

# APLICAÇÃO DO SOFTWARE ATP PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Gislene. C.L. Ferreira<sup>1</sup>, Guilherme H.B. Cunha<sup>2</sup>, Geraldo C. Guimarães<sup>3</sup>

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – Minas Gerais

<sup>1</sup>[gilimafe@hotmail.com](mailto:gilimafe@hotmail.com), <sup>2</sup>[guilhermehbcunha@gmail.com](mailto:guilhermehbcunha@gmail.com), <sup>3</sup>[gcaixeta@ufu.br](mailto:gcaixeta@ufu.br)

**Resumo** - O objetivo principal deste documento é avaliar a potencialidade da utilização do “ATP Alternative Transients Program” como ferramenta de simulação da estabilidade transitória de um sistema elétrico de potência. O sistema considerado é constituído de nove barras com três geradores sendo um com característica hidráulica e os outros dois com características térmicas. As questões técnicas aqui estudadas se referem à análise de estabilidade do sistema subsequente a uma perturbação decorrente de uma falta trifásica ou uma perda de carga. Os resultados computacionais demonstram que o programa ATP realiza de forma satisfatória a análise da estabilidade transitória e que, para aprimorá-lo, é necessária a implementação dos reguladores de velocidade e de tensão das máquinas síncronas.

**Palavras-Chave** – análise de estabilidade transitória, ATP, máquina síncrona, sistema elétrico de potência.

## APPLICATION OF SOFTWARE ATP FOR TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF AN ELECTRIC POWER SYSTEM

**Abstract** - The main objective of this paper is to evaluate the potential use of EMTP-ATP (Alternative Transients Program) as a tool for simulation of transient stability of an electric power system. The system is composed by nine busbars with three generators, one with hydraulic characteristic and two with thermal characteristics. The technical issues studied here refer to the system stability analysis after a disturbance due to a three-phase fault or a loss of load. The computer results show that ATP program performs satisfactorily the of transient stability analysis and that, to improve it, synchronous machines must be equipped with speed governors and voltage regulators.

**Keywords** – ATP, electric power system, synchronous machine, transient stability analysis.

### NOMENCLATURA

$x'_d$  Reatância transitória de eixo direto (pu);

$x'_q$  Reatância transitória de eixo de quadratura (pu);  
 $x_d$  Reatância de eixo direto (pu);  
 $x_q$  Reatância de eixo de quadratura (pu);  
 $T'_{do}$  Constante de tempo de curto-circuito, transitória de eixo direto (s);  
 $T'_{q0}$  Constante de tempo de curto-circuito, transitória de eixo de quadratura (s);  
 $J_m$  Momento de inércia mecânico (kg m<sup>2</sup>);  
P Número de pólos da máquina;  
 $\theta_e$  Ângulo elétrico (rad);  
 $\theta_m$  Ângulo mecânico (rad);  
[i] [ $i_1, i_2, i_3, i_f, i_g, i_D, i_Q$ ];  
[ $\lambda$ ] [ $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_f, \lambda_g, \lambda_D, \lambda_Q$ ];  
[v] [ $v_1, v_2, v_3, v_f, 0, 0, 0$ ];  
[R] Matriz diagonal das resistências dos enrolamentos  $R_a, R_s, R_a, R_f, R_g, R_D, R_Q$ ;  
 $R_a$  Resistência de armadura ( $\Omega$ );  
H Constante de inércia (s);  
 $S_{rating}$  Potência aparente nominal do gerador (MVA);  
 $P_{rating}$  Potência nominal do sistema turbina gerador (MW);  
 $E_c$  Energia cinética (J);  
 $\omega_m$  Velocidade angular mecânica (rad/s);  
 $D_m$  Coeficiente de amortecimento mecânico;  
 $T_a$  Torque acelerante (N.m);  
 $T_m$  Torque mecânico (N.m);  
 $T_e$  Torque elétrico (N.m).

## I. INTRODUÇÃO

A estabilidade de um sistema elétrico de potência pode ser definida como a capacidade desse sistema permitir que as máquinas síncronas respondam a um distúrbio, a partir de uma condição de regime permanente, de tal maneira a retornarem a uma condição novamente normal, podendo esta ser igual ou diferente da anterior [1].

