

Modelagem de Equipamentos Eletroeletrônicos Utilizando Fontes Lineares e Chaveadas sob Condições Não Ideais de Alimentação na Plataforma ATP

M. V. B. Mendonça, C. E. Tavares, I. N. Gondim, J. C. de Oliveira, A. C. Delaiba,
K. D. Rodrigues, R. M. T. da Silva

Resumo--Este artigo contempla aspectos relacionados com a modelagem computacional, validação experimental e análise do desempenho de fontes lineares e chaveadas, quando submetidas a um suprimento de energia elétrica sob condições não-ideais. Os equipamentos empregados para os estudos correspondem a um microcomputador e um *home theater*, cuja entrada é constituída respectivamente por uma fonte chaveada e uma fonte linear. Os modelos desenvolvidos estão direcionados à plataforma ATP. Embora as exemplificações estejam dirigidas para tais produtos, a metodologia e a análise aplicadas nesta investigação podem ser prontamente estendidas para outros equipamentos que utilizam as mencionadas fontes de alimentação. Os procedimentos empregados consistem em estudos computacionais e experimentais, com o intuito validar o modelo implementado no ATP e de avaliar o desempenho destes aparelhos quando são submetidos a: variações de tensão de curta duração e tensões transitórias oscilatórias.

Palavras-chave--Microcomputador, Desempenho de Equipamentos, Fonte Chaveada, Fonte Linear, *Home Theater*, Modelagem Computacional, Qualidade da Energia.

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica de suprimento, em anos recentes, vem apresentando características diferentes daquelas consideradas ideais devido principalmente ao aumento do número de cargas com características não lineares e à

Agradecimento a CAPES e a FAPEMIG pelas bolsas de mestrado e de doutorado no programa de Pós-Graduação da FEELT-UFU, e a CEB Distribuição S/A pelo suporte técnico/financeiro para realização deste trabalho através de Projeto de P&D firmado entre a CEB e a UFU.

M. V. B. Mendonça é aluno de mestrado na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (e-mail: borgesmarcus@yahoo.com.br).

C. E. Tavares é aluno de doutorado na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (e-mail: cetavares@eel.ufu.br).

I. N. Gondim é aluno de graduação na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (e-mail: nig_eng@yahoo.com.br).

J. C. de Oliveira é professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (e-mail: jcoliveira@ufu.br).

A. C. Delaiba é professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (e-mail: delaiba@ufu.br).

K. D. Rodrigues é professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (e-mail: kleiber@ufu.br).

R. M. T. da Silva é engenheiro sênior da Companhia Energética de Brasília – CEB Distribuição S/A (e-mail: rildo@ceb.com.br).

complexa dinâmica de operações do sistema interligado, compreendendo a entrada e saída de grandes cargas, os mais diversos chaveamentos e energizações e possíveis contingências. Estas condições podem, por vezes, comprometer o adequado funcionamento de equipamentos eletroeletrônicos e afetar a sua integridade física, principalmente aqueles dotados de tecnologia mais moderna, que geralmente são mais sensíveis à qualidade da tensão de suprimento [1].

Diante destes aspectos, tem-se notado nos últimos anos um incremento de pedidos de ressarcimento feitos por consumidores às concessionárias de energia associados aos danos em dispositivos eletroeletrônicos, possivelmente ocasionados pelos problemas na qualidade da energia elétrica de suprimento [2].

No intuito de analisar o relacionamento entre um dano reivindicado e um dado distúrbio na tensão, a utilização de ferramentas computacionais surge como uma aproximação prometedora. Geralmente, esta estratégia compreende as seguintes etapas: modelo do equipamento, implementação computacional do dispositivo e do sistema elétrico de suprimento no domínio do tempo, validação dos modelos obtidos perante ensaios laboratoriais, e finalmente, a comparação entre a suportabilidade do equipamento e os impactos dos distúrbios na tensão de suprimento aplicada nos terminais do produto investigado.

