



10 a 13 de novembro de 2019

### Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT

## COMPARAÇÃO DOS GERADORES SÍNCRONOS DE COGERADORES COM REGULAÇÃO DE TENSÃO ESTÁTICA X BRUSHLESS X PMG E OPERAÇÃO EM ILHA

João Roberto Cogo<sup>(\*)</sup>; Luis Fernando Ribeiro Ferreira<sup>(\*)</sup>;  
GSI – Engenharia e Consultoria Ltda<sup>(\*)</sup>;

J. Johnny Rocha E.  
Trassinio Consultoria

### RESUMO

Este informe técnico pretende apresentar os resultados de simulações de um sistema elétrico envolvendo três geradores síncronos conectados a uma rede de suprimento de energia em 230 [kV], sendo um com Sistema de Excitação Estática (SEE), um segundo com o Sistema de Excitação Brushless (SEB) e um terceiro com o Sistema de Excitação PMG.

### PALAVRAS-CHAVE

Geradores síncronos; Sistemas de excitação; Reguladores Automáticos de Tensão; AVR; Transitórios eletromecânicos.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os geradores síncronos são elementos fundamentais na produção de energia elétrica e têm suas forças motrizes primárias oriundas do vento, da água, óleo diesel, gás, biomassa, entre outros.

De acordo com o Plano da Operação Energética (Brasil - cenário 2018 a 2022), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) indica que a cogeração de biomassa em 2017 representou, na Matriz de Energia Elétrica, 13.623 [MW], ou seja, 8,8% do total da produção nacional que foi de 155.526 [MW]. A previsão para 2022 indica um aumento em valores absolutos para 13.829 [MW] [1]. Significando que este tipo de geração cresce substancialmente no Brasil, não só como um fator representativo, mas também implica no crescimento da potência nominal dos geradores que, se na década de 1970 estavam na ordem de 15 a 20 [MW] e atualmente, nas indústrias mais modernas já atingem a ordem de 150 [MW], ou seja, as turbinas, com os correspondentes geradores tiveram um crescimento de 600%, por unidade, em aproximadamente 50 anos. Este salto tanto na potência como na representação da matriz energética indicam que a biomassa é um fator importante que vem se destacando no cenário nacional. Já existem cogerações cuja potência é tal que se conectam na rede básica em 440 [kV].

Por outro lado, dependendo da potência dos geradores e de sua fonte primária existem diversos sistemas utilizados como reguladores automáticos de controle de tensão, os denominados “Automatic Voltage Regulator (AVR)”, cuja aplicação está diretamente associada aos custos e benefícios que o mesmo pode oferecer. Os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [2] colocam como destaque o uso de sistemas de excitação estática, o que dificulta a conexão de autoprodutores na rede básica. Cabe lembrar que turbo geradores industriais, sejam de dois ou quatro polos, em geral são providos de sistemas de excitação sem escovas (*Brushless*) ou com gerador auxiliar a base de ímãs permanente, os denominados de *Permanent Magnetic Generator* (PMG).

(\*) Rua Mato Grosso, n° 120, CEP 12.062-120, Taubaté, SP - Brasil

Assim sendo, diante desse cenário, este trabalho busca efetuar comparações entre os três tipos de AVR normalmente utilizados na auto produção de energia, para mostrar que a relação entre a potência do gerador e seu ponto de instalação no Sistema Interligado Nacional (SIN), na maioria dos casos, não interferem no desempenho da rede básica durante afundamentos de tensão. Alega-se que tanto o PMG como a *Brushless* não apresentam respostas com velocidade e desempenho adequados.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos já indicam que alguns fabricantes possuem o sistema de regulação de tensão aplicável aos sistemas de excitação do tipo PMG em cogeração que se comportam com a mesma resposta da excitação estática para faltas no Sistema Interligado Nacional (SIN) uma vez que existem cargas de grande porte a serem supridas de modo diferente daquelas encontradas nas usinas termoeletricas. Assim sendo, se pretende mostrar, através de resultados de simulações computacionais, utilizando o programa Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) com a base de dados disponível no ONS, que a aludida justificativa contém em boa parte dos casos circunstâncias contornáveis com a aplicação de estudos de engenharia customizados de acordo com cada caso.

