

Programas computacionais para estudos de harmônicos em sistemas elétricos

Márcio Melquíades Silva¹, Manuel Losada y Gonzalez², Eduardo Nohme², Selênio Rocha Silva¹,

Resumo - Este trabalho apresenta um estudo sobre as características de vários programas encontrados nos mercados nacional e internacional, que são utilizados para análise de propagação de harmônicos em sistemas de energia elétrica. Em geral, as componentes harmônicas podem ser tratadas por simulação no domínio do tempo ou da frequência. Os programas no domínio do tempo são usados principalmente para estudos de transitórios e possuem normalmente funções para análise de harmônicos. Os programas no domínio da frequência são usados para estudos de harmônicos e suas principais técnicas de análise existentes são a varredura em frequência e o cálculo da propagação das componentes harmônicas. Neste trabalho buscou-se identificar programas comerciais mais adequados para análise harmônica de grandes sistemas elétricos, avaliando principalmente os modelos matemáticos utilizados, as técnicas de solução e resultados apresentados. O trabalho pretende contribuir para a engenharia brasileira no tema, subsidiando-a na escolha do aplicativo mais adequado para análise harmônica.

Palavras chaves: Sistemas elétricos de potência, Simulação de sistemas elétricos, Programas para simulação, Aplicações computacionais, Harmônicos em sistemas elétricos.

I. NOMENCLATURA

PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
EMTP	Electromagnetic Transients Program
EMTDC	Electromagnetic Transients including DC
FDHAP	Frequency Domain Harmonic Analysis Program
ATP	Alternative Transients Program
PTW	Power Tools for Windows
PSS/E	Power System Simulator for Engineering
ESA	Easy Power Electrical Software
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
DHT	Distorção Harmônica Total

II. INTRODUÇÃO

Atualmente, os computadores são uma das principais ferramentas usadas para simulação, análise, monitoramento, gerenciamento e desenvolvimento de projetos em sistemas de energia elétrica. Existem programas cada vez mais complexos, porém de fácil utilização, por meio de interfaces gráficas e interativas. Estes programas permitem realizar diversas funções, tais como:

- Cálculo do fluxo de carga;
- Cálculo de correntes de curto-circuito;
- Análise da estabilidade dos sistemas;
- Dimensionamento e coordenação da proteção;
- Controle de tensão na geração;
- Análise de sistemas de corrente contínua;
- Otimização do fluxo de potência;
- Análise e gerenciamento em condições de contingenciamento;
- Análise de confiabilidade;
- Integração e monitoramento da rede;
- Modelagem e análise da demanda;
- Qualidade de energia.

A utilização destes programas é cada vez mais presente em razão do aumento do número de cargas baseadas em eletrônica de potência e das exigências para conexão de alguns consumidores na rede pública, requerendo simulações das características das redes elétricas para atendimento ao quesito qualidade de energia.

Atualmente, dentre as diversas funções realizadas pelos programas, a maioria possui ferramentas que incluem o cálculo das distorções harmônicas de tensão e de corrente e varredura em frequência. Entretanto, os programas, de maneira geral, são projetados para ter um melhor desempenho para uma classe específica de sistemas elétricos que incluem a geração, transmissão, distribuição ou sistemas industriais, apresentando, por conseguinte, limitações [1-3]. Os módulos de análise harmônica encontrados nos programas podem ser utilizados para diversos tipos de análises [2], tais como:

- Determinação da resposta do sistema devido à instalação de novas cargas;
- Predição das condições ressonantes para instalação de bancos de capacitores;
- Avaliação dos limites de harmônicos previstos em normas;
- Determinação de perdas no sistema causadas por harmônicos;
- Auxílio na solução de problemas de interferência nos sistemas de telecomunicação;
- Análise de problemas em equipamentos;
- Desenvolvimento de projetos de filtros para harmônicos.

Sendo assim, o uso de programas computacionais no planejamento das instalações ou no diagnóstico de problemas torna-se uma ferramenta indispensável para os gestores dos sistemas elétricos.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais – Av. Antônio Carlos, 6627 – CEP. 31.270-901 - Belo Horizonte – MG – Brasil e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas

² Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais – Av. Antônio Carlos, 6627 – CEP. 31.270-901 - Belo Horizonte – MG – Brasil.

Neste artigo são abordados vários programas computacionais para SEP que possuem ferramentas para análise da qualidade de energia, incluindo harmônicos. Neste estudo foram consultados manuais dos programas e algumas versões de demonstração. Devido à constante atualização dos programas, é possível que mudanças já tenham ocorrido em alguns deles desde que estas análises foram realizadas. Alguns manuais também não apresentam detalhes sobre modelos de componentes utilizados nas simulações recomendando-se sempre consultar os fabricantes dos programas sobre as características atuais dos mesmos.

III. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROGRAMAS

A. Análise no Domínio do Tempo e da Frequência

Os programas para sistemas elétricos podem ser divididos em dois grupos: domínio do tempo e domínio da frequência. Alguns programas permitem a simulação em ambos os domínios. A tabela I apresenta a relação de programas analisados neste artigo.

TABELA I
RELAÇÕES DE PROGRAMAS ANALISADOS NESTE ARTIGO

Domínio do tempo	Domínio da Frequência
SPICE	CYMFLOW
ATP-EMTP	PTW DAPPER
EMTP-RV	ETAP
PSCAD-EMTDC	POWER FACTORY
MICRO TRAN	EDSA
PSIM	PSS/E-Siemens
MATLAB/SIMULINK	SuperHarm
	HARM
	SPARDO
	ESA

(1) Análise no Domínio do Tempo

Os programas utilizam, para este domínio, uma formulação matemática com a solução no tempo. Para isto, um conjunto de equações diferenciais representa o comportamento dinâmico dos componentes interconectados no sistema de potência. A análise de harmônicos requer sua contínua simulação até a obtenção do regime permanente de operação. Na Fig. 1 têm-se as formas de onda da tensão e corrente para uma simulação realizada no Matlab/Simulink.

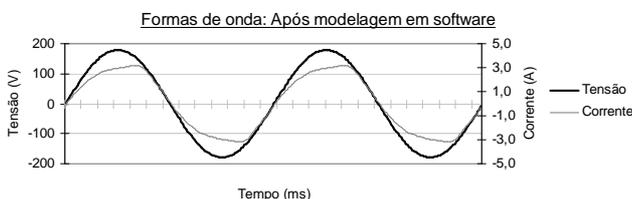


Fig. 1 – Tensão e corrente no domínio do tempo.

Neste domínio é possível observar que a forma de onda da corrente não é totalmente senoidal devido à existência de componentes harmônicas, porém não é possível identificar a frequência e a amplitude dos harmônicos presentes neste sinal. Esta informação somente é visualizada com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para a obtenção dos componentes harmônicos de tensão e corrente do sistema, conforme mostrado na Fig. 2. Na Fig. 2a não há harmônicos de

tensão, mas na Fig. 2b é possível observar harmônicos de corrente de 3ª e 5ª ordem.

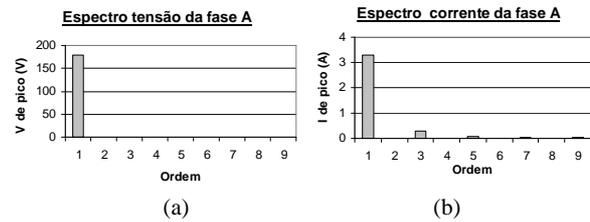


Fig. 2 – Espectro harmônico para a tensão e corrente da Fig. 1.

Na análise neste domínio, geralmente a modelagem de cargas eletrônicas é realizada pela representação direta dos circuitos eletrônicos. A representação de cargas por fontes de correntes pode ser realizada com a inserção individual de cada fonte, não havendo, geralmente, modelos de cargas nestas configurações. Mesmo programas direcionados para sistemas eletrônicos podem ser utilizados para análise de harmônicos. Como o esforço computacional necessário é bastante considerável, mesmo para sistemas relativamente pequenos, geralmente programas no domínio do tempo são utilizados em estudos de sistemas com dimensões reduzidas [4], [5].

(2) Análise no Domínio da Frequência

(a) Cálculo de Fluxo de Potência

A maioria dos programas analisados trabalha no domínio da frequência na análise harmônica, realizando inicialmente o cálculo do fluxo de carga. Por isto, maior ênfase foi dada a estes programas neste artigo.

Geralmente, o cálculo do fluxo de carga é a primeira função realizada pela maioria dos programas. Através do fluxo de carga, são determinadas as principais características da rede elétrica, tais como níveis de tensões nos diversos barramentos, queda de tensão nas impedâncias do sistema e carregamento de circuitos/equipamentos tais como alimentadores, linhas, transformadores e também as perdas elétricas no sistema. Para estes cálculos, são utilizados métodos iterativos algébricos, como *Gauss Seidel* e *Newton Raphson* [1].

(b) Cálculo de Correntes Harmônicas

Após o fluxo de carga, são calculadas as correntes harmônicas das cargas não lineares e as impedâncias equivalentes harmônicas da rede para cada frequência de interesse (varredura em frequência), possibilitando ainda o cálculo das tensões e correntes para cada frequência nas diversas barras e linhas do sistema.

Para a análise harmônica, os métodos utilizados são varredura em frequência, injeção de corrente e fluxo de potência harmônico. A maioria dos programas possui ferramentas para dimensionamento de filtros para harmônicos.

(c) Cálculo da Distorção Harmônica Total

Finalmente, utilizando o princípio da superposição, é possível calcular a distorção harmônica total. Como exemplo para um sistema elétrico, na Fig. 3 é apresentado o resultado

da varredura em frequência em uma barra de 4,16 kV, onde é mostrada a impedância harmônica para cada frequência, no intervalo de 60 a 1200 Hz. Na fig. 4 são mostradas as tensões harmônicas resultantes no domínio da frequência, quando um conversor de 6 pulsos é ligado nesta barra como fonte de harmônicos, calculados com o uso do programa PowerFactory.

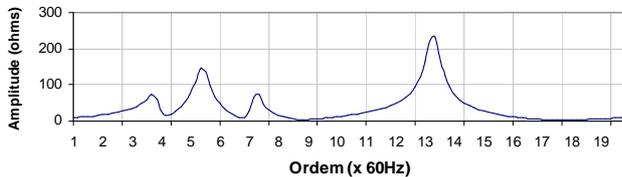


Fig. 3 – Varredura em frequência em uma barra de um sistema elétrico.

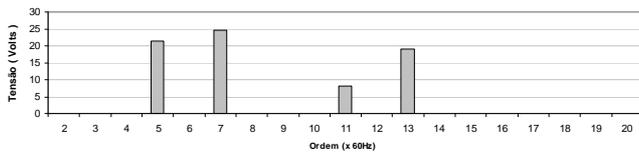


Fig. 4 – Tensões harmônicas na presença de um conversor de 6 pulsos.

B. Modelos de Componentes Elétricos para Análise de Harmônicos

A modelagem dos componentes dos sistemas elétricos para estudos harmônicos é um tema bastante discutido na literatura [6], [7]. Existem diversos modelos para a maioria dos componentes. Os modelos dependem do tipo de rede em estudo e dos níveis de precisão desejados. Alguns programas, com o objetivo de conseguir simplicidade e rapidez, utilizam modelos simplificados [2]. Estes modelos podem levar a resultados não satisfatórios em algumas situações.

(1) Modelos de Cargas

A maioria dos programas permite aos usuários escolherem os modelos de cargas a serem utilizados. Assim nos programas *PTW* e no *PSS/E*, as cargas podem ser consideradas na simulação como modelo RL série ou paralelo. Os programas *Cymharmo*, *Superharm*, *HarmZS* permitem também a modelagem de cargas utilizando modelos conforme o padrão CIGRÉ ou arranjos mistos.

(2) Modelos de Linhas de Transmissão e de Distribuição

As linhas podem ser representadas pelos modelos RL, modelo π ou π com parâmetros distribuídos.

2.a. Efeito Pelicular

Alguns programas consideram o efeito pelicular sobre a resistência das linhas como no *Cymharmo*, *Power Factory*, *PSS/E* e *Superharm*, enquanto que em outros, como o *PTW*, este efeito é desprezado.

A modelagem do efeito pelicular é variada nos diversos programas. Este efeito é modelado mantendo a relação X/R constante como no programa *PSS/E*, como também pode ser informado pelo usuário, através de dados tabelados como no *PSS/E*, *Superharm* e *Power Factory*. No *Power Factory*, o efeito pelicular também pode ser calculado utilizando uma

equação polinomial. Já no *Cymharmo*, este cálculo pode ser realizado utilizando os modelos com correções típicas das concessionárias NGC (Reino Unido) e EDF (França).

(3) Transformadores

Os programas também permitem a representação de transformadores de dois e três enrolamentos por suas impedâncias séries. Programas como o *Cymharmo* e o *PTW* permitem o uso da ligação em zig-zag.

(4) Modelos de Motores Elétricos

Para motores, existem programas que utilizam modelo RL, como no *PTW*, ou que consideram o modelo completo do motor como no *Power Factory*, *Cymharmo*, *PSS/E*, *HARMZS* e no *Superharm*.

(5) Bibliotecas de Modelos

Geralmente, os programas possuem bibliotecas de modelos típicos de componentes do sistema elétrico. Entretanto, em muitos casos, os modelos disponíveis possuem valores típicos diferentes daqueles utilizados no Brasil, tais como tensões nominais diferentes, frequência e potências nominais dos transformadores. Nestes casos, o usuário deve criar sua própria biblioteca.

C. Técnicas de Simulação do Sistema Elétrico

Outro aspecto importante é a escolha do tipo de sistema a ser simulado: monofásico ou trifásico.

Os modelos monofásicos, representando somente a sequência positiva, geralmente são suficientes para sistemas de transmissão que geralmente são equilibrados.

Já nos demais sistemas, quando há a presença de cargas ou bancos de capacitores monofásicos, ou harmônicos múltiplos de três, são necessários modelos trifásicos que trabalham com as sequências zero, positiva e negativa [4]. Nesta situação também é possível realizar simulações de cargas harmônicas gerando harmônicos não característicos. O programa *Power Factory* permite a simulações de sistemas desequilibrados, calculando as distorções harmônicas de tensão e corrente por fase ou por sequência.

D. Facilidades de Uso e Aspectos Comerciais

(1) Interface Gráfica

Nem todos os programas existentes possuem interface gráfica. Em alguns, a interface somente está disponível para saída de resultados. Isto dificulta, bem como aumentam as chances de erro na montagem e visualização do sistema e no preenchimento das características dos componentes.

(2) Importação e Exportação de Resultados

Outra característica importante é a função de exportação e importação de dados para outros aplicativos, o que pode facilitar o tratamento posterior dos resultados e a elaboração de relatórios. Vários programas geram gráficos que não são de fácil compreensão ou que possuem tamanhos de letras e cores que dificultam imprimi-los diretamente. Além disto, em muitas situações, várias simulações podem ser necessárias e os

resultados devem ser comparados entre si para uma melhor avaliação.

(3) Versões de Programas para Avaliação

A maioria dos programas analisados disponibiliza versões para avaliação pelo usuário, incluindo versões com limitações do número de barras, versões com funções reduzidas ou versões que funcionam durante períodos determinados como 15 ou 30 dias.

Em alguns casos, estas versões podem ser obtidas diretamente nos site dos fabricantes. Porém, em geral, o usuário necessita fazer um cadastro para aquisição posterior ou para solicitação aos representantes. Apesar de a maioria dos fabricantes serem de origem estrangeira, vários possuem representações no Brasil, fato que pode facilitar a troca de experiências, obtenção de maiores informações ou de versões de testes.

