

AVALIAÇÃO DE PROGRAMAS DIRECIONADOS À ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA SUBMETIDOS A CONTINGÊNCIAS

Paulo Sérgio P. Junior¹, Gustavo S. Salge¹, Moisés J. B. B. Davi¹, Márcio A. Tamashiro², Thales L. Oliveira², Geraldo C. Guimarães²

¹CONPROVE Engenharia, ²Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – O objetivo deste artigo consiste em realizar comparações para auxiliar pesquisadores, estudantes ou empresas na escolha mais adequada de um simulador computacional a ser utilizado nos estudos do comportamento de máquinas síncronas em sistemas elétricos de potência. Nesse contexto serão comparados dois programas utilizados para estudos com esse direcionamento. O primeiro, denominado MATLAB/Simulink, desenvolvido pela empresa americana MathWorks Inc.. O segundo, genuinamente brasileiro, denominado PS SIMUL (*Power System Simulator*), desenvolvido pela empresa CONPROVE Engenharia. Para tal análise e comparação será utilizado um estudo de caso onde um gerador síncrono é submetido à perda de sua excitação.

Palavras-Chave – máquina síncrona, MATLAB/Simulink, perda de excitação, PS SIMUL, simulação computacional.

EVALUATION OF PROGRAMS DIRECTED TO THE ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Abstract – The objective of this paper is to perform comparisons to help students, researchers or companies to choose the most suitable computer simulator software to be used in behavioral studies of synchronous machines in electrical power systems. In this context two programs used for this type of study are compared. The first, called MATLAB/Simulink, developed by commercial firm MathWorks Inc.. The second, genuinely Brazilian, called PS SIMUL (*Power System Simulator*), developed by enterprise CONPROVE Engenharia. For this analysis and comparison, will be used a case study where a synchronous generator is subjected to loss of excitation.

Keywords – computer simulation, loss of excitation, MATLAB/Simulink, PS SIMUL, synchronous machine.

NOMENCLATURA

X _d	Reatância síncrona de eixo d em pu.
X _q	Reatância síncrona do eixo q em pu.
X' _d	Reatância transitória de eixo d em pu.
X'' _q	Reatância subtransitória do eixo q em pu.
X'' _d	Reatância subtransitória do eixo d em pu.
T' _d	Constante de tempo transitória de curto circuito de eixo d em segundos.
T'' _d	Constante de tempo subtransitória de curto circuito de eixo d em segundos.
T'' _q	Constante de tempo subtransitória de curto circuito de eixo q em segundos.
X _l	Reatância de dispersão do estator da máquina em pu.
R _s	Resistência do estator da máquina síncrona em pu.
H	Inércia da máquina síncrona em segundos.

I. INTRODUÇÃO

Segundo Banks, simulação é, em geral, entendida como “imitação” de uma operação ou de um processo do mundo real [1]. Toda simulação a priori, investiga e constrói um modelo físico e/ou matemático de um determinado sistema ou fenômeno, sendo que após tal modelagem, o sistema pode ser utilizado para a realização de diversos tipos de ensaios e análises, mesmo antes de sua concepção.

Nos dias atuais, a disponibilidade de ferramentas de simulação é grande, principalmente computacionais, utilizadas nas mais diversas áreas do conhecimento. Em função de tal diversidade, foram escolhidos dois simuladores computacionais bastante úteis para a realização de estudos do comportamento de máquinas síncronas em sistemas elétricos de potência: MATLAB/Simulink e PS SIMUL (*Power System Simulator*).

Tendo em vista que o MATLAB já é bastante utilizado, tanto para fins didáticos quanto para o desenvolvimento de pesquisas na área e o PS SIMUL é um programa relativamente novo, o objetivo principal do trabalho é, além de apresentar uma nova ferramenta computacional, determinar as melhores características de operação e funcionamento de cada um desses programas. Salienta-se que não há preocupação em determinar qual o melhor simulador, mas de confrontar os programas e estabelecer as similaridades e as diferenças existentes. Desse modo, empresas, estudantes e pesquisadores poderão, por meio desta contribuição, optar pela ferramenta que melhor atenda às suas necessidades.



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

II. ASPECTOS GERAIS DOS SIMULADORES

Serão apresentados a seguir, aspectos gerais dos simuladores em análise.

A. MATLAB/Simulink

O MATLAB, de Matrix Laboratory, é um ambiente de simulação comercial, desenvolvido pela empresa americana MathWorks Inc. em uma linguagem de alto nível direcionada principalmente a cálculos numéricos e programação. Ele conta também com uma diversidade de ferramentas e aplicações direcionadas à modelagem e simulação de sistemas com interface amigável ao usuário. As versões recentes do programa, atualmente na versão R2015a [2], melhoraram de forma significativa o ambiente, incluindo facilidades gráficas de visualização de resultados e várias outras ferramentas denominadas Tool Boxes. Dentre as Tool Boxes disponibilizadas pelo MATLAB, destaca-se a ferramenta Simulink direcionada a simulações de sistemas elétricos em geral, a qual foi utilizada para obtenção de alguns resultados deste artigo.

O Simulink, que se encontra atualmente na versão 8.5, é uma ferramenta utilizada para modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos suportando sistemas lineares e não lineares modelados em tempo contínuo, tempo discreto ou com um híbrido dos dois [3]. Para realização da modelagem dos sistemas elétricos, o Simulink possui uma interface gráfica amigável (GUI – *Graphical User Interface*) para construir modelos com diagramas de blocos de forma prática e ágil. Além dos blocos pré-definidos, o usuário pode também personalizar e criar seus próprios blocos e subsistemas.

A Figura 1 mostra a tela principal da ferramenta Simulink, onde o usuário terá acesso ao ambiente de desenho e também à biblioteca de blocos pré-definidos (Figura 2).

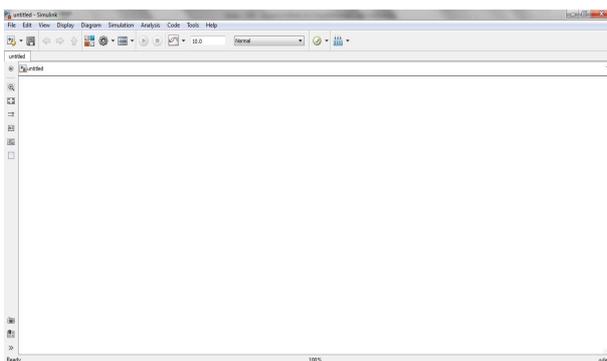


Fig. 1. Tela principal da ferramenta Simulink.

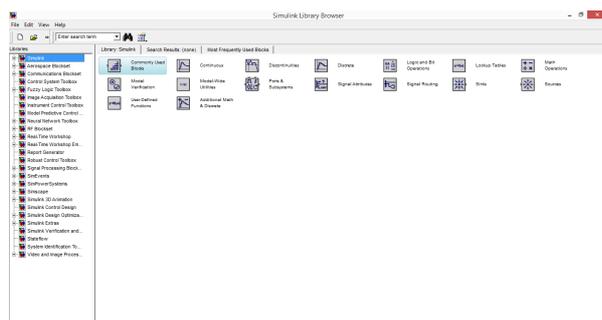


Fig. 2. Biblioteca de blocos do Simulink.

A biblioteca padrão dispõe de diversos blocos de características variáveis, o que possibilita maior flexibilidade e autonomia nas simulações. Existem também diversos métodos de resolução disponíveis ao usuário, com passo de tempo fixo ou variável.

Além da simulação de sistemas elétricos no domínio do tempo, análise de estabilidade e transitórios, a biblioteca disponibiliza um bloco denominado “*Power GUT*” que possibilita, além de outros recursos, a simulação do fluxo de carga do sistema para que o usuário proceda, por exemplo, a inicialização de máquinas elétricas em regime permanente.

B. PS SIMUL (Power System Simulator)

O programa PS SIMUL, desenvolvido no Brasil desde o ano de 2009 pela empresa CONPROVE Engenharia, teve sua primeira versão lançada no ano de 2014, sendo disponibilizada pelo site da empresa uma versão demonstrativa do *software* [4]. Esse programa, criado com a finalidade principal de permitir ao usuário modelar sistemas de potência e de controle complexos e simular transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, trabalha com uma interface bastante intuitiva e amigável, com uma série de recursos que facilitam a obtenção e avaliação de resultados, visualização de erros e entrada de dados em geral. Além disso, o *software* subdivide-se em duas partes: *Draft* e *RunTime*, sendo a primeira direcionada ao desenho dos circuitos de potência ou de controle e, a segunda, onde são disponibilizados os resultados da simulação.

Com o intuito de facilitar as análises e torná-las mais didáticas, é possível que seja criado um painel de controle na *RunTime* onde o usuário, através de botões (*dial*, chaves, sinalizadores, entre outros), pode controlar o circuito de potência ou de controle, possibilitando variações do sistema sem que seja necessário realizar alterações no circuito. Nesse módulo o usuário poderá analisar a saída de sua simulação de diversas maneiras, entre elas: formas de onda (incluindo componente simétrica, potências e impedâncias), fasores, trajetórias de impedância e gráfico de barras para decomposição harmônica. Todos os resultados obtidos no projeto são salvos em um único arquivo permitindo ainda sua exportação para os formatos COMTRADE e CSV. A Figura 3 apresenta a tela principal do programa.

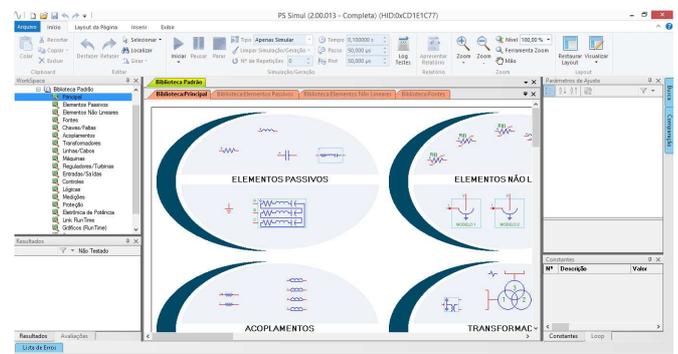


Fig. 3. Tela principal do programa PS SIMUL.

Em se tratando da biblioteca e recursos disponibilizados, seguem algumas das funcionalidades mais importantes.

1) Métodos numéricos utilizados.

Essa ferramenta computacional utiliza o método trapezoidal em seu processo numérico de integração, alterando-o para o método de Euler na ocorrência de chaveamentos, o que evita oscilações numéricas durante a simulação.

2) Recursos de Constantes, Loop e Avaliação.

O aplicativo permite ao usuário trabalhar e gerenciar variáveis globais, denominadas de constantes, que possibilitam a definição de um ajuste comum a vários blocos em um único ponto. Com esse recurso o usuário pode, por exemplo, definir a frequência de todas as fontes de seu sistema como uma constante e alterando seu valor todas as fontes passarão a trabalhar com a nova frequência dentre outras inúmeras aplicações. O recurso de constantes permite também que sejam realizados testes múltiplos alterando uma ou mais constantes, ou seja, o usuário pode definir um *loop* para cada uma das constantes de tal forma a varrer uma infinidade de possibilidades. Ao configurar um *loop*, todos os resultados das simulações ficam armazenados podendo ser comparados, e também salvos em arquivo.

Após a obtenção de todos os resultados de um *loop*, é possível avaliá-los em tempo ou amplitude através da ferramenta de avaliação, esta que irá filtrar os resultados obtidos de acordo com as necessidades do usuário.

3) Modelos de máquinas e reguladores.

No que tange a máquinas, este programa disponibiliza:

- Máquinas Síncronas com todos os tipos de conexões, inclusive conexão externa (usuário tem acesso aos enrolamentos do rotor da máquina);
- Máquinas Assíncronas com rotor bobinado ou gaiola de esquilo;
- Máquinas DC de Ímã Permanente ou Excitação Externa;
- Reguladores de excitação e velocidade.

4) Modelos de Transformadores, Linhas e Cabos.

São disponibilizados transformadores reais e ideais de até cinco enrolamentos com possibilidade de acesso às espiras de todos eles. Além disso, a biblioteca conta com transformadores de potencial e corrente, reais e ideais.

Em se tratando de linhas e cabos, estes podem ser configurados através de parâmetros distribuídos ou concentrados e, para as linhas, pode-se entrar com dados de geometria, matriz RLC ou Matriz de Sequência e escolher entre os modelos: Pi, RL, Sem Perdas, Bergeron, Modelagem em frequência no domínio das fases ou modal.

5) Representação de Cargas.

O PS SIMUL disponibiliza diversas configurações de cargas lineares e não lineares, trifásicas e monofásicas e SIR (*Source Impedance Ratio*).

6) Reprodução de oscilografias e distúrbios reais.

Além da possibilidade de exportar formas de onda, está incluso no *software* também, o recurso de importar oscilografias de distúrbios reais, reproduzindo-as no sistema a ser simulado através da fonte COMTRADE de sua biblioteca.

7) Representação de faltas e Sistemas de Proteção.

A biblioteca contém blocos prontos para faltas de todos os tipos, inclusive faltas para linha, sem a necessidade de dividi-las manualmente (escolhendo a distância da falta em quilômetros ou em porcentagem). Além disso, existem chaves controladas por tensão ou tempo, disjuntores trifásicos e monofásicos com as mais diversas formas de atuação e blocos com a função diferencial implementada.

8) Possibilidade de conexão com Hardware.

A versão completa deste programa possibilita ao usuário a conexão com a mala de teste da CONPROVE, através do direcionamento de saídas e entradas realizado por blocos de sua biblioteca. Desta maneira, as formas de onda simuladas podem ser reproduzidas fielmente pelos amplificadores de corrente e tensão, visando analisar o comportamento dos dispositivos de proteção ou medição.

9) Suporte Técnico e Manual.

Por não se tratar de um programa gratuito, a empresa CONPROVE dispõe de um suporte técnico especializado e direcionado aos usuários do programa PS SIMUL, o que facilita em caso de dúvidas quanto à utilização do mesmo. Além disso, um manual com todas as características e teoria dos componentes da biblioteca acompanha o *software*.

Com todas as funcionalidades observadas, o programa possibilita a realização de estudos de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, estabilidade transitória, sobretensão, descargas atmosféricas, modelagem de máquinas elétricas, partida de motores, ocorrência de harmônicos, energização de linhas e transformadores, saturação de transformadores de corrente, aplicações em eletrônica de potência, análise de distúrbios reais, testes em dispositivos de proteção, tensão de restabelecimento de transitórios, estudos de qualidade de energia, manobra de cargas, religamento de linhas, lógicas de controle, entre outras.

Em se tratando da versão demonstrativa, esta não expira com o tempo de uso, porém algumas características de funcionalidade são limitadas, como disponibilidade de apenas:

- 01 página de *Draft*;
- 01 página de *RunTime*;
- 02 projetos abertos simultaneamente;
- 30 blocos por página de *Draft*;
- 10 blocos por página de *RunTime*;
- 50 nós de controle e 12 de potência por página de *Draft*.

III. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Seguindo instruções de testes de operação assíncrona em geradores [5], foi simulado um sistema onde um gerador síncrono é submetido à perda total de sua excitação.

Tal escolha para comparação dos programas, parte do princípio da relevância do tema em questão, já que de acordo com estatísticas, perdas de excitação e curto-circuito, representam mais de 80% das falhas observadas em geradores síncronos, sendo que 20% são relacionadas a perdas na excitação e 60% a curtos [6].

É visto ainda, que a desconexão do gerador síncrono submetido à perda de excitação no sistema, em alguns casos não é necessária de forma imediata. Sendo tal decisão dependente da potência produzida pelo gerador no momento da perda, o que irá refletir nos níveis alcançados pelas correntes e tensões do mesmo. De acordo com estudos já realizados [7], quando um gerador de 600 MW de potência (conectado ao sistema elétrico proposto em [7]) a 100% de sua potência nominal sofre perda de excitação, os níveis de corrente no estator podem alcançar até 2,65 vezes a corrente nominal, ocasionando em possíveis danos aos demais equipamentos do sistema. Entretanto, se este mesmo gerador estivesse operando com 40% de sua potência nominal, tais correntes não ultrapassariam 10% das correntes nominais [7].

Partindo desse princípio, o estudo proposto utilizou de um sistema com um único gerador trifásico de 50 MVA de potência, conectado a uma barra infinita através de um transformador trifásico de dois enrolamentos (245/20 kV). O sistema proposto é mostrado nas Figuras 4 e 5, modelado nos programas MATLAB/Simulink e PS SIMUL respectivamente, e todos os dados da máquina são mostrados na Tabela I.

Tabela I – Dados do Gerador Síncrono simulado.

Gerador de 50 MVA, 20kV, 60Hz	
X_d	2,4 pu
X'_d	0,2 pu
X''_d	0,15 pu
X_q	1,77 pu
X'_q	0,26 pu
X''_q	0,05 pu
R_s	0,001 pu
T'_d	0,33 segundos
T''_d	0,03 segundos
T'_q	0,03 segundos
H	10 segundos
N_p	4

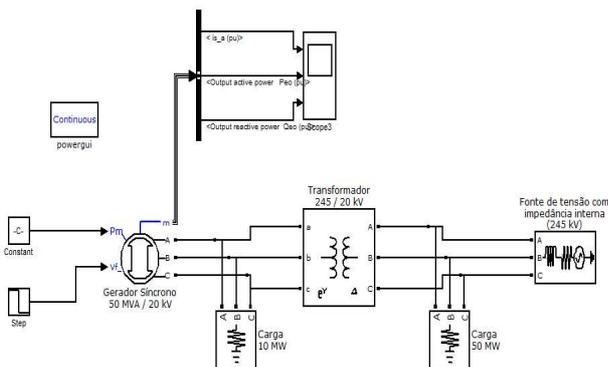


Fig. 4. Sistema modelado no ambiente Simulink.

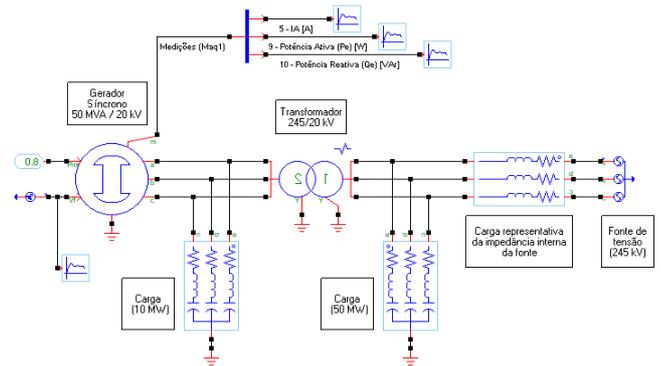


Fig. 5. Sistema modelado no ambiente PS SIMUL.

Feita a modelagem do sistema em ambos os programas, submeteu-se o gerador síncrono a uma perda de excitação após 1 segundo do início da simulação, observando a resposta dos sistemas em dois diferentes cenários. No primeiro cenário, o gerador síncrono é submetido a uma perda de excitação quando opera a 100% de sua potência nominal. No segundo, o gerador opera apenas com 45% de potência nominal no momento da perda.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Após realização das simulações, tanto no MATLAB/Simulink quanto no PS SIMUL foram observadas algumas características de operação e impressos gráficos disponíveis para a realização de comparações visuais dos resultados obtidos.

Em ambos os simuladores, a interface gráfica facilitou bastante na construção do modelo, assim como a inserção de dados e configuração de parâmetros da simulação. Outro aspecto importante relaciona-se à visualização de resultados que é feita de forma bastante organizada e clara, oferecendo grande flexibilidade operacional ao usuário de ambos os softwares.

No que tange ao tempo de simulação do sistema, o MATLAB obteve os resultados em 10,3 segundos e o PS SIMUL em 11,9 segundos, ambos com o mesmo passo de integração, as diferenças observadas são pouco significativas e possivelmente oriundas dos métodos de resolução empregados.

Salta-se a possibilidade de montagem de um painel de controle na *RunTime* do PS SIMUL, adicionando-se botões, chaves, sliders e sinalizadores, o que poderia tornar simulações como estas mais didáticas e de fácil configuração. Além disso, com a utilização dos recursos de comunicação com *hardware* existentes no programa PS SIMUL, o usuário poderia, por exemplo, comunicá-lo com um relé operando na função de subexcitação e verificar a funcionalidade do mesmo, direcionando a resposta do sistema simulado a uma entrada do relé e a saída do *trip* do relé a um disjuntor adicionado à página de *Draft* do programa.

Foram analisadas as formas de onda das potências ativa e reativa e corrente no estator, para 100% e 45% da potência nominal do gerador síncrono. No caso em que o gerador opera a 100% de sua potência nominal foram obtidos gráficos para ambos os programas, observando as seguintes

variáveis: potências ativas (Figuras 6 e 7), potências reativas (Figuras 8 e 9) e corrente no estator (Figuras 10 e 11). Para o gerador operando com 45% de sua potência nominal observou-se: potências ativas (Figuras 12 e 13), potências reativas (Figuras 14 e 15) e correntes no estator (Figuras 16 e 17).

Através dos resultados, observou-se primeiramente que ambos os programas analisados operaram de forma idêntica, já que as magnitudes alcançadas em todos os casos são as mesmas, assim como a característica das respostas obtidas.

Além disso, os resultados mostrados estão condizentes com o esperado pela teoria e referências bibliográficas de estudos anteriores, visto que a magnitude atingida pela corrente do estator com a perda de excitação diminui consideravelmente com a redução da potência gerada pela máquina síncrona no momento dessa perda.

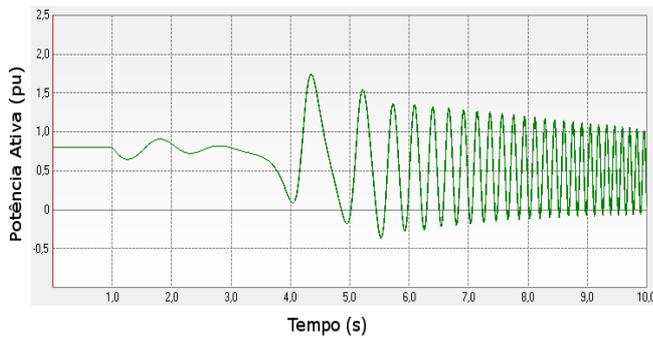


Fig. 6. Potência Ativa a 100% da potência nominal (PS SIMUL).

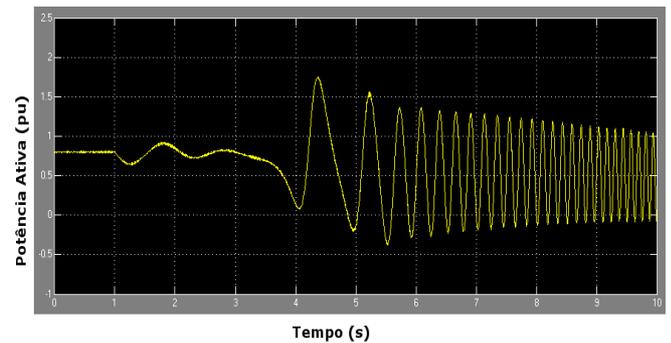


Fig. 7. Potência Ativa a 100% da potência nominal (MATLAB/Simulink).

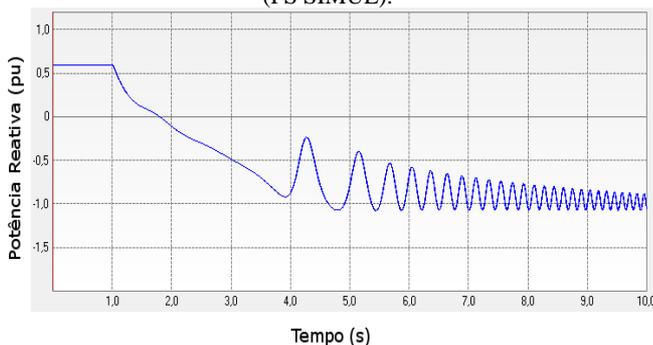


Fig. 8. Potência Reativa a 100% da potência nominal (PS SIMUL).

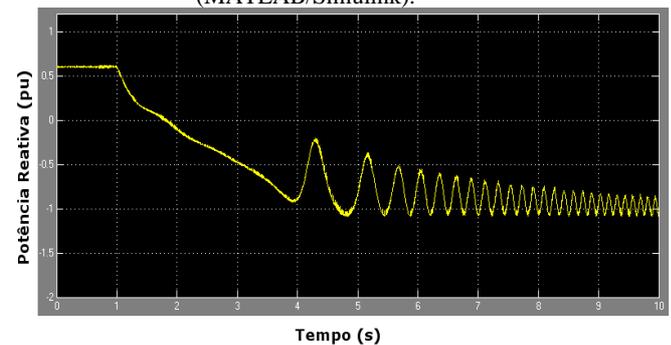


Fig. 9. Potência Reativa a 100% da potência nominal (MATLAB/Simulink).

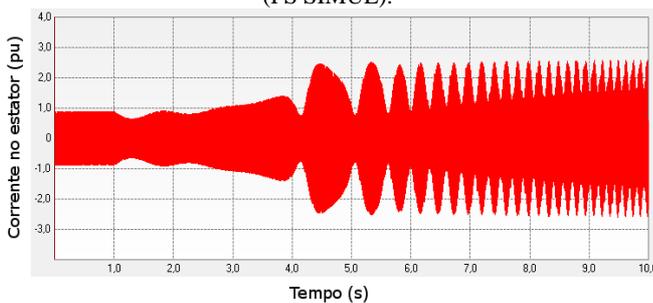


Fig. 10. Corrente no estator a 100% da potência nominal (PS SIMUL).

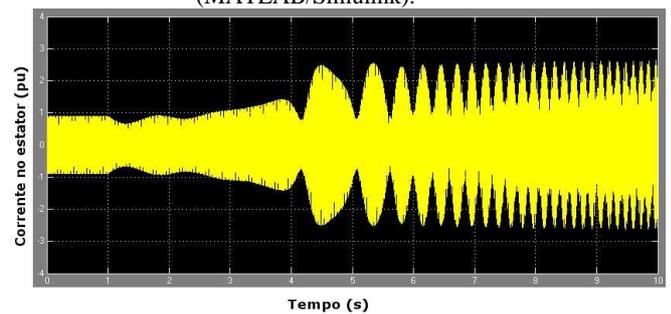


Fig. 11. Corrente no estator a 100% da potência nominal (MATLAB/Simulink).

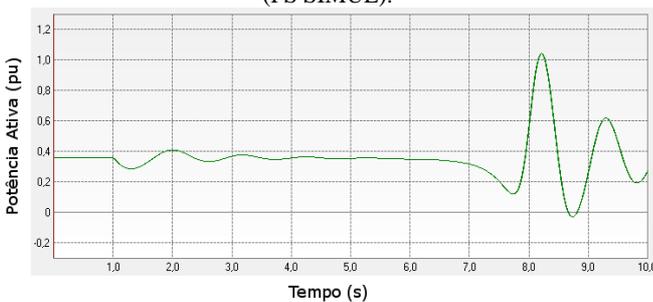


Fig. 12. Potência Ativa a 45% da potência nominal (PS SIMUL).

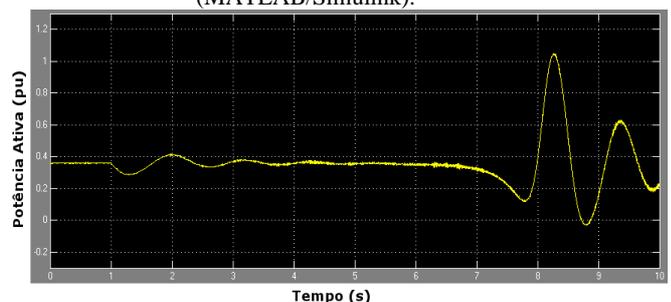


Fig. 13. Potência Ativa a 45% da potência nominal (MATLAB/Simulink).

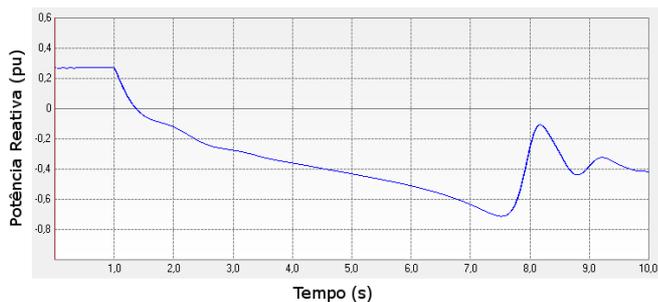


Fig. 14. Potência Reativa a 45% da potência nominal (PS SIMUL).

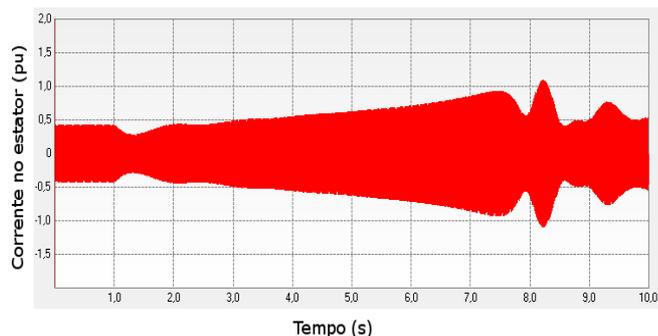


Fig. 16. Corrente no estator a 45% da potência nominal (PS SIMUL).

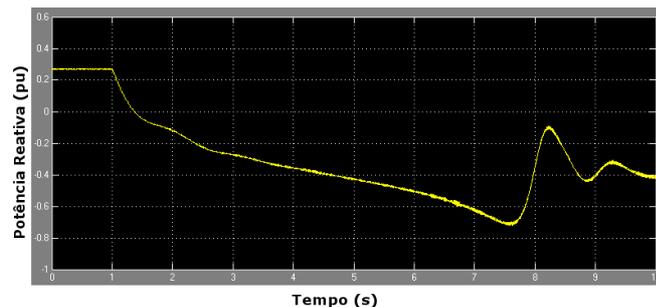


Fig. 15. Potência Reativa a 45% da potência nominal (MATLAB/Simulink).

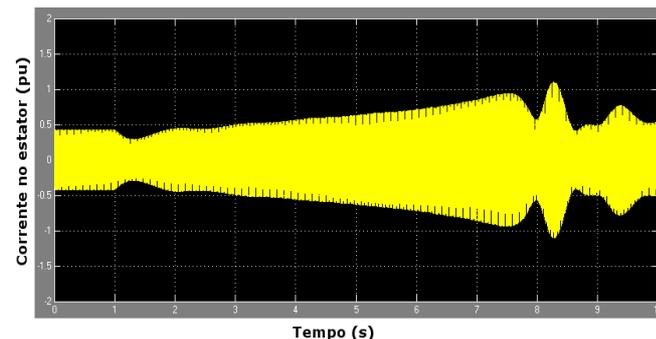


Fig. 17. Corrente no estator a 45% da potência nominal (MATLAB/Simulink).

V. CONCLUSÕES

Avaliando os programas de uma forma qualitativa com relação aos resultados obtidos, conclui-se que o MATLAB/Simulink e o PS SIMUL mostraram ser ótimas opções para a realização de estudos do comportamento de máquinas síncronas em sistemas elétricos de potência, pois ambos os programas dispõem de diversos modelos de equipamentos prontos para serem utilizados pelo usuário.

Uma diferença importante a ser salientada, está relacionada a alguns recursos disponibilizados pelo PS SIMUL como a declaração de constantes, configuração de *loops* e montagem de painéis de controle na *RunTime*, o que permite maior facilidade e flexibilidade ao operador em suas simulações. Além disso, este programa é uma tecnologia inteiramente desenvolvida no Brasil e conta com equipamentos de características únicas como, por exemplo, a possibilidade de acesso aos enrolamentos do rotor da máquina elétrica e também aos enrolamentos dos transformadores.

Ressalta-se ainda, que a empresa CONPROVE Engenharia disponibiliza em seu site uma versão demonstrativa gratuita do programa [4] e, visando complementar ainda mais o *software* atual, já está desenvolvendo vários outros componentes e recursos como, por exemplo, a possibilidade de criação de blocos pelos usuários e simulações que agregam energias alternativas.

O MATLAB/Simulink, apesar de não oferecer essas comodidades ao usuário e não se tratar de uma tecnologia nacional, dispõe de vários métodos de resolução para os sistemas simulados, incluindo passo de integração variável ou fixo.

REFERÊNCIAS

- [1] BANKS, J. "Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice", John Wiley & Sons, Atlanta, Georgia, 1998.
- [2] Matlab. *The Language of Technical Computing*. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/index-b.html>>. Acesso em: 13 Maio 2015
- [3] Simulink. *Simulation and Model-Based Design*. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/simulink/index-b.html>>. Acesso em: 13 Maio 2015.
- [4] Conprove Engenharia, Indústria e Comércio. *PS SIMUL: Software para Modelagem do Sistema de Potência e Simulação de Transitórios Eletromagnéticos*. Disponível em: <http://www.conprove.com.br/pub/i_ps_simul.html>. Acesso em: 27 Maio 2015
- [5] GUIDE, Z.; BEINING, G.. *Technology and Practice of Synchronous Generator Operation*, 2nd ed. China Electric Power Press, 2004.
- [6] YANLING, L.; BAOJUN, G.; CUICUI, L.; DAJUN, T.; ZHIQIANG, Z.. *Analysis of High-voltage Generator Stator Windings Sudden Three-phase Short-Circuit and Loss of Excitation Fault*[J]. *Sustainable Power Generation and Supply*, 2009.
- [7] JIN-YAO, H.; YAN-PING, L.; JING, C.. *Simulation Analysis for Asynchronous Operation Capacity of Turbogenerator under Excitation-Loss*. *The 6th International Forum on Strategic Technology*, 2011.