## 2.0 - O SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E SUAS POSSIBILIDADES

Na atualidade é impossível dissociar o sistema de excitação do seu sistema automático de regulação de tensão. Isso porque sem esse conjunto seria impossível se consolidar um processo estável de transformação de energia em máquinas síncronas. A final, como em qualquer outra disciplina, há condições de contorno que precisam ser obedecidas, dentre elas podemos mencionar o axioma fundamental que diz:

*Todo o processo de conversão de energia, em máquinas elétricas rotativas, assume que a quantidade de linhas de fluxo magnético que atravessam o entreferro se mantenha constante em qualquer condição de operação de regime permanente.*

Como consequência principal, toda a energia elétrica, na forma de energia magnética armazenada, será convertida em variação de energia mecânica. Naturalmente que esta declaração assume um ambiente ideal onde não há perdas.

Ou seja, numa máquina síncrona, uma vez que o rotor se encontre em movimento, *enquanto possa se manter um fluxo radial constante*, ocorrerá a conversão de energia elétrica, armazenada sob a forma de energia magnética, em energia mecânica. Sendo que para esse fim há necessidade de se ter um deslocamento tangencial da densidade de fluxo, que justifica a existência de uma variação angular no processo de conversão de energia [6].

De onde decorre a natural importância do sistema de excitação e do seu AVR, que tem a missão de manter constante a quantidade de linhas de fluxo que atravessa o entreferro da máquina síncrona em todo o processo de operação.

Como controlar linhas de fluxo seria uma tarefa impossível, nos servimos da tensão nos terminais do gerador como variável a ser controlada, por ser esta uma consequência direta do fluxo que atravessa o entreferro. Assim, assumindo idealmente que o regulador de velocidade mantenha praticamente constante a velocidade síncrona do rotor, então a corrente de excitação se apresenta como variável única para efetuar o controle da tensão nos terminais do gerador.

Ao longo da história, o sistema de excitação junto com o AVR tem evoluído no mesmo compasso dos geradores síncronos, desde os sistemas associados a geradores auxiliares independentes aos modernos sistemas estáticos. Nas últimas décadas a excitação dos turbo-geradores industriais modernos tem se concentrado em 3 tipos principais: o sistema de excitação estático; o sistema *brushless*; e o tipo *brushless* assistido com PMG.

### 2.1 Sistema de excitação tipo estático

A introdução dos dispositivos de estado sólido, principalmente o advento do Retificador Controlado de Silício (*Silicon Controlled Rectifier* – SCR), permitiu a construção das pontes totalmente controladas na denominada formação de Graetz mostrada na Figura 1.

A tensão, praticamente contínua, que pode ser controlada nos terminais da ponte retificadora ( $U_{d\alpha}$ ) é dada aproximadamente pela expressão (1) a seguir:

$$U_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} (\sqrt{2} U_s) \cos \alpha \quad (1)$$

Na expressão anterior  $U_s$  é a tensão da entrada da ponte retificadora controlada em formação de Graetz conforme mostra Figura1, O valor de  $\alpha$  é um ângulo obtido a partir do cruzamento dos valores instantâneos das tensões das fases a e b, b e c, bem como c e a [4]. Este ângulo é fundamental para definir a tensão contínua de interesse que vai permitir regular a corrente de campo e finalmente controlar a tensão nos terminais da máquina. Portanto, o AVR (vide Figura 1) tem por função a partir de um valor medido (Valores atuais) efetuar a comparação com a referência correspondente e alterar o ângulo  $\alpha$  através de seu sistema de controle para atingir o objetivo necessário, ou seja, alterar a corrente de campo da máquina síncrona para atingir o controle de tensão. Além da possibilidade de controlar a tensão nos terminais da máquina, o fator de potência no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) com o

SIN e o fluxo de potência reativa gerado, o AVR também permite controlar a oscilação de potência da máquina através da função denominada Power System Stabilizer (PSS).

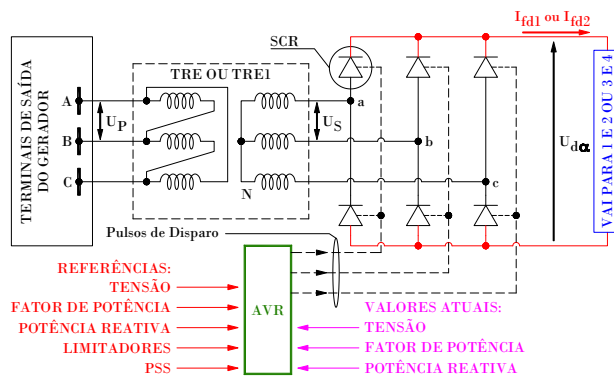


FIGURA 1 – Ponte retificadora totalmente controlada de Graetz

Neste tipo de sistema existem as escovas que fazem a interface entre o AVR e o circuito de campo principal solidário ao rotor que é uma peça móvel. Esta interface através das escovas é feita de modo que a corrente, que pode chegar facilmente acima de 1000 A, disponibilizada pelo AVR, circule no circuito de campo da máquina.