TABELA I
CARACTERÍSTICA DOS PROGRAMAS PARA ESTUDOS DE HARMÔNICOS

Programa	País	Ano ¹	Interface gráfica	Módulo de análise de harmônicos	Domínio p/ harmônicos	Versões de teste ²	Citações no IEEE ³
PSPICE	USA	1984	Sim	Principal	Tempo	Sim	202
ATP-EMTP		1984	Sim	Principal	Tempo	(4)	75
PSCAD/EMTDC	Canadá	1993	Sim	Principal	Tempo/ Frequência	Sim	237
EMTP-RV	Canadá	1987	Sim	Principal	Tempo	Sim	52
MICROTRAN	Canadá	1987	Parcial	Principal	Tempo/ Frequência	Sim	2
PSIM	USA	1997	Sim	Principal	Tempo/ Frequência	Sim	61
MATLAB/SIMULINK	USA	1984	Sim	Principal	Tempo	Sim	909
PSAF / CYMFLOW	Canadá	1986	Sim	CYMharmo	Frequência	Sim	5
PTW / SKM	USA	1972	Sim	Hi-Wave	Frequência	Sim	3
ETAP	USA	1986	Sim	Principal	Frequência	Sim	6
POWER FACTORY	Alemanha	1986	Sim	Principal	Frequência	Sim	25
EDSA	USA	1986	Sim	Principal	Frequência	-	3
PSS/E SIEMENS	USA/Alemanha	2004/1976	Sim	PSS SINCAL's	Frequência	Sim	5
SUPERHARM	USA	1984	Parcial	Principal	Frequência	Sim	3
HARM / CEPEL	Brasil	-	Parcial	Harmzs	Frequência	Sim	1
ASPEN	USA	1986	Sim	DistriView	Frequência	Sim	-
SPARDO	Colômbia	1992	Sim	mp Power	Frequência	-	-

¹ Início de comercialização do programa quando disponível ou criação/aquisição da empresa de software

² Incluem versões de teste, para universidades ou de estudante. Alguns demos necessitam de cadastro.

³ Busca no portal IEEE XPLORE = Nome do programa + harmonic em março 2011.

⁴ Este programa pode ser obtido gratuitamente por usuários que não participam da venda de outros programas de transitórios eletromagnéticos semelhantes ao ATP.

IV. PRINCIPAIS PROGRAMAS AVALIADOS

Nesta seção são apresentados os programas avaliados por nome, endereço eletrônico e uma breve descrição das características. Na tabela II são mostrados a relação dos programas, algumas de suas características e o número de citações dos mesmos para análise harmônica através de buscas no portal IEEE *explore*.

A. Programas no Domínio do Tempo

1. SPICE - www.orcad.com - O software SPICE foi desenvolvido para a simulação de circuitos eletrônicos em 1972, na Universidade da Califórnia. Porém é possível simular e modelar circuitos e cargas harmônicas de sistemas elétricos de potência. Elementos da rede elétrica podem ser representados utilizando valores em pu e modelados utilizando componentes discretos, ativos ou passivos. Desta forma podem-se criar modelos apropriados de linha, cargas e outros elementos da rede e realizar a simulação no domínio do tempo. Atualmente, versões modificadas semelhantes ao SPICE, são comercializadas por várias companhias usando vários nomes [12].

2. ATP-EMTP - www.emtp.org - O ATP é originado a partir do EMTP, desenvolvido inicialmente na década de 1960 na

Alemanha. Quando foi criado, o programa só permitia modelagem de circuitos monofásicos através de indutâncias, resistências, capacitâncias e linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Divergências entre os desenvolvedores do EMTP levaram à criação do ATP que atualmente possui um programa de apoio chamado ATPDRAW, que proporcionou uma interface gráfica para entrada de dados via Windows e também um módulo de saída dos dados. O ATP pode trabalhar no domínio do tempo utilizando valores discretos ou no domínio da frequência. O software possui os principais elementos para modelagem de sistemas de transmissão, distribuição e industriais, além de possuir ferramentas necessárias para a modelagem de diversos elementos como dispositivos de eletrônica de potência [9].

3. EMTP-RV - www.emtp.com - É também um programa desenvolvido a partir do EMTP, em 1987 no Canadá. É utilizado para análise de transientes nos sistemas elétricos; realiza estudos em regime permanente, no domínio do tempo, cálculo de fluxo de carga, análise de harmônicos e varredura em frequência.

4. PSCAD-EMTDC - <https://pscad.com/> - foi desenvolvido por Manitoba HVDC Research Center no Canadá. Possui

interface gráfica e possibilita simular respostas transitórias em sistemas elétricos. Atualmente o desenvolvedor do PSCAD lançou o módulo independente FDHAP específico para análise harmônica utilizando linhas de comando. Este realiza o cálculo da amplitude e fase do DHT-V nos nós para diversos tipos de fontes, varredura em frequência e projeto de filtros [8].

5. MICRO TRAN - www.microtran.com - Também derivado do EMTP, é desenvolvido pela empresa Microtran Power Systems Analysis Corporation, desde 1987 no Canadá. Realiza a simulação de transitórios em sistemas elétricos de potência causados por raios ou surtos de chaveamento. Realiza também a análise de partida de motores, fenômenos de ressonância e análise da qualidade da energia, incluindo harmônicos. Conta atualmente com interface gráfica [10], [11].
6. PSIM - www.powersimtech.com/ - Programa da empresa Powersim. Realiza a simulação de sistemas de eletrônica de potência, como conversores, acionamento de motores e dinâmica de sistemas elétricos. Utiliza interface gráfica. A partir da versão 9, foi incluída a simulação de fontes alternativas de energia com modelos de turbinas eólicas e células solares. Permite a simulação de componentes do sistema elétrico e a criação de modelos para análise específicas como a modelagem de cargas harmônicas [13].
7. MATLAB/SIMULINK - www.mathworks.com - O MATLAB é um software interativo de alto desempenho voltado para a computação técnica, da empresa The MathWorks. Possui diversas ferramentas de cálculo numérico, simulação de sistemas e ferramentas para o desenvolvimento de aplicações. Na plataforma do Matlab tem-se o Simulink, que é a ferramenta para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos. Dentre as diversas bibliotecas do Simulink, tem-se o SimPowerSystem que modela e simula sistemas elétricos de potência [14], com ferramentas de cálculo das distorções harmônicas de corrente, tensão e cálculo de valores eficazes.

B. Programas no Domínio da Frequência

1. CYMFLOW - www.cyme.com - Módulo principal do software PSAF, atualmente parte do grupo Cooper Industries. Realiza a simulação de sistemas elétricos de transmissão, distribuição e industrial e possui sub-módulo específico para harmônicos. Possui interface gráfica para entrada e saída de dados [15].
2. PTW DAPPER - www.skm.com - É um software da empresa SKM Systems Analysis presente no mercado desde 1972. Tem módulos integrados de simulação e análise de redes elétricas em sistemas de transmissão, distribuição e sistemas industriais. Possui interface gráfica e permite diversas análises como correntes de falta, co-geração e análise de transitórios. O módulo HI-HAVE é o módulo responsável pela análise harmônica. Realizam varredura em frequência, cálculos da THD e projeto de filtros [16],[17].
3. ETAP - www.etap.com - Programa para simulação e monitoramento em tempo real de sistemas elétricos de transmissão, distribuição e industrial. Composto por módulo principal e outros quatro módulos adicionais: módulo de simulação da monitoração, módulo de gerenciamento de sistema de energia, módulo de controle de demanda e módulo de automação de subestações. Possui entrada e a saída de resultados por interfaces gráficas [18],[19].
4. POWER FACTORY - www.digsilent.de - Programa da empresa Alemã Digsilent, comercializado desde 1986, que realiza a simulação e análise de sistemas elétricos de potência de transmissão, distribuição e industriais. Executa diversas funções como a análise de fluxo de carga, curto-circuito, estabilidade do sistema, coordenação da proteção e análise harmônica. Realiza análise harmônica no módulo principal com entrada de dados e saída de resultados através de interface gráfica. Permite a simulação detalhada para redes equilibradas e desequilibradas exigindo desta forma um bom conhecimento do software para as simulações [20], [21], [22], [23], [24], [25].
5. EDSA - www.poweranalytics.com - O software é direcionado para projeto, simulação e análise de sistemas elétricos de potência. Comercializado desde 1986, possui também módulos para análise em tempo real e para controle de SEP. Possui módulo de qualidade de energia que calcula a distorções harmônicas. Possui entrada de dados e saída de resultados através de interface gráfica [26].
6. PSS/E-Siemens - www.energy.siemens.com/hq/en/services/power-transmission-distribution/power-technologies-international/ - Software desenvolvido pela empresa *Shaw Power Technologies*, parte do grupo Siemens desde 2004. Composto de vários módulos, é um programa integrado de SEP que realiza simulação, análise e otimização, principalmente na transmissão. O módulo PSS SINCAL's realiza análise de harmônicos [27], [28].
7. SUPERHARM - www.electrotek.com - É um dos módulos autônomos do pacote de softwares *PQSoft* da empresa *Electrotek Concepts* para análise de qualidade de energia e eficiência energética. Este módulo é específico para modelagem e simulação de harmônicos em sistemas elétricos. A entrada de dados é através de linhas de código e a saída de resultados por interface gráfica [29].
8. HARM - www.cepel.br - Desenvolvido pelo CEPTEL especificamente para estudo de harmônicos nos sistemas de potência. A versão mais atual do software é o HARMZS, que substituiu o HARMZW. A entrada de dados é através de linhas de código e a saída de resultados por interface gráfica [30].

