transformador da subestação que atende o alimentador. Isso se deve às quedas de tensão harmônicas

**TABELA 3**  
**THDs DE TENSÃO AO LONGO DO ALIMENTADOR – SIMULAÇÃO A PARTIR DE TRANSFORMADORES COM RESIDÊNCIAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS**

| Próximo à subestação |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|
|                      | Fase A | Fase B | Fase C |
| 12h                  | 0,08   | 0,08   | 0,07   |
| 21h                  | 0,23   | 0,57   | 0,23   |
| 2h                   | 0,15   | 0,16   | 0,13   |
| Meio do alimentador  |        |        |        |
|                      | Fase A | Fase B | Fase C |
| 12h                  | 0,39   | 0,4    | 0,32   |
| 21h                  | 1,13   | 1,7    | 1,17   |
| 2h                   | 0,74   | 0,82   | 0,67   |
| Fim do alimentador   |        |        |        |
|                      | Fase A | Fase B | Fase C |
| 12h                  | 0,64   | 0,65   | 0,53   |
| 21h                  | 1,85   | 2,62   | 1,93   |
| 2h                   | 1,21   | 1,36   | 1,11   |

**TABELA 4**  
**THDs DE TENSÃO AO LONGO DO ALIMENTADOR – SIMULAÇÃO A PARTIR DAS MEDIÇÕES EM TRANSFORMADORES**

| Próximo à subestação |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|
|                      | Fase A | Fase B | Fase C |
| 12h                  | 0,64   | 0,77   | 0,58   |
| 21h                  | 0,50   | 1,06   | 0,71   |
| 2h                   | 0,42   | 0,56   | 0,45   |
| Meio do alimentador  |        |        |        |
|                      | Fase A | Fase B | Fase C |
| 12h                  | 1,06   | 1,3    | 0,98   |
| 21h                  | 0,82   | 1,65   | 1,17   |
| 2h                   | 0,71   | 0,93   | 0,76   |
| Fim do alimentador   |        |        |        |
|                      | Fase A | Fase B | Fase C |
| 12h                  | 0,64   | 0,65   | 0,53   |
| 21h                  | 1,85   | 2,62   | 1,93   |
| 2h                   | 1,21   | 1,36   | 1,11   |

que vão ocorrendo no alimentador conforme se distancia da subestação. Apesar das distorções de tensão encontradas na simulação, em nenhum caso foram encontradas distorções que estivessem acima das normas.

Nos próximos capítulos, serão apresentadas informações adicionais desse trabalho, que, originalmente, eram apêndices da dissertação de mestrado que deu origem a esse fascículo. No final, serão feitas proposições para trabalhos futuros, dando continuidade ao tema.

### 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, October 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, January 1996.

*Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, Test Systems for Harmonic Modeling and Simulation*, IEEE Transaction on Power Delivery, v. 14, n. 2, April 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, October 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](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)