O transformador do sistema de excitação (TRE1), mostrado na Figura 2, está apresentado na Figura 1 em seu modo trifilar acoplado a ponte retificadora controlada que controla a corrente de campo ( $I_{fd}$ ). Este tipo de sistema requer a manutenção frequente nas escovas e o transformador TRE1 e por consequência o sistema de retificação apresenta uma potência da ordem de 0,25 a 1,00% da potência nominal da máquina síncrona em MVA.

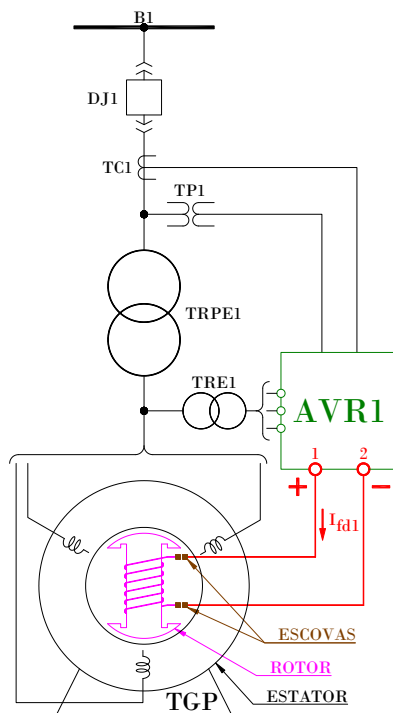


FIGURA 2 – Diagrama unifilar simplificado do sistema com excitação estática

## 2.2 Sistema de excitação tipo Brushless

Uma maneira de contornar as limitações impostas pelo sistema de anéis coletores (escovas) foi montar, na ponta livre do eixo do gerador principal (TGP), um gerador auxiliar com polos estacionários (TGA) conforme mostra a Figura 3. Nesta figura pode-se observar que no rotor do TGA (solidamente acoplado ao rotor do TGP) existe um circuito trifásico de corrente alternada. A tensão alternada é retificada através de uma ponte a diodos também solidária ao eixo da máquina cujos terminais são conectados ao circuito de campo situado no rotor do TGP. Desta forma as escovas são eliminadas e a potência do TRE1 fica em torno de 0,2 a 0,5% da potência nominal da máquina. Naturalmente, neste caso o transformador TRE1 pode ser conectado diretamente dos terminais do gerador principal, ou em um barramento dos serviços auxiliares ou, ainda de uma fonte independente. A parte do circuito de controle com a ponte retificadora pode ser visto também na Figura 1.

Este tipo de sistema não apresenta escovas e o transformador TRE2 por consequência o sistema de retificação apresenta uma potência da ordem de 0,25 a 1,20% da potência nominal da máquina síncrona em MVA.

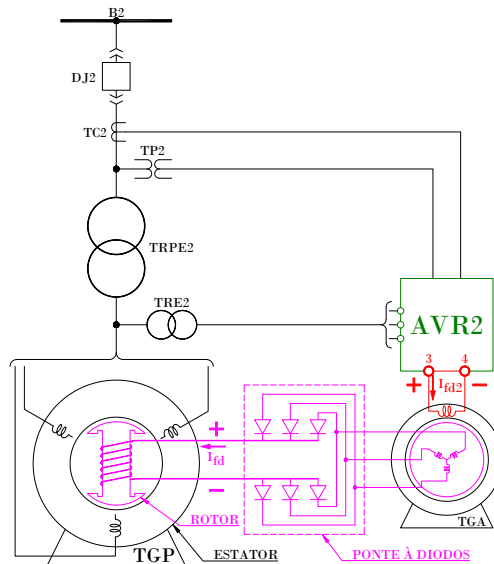


FIGURA 3 – Diagrama unifilar simplificado do sistema brushless

## 2.3 Sistema de excitação tipo PMG

Um recurso para dotar autonomia à unidade geradora com excitação *brushless*, e eliminar a necessidade do transformador de excitação, foi a introdução de um gerador de ímã permanente sobre o mesmo eixo da máquina. No PMG, os ímãs estão instalados no rotor e o estator é dotado de um enrolamento trifásico; de modo que, a tensão nos seus terminais depende da rotação síncrona da máquina como pode se observar na FIGURA 4. Como em operação normal a rotação da máquina é constante, esta dependência deixa de ser significativa. Por outro lado, caso a máquina fique parada por muito tempo o magnetismo residual é perdido e um sistema auxiliar de baterias deve iniciar o processo de controle da máquina.

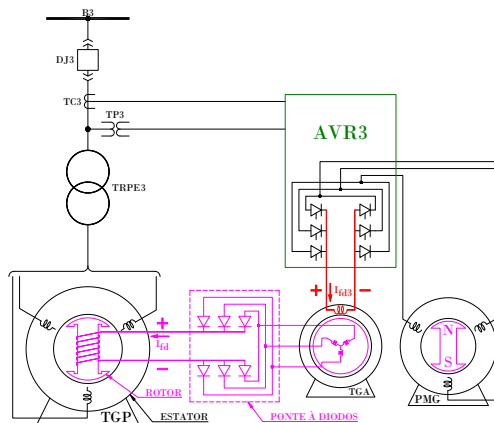


FIGURA 4 – Diagrama unifilar simplificado do sistema PMG

Nessa solução, o PMG tem seus terminais diretamente acoplados a uma ponte retificadora totalmente controlada para excitar o campo do gerador auxiliar conectado diretamente a ponte de diodos que por sua vez excita a máquina principal. Ou seja, a tensão de alimentação para o sistema de excitação é provida pelo PMG e não pelos terminais do gerador ou pelo barramento auxiliar. O gerador PMG apresenta uma potência da ordem de 0,002 a 0,03% da potência nominal da máquina principal (TGP) em [MVA].

### 3.0 - SIMULAÇÕES

Para efeito de comparação entre os três tipos de excitação foram realizadas simulações no software ANATEM a partir da base de dados para estudos de estabilidade eletromecânica disponibilizada pelo ONS, versão março/2019. As simulações mostram o comportamento típico de cada tipo de regulador frente a uma falta monofásica na barra de conexão ao SIN.

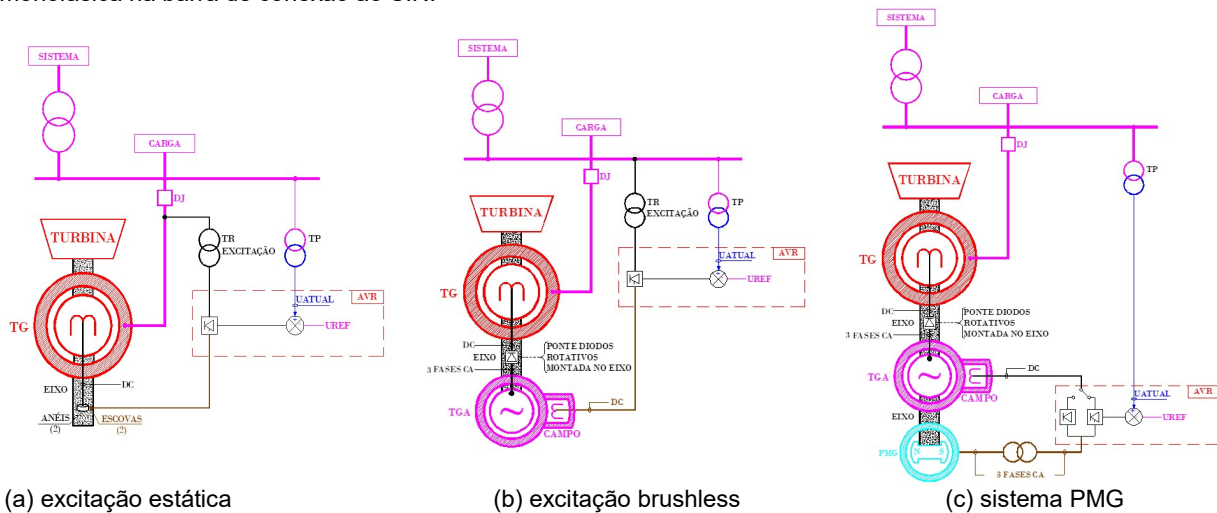


FIGURA 5 – Comparativo dos sistemas de excitação

Notar que apenas os sistemas mostrados em 5.a e 5.b necessitam de um transformador de excitação.

As simulações consideram um turbogerador de 100 [MVA] com despacho de aproximadamente 60 [MW], alimentando uma carga interna da unidade de 30 [MW] sob um fator de potência 0,95. A exportação ao SIN será da ordem de 30 [MW] através de um transformador elevador de 75 [MVA] em 13,8/230 [kV].