Dentro deste contexto emergem alguns equipamentos com tecnologias conhecidas, como fontes chaveadas e lineares, amplamente utilizadas por fabricantes de eletroeletrônicos. De acordo com informações de concessionárias, os aparelhos eletroeletrônicos, que detêm estas fontes de alimentação, estão se transformando em um motivo de grande preocupação devido ao seu custo financeiro e ao número crescente de pedidos de indenização pelos danos nos mesmos.

Portanto, visando contribuir neste complexo tema, este artigo apresenta a modelagem computacional de produtos eletroeletrônicos que utilizam as mencionadas fontes na plataforma ATP e o desempenho destes equipamentos sob condições anormais de alimentação, tais como: variações de tensão de curta duração e transitórios oscilatórios.

II. MODELAGEM COMPUTACIONAL E ESTRATÉGIA DE VALIDAÇÃO

Para realizar a proposta descrita anteriormente, os seguintes passos foram seguidos:

A. Modelos Representativos dos Equipamentos

Os equipamentos considerados neste estudo estão mostrados na Fig. 1. Os microcomputadores, Fig. 1 (a), normalmente utilizam em sua entrada uma fonte do tipo chaveada, assim como os equipamentos: televisores, aparelhos de DVD, fax-símile, etc. Já os aparelhos denominados por *home theater*, Fig. 1 (b) possuem uma fonte linear para alimentação de seus circuitos internos, e de forma similar a estes, estão os aparelhos de som, telefones sem fio entre outros.



(a) microcomputador (b) Home Theater
Fig. 1. Equipamentos usados nos estudos.

Através de catálogos de fabricantes e investigações laboratoriais usando os equipamentos apresentados foi possível estabelecer os circuitos representativos indicados nas Figs. 2 e 3. Como pode ser visto a estratégia primou por representar os elementos encontrados na entrada do dispositivo por serem os principais componentes danificados, quando submetidos a distúrbios de tensão nas redes elétricas, segundo informações obtidas em oficinas técnicas de manutenção e reparo. Maiores detalhes referentes ao modelo simplificado podem ser obtidos em [3].

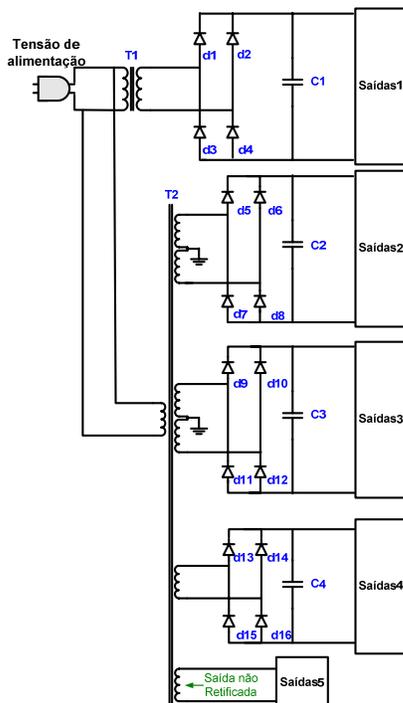


Fig. 2. Circuito elétrico representativo do *home theater*.

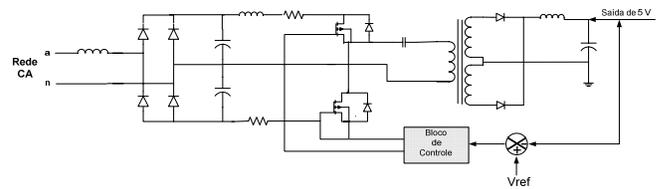


Fig. 3. Circuito elétrico representativo do microcomputador.

B. Implementação Computacional

O programa usado para os estudos computacionais foi o ATP (*Alternative Transients Program*), o qual é uma ferramenta com boa aceitação no setor elétrico para análises no domínio do tempo de sistemas de potência.

No intuito de inserir o modelo dos equipamentos neste programa, os recursos do ATPDraw foram usados. Para modelar um sistema de suprimento com problemas de qualidade utilizaram-se componentes internos do ATP que não são descritos neste trabalho, maiores informações podem ser obtidas em [4].

