



ESTUDO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA PARA UM SISTEMA DE 9 BARRAS.

Anderson Rodrigo Piccini¹, Márcio Augusto Tamashiro², Dr. Fabio Lima Albuquerque³, Dr. Geraldo Caixeta Guimarães⁴

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFU. Professor efetivo IFTO. e-mail: anderson@ifto.edu.br

²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFU. Professor efetivo IFTO. e-mail: tamashiro@ifto.edu.br

³Professor efetivo IFTO. e-mail: fabiolima@ifto.edu.br

⁴Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFU. Professor efetivo UFU. e-mail: gcaixeta@ufu.br

Resumo: O presente artigo trata do estudo de estabilidade de um sistema elétrico, a adequação entre a potência elétrica gerada e consumida pelas diversas cargas presentes na rede e eventuais distúrbios. Apesar de todas as precauções tomadas quanto ao planejamento e concepção de um Sistema Elétrico de Energia, a ocorrência de algumas contingências e posterior sequência de acontecimentos pode conduzir a situações de perda total ou parcial do sistema. De acordo com as características da perturbação e do intervalo de tempo considerado, é usual dividir os estudos de estabilidade em: estabilidade dinâmica, estabilidade transitória e estabilidade de regime permanente. Dentro deste contexto, o objetivo é apresentar o estudo de estabilidade transitória desenvolvido para um sistema elétrico de nove barras, a partir de uma condição inicial, sem e com a presença de reguladores de tensão e velocidade que deverão atuar na sua recuperação e estabilidade. Dessa forma, será avaliado o comportamento do sistema, quanto a sua estabilidade, durante a ocorrência de um curto-circuito trifásico aplicado a uma barra desse sistema, escolhida aleatoriamente. Os estudos foram conduzidos através de simulações no programa MATLAB/PSAT, dada a capacidade do mesmo de realizar investigações quanto à estabilidade transitória de uma rede elétrica, entre outras funções.

Palavras-chave: dinâmica, estabilidade, regulador de tensão, regulador de velocidade

1. INTRODUÇÃO

O estudo de estabilidade de um sistema elétrico envolve, muitas vezes, a adequação entre a potência elétrica gerada e a consumida pelas diversas cargas presentes na rede elétrica, ou então, a ocorrência de eventuais distúrbios. Um desbalanceamento entre o suprimento e a demanda é formado devido a uma modificação nas condições da carga, da geração ou da rede. Isto conduz a uma mudança no estado de operação do sistema, o qual pode ser considerado estável caso a situação de sincronismo se mantenha, e caso contrário, o sistema é dito instável.

A segurança do sistema envolve um vasto conjunto de subproblemas, que podem ser enquadrados em dois níveis: a segurança do funcionamento em regime permanente associada ao comportamento da rede face à saída de serviço de alguns componentes e a segurança do funcionamento dinâmico do sistema associada com problemas de estabilidade. Apesar de todas as precauções tomadas quanto ao planejamento e concepção de um Sistema Elétrico de Energia (SEE), a ocorrência de algumas contingências e posterior sequência de acontecimentos pode conduzir a situações de perda total ou parcial do sistema.

Entre os múltiplos eventos que podem provocar o colapso da rede salientam-se os seguintes: o aumento súbito da carga numa ou em várias linhas de interligação de uma rede elétrica às suas redes vizinhas, produção insuficiente de energia reativa podendo provocar a degradação do plano de tensão, produção deficitária de energia ativa originada pela saída de serviço de uma unidade do sistema gerador (que se traduz por uma queda do valor da frequência), defeitos severos em algumas linhas ou barramentos da rede e situações de instabilidade que conduzam à perda do sincronismo. Todos estes fenômenos, direta ou indiretamente, conduzem a problemas de estabilidade na rede elétrica.

De acordo com as características da perturbação e do intervalo de tempo considerado é usual dividir os estudos de estabilidade em: estabilidade dinâmica, estabilidade transitória e estabilidade de regime permanente.