### 3.1 Casos simulados

As simulações no ANATEM consideram a conexão do sistema gerador-carga através de uma linha de circuito simples conforme mostrado na Figura 6 a seguir. A partir deste sistema desenvolveram-se variações nos pontos de acoplamento de forma a poder se comparar os tipos de excitação de geradores frente a várias configurações do sistema conforme descrito na Tabela 1 seguir:

Tabela 1 – Descrição dos casos simulados

Configuração	Potência de Curto-Circuito no ponto de acoplamento	Barra escolhida no SIN	Corrente de curto fase-terra [kA]
1	Alta	SE Cabreúva 230 kV	37,9
2	Média	SE Pirapama 230 kV	20,3
3	Baixa	SE Nilo Peçanha 230 kV	3,87

Para fins de comparação, em todas as Configurações utilizou-se os mesmos despachos de potência ativa e reativa no turbogerador, sendo neste caso a tensão da barra em 13,8 kV regulada pelo comutador de taps no transformador. Desta forma, as condições iniciais para o gerador nas simulações podem ser consideradas como equivalentes entre as três Configurações simuladas.

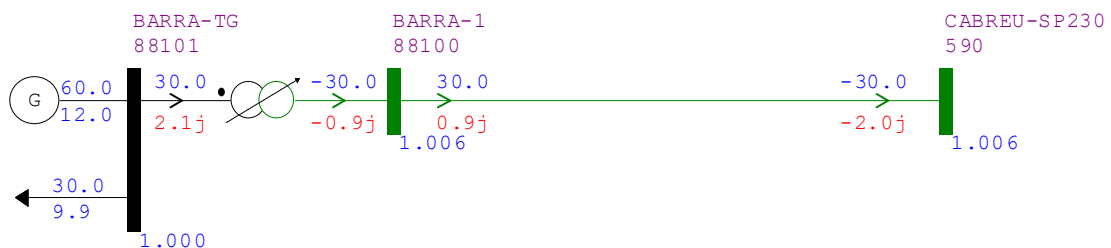


FIGURA 6 – Diagrama unifilar simplificado para Configuração 1 – acesso ao SIN

#### 4.0 - MODELOS DOS REGULADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE UTILIZADOS

As simulações foram realizadas com apenas duas alterações entre os casos, sendo o primeiro o ponto de conexão ao SIN, conforme item 3.1. A segunda alteração consiste na utilização, para o mesmo gerador, de reguladores do tipo estático, brushless e PMG. Mostra-se, a seguir, a modelagem dos reguladores

Mostra-se na Figura 7 a seguir o modelo do regulador tipo estático e os principais parâmetros deste modelo

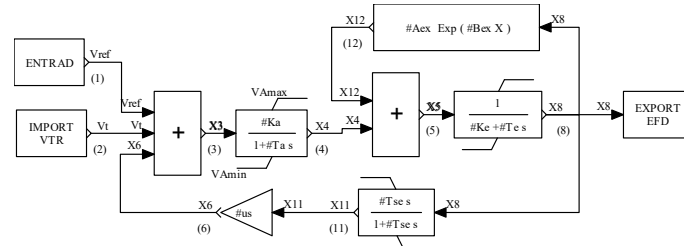


FIGURA 7 – Modelo e ajustes utilizados no regulador com excitação do tipo estática

Mostra-se na Figura 8 a seguir o modelo do regulador tipo brushless e os principais parâmetros deste modelo.

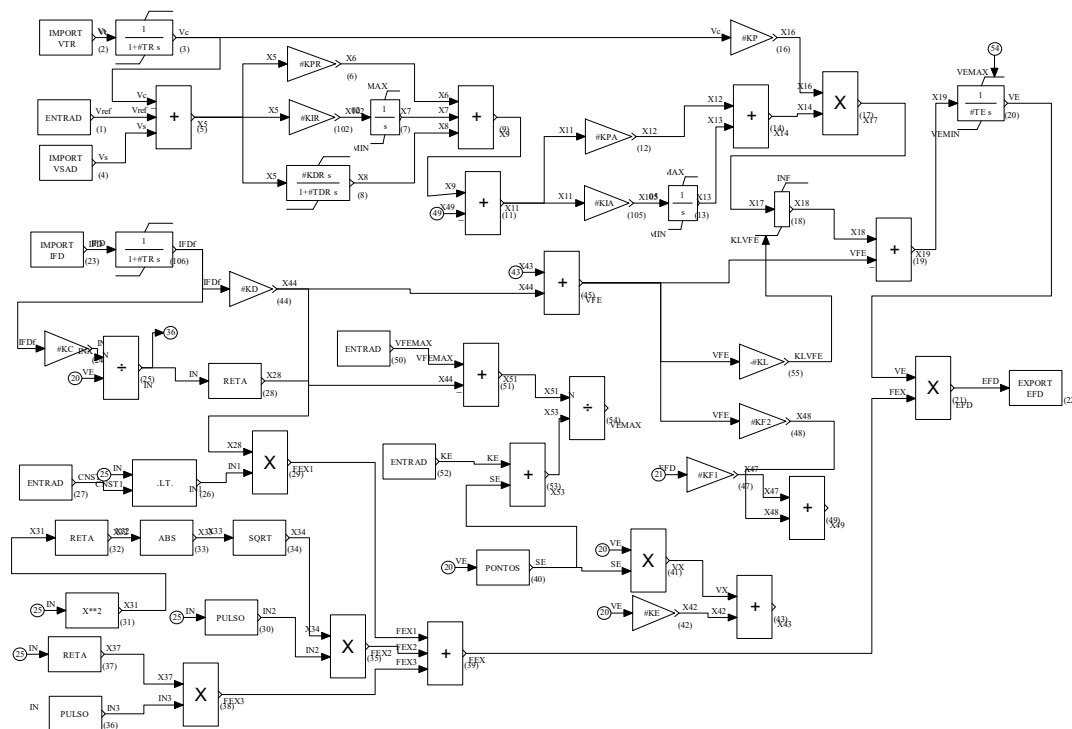


FIGURA 8 – Modelo e ajustes utilizados no regulador com excitação do tipo brushless

Em termos de modelagem para a simulação, o regulador do tipo PMG é similar ao brushless, com exceção dos limites  $V_{Rmin}$  e  $V_{Rmax}$  que agora passam a ser constantes, limitados apenas pelas características de projeto da máquina. Justamente pelo fato de o PMG fornecer uma tensão constante ao regulador, variações de carga no gerador ou eventos transitórios externos não afetam o fornecimento de tensão ao campo da máquina.

#### 5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Para as Configurações 1, 2 e 3 que consideram a conexão em barras de alta, média e baixa potência de curto-circuito, respectivamente, observa-se um comportamento oscilatório amortecido ou decrescente das variáveis analisadas para os geradores e suas variações de sistema de excitação (ângulo delta com relação à referência da UHE de Ilha Solteira, tensão nos barramentos em 13,8 e 230 [kV], potência elétrica e frequência). Para que os modelos pudessem ser melhor comparados, foram desligados todos os Sistemas Especiais de Proteção da base de dados ONS, a fim de que as atuações destes sistemas não interfiram na interpretação dos resultados.

A Tabela 6 a seguir ilustra o resultado comparativo entre os casos analisados, apresentando as maiores variações observadas.

Tabela 6 - Comparação de resultados

GRANDEZA	REFERÊNCIA	CONFIG 1	CONFIG 2	CONFIG 3	UNIDADE
		VARIACÃO MÁXIMA			
Ângulo Delta	TG Estática	18,3	26,8	16,4	[°]
	TG Brushless	16,2	22,4	11,2	
	TG PMG	16,2	22,4	11,2	
Tensão em 230 [kV]	Barra Cabreúva - 590 <sup>(1)</sup>	0,020	0,013	0,010	[pu]
	Barra Pirapama - 5131 <sup>(1)</sup>	0,021	0,012	0,002	
	Barra N. Peçanha - 252 <sup>(1)</sup>	0,021	0,012	0,002	
Frequência	TG Estática	0,38	0,61	0,25	[Hz]
	TG Brushless	0,32	0,48	0,19	
	TG PMG	0,32	0,48	0,19	

**Nota (1):** As identificações 590, 5131 e 252 são as mesmas do arquivo formato público do ONS e são referentes aos pontos onde sistema gerador-carga foram acoplados ao SIN quando se considerou o sistema com alta, média e baixa potência de curto-circuito.

De forma a complementar os resultados mostrados na Tabela 6, são apresentados nas Figuras 9 a 11 a seguir os comportamentos do ângulo delta e da frequência dos turbogeradores para cada Configuração simulada, verificando o comportamento oscilatório amortecido citado anteriormente. Cada gráfico contém os três tipos de excitação, facilitando o seu comparativo. As curvas em vermelho são da excitação tipo estática; as em azul, brushless e as em verde, PMG. Nota-se que o comportamento do tipo brushless e PMG são praticamente idênticos.