Os transitórios subsequentes a uma perturbação do sistema são oscilatórios por natureza, no entanto se o sistema tender a estabilidade estas oscilações serão amortecidas [2].

Os estudos de estabilidade podem ser classificados em três tipos: (a) regime transitório, (b) regime dinâmico e (c) de regime permanente.

As análises de estabilidade transitória são feitas quando se determina se um certo sistema permanecerá em sincronismo após distúrbios significativos, tais como faltas no sistema, rejeição de carga, perda de geração, partida de um grande motor de indução, chaveamento de linhas, entre outras. Já no estudo da estabilidade dinâmica são considerados também os efeitos dos reguladores de velocidade e de tensão, isto é, são incluídos os sistemas de controle. Finalmente, quanto a estabilidade de regime permanente, tem-se o estudo do sistema durante a maior parte do seu funcionamento normal. Nesta condição, busca-se que todos os equipamentos



X CEEL - ISSN 2178-8308  
24 a 28 de setembro de 2012  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

elétricos pertencentes ao sistema estejam operando dentro de seus limites de tensão, frequência, potência, entre outros.

O estudo de estabilidade transitória tem como objetivo determinar se após distúrbios ocorridos no sistema os rotores das máquinas, sob perturbação, retornam ou não à operação com velocidade constante.

Os diversos estudos do sistema elétrico de potência são feitos para visualizar possíveis problemas decorrentes dos distúrbios que ocorrem no sistema. Assim, com os resultados dessas simulações são definidos parâmetros para os reguladores, equipamentos de proteção, entre outros.

## II. O SOFTWARE ATP

O *Alternative Transients Program* (ATP) é considerado como sendo um dos programas mais amplamente utilizado para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos bem como a simulação da natureza eletromecânica em sistemas elétricos de potência [4].

Com este programa pode-se simular vários sistemas complexos e redes elétricas podendo ser analisadas as mais diversas variáveis.

O ATP é uma versão do EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) e, ao contrário desse último, o primeiro possui domínio público. O ATP data de 1984 quando um grupo de estudiosos não concordaram com a empresa BPA (Bonnevillle Power Administration) em cobrar pelo uso do EMTP [5]. Desde essa data o ATP vem continuamente sendo desenvolvido e aprimorado por diversos grupos no mundo.

O conceito matemático que constitui o programa tem como pilar, para parâmetros distribuídos, o método das características; e para parâmetros concentrados, a regra de integração trapezoidal. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O ATPDraw<sup>TM</sup> é uma interface gráfica, um pré-processador do ATP. No ATPDraw o usuário pode construir um modelo do circuito a ser simulado usando o *mouse* e selecionando componentes já existentes no programa em um extensa lista. [5]

Os geradores usados na simulação são as máquinas síncronas *tipo 59* do ATPDraw. De acordo com a referência [6] a máquina *tipo 59* é trifásica e sem controle. As linhas de transmissão são do *tipo LINEZT\_3* que possuem como característica os parâmetros distribuídos, modelo de Clarke e são transpostas. Já os transformadores são do *tipo SatTrafo*, cuja característica principal é a possibilidade da inserção da curva de saturação. Finalmente as cargas são do *tipo RlcY3*, isto é, resistência, indutância e capacitância ligadas em estrela com valores independentes por fase.

## III. MODELAGEM MATEMÁTICA

O rigor matemático empregado para representação de máquinas síncronas no ATP depende muito do tipo de transitório a ser estudado [8]. Para atender aos estudos de estabilidade aqui tratados, a parte elétrica da máquina síncrona é modelada como uma máquina de 2 polos com 7 enrolamentos acoplados [8], sendo:

- Três (1, 2 e 3) enrolamentos de armadura (um em cada fase) conectados ao sistema de potência;

- f – um enrolamento de campo que produz fluxo de eixo direto, conectado na fonte DC do sistema de excitação;
- g – um enrolamento hipotético no eixo de quadratura para representar variações lentas de fluxo produzidas neste eixo por correntes parasitas ou de Foucault;
- D – um enrolamento hipotético no eixo direto para representar o efeito do amortecedor neste eixo;
- Q – um enrolamento hipotético no eixo de quadratura para representar o efeito do amortecedor neste eixo.

