



**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDOS DE GERAÇÃO HIDRÁULICA(GGH)**

**REVISÃO DOS CRITