

# Fluxo de Carga Harmônico para Operação e Planejamento de Sistemas Radiais de Distribuição através dos Métodos Soma de Potências e Montagem da Matriz Impedância de Barras

D.Sc. J. T. Oliveira, UFRN; Dr.-Ing. M. F. Medeiros Jr, UFRN; E. F. Silva, UFRN e Engo. G. Bezerra Jr, COSERN

## RESUMO

Este trabalho apresenta a técnica Fluxo de Carga Harmônico Soma de Potências (FCHSP). Esta técnica é estruturada a partir dos métodos Soma de Potências e Montagem da Matriz Impedância de Barras. O objetivo é resolver um fluxo de carga harmônico para planejamento e operação de sistemas radiais de distribuição, com cargas equilibradas. Sua metodologia de cálculo está estruturada de forma que, para a componente fundamental da frequência utiliza-se o método da Soma de Potências, enquanto que para o cálculo das tensões no restante do espectro de frequências (harmônicos), utiliza-se a montagem da matriz impedância de barras do sistema elétrico, tendo como fontes de corrente, as correntes medidas em um ou mais consumidores, identificados como responsáveis pela injeção de correntes harmônicas do sistema elétrico de distribuição. Como ilustração, mostra-se um exemplo de aplicação com a referida técnica, implementada computacionalmente, procurando ressaltar a flexibilidade do uso do programa desenvolvido.

## PALAVRAS-CHAVE

Fluxo de Carga, Harmônicos, Matriz Impedância, Soma de Potências.

## I. INTRODUÇÃO

Estudos de fluxo de carga através de computador digital para planejamento e operação de sistemas de potência são práticas largamente utilizadas já há um certo tempo. Porém, a análise de sistemas de distribuição, mais especificamente, o desenvolvimento de fluxo de potência para sistemas radiais de distribuição é matéria de interesse recente.

Este trabalho foi financiado pelo "Programa de Pesquisa & Desenvolvimento da COSERN, dentro do Projeto de Transitórios Eletromagnéticos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica" em convênio com os Departamentos de Engenharia Elétrica e de Engenharia de Computação e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

J. T. Oliveira é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRN (e-mail: jtavares@ct.ufrn.br).

M. F. Medeiros Jr é professor do Departamento de Engenharia de Computação e Automação - UFRN (e-mail: firmino@dca.ufrn.br)..

E. F. Silva é graduando em Engenharia Elétrica pela UFRN (e-mail: fernandeselves@bol.com.br).

Na distribuição, um fator que deve ser relevante no estudo de fluxo de carga é o aparecimento dos efeitos produzidos por cargas com características não lineares, ocasionando tensões e correntes harmônicas que se propagam através do sistema elétrico. A consideração desses harmônicos resulta em encontrar uma solução mais próxima da realidade. Sendo assim, além das preocupações vinculadas a um estudo convencional de fluxo de carga, surgem outras, relacionadas à qualidade da energia como as distorções harmônicas de tensão e de corrente - THDV (Total Harmonic Distortion Voltage) e THDI (Total Harmonic Distortion Current).

A proposta desse trabalho é desenvolver um método para cálculo de fluxo de carga harmônico para planejamento e operação de sistemas radiais de distribuição, com cargas equilibradas. A solução desse fluxo de carga está estruturada de forma que, para a componente fundamental da frequência é utilizado o método Soma de Potências, enquanto que para o cálculo das tensões no restante do espectro de frequências (harmônicos) é utilizada a montagem da matriz impedância de barras do sistema elétrico, tendo como fontes de corrente, as correntes medidas em um ou mais consumidores, identificados como responsáveis pela injeção de correntes harmônicas do sistema elétrico de distribuição.

## II. MODELAGEM DOS COMPONENTES DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

### A. Linhas de distribuição

Essas linhas foram consideradas como curtas, resistência em série com uma reatância (Figura 1).



FIGURA 1. Modelo da rede.

### B. Cargas

Para a frequência fundamental as cargas são consideradas como potências constantes.

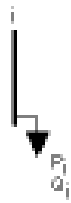


FIGURA 2. Modelo de carga para a frequência fundamental (potência constante).

Para os harmônicos as cargas são consideradas com impedâncias constantes.

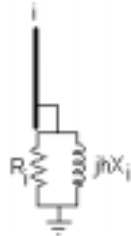


FIGURA 3. Modelo de carga para harmônicos (impedância constante).

### III. FORMULAÇÃO E SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DO FLUXO DE CARGA

#### A. Método de Solução - Soma de Potências Aspectos Básicos

A solução de fluxo de carga por esse método consiste em resolver (1), para os trechos de um alimentador, mostrado através da Figura 4.

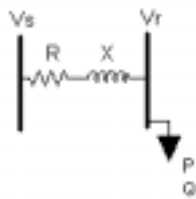


FIGURA 4. Elemento básico para o método de Soma de Potências.

$$V_r^4 + [2 \cdot (PR + QX) - V_s^2] \cdot V_r^2 + (P^2 + Q^2) \cdot (R^2 + X^2) = 0 \quad (1)$$

onde:

s: barra do lado da fonte;

r: barra do lado da carga;

$V_s$ : módulo da tensão do lado da fonte;

$V_r$ : módulo da tensão do lado da carga;

P, Q: soma das potências ativas e reativas a jusante da barra de carga incluindo as perdas;

As perdas ativas e reativas são calculadas pelas equações seguintes:

$$L_p = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (2)$$

$$L_q = X \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{V_r^2} \quad (3)$$

onde:

$L_p$ : perdas ativas do ramo;

$L_q$ : perdas reativas do ramo.

#### Fluxo Soma de Potências - Procedimento de cálculo:

1. Ler os dados da rede incluindo os parâmetros, descrição da topologia, módulo da tensão na fonte, tensões e potências nominais nas cargas. Converte os valores para pu.
2. Assume que as tensões em todas as barras são iguais a 1 pu. As perdas inicialmente são nulas;
3. Calculam-se as potências soma para cada barra de carga. Todas as potências a jusante a esta barra são somadas e alocadas na posição correspondente a barra, incluindo as perdas. Este procedimento se dá no sentido das barras terminais para a fonte;
4. Começando da barra da fonte e usando (7), calculam-se as tensões do lado da carga para todas as barras. Este procedimento se dá no sentido da fonte para as barras terminais;
5. Com as novas tensões recalculam-se as perdas através de (8) e (9). Recalculam-se as novas cargas. Verificam-se as variações das tensões com respeito aos valores calculados anteriormente se são maiores que um erro especificado, vá para o passo 3. Caso contrário, imprima todos os resultados e PARE.

#### B. Montagem da Matriz Impedância de Barras e Fontes de Correntes Medidas

Os métodos das fontes de correntes (ou injeção de correntes) são as formas mais comuns de análises de harmônicos. Consistem em modelar cargas não lineares como sendo fontes de correntes. Mais especificamente, essas cargas não lineares são representadas por um somatório de correntes.

##### Análise de Harmônicos - Procedimento de cálculo:

1. Montagem das matrizes impedâncias de barras  $[Z_{BARRA}]_{n \times n}^{h \neq 1}$  para cada harmônico de interesse  $h = h_{\min}, \dots, h_{\max}$ . Os parâmetros reativos tanto das linhas como das cargas são modelados como  $jh \cdot X_i$ ;
2. Construção dos vetores de correntes complexas medidas para os consumidores identificados, responsáveis por

injeção de correntes harmônicas  $[I]^i = \begin{bmatrix} I_{h,\min} \\ \vdots \\ I_{h,\max} \end{bmatrix}$ . Onde i

é o número da barra e h o harmônico de interesse.  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $h = h_{\min}, \dots, h_{\max}$ ;