C. Estratégia de Validação dos Modelos

Uma vez que o modelo de cada equipamento tenha sido incluído no simulador ATP, procede-se na seqüência a validação dos mesmos. Esta etapa consiste em simular diferentes casos envolvendo condições ideais e não-ideais da tensão de alimentação e reproduzi-los em laboratório. Pela comparação dos correspondentes resultados é possível validar o circuito simplificado utilizado para representar o desempenho do respectivo equipamento em distintas condições da tensão de suprimento.

O arranjo laboratorial, mostrado na Fig. 4, compreende uma fonte programável HP6834A trifásica de 4,5 KVA e outro equipamento para registrar a forma de onda de tensão e corrente.

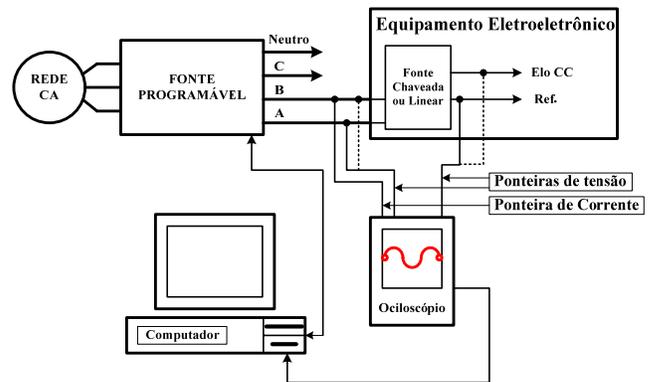


Fig. 4. Esquema de conexão para realização dos experimentos.

III. VALIDAÇÃO DOS MODELOS SOB CONDIÇÕES NOMINAIS E NÃO IDEAIS DE OPERAÇÃO

No intuito de conhecer o comportamento dos mencionados equipamentos e verificar a consistência dos modelos computacionais representativos obtidos, foram realizados vários estudos de casos. Estes compreenderam condições ideais e não ideais de suprimento, aplicadas tanto em âmbito computacional quanto experimental. Devido a limitações de

espaço, serão apresentados somente a condição de alimentação ideal e os casos considerados mais críticos, conforme indicado na Tabela I.

TABELA I
CASOS ESTUDADOS

Caso	Características
1 – Condição Ideal e Nominal	Tensão fundamental de 220 V, 60 Hz.
2 – Interrupção de Tensão	Tensão nominal de 220 V, 60 Hz; Interrupção da tensão; Duração do evento de 4 ciclos (microcomputador) e 1 ciclo (<i>home theater</i>).
3 – Elevação de Tensão	Tensão nominal de 220 V, 60 Hz; Elevação para 120% da tensão nominal; Duração do evento de 10 ciclos.
4 – Transitório Oscilatório de Tensão	Tensão nominal de 220 V, 60 Hz; Valor de pico da tensão oscilatória cerca de 500 a 660 V; Frequência de oscilação de 1 kHz; Constante de tempo equivalente a ¼ ciclo da frequência fundamental.

IV. RESULTADOS

A partir dos estudos citados é possível compreender o comportamento de uma fonte chaveada (microcomputador) e de uma fonte linear (*home theater*) operando sob condições ideais e não ideais de alimentação e, sobretudo avaliar o modelo implementado no ATP.

Para cada situação, as seguintes variáveis são consideradas para ambas as análises, computacional e experimental:

- Tensão de alimentação do equipamento;
- Corrente de entrada;
- Tensão contínua no elo CC.

A. Fonte Chaveada - Microcomputador

Os resultados alcançados para uma fonte chaveada (microcomputador) são apresentados a seguir.

• Caso 1: Condições Ideais

Este caso considera a operação de um microcomputador em condições ideais e nominais, e desse modo, servindo como base para os casos subseqüentes. As Figs. 5 (a) e (b) ilustram as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento de forma computacional e experimental, respectivamente.

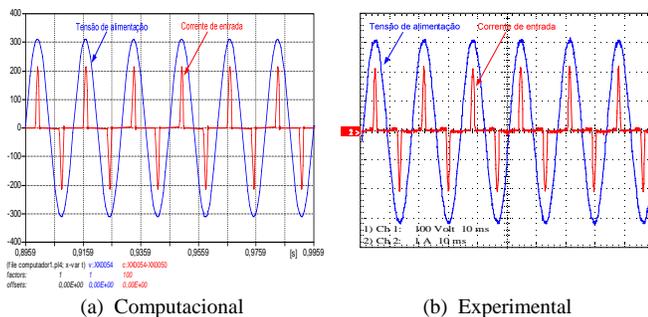
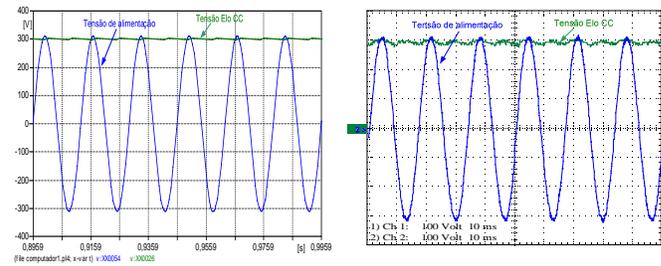


Fig. 5. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 1 - Condição Ideal.

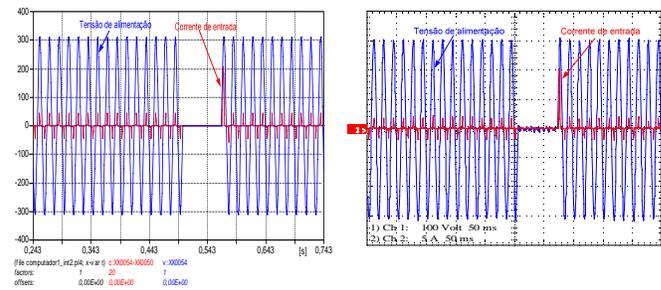
As Figs. 6 (a) e (b) apresentam computacional e experimentalmente as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.



(a) Computacional (b) Experimental
Fig. 6. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 1 - Condição Ideal.

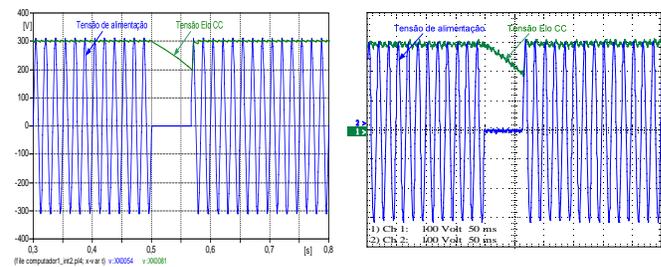
• Caso 2: Interrupção de Tensão

As Figs. 7 (a) e (b) mostram as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento na mesma seqüência anteriormente apresentada.



(a) Computacional (b) Experimental
Fig. 7. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 2 - Interrupção de tensão.

As Figs. 8 (a) e (b) exibem as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.



(a) Computacional (b) Experimental
Fig. 8. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 2 - Interrupção de tensão.

A duração da interrupção de tensão foi de 4 ciclos. Isto se deve a sensibilidade do equipamento quanto a este distúrbio, ou seja, para um tempo de duração superior a esse o equipamento se desligava automaticamente devido ao nível mínimo de tensão atingido no elo CC.

• Caso 3: Elevação de Tensão

As Figs. 9 (a) e (b) ilustram as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento.

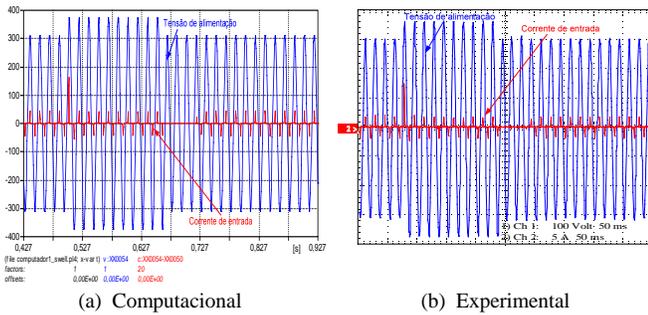


Fig. 9. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 3 - Elevação de tensão.

As Figs. 10 (a) e (b) apresentam os resultados obtidos via simulação e através de experimentos das formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.

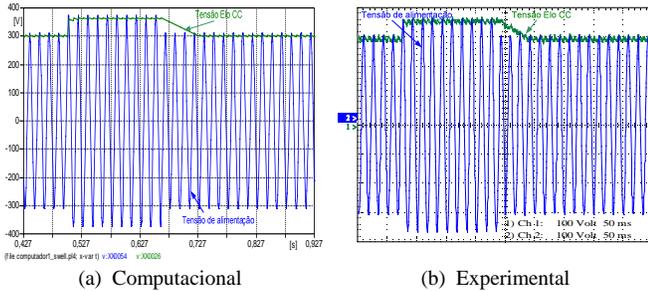


Fig. 10. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 3 - Elevação de tensão.

• **Caso 4: Transitório Oscilatório de Tensão**

As Figs. 11 (a) e (b) mostram as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento de forma computacional e experimental, respectivamente.

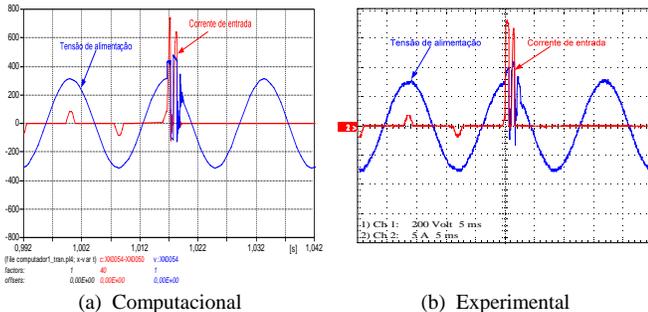


Fig. 11. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 4 - Transitório oscilatório de tensão.

As Figs. 12 (a) e (b) apresentam, de forma computacional e experimental, as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.

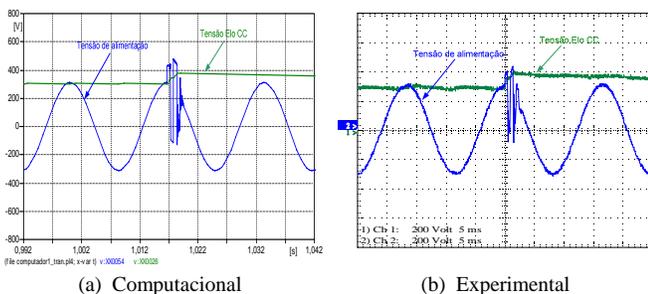


Fig. 12. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 4 - Transitório oscilatório de tensão.

Como pode ser visto nas figuras anteriores, para todas as condições operacionais impostas ao equipamento, o modelo computacional implementado no ATP apresentou uma boa correlação com as formas de onda obtidas nos ensaios laboratoriais, comprovando a eficácia do método utilizado.

B. Fonte Linear - Home Theater

Os resultados obtidos para uma fonte linear (*home theater*) são mostrados em seguida.

• **Caso 1: Condições Ideais**

Este caso, considerado como caso base, pretende expor a operação de um *home theater* em condições ideais e nominais. Desta forma, as Figs. 13 (a) e (b) ilustram as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento de forma computacional e experimental, respectivamente.

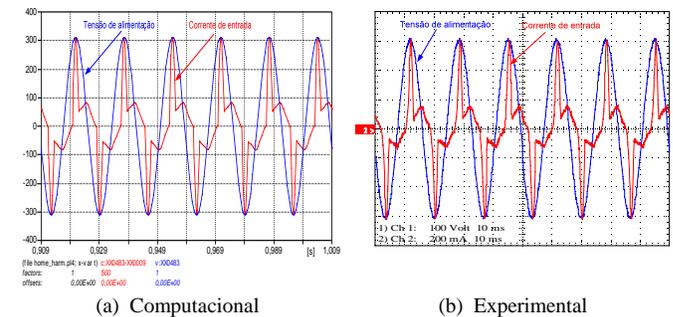


Fig. 13. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 1 - Condição Ideal.

As Figs. 14 (a) e (b) apresentam computacional e experimentalmente as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento. Vale destacar que a tensão contínua mostrada nas próximas figuras é aquela nomeada por Elo CC 2 na Fig. 2.

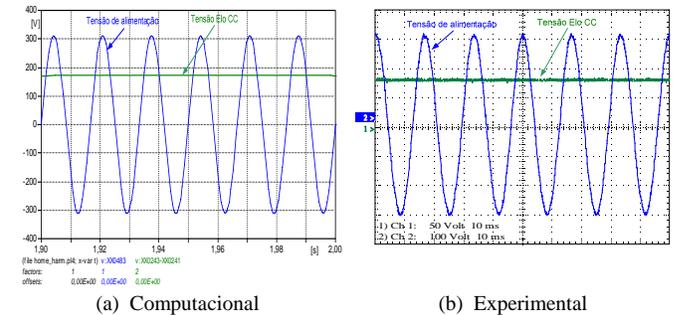


Fig. 14. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 1 - Condição Ideal.

• **Caso 2: Interrupção de Tensão**

As Figs. 15 (a) e (b) exibem as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento.

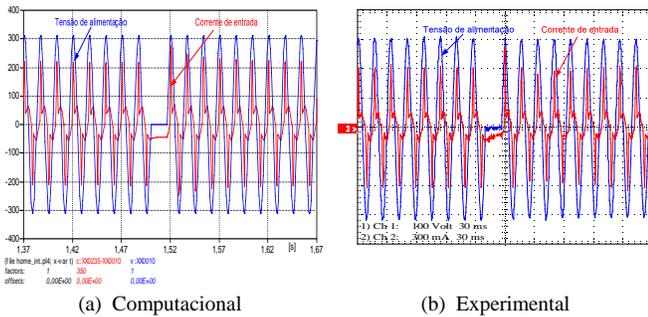


Fig. 15. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 2 - Interrupção de tensão.

As Figs. 16 (a) e (b) mostram, de forma computacional e experimental, as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.

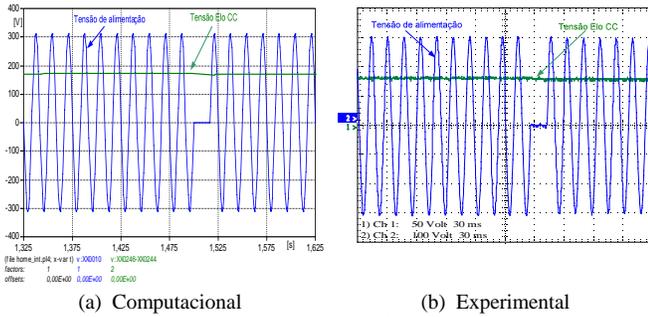


Fig. 16. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 2 - Interrupção de tensão.

De forma similar a explicação dada para o equipamento anterior, para este aparelho a duração do evento de interrupção de tensão foi de apenas 1 ciclo.

• **Caso 3: Elevação de Tensão**

As Figs. 17 (a) e (b) ilustram as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento por meio de simulação e ensaios laboratoriais, respectivamente.

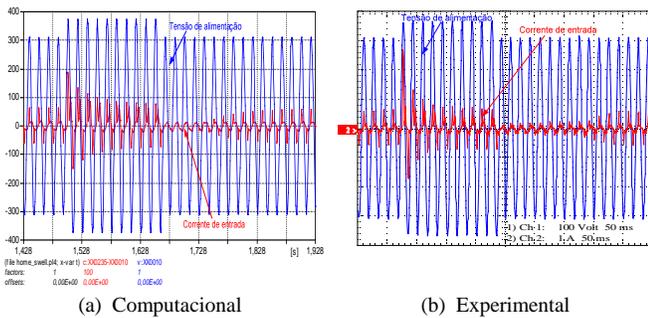


Fig. 17. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 3 - Elevação de tensão.