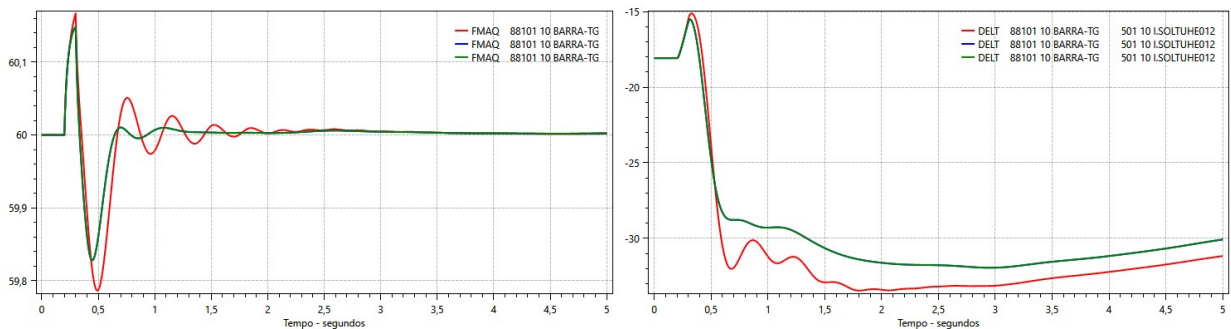


FIGURA 9 - Configuração 1 - Ângulo Delta com Relação à UHE Ilha Solteira e Frequência dos Turbogeneradores, para Curto-Circuito Monofásico na SE Cabreúva 230 [kV]. Tempo de Falta Aplicado igual a 100 [ms].

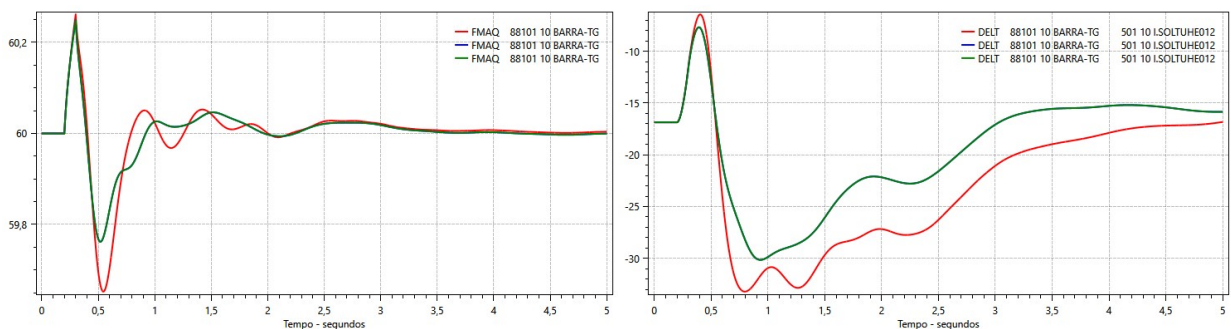


FIGURA 10 - Configuração 2 - Ângulo Delta com Relação à UHE Ilha Solteira e Frequência dos Turbogeneradores, para Curto-Circuito Monofásico na SE Pirapama 230 [kV]. Tempo de Falta Aplicado igual a 100 [ms].

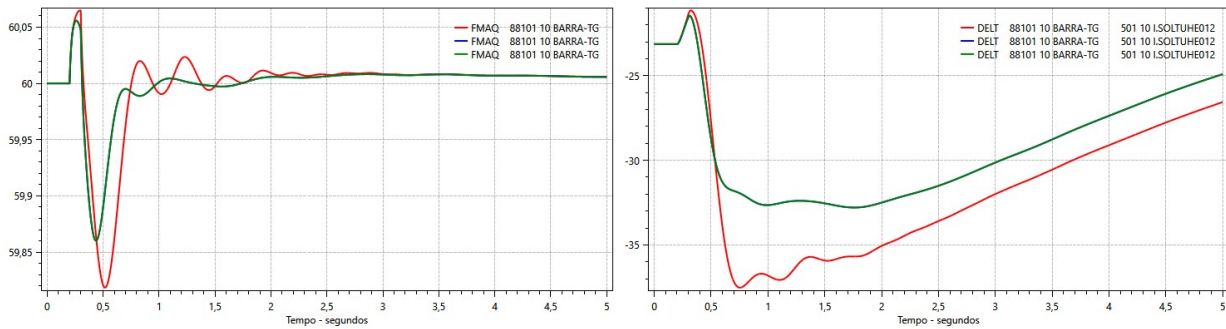


FIGURA 11 - Configuração 3 - Ângulo Delta com Relação à UHE Ilha Solteira e Frequência dos Turboogeradores, para Curto-Circuito Monofásico na SE N.Peçanha 230 [kV]. Tempo de Falta Aplicado igual a 100 [ms].