3. As tensões nas barras para cada harmônico considerado são obtidas fazendo variar a ordem dos harmônicos de interesse de  $h_{\min}$  até  $h_{\max}$  e aplicando a equação a seguir:

$$\begin{bmatrix} V^i \\ \vdots \\ V^n \\ \vdots \end{bmatrix}^{h,\min} = [Z_{BARRA}]_{n \times n}^{h,\min} \cdot [I_{h,\min}^i, \dots, I_{h,\min}^n]^T_{n \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ V^i \\ \vdots \\ \vdots \\ V \end{bmatrix}^{h,\text{máx}} = [Z_{\text{BARRA}}]_{n \times n}^{h,\text{máx}} \cdot [I_{h,\text{máx}}^1, \dots, I_{h,\text{máx}}^n]^T \quad (10)$$

#### IV. FORMULAÇÃO GERAL DA TÉCNICA DO FLUXO DE CARGA HARMÔNICO

Com base nos métodos apresentados nas subseções A e B, foi proposto um algoritmo que realiza de forma integrada a solução para a frequência fundamental e frequências harmônicas. Essa técnica é chamada de Fluxo de Carga Harmônico Soma de Potências (FCHSP). Ela é estruturada em duas partes, a saber: Fluxo Soma de Potência e Análise de harmônicos. Veja a Figura 5.

As principais características da técnica FCHSP podem ser sumarizadas como segue:

1. O algoritmo FCHSP é um programa monofásico. Ele pode ser considerado no estudo de planejamento e operações de sistemas em condições desequilibradas, como uma boa aproximação;
2. Permite a inclusão de cargas com características não lineares em qualquer barra do sistema;

#### V. EXEMPLO DE APLICAÇÃO: SISTEMA COM 4 (QUATRO) BARRAS

Um consumidor industrial deseja ser atendido a partir de uma subestação de 69/13,8 kV. Ele terá uma carga trifásica equilibrada de 1MW e  $f_p = 0,863$  (carga convencional). Em sua proximidade existirá um outro consumidor com carga não convencional.



FIGURA 5. Fluxograma da técnica empregada.

#### A. Detalhamento do Sistema

Subestação Abaixadora 69/13,8 kV

Barra da subestação: Barramento infinito com Tensão de fornecimento 13,8 kV e frequência de 60Hz.

Reatância da Barra da Subestação para a Terra (só para harmônicos): 0,1904 W

Alimentador Elétrico de Distribuição

Todos os dados referentes à construção da linha de distribuição estão especificados na Tabela 1.

TABELA 1

Dados do Alimentador de Distribuição

Trecho	Tipo de Cabo	R (W/km)	X (W/km)	Distância (km)	
1	2	1/0 CAA	0,6005	0,4321	1,10
2	3	1/0 CAA	0,6005	0,4321	2,22
3	4	4 CAA	1,5212	0,4670	1,03

#### Consumidores de Energia Elétrica Atendidos

Os consumidores atendidos em 13,8 kV pelo alimentador estão mostrados na Tabela 2.

O consumidor industrial com carga não convencional localizado na barra 4 (quatro) do alimentador apresenta o conteúdo harmônico de corrente mostrado na Tabela 3.

TABELA 2

Descrição das Cargas do Sistema de Distribuição

Barra	P (kW)	Q (kVAr)	Descrição das Cargas
1	0	0	Subestação
2	8,3	5,1	Transformador de Carga Residencial
3	1000	585	Consumidor Industrial – Convencional
4	16	8	Consumidor Industrial – Carga não Convencional

TABELA 3

Injeção de Correntes Harmônicas do Consumidor localizado na Barra 4

I	3ª	5ª	7ª
Módulo (A)	0,25	0,10	0,05
Fase (°)	0	0	0

#### Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição

Mediante a verificação das Tabelas I, II e III e fazendo uma análise do diagrama unifilar, mostrado na Figura 6, é possível uma compreensão melhor do sistema proposto como exemplo.

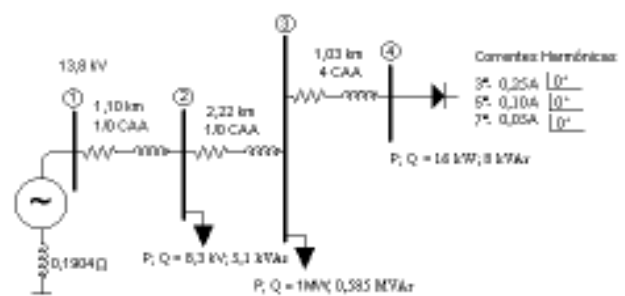


FIGURA 6. Diagrama unifilar do sistema de distribuição

## VI. SIMULAÇÃO DO EXEMPLO COM FCHSP E RESULTADOS OBTIDOS

Utilizando a técnica FCHSP foi possível desenvolver uma ferramenta computacional eficaz no planejamento e operação de sistemas elétricos radiais de distribuição. Com este aplicativo desenvolvido é possível realizar análise da distorção harmônica de tensão e de corrente e verificar o perfil de tensão ao longo do alimentador. Sua tela principal é mostrada através da Figura 7.

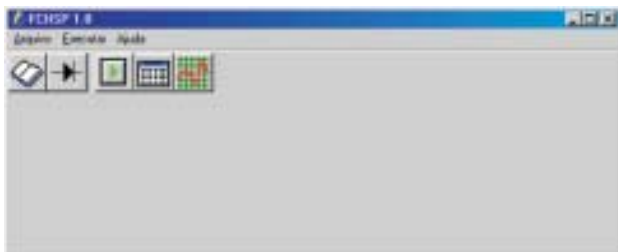



FIGURA 7. Interface gráfica do programa FCHSP.

Para executar uma demonstração com FCHSP deve-se seguir os passos abaixo mencionados:

Na tela do FCHSP o botão  estará habilitado. Acione-o com um único *click*. Então aparecerá a tela tal como mostra a Figura 8.

Em seguida, preencha os campos com: Número de Barras: 4; Número de Linhas: 3; Digite os dados das Tabelas I (colunas 1, 2, 4, 5 e 6) e II (colunas 1, 2 e 3); Impedância da Subestação (ohm): 0.1904 e Tensão Primária (kV): 13.8;

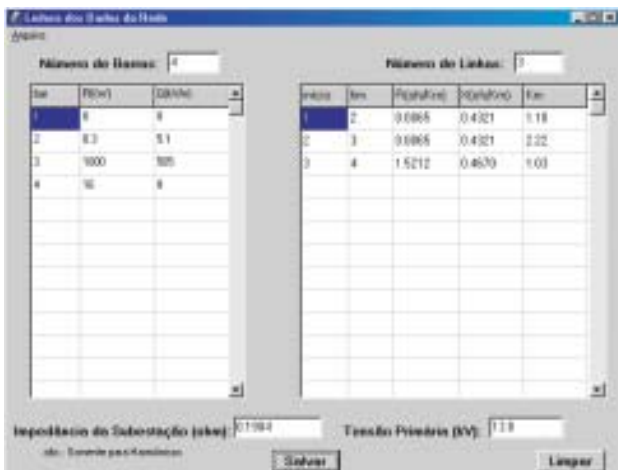


FIGURA 8. Tela de leitura dos dados do sistema (das linhas e das barras) com os valores numéricos do exemplo de aplicação.

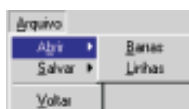



FIGURA 9. Opções para edição de arquivos de dados.

Depois de ter preenchido todos os campos, acione o botão Salvar (Figura 8) para carregar os dados e, em seguida, o botão Voltar (Figura 9).

Na tela inicial do FCHSP o botão  já estará habilitado. Acione-o com um único *click* que aparecerá a tela tal como mostra a Figura 10.

Preencha todos campos desta forma: CNL – Barra: 4; Máximo Harmônico Desejado: 7; Digite os dados da Tabela 3 (colunas 2, 3 e 4). Veja a Figura 13.

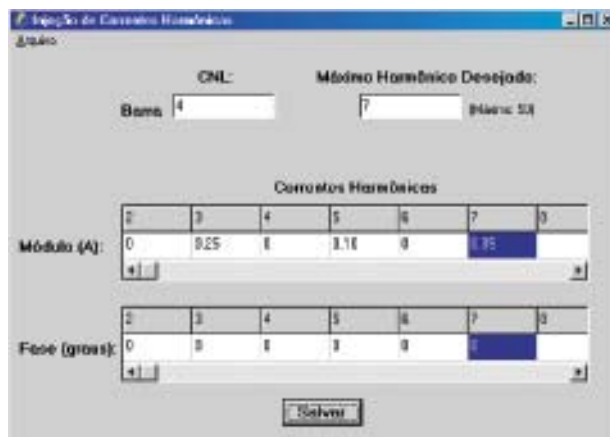


FIGURA 10. Tela para entrada dos dados de correntes harmônicas injetadas pelo consumidor.

Depois de ter preenchido os campos indicados, acione o botão Salvar (Figura 10) para carregar os dados e, em seguida, Voltar (Figura 11) para retornar à tela principal.

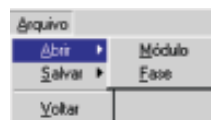





FIGURA 11 – Opções para edição de arquivos.

Na tela principal do FCHSP o botão  estará habilitado. Acione-o com um único *click* para executar o fluxo de carga harmônico. Então aparecerão habilitados na barra de ferramentas os botões para análises dos resultados : Acione o botão  para verificar o perfil de tensão ao longo do alimentador de distribuição referente ao exemplo de aplicação com 4 (quatro) barras. Veja o resultado na tela mostrada na Figura 12.

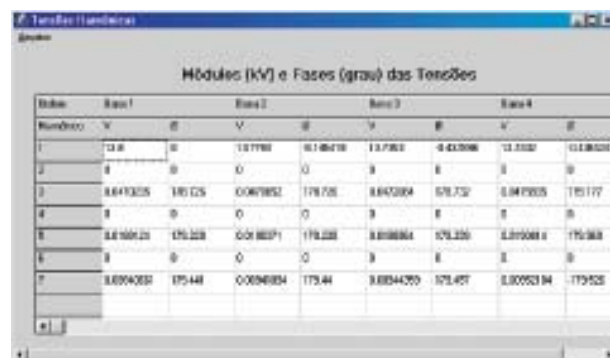


FIGURA 12. Tensões do sistema exemplo 4 (quatro) barras.

Na opção Arquivo, no topo da tela, selecione Voltar. Dessa forma, retornar-se para a tela principal (Figura 7).


Em seguida, acione com um *click* o botão  para verificar o comportamento da tensão em função do tempo a partir de qualquer barra do sistema e da corrente em função do tempo a partir de qualquer trecho desse referido sistema. Acionando este botão, o programa apresentará a tela tal como mostra a Figura 13.



FIGURA 13 - Opções de exibição gráfica – tensão e corrente.

Para ver o comportamento da tensão na barra 4, por exemplo, basta preencher o campo com o número da Barra: 4 e selecionar OK. Então será apresentada a tela como mostra a figura 14.

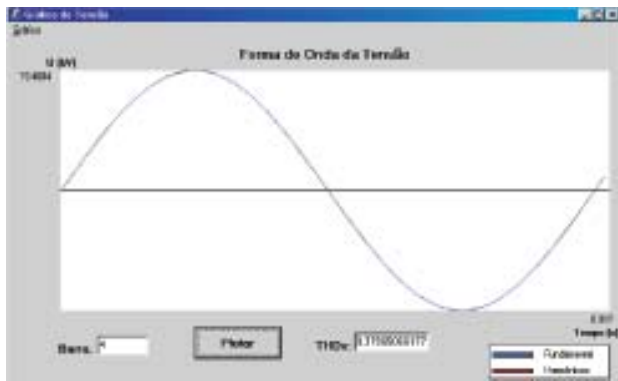


FIGURA 14- Comportamento da tensão na barra 4.

A partir da Figura 13, selecione a opção Corrente e dê um *click* no botão OK. Então o programa apresentará a tela mostrada na Figura 14. Agora, deve-se preencher o campo dessa forma: Trecho - De: 4 Para: 0. Em seguida, acione o botão Plotar. Veja o resultado na Figura 15.