9. SPARDO - www.energyco.com/ – Pacote de programas da *Energy Computer Systems*. O módulo *SPARDO mp Distribution* realiza análise operacional, otimização e planejamento de sistemas de distribuição como cálculo de fluxo de carga, análise de curto-circuito e gerenciamento de carregamento de transformadores. O módulo *SPARDO mp Power* realiza cálculos, modelagem e análise de sistemas de transmissão, distribuição e industriais, cálculos para ajuste da proteção e análise de harmônicos [31].
10. ESA - www.easypower.com – Pacote de programas da empresa *Easy Power*. composto por vários módulos que realizam modelagem, análise e monitoramento de redes. Possui módulos para cálculo do fluxo de carga, análise de curto circuito, estabilidade do sistema, partida de motores e o módulo *Spectrum* para análise de harmônicos [32].

V. CONCLUSÕES

Os programas computacionais são uma ferramenta indispensável na análise de harmônicos nos sistemas elétricos. Há diversos programas que fazem análise no domínio do tempo e no domínio da frequência, sendo que os programas no domínio da frequência mostram-se mais adequados com maior rapidez e facilidades na modelagem para os grandes sistemas. Alguns programas não explicitam os modelos utilizados nas simulações, não permitindo mesmo aos usuários mais experientes avaliar o nível de precisão dos resultados fornecidos.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao CNPq pelo suporte financeiro aos projetos e às atividades de pesquisa.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Dias G. A. "Harmônicas em Sistemas Industriais." Porto Alegre. EDIPUCRS, 2ª Ed., 2002. pp-159-168.
- [2] Bam, L.; Jewell, W. "Review: Power System Analysis Software Tools." In IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2005.
- [3] Bengiamin, N.N; Holcomb, F.H. "PC-Basead Power systems software: comparing functions and features." In IEEE Computer Applications in Power. Pp. 35-39; 1992.
- [4] Variz, Abílio Manuel. "Cálculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes." Tese (Doutorado em engenharia elétrica) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [5] Chatterjea, A.; Mahmoud, A.; Harris, D.L. "The use of PSpice as a power system harmonics." In IEEE Power Symposium. Pp.40-49. 1989
- [6] Task Force On Harmonic Modeling And Simulation, IEEE Power Eng. Soc. T&D Committee. "Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A Comparison of Common Practice and Analytical Models." In IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, April 2003, pp. 625-630.
- [7] Xu, W. "Status and future directions of power system harmonic analysis." In Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Colorado, Vol. 1, pp.756-761, 2004.
- [8] Manitoba HvdC Research Centre Inc. "Applications of PSCAD / EMTDC." 2008. 114p.
- [9] Velasco, Juan A. Martinez. "El paquete de simulación ATP. Nuevas prestaciones." Disponível em <<http://www.iitree-unlp.org.ar/caue/PapersRevista/2000-N3-El%20paquete%20ATP.pdf>> Acesso em 03/03/2011.
- [10] Micro Tran. "Reference Manual." 2002. 21p.
- [11] Mtdiagram."Reference Manual - Graphical user interface and network drafting tool for Microtran". 190p.
- [12] Veronese, P. R. "Simuladores de circuitos eletrônicos – mini-curso." Disponível em <<http://www.sel.eesc.usp.br/sasel>>. Acesso em 03/03/2011.