As Figs. 18 (a) e (b) expõem computacional e experimentalmente as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.

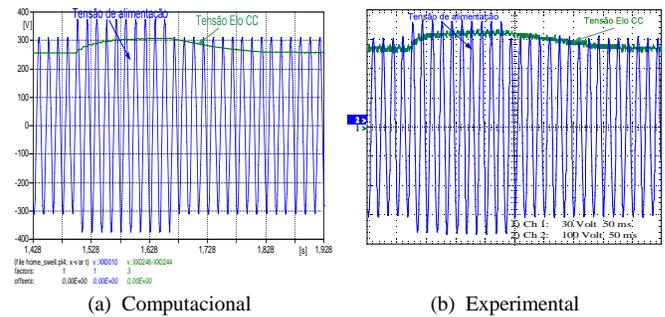


Fig. 18. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 3 - Elevação de tensão.

• **Caso 4: Transitório Oscilatório de Tensão**

As Figs. 19 (a) e (b) expressam as formas de onda da tensão e da corrente na entrada do equipamento na mesma seqüência apresentada para os demais casos.

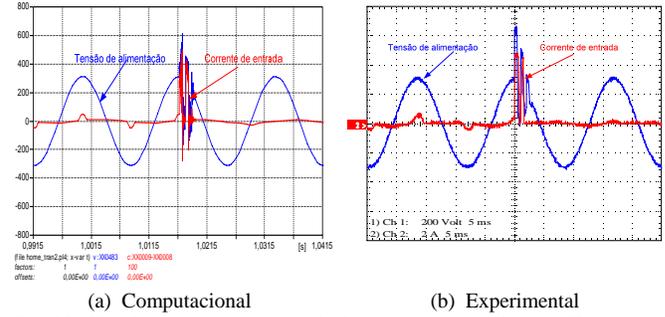


Fig. 19. Tensão e corrente na entrada do equipamento - Caso 4 - Transitório oscilatório de tensão.

As Figs. 20 (a) e (b) exibem as formas de onda da tensão no elo CC e da tensão de suprimento.

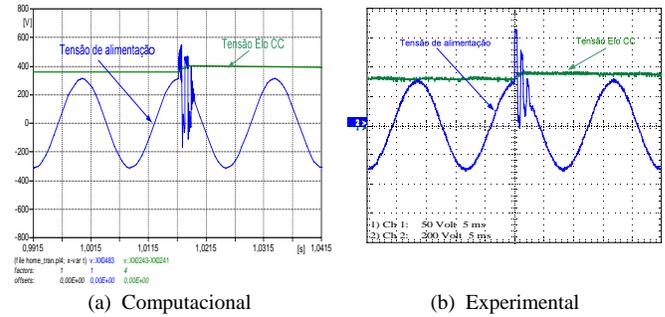


Fig. 20. Tensão de alimentação e no elo CC - Caso 4 - Transitório oscilatório de tensão.

Também para este equipamento, o modelo computacional implementado no ATP apresentou um comportamento equivalente ao observado nos testes experimentais. A comparação das figuras obtidas para os casos estudados comprova a qualidade representativa do modelo para os fins almejados nesta pesquisa.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a modelagem realizada para dois equipamentos eletroeletrônicos, um fundamentado na tecnologia da fonte chaveada (microcomputador), e outro no uso da fonte linear (*home theater*). As representações propostas destinam-se aos estudos de desempenho destes dispositivos quanto alimentados por tensões ideais e não-ideais.

O motivo que norteou a escolha destes princípios operacionais se deve a grande difusão de produtos comerciais que utilizam tais tecnologias para suas fontes de potência, e o grande número de solicitações de ressarcimento associado a eletrodomésticos dessa natureza. Neste contexto, surge a necessidade de obtenção de modelos capazes de correlacionar o funcionamento no domínio do tempo de tais equipamentos com eventuais distúrbios responsáveis por danos físicos, adequados para análise de pedidos de ressarcimento de danos a consumidores.