Nesse contexto, o objetivo é apresentar o estudo de estabilidade transitória desenvolvido para um sistema elétrico de nove barras, a partir de uma condição inicial. A oscilação transitória foi produzida através da aplicação de um distúrbio como: curto-circuito trifásico em uma das barras escolhida de forma aleatória. Deste modo será possível verificar o comportamento dos circuitos com e sem a utilização dos reguladores de tensão e velocidade. Para tanto, um programa de simulação de sistemas chamado “PSAT” foi utilizado, uma vez que este software disponibiliza recursos especificamente destinados a esse fim.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado utilizando o sistema teste de 9 barras (Figuras 1) retiradas do livro (ANDERSON; FOUAD, 2003, p. 38). O sistema foi utilizado para estudo de fluxo de potência e estabilidade e foi simulado no programa Power System Analysis Toolbox – PSAT – através da plataforma MatLab.

Para auxiliar a análise todos os valores são dados em pu na potência base de 100 MVA e frequência nominal do sistema em 60 Hz.

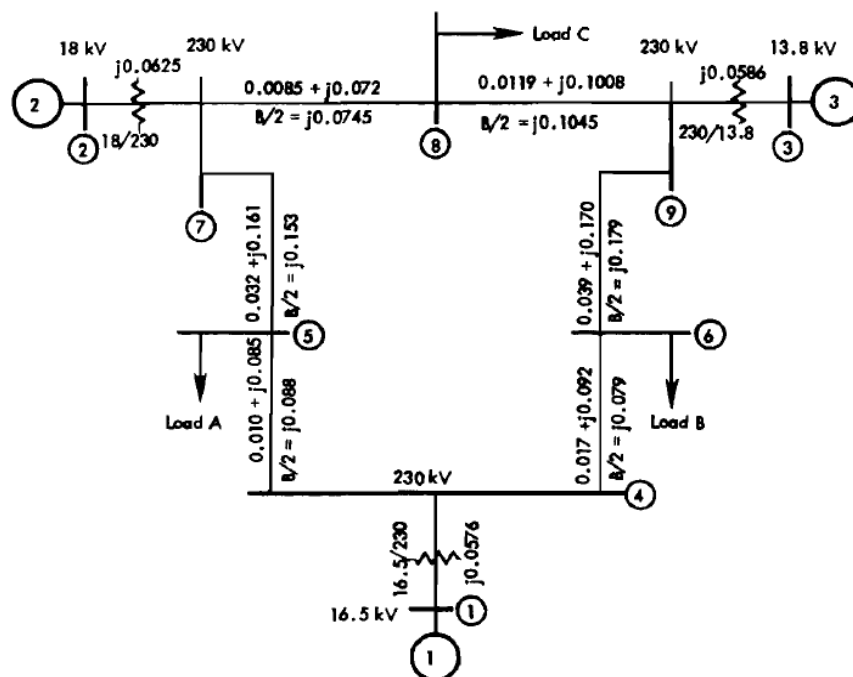


Figura 1 - Diagrama de impedância do sistema elétrico de 9 barras.

Os dados de linha e transformadores, de barra como potências e tensões e os parâmetros dos geradores ou máquinas síncronas estão apresentado no livro de Anderson e Fouad (2003, p. 38 - 44). Observa-se que os valores em pu são relativos à potência nominal de cada máquina. As resistências da armadura e a saturação foram desconsideradas.

Os parâmetros de ajuste dos reguladores de tensão (AVR) e velocidade foram obtidos de maneira empírica e estão apresentados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Parâmetros dos reguladores de tensão.

Máq Nº	K_a (pu)	T_a (s)	K_f (pu)	T_f (s)	K_e (pu)	T_e (s)	V_{max} (pu)	V_{min} (pu)	E_{max} (pu)	E_{min} (pu)	$SE_{0.75E_{max}}$ (pu)	SE_{max} (pu)	D_{max} (pu/s)
1	400	0.02	0.03	1.0	1.0	0.8	6.6	0.0	∞	0,0	1.5	1.6	∞
2	400	0.02	0.03	1.0	1.0	0.8	6.6	0.0	∞	0,0	1.5	1.6	∞
3	400	0.02	0.03	1.0	1.0	0.8	6.6	0.0	∞	0,0	1.5	1.6	∞

Tabela 2 - Parâmetros dos reguladores de velocidade.