O comportamento dos sete enrolamentos é descrito por dois sistemas de equações [8]:

$$[v] = -[R][i] - \frac{d}{dt} [\lambda] \quad (1)$$

$$[\lambda] = [L][i] \quad (2)$$

Onde:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1Q} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2Q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{Q1} & L_{Q2} & \cdots & L_{QQ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para resolver estas equações algumas suposições são assumidas, as quais são razoáveis no caso de estudos de sistemas de potência. Estas são [8]:

- A resistência de cada enrolamento é constante;
- A relutância de cada parte do circuito magnético é constante;
- Os enrolamentos de armadura são simetricamente dispostos;
- Os circuitos elétricos e magnéticos da estrutura de campo são simétricos sobre os eixos direto e em quadratura;
- A indutância própria de cada enrolamento de rotor é constante;
- As indutâncias próprias e mútuas dos enrolamentos de armadura são expressas como uma constante mais uma função senoidal de segunda harmônica da posição do rotor (com a amplitude da componente de segunda harmônica sendo a mesma para todas as indutâncias próprias e mútuas);
- A indutância mútua entre qualquer enrolamento de campo e qualquer enrolamento de armadura é função senoidal fundamental da posição do rotor;
- Efeitos de histerese são insignificantes;
- Efeitos das correntes de Foucault são desprezíveis ou, no caso de máquinas de rotor cilíndrico, são representadas pelo enrolamento g.

A equação de oscilação eletromecânica da porção rotativa do conjunto turbina-gerador está indicada em (4), seguida pelas equações da constante de inércia H (5), energia cinética (6) e velocidade angular mecânica (7):

$$J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + D_m \frac{d\theta_m}{dt} = T_m - T_e = T_a \quad (4)$$

$$H = \frac{E_c}{S_{rating}} \quad (5)$$

$$E_c = \frac{1}{2} J_m \omega_m^2 \quad (6)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (7)$$

#### IV. O SISTEMA ESTUDADO E SEUS DADOS

O sistema elétrico de potência aqui analisado é composto por 9 (nove) barras sendo extraído de uma referência bastante conhecida pelos engenheiros de sistemas de potência, isto é, o livro “Power System Control and Stability” [3]. Este está ilustrado na Figura 1 e os dados do diagrama unifilar das impedâncias dos ramos utilizado para calcular os parâmetros das linhas de transmissão e também dos transformadores.

Esse sistema foi escolhido devido ao fato de ser representativo de uma porção de um sistema elétrico de potência de grande porte, contendo geradores do tipo hidráulico e térmico. Apesar do sistema escolhido tratar-se de uma rede didática, o estudo apresentado mostra-se bastante pertinente, pois os procedimentos desenvolvidos para a sua análise podem ser aplicados às redes reais fornecendo resultados condizentes.

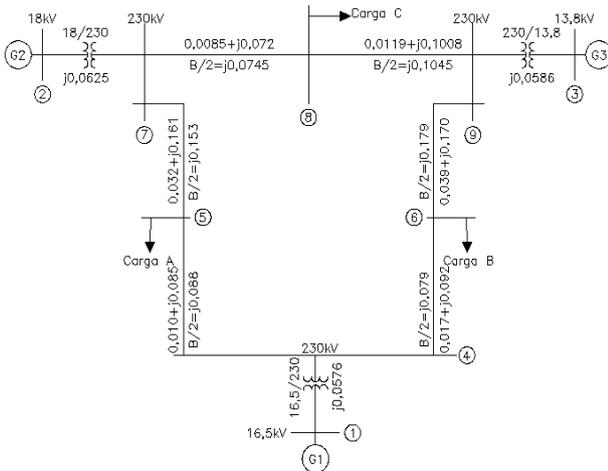


Fig. 1. Diagrama de impedâncias do sistema de nove barras. [3]

Na Tabela 1 são mostrados inicialmente os dados dos geradores que foram inseridos no ATPDraw, no bloco da máquina síncrona, *tipo 59*, conforme supracitado.