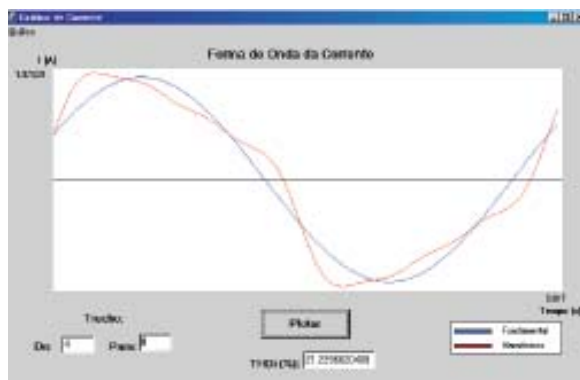


FIGURA 15 - Tela mostrando o comportamento da corrente no trecho da barra 4 para a terra "0"

No topo da tela, existe a opção: Gráfico, a qual possibilita escolher Plotar ou Voltar. Selecionando esta última, retorna-se a tela principal (figura 7).

Para efeito de análise dos resultados obtidos mostrados nas Figuras 12, 14 e 15 tece-se um comentário a seguir:

A Figura 12 mostra o perfil de tensão ao longo do alimentador do sistema considerado, para a frequência fundamental e, para cada harmônico. A componente fundamental de tensão do sistema não apresenta variação muito significativa ao longo do alimentador. Os harmônicos de tensão apresentam uma contribuição pequena para a composição da tensão resultante. Isso fica claro quando analisamos a Figura 14, onde a distorção harmônica de tensão (THDV) na barra 4 é 0,38%, aproximadamente. Essa distorção é a maior que se pode ter neste sistema, pois a injeção de correntes harmônicas pelo consumidor é feita através da barra 4. Sendo assim, a maior distorção será nesta barra, em virtude de que a propagação dos harmônicos ao longo do alimentador será atenuada. A Figura 15 mostra a forma de onda da corrente que está sendo injetada na barra 4 e sua distorção harmônica (THDI).

## VII. CONCLUSÕES

A técnica (FCHSP) monofásica de fluxo de carga harmônico foi desenvolvida para análise harmônica de sistemas radiais de distribuição submetidos a quaisquer tipos de cargas não lineares em condições equilibradas. Esta técnica se compõe de duas partes principais. A primeira parte consiste em resolver um fluxo convencional (na frequência fundamental) pelo método de Soma de Potências. A segunda parte executa soluções de redes lineares pela construção da matriz impedância de barras e dos vetores de injeção de correntes medidas, em cada barra, para as frequências harmônicas.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Xia and G. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution, Part II – Implementation and practical application". *IEEE Trans. on Power Apparatus and systems*, vol. PAS-101, pp. 1257-1270, June 1982.
- [2] W. Xu, J. R. Marti and H. W. Dommel, "A Multiphase Load Flow Solution Technique". *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 1, February 1991.
- [3] R. Cespedes G. "New Method for the analysis of distribution Networks". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 5, no. 1, January 1990.
- [4] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. "Modeling and Simulation of the propagation of harmonics in electric power networks, Parts I & II," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, Jan. 1996, pp. 452-474.
- [5] A. E. Emanuel. "On the assessment of harmonic pollution," *IEEE Trans. on Delivery*, vol. 10, no. 3, Jul. 1995, pp. 1693-1698.
- [6] D. J. Pileggi, N. H. Chandra and A. E. Emanuel. "Prediction of harmonics voltages in distribution systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus and systems*, vol. PAS-100, no. 3, Mar. 1981.
- [7] T. H. Ortmeier and T. Hiyama. "Distribution system harmonic filter planning," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 4, Oct. 1996, pp. 2005-2008.
- [8] J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, *Power Systems Harmonics*, John Wiley & Sons, NY: 1985.
- [9] J. A. Monticelli. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo". ed. Edgard Blücher Ltda. 1983.
- [10] A. Gross. Charles. "Power System Analysis". Second edition. John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [11] M. Grady. "Understanding Power System Harmonics". University of Texas at Austin. September 2000.
- [12] J. T. Oliveira. "Fundamentos de Análises de Sistemas de Potência". Fevereiro de 1998.