Máq. N ^o	Flyballs Ganho (pu)	Regulação (pu)	T _{fb} (s)	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	T ₄ (s)	T ₅ (s)	P _{max} (MW)
1	1,0	0.05	0.20	0.0	0.0	0.30	0.15	0.30	247,5
2	1,0	0.05	0.20	0.0	0.0	0.30	0.0	0.30	163,2
3	1,0	0.05	0.20	0.0	0.0	0.30	0.0	0.30	108,8

Com as informações acima e o circuito montado no programa de análise de estabilidade transitória, foram utilizados os dados abaixo para a simulação:

Curto-circuito trifásico na barra 4, com duração de 120ms, adotou-se o instante de 1 segundo como sendo o marco inicial para ocorrência do fenômeno em questão, sendo a escolha da barra e dos tempos feitos aleatoriamente. Diante desta perturbação, serão mostradas as influências dos reguladores de velocidade e de tensão no sistema e sua atuação sobre os geradores. Também vamos assumir que todas as cargas encontram-se com impedâncias constantes. Após, será mostrado a variação do ângulo δ dos geradores, gerando gráficos de outras variáveis para permitir uma análise mais apurada da dinâmica do sistema e por fim, incluir comentários e conclusões a respeito dos resultados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentadas as simulações realizadas no MatLab/Simulink - PSAT acompanhada dos comentários acerca do comportamento do circuito.

Inicialmente o circuito foi montado no programa, sendo rodado o fluxo de potência. Após, ao certificar a correta montagem do circuito tornou-se possível prosseguir as análises para o caso apresentado.