**TABELA I**  
**Dados das máquinas síncronas [3]**

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
Potência (MVA)	247,5	192,0	128,0
Rotação (rpm)	180	3600	3600
$x'_d$ (pu)	0,0608	0,1198	0,1813
$x'_q$ (pu)	0,0969	0,1969	0,250
$x_d$ (pu)	0,1460	0,8959	1,3125
$x_q$ (pu)	0,0969	0,8645	1,2578
$T'_{d0}$ (pu)	8,96	6,00	5,89
$T'_{q0}$ (pu)	0,0	0,535	0,600
Energia armazenada à velocidade nominal (MWs)	2364	640	301

Em seguida são apresentados na Tabela II os dados das linhas de transmissão e dos transformadores. Tais dados foram manipulados através de equações para que seus parâmetros ficassem em formatos compatíveis com os adotados no ATPDraw.

**TABELA II**

**Dados dos transformadores e linhas de transmissão [3]**

Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência série (pu)	Reatância série (pu)	Susceptância shunt (pu) (B/2)
1	1	4	0,0	0,0576	-
2	2	7	0,0	0,0625	-
3	3	9	0,0	0,0586	-
4	4	5	0,010	0,085	0,088
5	4	6	0,017	0,092	0,079
6	5	7	0,032	0,161	0,153
7	6	9	0,039	0,170	0,179
8	7	8	0,0085	0,072	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Finalmente pela Tabela III são dados os valores de potências consumidas pelas cargas, assim como os valores das potências fornecidas pelos geradores. Além disto, são também fornecidos os módulos e ângulos das tensões em todas as barras os quais correspondem a uma condição de regime permanente do sistema elétrico em questão.

**TABELA III**

**Dados de barra (potências e tensões) [3]**

Barra	Potência Gerada		Potência Consumida		Módulo da tensão (pu)	Ângulo da tensão (graus)
	Ativa (MW)	Reativa (MVA <sub>r</sub> )	Ativa (MW)	Reativa (MVA <sub>r</sub> )		
1	71,6	27,0			1,040	0,0
2	163,0	6,7			1,025	9,3
3	85,0	-10,9			1,025	4,7
4					1,026	-2,2
5			125,0	50,0	0,996	-4,0
6			90,0	30,0	1,013	-3,7
7					1,026	3,7
8			100,0	35,0	1,016	0,7
9					1,032	2,0

Após a realização e validação da modelagem do sistema elétrico como um todo, foram realizados os estudos de estabilidade transitória para os seguintes tipos de perturbações: um curto circuito trifásico e uma perda de carga elétrica.

#### V. TIPOS DE SIMULAÇÕES

As simulações computacionais foram realizadas de modo que seja possível avaliar, para o sistema estudado, quais serão as principais alterações no seu funcionamento. Os casos simulados são descritos a seguir:

Caso 1: Análise da estabilidade transitória do sistema para um curto circuito trifásico com duração de 100 ms nos terminais da barra 4.

Caso 2: Análise da estabilidade transitória do sistema para perda (corte) da carga A ligada a barra 5.

Para cada simulação de operação do sistema serão analisadas as curvas pertinentes ao estudo.

## VI. RESULTADOS E ANÁLISE

Neste item serão apresentados os resultados das simulações realizadas no ATP e também os comentários acerca do comportamento do sistema elétrico.

Caso 1: Curto circuito trifásico com duração de 100 ms na barra 4.

A Figura 2 ilustra o circuito simulado no ATP com a inserção de um curto na barra 4.