Nestes termos, as principais contribuições deste trabalho foram direcionadas ao desenvolvimento de representações simplificadas e apropriadas aos estudos de desempenho dos produtos focados no domínio do tempo. Uma vez validados, os modelos foram então incorporados na base ATP, a qual, como se sabe, não possui originalmente representações destinadas aos estudos operacionais de dispositivos similares aos aqui considerados.

Avaliações computacionais realizadas sob condições nominais e anormais de funcionamento dos equipamentos e correspondentes resultados experimentais permitiram constatar a consistência dos modelos computacionais desenvolvidos e implementados.

Os avanços aqui relatados quanto aos modelos propostos e respectiva inserção no simulador ATP constituem-se em passos importantes para o estabelecimento de um aplicativo computacional para futuras investigações das correlações entre distúrbios e efeitos em equipamentos.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd Edition, USA: McGraw-Hill, 2003.
- [2] A. S. Jucá, “Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de Adequação”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo/SP, 2003.
- [3] J. C. Oliveira, C. E. Tavares, A. C. Delaiba, M. V. B. Mendonça, I. N. Gondim, K. D. Rodrigues, “Uma Estratégia Computacional para Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento a Nível de Distribuição”, Relatório Técnico 03/07 - “Validação dos Modelos Computacionais”, CEB-UFU, Brasília/DF, Uberlândia/MG, Brazil, Maio 2006.
- [4] Alternative Transients Program (ATP) Rule Book, Julho 1987.
- [5] K. Ermeler, W. Pfeiffer, D. Schoen, M. Schocke, “Surge Immunity of Electronic Equipment”, *IEEE - Electrical Insulation Magazine*, vol. 14, 1998.
- [6] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, USA: Wiley - IEEE Press, 2000.
- [7] H. R. P. M. Oliveira, N. C. Jesus, M. L. B. Martínez, “Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaios de Sobretensões”, *XVIII SNPTEE*, Curitiba/PR, Outubro 2005.

VII. BIOGRAFIAS



Marcus Vinícius Borges Mendonça nasceu em Ituiutaba-MG, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde, atualmente, cursa o doutorado e atua como pesquisador nas áreas de Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.



Carlos Eduardo Tavares nasceu em Juiz de Fora-MG, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ). Obteve o título de Mestre em Ciências pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde, atualmente, cursa o doutorado e atua como pesquisador nas áreas de Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.



Isaque Nogueira Gondim nasceu em Araporã-MG, Brasil. Atualmente cursa a graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e trabalha no grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica desta instituição como pesquisador e aluno de iniciação científica.



José Carlos de Oliveira nasceu em Itajubá-MG, Brasil. Graduou-se e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e de PhD pelo Instituto de Ciências e Tecnologia da Universidade de Manchester, em Manchester - Reino Unido. Atualmente, trabalha como pesquisador e professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Tem lecionado e publicado sobre vários assuntos relacionados com Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.



Antônio Carlos Delaiba nasceu em Botucatu-SP, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Fundação Educacional de Barretos (FEB). Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela USP-SP(São Carlos) e de Doutor pela USP-SP(capital). Atualmente, trabalha como pesquisador e professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Tem lecionado e publicado sobre vários assuntos relacionados com Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.



Kleiber David Rodrigues nasceu em Ituiutaba-MG, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Obteve o título de Mestre em Ciências pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e de Doutor pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde atualmente é professor e pesquisador do Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica.



Rildo Marley Tavares da Silva nasceu em Itajubá-MG, Brasil. Concluiu a graduação na Universidade Federal de Itajubá - Brasil, e MBA Empresarial na Fundação Dom Cabral - MG. É Gerente Executivo de Manutenção e Serviços da Companhia Energética de Brasília. Tem atuado em projetos de pesquisa nas áreas de Sistemas de Potência e Qualidade de Energia.