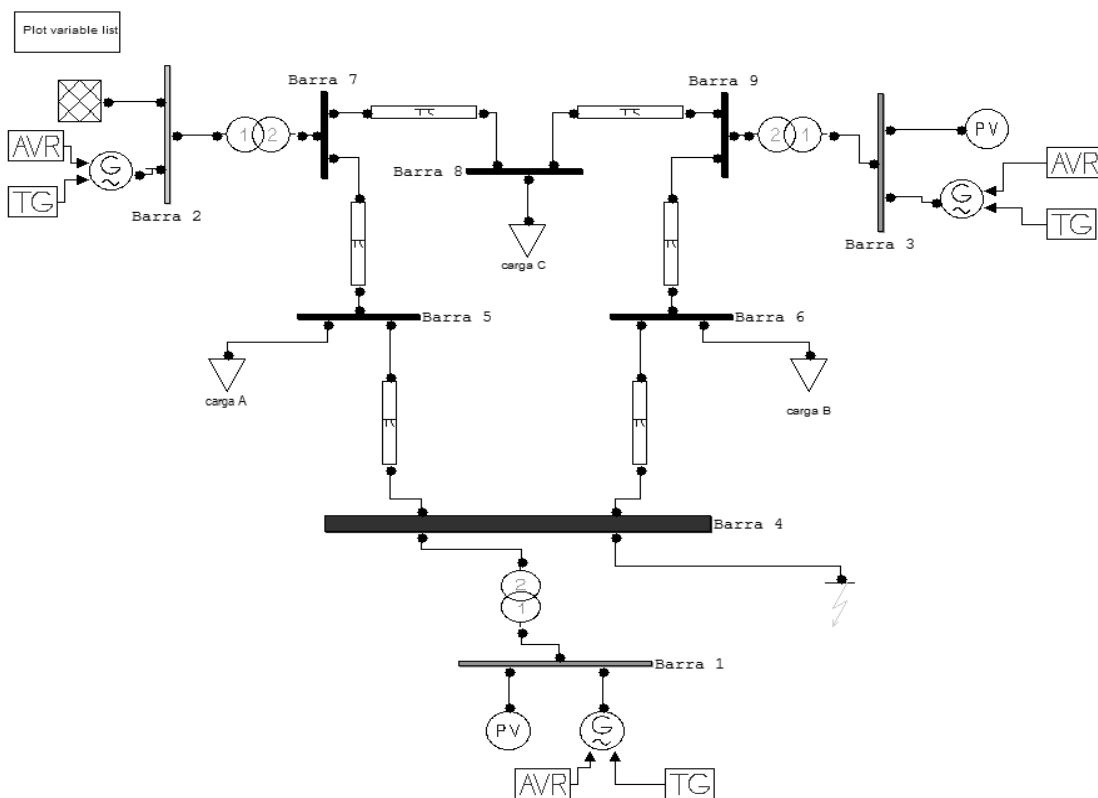


Figura 2 - Diagrama Unifilar com falta na barra 4 com reguladores de tensão e velocidade.

O diagrama unifilar da figura 2 mostra o circuito montado no PSAT com as máquinas síncronas dotadas de ambos os reguladores, sendo eles: os reguladores de velocidade (TG) apresentados na figura 3 (MILANO, 2005, p. 153) e os reguladores de tensão (AVR) da figura 4 (MILANO, 2005, p. 157), que estão disponíveis no programa com suas características específicas.

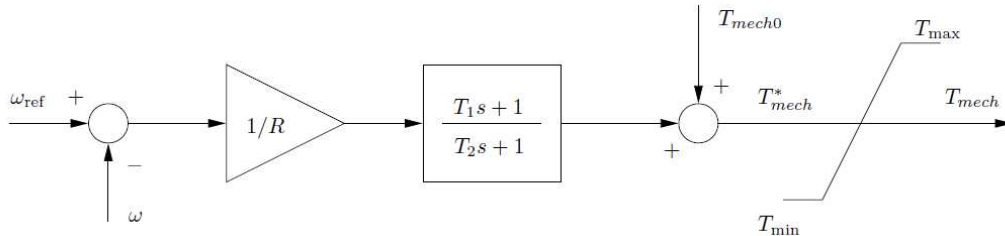


Figura 3 - Modelo do regulador de Velocidade Tipo II do programa PSAT.

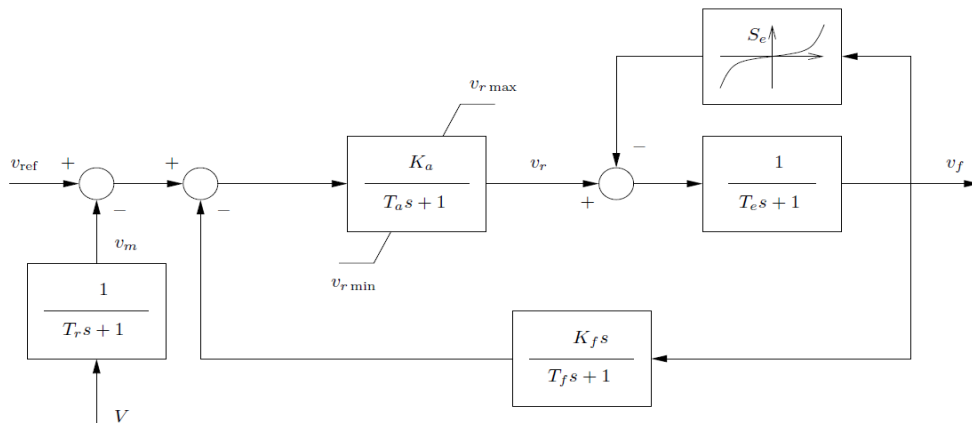


Figura 4 - Modelo do regulador de Tensão (AVR) Tipo II do programa PSAT.

Abaixo serão apresentados os resultados gráficos da simulação (potência mecânica, frequência, velocidade angular, ângulo Delta e tensão de excitação).

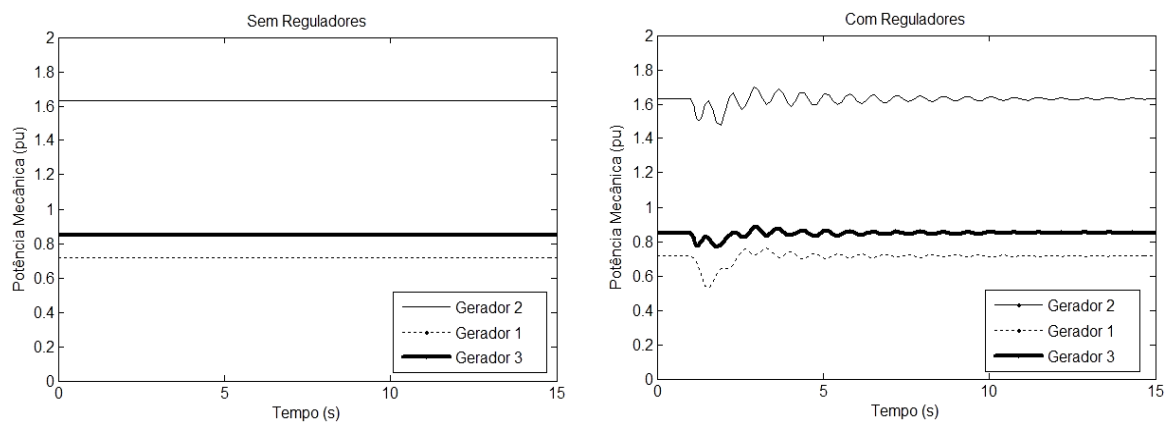


Figura 5 - Potência mecânica de cada máquina síncrona, sem e com seus reguladores.

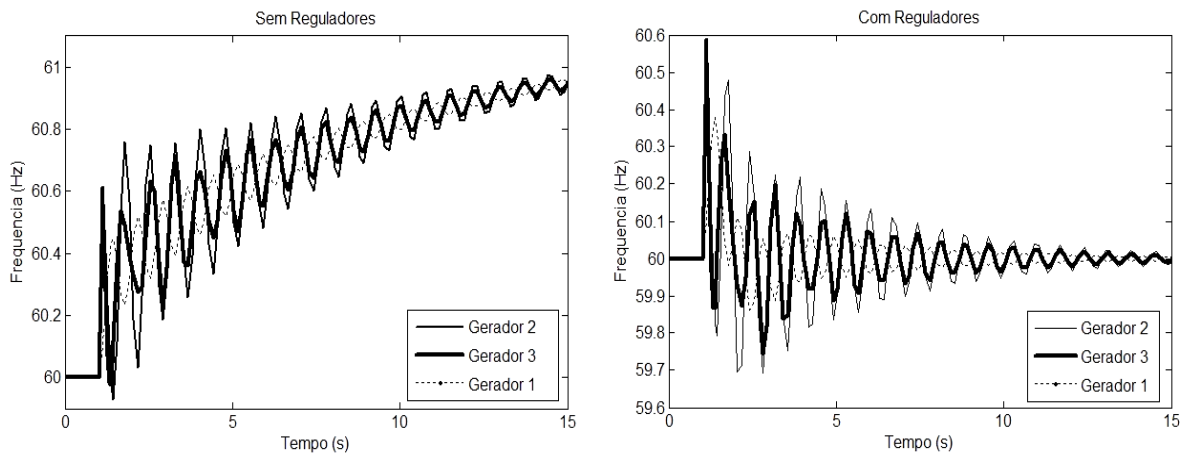


Figura 6 - Frequência das máquinas síncronas após o curto, sem e com seus reguladores.

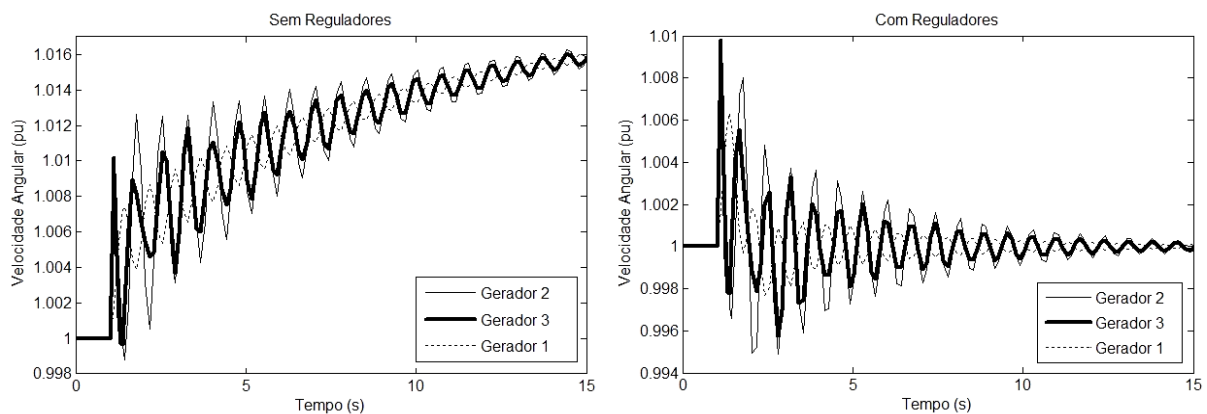


Figura 7 - Velocidade angular de cada máquina síncrona, sem e com seus reguladores.

Desse modo, conclui-se que a variação das potências mecânicas ocorre somente com a utilização dos reguladores, pois os reguladores atuam sobre as máquinas acelerando e desacelerando para compensar o curto na barra 4 e trazer o sistema a estabilidade (Figura 5).

Com relação às frequências é possível observar que os geradores, sem os reguladores, passam a trabalhar com valores maiores que 61 Hz e quando analisamos o desempenho da velocidade angular do rotor (ω), a mesma tem um aumento de 1,7% passando a operar com os geradores acelerados e após um período estabilizando com a frequência diferente a da rede elétrica. As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, no prazo de 30 (trinta) segundos após sair desta faixa, quando do distúrbio no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração (ANEEL, 2011). Mas quando observamos a atuação dos dois reguladores, os mesmos fazem com que elas se estabilizassem nos valores de 60 Hz e 1 p.u. de velocidade, respectivamente, de maneira rápida deixando o sistema estável novamente como antes do curto-circuito (Figura 6 e 7). O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL, 2011).

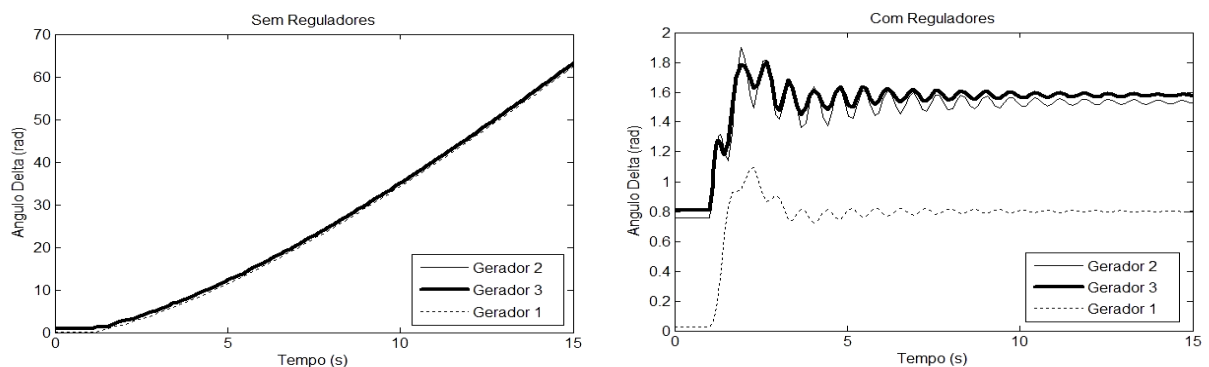


Figura 8 - Ângulo δ de cada máquina síncrona, sem e com seus reguladores.

Também se conclui que há um melhor desempenho quanto aos ângulos δ das máquinas. Isto ocorre devido à ação conjunta dos dois reguladores. Após o curto-circuito verifica-se que o sistema permanece estável e os valores dos ângulos δ aumentados de 0.8 rad, tendendo após 10s para uma reta paralela, diferentemente do que sem os reguladores. Isto quer dizer que, após a perturbação, o sistema tende a se estabilizar novamente em 60 Hz (Figura 8).

Por fim a variação nas tensões de excitação dos geradores, devido à presença dos dois reguladores agindo sobre tensão V_f , volta para a condição em um tempo muito pequeno fazendo com que o sistema volte para a estabilidade mesmo após o curto-circuito na barra 4 (Figura 9).

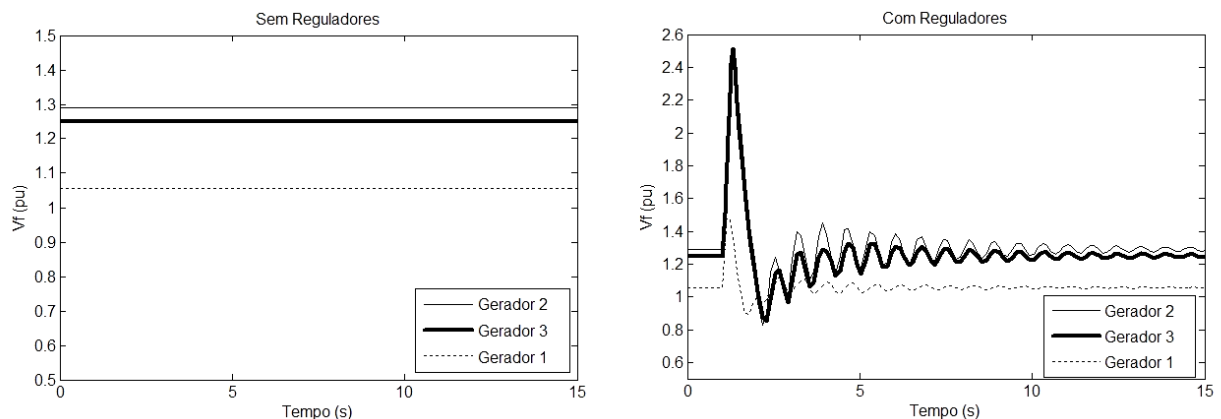


Figura 9 - Tensão de excitação de cada máquina síncrona, sem e com seus reguladores.

4. CONCLUSÕES

De uma forma geral, este trabalho permitiu a análise de um sistema elétrico de potência com 9 barras e 3 geradores no que tange o estudo de estabilidade. Estas simulações foram executadas para verificar o comportamento de um evento possível de ocorrer na rede de suprimento de energia elétrica, como o caso de um curto-circuito, e com a utilização e a análise de reguladores de tensão e velocidade construídos conforme a realidade instalada e as exigências da concessionária de energia. Vale lembrar que, segundo a ANEEL (2010), toda central geradora com potência instalada acima de 300 kW deve possuir sistemas de controle de tensão e de frequência.

Após a análise dos resultados, verificou-se a influência benéfica dos reguladores no sentido de auxiliar no restabelecimento do sistema. Através da ação dos reguladores de velocidade, o controle é executado com o objetivo de fazer com que o sistema retorne a sua frequência nominal, e por meio dos reguladores de tensão serão controladas as tensões de forma que elas retornem a valores próximos aos iniciais, antes da ocorrência do curto circuito.



REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A.; **Power System Control and Stability**. The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**; Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo3_Revisao_1.pdf> Acesso em: 22 ago 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**; Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_2.pdf> Acesso em: 22 ago 2012.

CAIXETA, D.; **Manual de Simulação de Sistema Elétrico com PSAT (versão 1.3.4) e MatLab (versão 6.5) incluindo um Caso Exemplo**; Uberlândia, 2012.

GUIMARÃES, G. C.; “**Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos – Parte I: Modelagem de uma Máquina Síncrona e seus Controles para Estudos de Estabilidade Transitória**”, Universidade Federal de Uberlândia, 2008

MILANO, F.; **PSAT - Power System Analysis Toolbox, Documentation for PSAT version 1.3.4**, July 14, 2005.