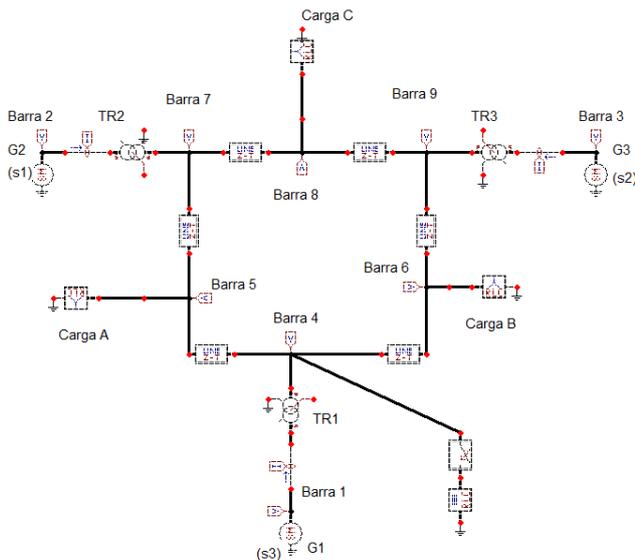


Fig. 2. Sistema de 9 barras com curto circuito na barra 4

Este caso permite identificar como se comporta o sistema da Figura 2 mediante o curto circuito trifásico na barra 4. O curto circuito irá ocorrer no instante  $t = 1$  s e será retirado no instante  $t = 1,1$  s (isto é, após 100 ms).

A Figura 3 apresenta o comportamento nas três fases da tensão da barra 4 e, como já era previsto para um curto sólido ou franco, esta cai para zero volt durante os 100 ms de duração do distúrbio.

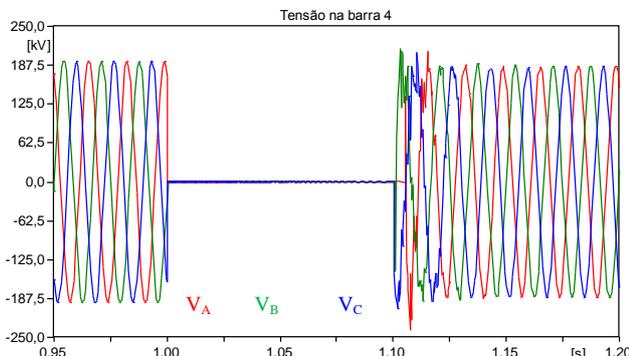


Fig. 3. Tensão na barra 4

Na Figura 4 são mostradas as curvas dos desvios das velocidades dos geradores em relação à velocidade síncrona. Observa-se que como não existe nenhuma regulação, a velocidade angular do rotor deverá encontrar um novo valor

para tornar o sistema estável após a extinção do curto circuito. Analisando os picos do desvio da velocidade síncrona das máquinas em questão chega-se a conclusão de que o gerador G1, ligado a barra 1, mais próxima do curto circuito, teve um desvio máximo de 0,544 % em relação a velocidade síncrona. Já os geradores G2 (ligado a barra 2) e G3 (ligado a barra 3) tiveram um mesmo desvio máximo de 0,857% e 0,842% em relação as suas velocidades síncronas, respectivamente. Isso ocorre porque, apesar de G1 estar mais próximo eletricamente do local de curto circuito, a máquina G1 possui um momento de inércia maior do que os demais geradores.

Ressalta-se que tanto o ângulo do rotor (em graus) quanto o desvio da velocidade angular do rotor (rad/s) são fornecidos no ATP como grandezas de saída da máquina síncrona. Estas são grandezas mecânicas dependentes do número de polos. Neste contexto e tendo em vista que os geradores simulados possuem 2 (G2 e G3) e 40 polos (G1), foi necessária a utilização de duas escalas diferentes para representar os resultados.

Na Figura 4 a escala da esquerda refere-se ao gerador G1, já a da direita a G2 e G3. Isto se mantém também na Figura 5.

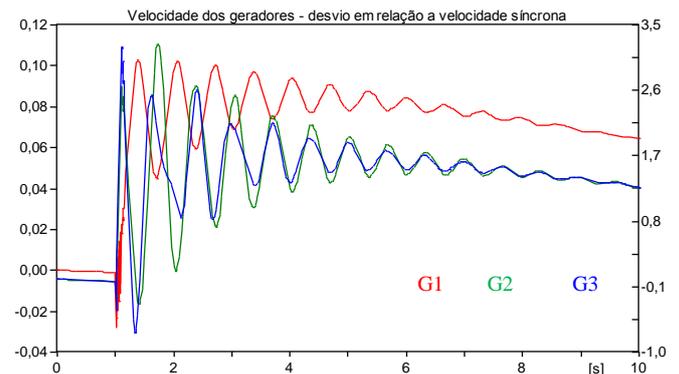


Fig. 4. Velocidade das máquinas síncronas

O problema de estabilidade envolve o estudo das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de alimentação. Assim, este é melhor descrito analisando a estabilidade do ângulo do rotor que representa a capacidade de interligar máquinas síncronas de um sistema elétrico de modo que estas permaneçam em sincronismo [7]. Sendo assim foi analisado o comportamento gráfico do ângulo mecânico apresentado na Figura 5.

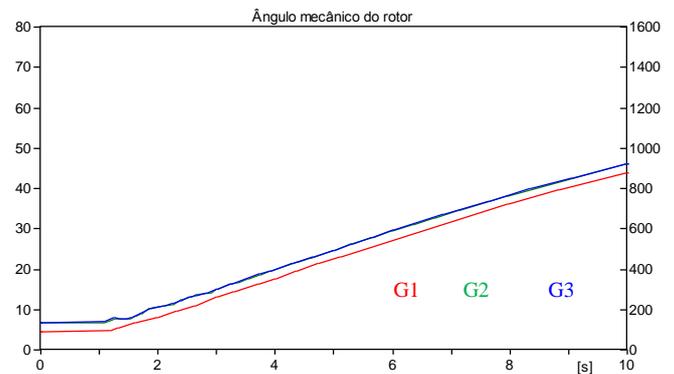


Fig. 5. Ângulo mecânico do rotor

Constatou-se pela Figura 5 que o sistema é estável visto que as curvas permanecem paralelas ao longo do tempo. Após a perturbação o sistema buscará outro ponto de equilíbrio, provavelmente diferente do anterior, uma vez que os geradores não possuem reguladores nem estão ligados a um barramento infinito.

Pela Figura 6 é possível verificar que a potência ativa fornecida pelo gerador 1 sai do seu valor de aproximadamente 73MW (regime permanente) para zero no período do curto circuito. Após a retirada do curto circuito ( $t = 1,1$  s), o fornecimento de potência passa por um período transitório e tende a estabilizar.

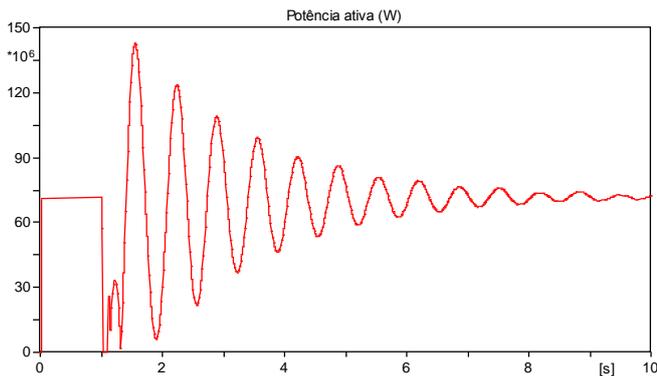


Fig. 6. Potência ativa gerada pela máquina 1 (G1) em W

**Caso 2:** Perda da carga A ligada a barra 5

A Figura 7 ilustra o circuito montado no ATP para a simulação de perda da carga A ligada a barra 5. Neste sistema o disjuntor conectado a carga A irá operar em  $t = 1,2$  s, ficando aberto até o fim da simulação.

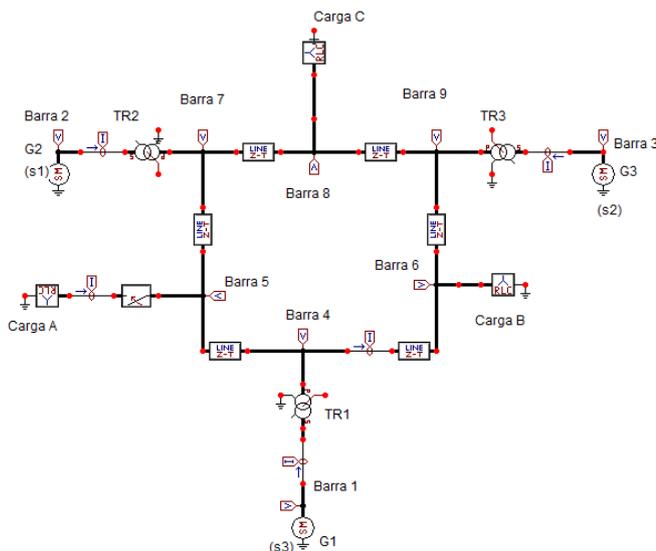


Fig. 7. Sistema de 9 barras com perda da carga A

Pela Figura 8 confirma-se que a corrente que flui para a barra de carga A cai para zero no instante da abertura do disjuntor.

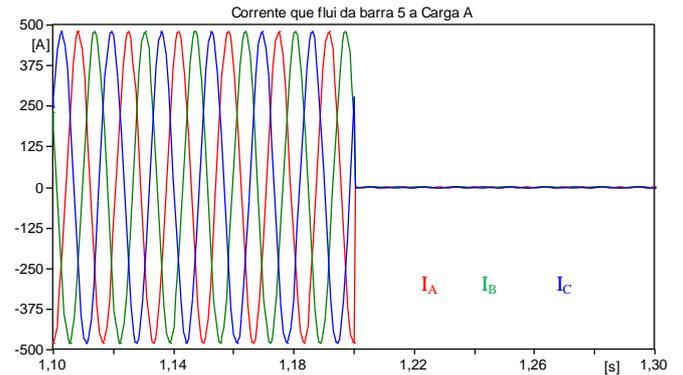


Fig. 8. Corrente que flui da barra 3 a barra 9

Nesse ponto é feita a análise dos ângulos mecânicos das máquinas após a perda da carga A, conforme indicado na Figura 9. Nota-se que o sistema permanece em sincronismo após a saída da carga, uma vez que as curvas permanecem paralelas entre si. Na Figura 9 a escala da esquerda refere-se ao gerador G1, já a da direita a G2 e G3. Isto se mantém também na Figura 10.

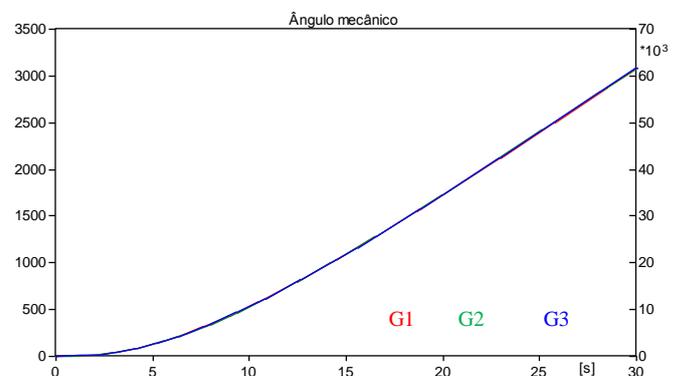


Fig. 9. Ângulo mecânico das máquinas

De acordo com a Figura 10, as velocidades dos geradores aumentaram em relação as respectivas velocidades síncronas, o que era de se esperar já que houve uma diminuição na carga total do sistema.

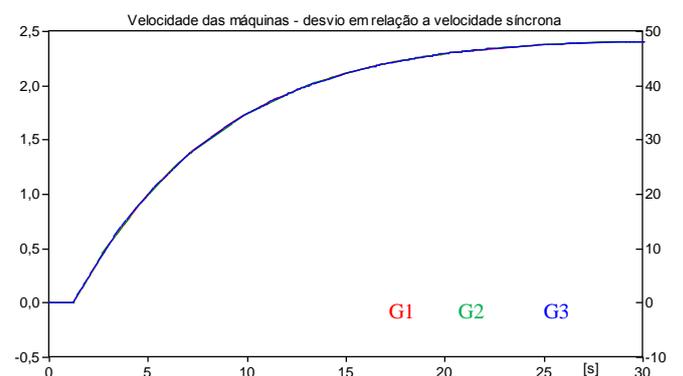


Fig. 10. Desvio da velocidade dos geradores em relação as suas respectivas velocidades síncronas

VII. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que o software ATP é capaz de realizar análises de estabilidade transitórias de sistemas elétricos de potência. Este permitiu visualizar o

comportamento dos geradores em duas distintas situações: curto circuito trifásico e perda de carga. Por meio destes estudos foram verificados uma série de fatores que influenciam os sistemas de geração de energia elétrica. Foi constatado, diante dos dois tipos de perturbações, que o sistema tende a estabilizar-se encontrando outro ponto de operação em regime permanente sem que seus geradores saiam de sincronismo.

Como vantagem específica do programa ATPDraw tem-se a sua grande aceitação no contexto mundial quando se trata de *software* de simulação. Já como desvantagem pode-se citar a impossibilidade de se obter, como saída das máquinas elétricas, as tensões e correntes expressas no sistema *por unidade (pu)* para facilitar as análises dos resultados. Como outra desvantagem cita-se que este não disponibiliza diretamente as grandezas com seu valor eficaz (*rms*), dependendo do *software* gráfico *PlotXY* para tal.

Este trabalho constitui-se numa primeira tentativa de trabalhar com o ATP para realizar estudos de estabilidade de sistemas de potência. Neste sentido, este evitou a inclusão de algumas complexidades inerentes ao sistema. Porém, como os grandes geradores de sistemas elétricos de potência normalmente são equipados com reguladores de velocidade e de tensão, os autores pretendem inserir suas representações nos próximos trabalhos visando uma tornar mais realísticos os resultados de simulação.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem o apoio financeiro do Ministério da Educação através da CAPES-Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e apoio institucional da Universidade Federal de Uberlândia.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. D. Stevenson, *Elementos de análise de sistemas de potência*, McGraw-Hill, 2ª Edição, São Paulo, 1986.
- [2] G. C. Guimarães, *Dinâmica de Sistemas Elétricos*, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, FEELT/UFU, 2010.

- [3] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, Ames, 2ª Edição, Iowa, 2003.
- [4] H. K. Høidalen, ATPDRAW, version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual, novembro de 2009.
- [5] ATP. *Alternativ Transients Program*. Acedido em 09 de abril de 2012, em: <http://emtp.org>.
- [6] CAUE, Comitê Argentino de usuários de EMTP-ATP. Rule book.
- [7] P. Kundur, "Power system stability and control" The EPRI Power system Engineering series, Califórnia, USA, McGraw-Hill, 1994
- [8] Bonneville Power Administration, Electro Magnetic Transients Program, EMTP, Theory Book, United States of America, julho, 1994.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Gislene Cristiane de Lima Ferreira**, nascida em 06/11/1980 em Abaeté-MG, é engenheira eletricista (2005) pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. É mestranda em Engenharia Elétrica, na área de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela UFU, com previsão de conclusão até agosto/2012.

**Guilherme Henrique Bernardes Cunha**, natural de Patos de Minas, Estado de Minas Gerais, Brasil, nascido em 04/11/1985. Formou em Engenharia Elétrica em 2010 pela Universidade Federal de Uberlândia. Realizou intercâmbio com o Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Lyon, França. Atualmente é mestrando na Universidade Federal de Uberlândia.

**Geraldo Caixeta Guimarães**, natural de Patos de Minas, Estado de Minas Gerais, Brasil, nascido em 11/07/1954. Formou em Engenharia Elétrica em 1977 pela Universidade Federal de Uberlândia, obteve o título de Mestrado em 1984 pela Universidade Federal de Santa Catarina e o título de Doutorado em 1990 pela *University of Aberdeen, Scotland*. Atualmente pesquisa e leciona nos cursos de graduação e Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.