De maneira geral, as simulações mostram que os sistemas com excitação Brushless e PMG apresentam desempenho superior ao estático, visto que os picos oscilatórios são menores e possuem um tempo de acomodação menor. Por outro lado o comportamento do sistema estático mostrou-se mais oscilatório nas três configurações, ou seja, com maiores amplitudes até atingir o novo ponto de equilíbrio. Destaca-se que não foram realizados ajustes finos para os três reguladores, tendo sido utilizados reguladores disponíveis na base de dados ONS para estudos de estabilidade.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Os sistemas de excitação analisados apresentaram desempenhos comportamentos similares, tendo em vista que as variações das oscilações conforme mostrado na Tabela 2 estão próximas. As simulações mostraram um desempenho superior dos sistemas de excitação brushless e PMG.

De um modo geral, durante perturbações as empresas, quando em cogeração, diferentemente das Unidades Termelétricas (UTES), por apresentarem cargas diretamente associadas ao processo de geração, se encontram atualmente com consumo interno da ordem de até 160 [MW]. Essas empresas tem seu sistema elétrico com cargas eletricamente sensíveis e, portanto, para perturbações externas (no SIN), é mais interessante se desacoplarem mais rápido possível.

Assim sendo, nestas aplicações o tipo de geração utilizada PMG pode trazer, além dos benefícios financeiros, uma segurança operacional maior, pois o sistema de excitação é autônomo e não sofre a interferência de eventos externos à máquina.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Plano de Operação Energética 2018-2019 PEN-2018, Reunião com os Agentes Associados, Associações, EPE, MME, e ANEEL - apresentação de resultados.," 26/06/2018 - Rio de Janeiro (Videoconferência CNOS, NNNE e NSUL). [Online]. Available: ([http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RESULTADOS\\_PEN%202018%2026\\_06\\_18.pdf#search=biomassa](http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RESULTADOS_PEN%202018%2026_06_18.pdf#search=biomassa)).. [Acesso em 20 09 2018].
- (2) ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Procedimentos de Rede, Requisitos técnicos para a Conexão à Rede Básica - Sub módulo 3".
- (3) P. M. Anderson e A. A. Fouad, POWER SYSTEM CONTROL AND STABILITY, New York: IEEE - The Institute of Electrical and Electronic Engineering Series - McGraw Hill Inc., 1993.
- (4) P. Kundur, POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL, EPRI - Electric Power Research Institute, Power System Engineering Series, McGraw Hill Inc., 1994.
- (5) 421.-5. IEEE, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, Sponsored by the Energy Development and Power Generation Committee, April 2006.
- (6) J. J. Rocha E. et al, "Como a solução hidráulica impacta o projeto do gerador em unidades bulbo," XXIII SNPTEE, 18 a 21 de outubro de 2015.



## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### João Roberto Cogo

Nasceu em Dois Córregos (SP) em 1951. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNIFEI em 1974, grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela UNIFEI em 1976, Doutor em Engenharia Elétrica na Área de Automação pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 1986, e pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal do Espírito Santo em 1998. Trabalhou como Professor da EFEI e na Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações.

### J. Johnny Rocha E.

Nasceu em Cochabamba, Bolívia, 1959. Eng. Eletricista pela PUC/RS em 1982; MSc Eng. Elétrica pela UFSC em 1985; DSc Sist. de Potência pela USP em 1996; MBA FGV em 2005 e Post Doc. na UNIFEI em 2018. Prof. Universitario, trabalhou na PUC/RS e UnB até 1990. Desde então tem se dedicado ao desenvolvimento teórico e prático de máquinas elétricas rotativas, com ênfase em hidro geradores. Trabalhou para as grandes empresas do ramo: ABB; Siemens; Alstom; General Electric. Desde 2018 se encontra a frente da Trassínio Consultoria. IEEE SM; CIGRE SC A1 Specialist.

### Luis Fernando Ribeiro Ferreira

Nasceu em Jacutinga (MG) em 1991. Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas elétricos de potência pela UNIFEI em 2014, foi bolsista pelo Programa Ciências sem Fronteiras na University of British Columbia. Atualmente trabalha na GSI - Engenharia e Consultoria Ltda. na área de estudos elétricos, com interesse nas áreas de simulações de estabilidade eletromecânica e de transitórios eletromagnéticos.