- [13] PSIM. "User's Guide. Version 9.0." January 2010. 216P.
- [14] Matlab. "User Guides." Disponível on line <www.mathworks.com/help/techdoc/index.html>. Acesso em 10/03/2011.
- [15] Cymharmo. "User's Guide and Reference Manual." March 2006, 104p.
- [16] Power Tools for Windows – "Tutorial." 2008. 360p.
- [17] Power Tools for Windows – "Hi-Ware reference Manual." 2006. 96p.
- [18] ETAP – "User guide – Chapter 21- Harmonic analysis." 48p.
- [19] ETAP 7.0.0 Demo – "Getting Started." 2009. 144p.
- [20] PowerFactory – "User's Manual, Version 14."Gomaringen, 2008. 1100p.
- [21] DiGSILENT "Technical Documentation - Induction Machine - TechRef ElmAsm V2.1", 2010, 21p.
- [22] DiGSILENT "Technical Documentation - General Load Model - TechRef ElmLod V4", 2008, 26p.
- [23] DiGSILENT "Technical Documentation - Two-Winding Transformer (3-Phase) - TechRef ElmTr2 V3", 2007, 28p.
- [24] DiGSILENT "Technical Documentation - Overhead Line Models - build 511", 2009, 15p.
- [25] Wasilewski, J.; Wiechowski, W. and Bak, C. L. "Harmonic domain modeling of a distribution system using the DiGSILENT PowerFactory software." In IEEE conference Future Power Systems. Amsterdam. 2005.
- [26] Paladin DesignBase Programs. Disponível on line <www.poweranalytics.com> Acesso em 20/03/2011.
- [27] PSS/E 30 – Volume II - Program Application Guide, 2004. 598p.
- [28] PSS/E Brochure. Disponível on line < www.energy.siemens.com> Acesso em 20/03/2011.
- [29] SUPERHARM - User's Guide – Version 4.3 – November 2002. 182p.
- [30] CEPEL - HarmZs - Manual de Utilização do Programa. V. 1.7,2007, 176p.
- [31] SPARD mp Power. Productos. Disponível on line <http://www.energyco.com/SPP_e.html> Acesso em 10/08/2011.
- [32] ESA-Spectrum Harmonic Analysis Software. Disponível on line <www.easypower.com/products/EasyPower/asyPower_family.php>.

VIII. BIOGRAFIA

Marcio Melquíades Silva é professor efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG Possui graduação em engenharia elétrica, é Mestre pelo CEFET-MG e doutorando no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas. Suas áreas de interesse são: Eficiência energética, qualidade da energia e instalações elétricas.

Manuel Losada y Gonzalez é professor associado do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Recebeu os graus de bacharel, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG nos anos de 1978, 1995 e 2000, respectivamente. Suas áreas de pesquisa incluem sistemas elétricos de potência, eficiência energética e qualidade de energia.

Selênio Rocha Silva é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Recebeu os graus de bacharel e mestre em Engenharia Elétrica pela UFMG respectivamente nos anos de 1980 e 1984, e o título de doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em Campina Grande (atual UFCG) em 1988. Seus interesses incluem máquinas elétricas, acionamentos elétricos, qualidade da energia e sistemas de geração de fontes alternativas de energia.

Eduardo Nohme é Professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre pela PUC-RJ em 1982 e Doutor pela UFSC em 1994 em Sistemas de Energia Elétrica, área de concentração estabilidade e segurança, incorporando mais recentemente em sua atuação na análise e operação de sistemas, os estudos relativos à integração à rede de fontes renováveis/alternativas de energia.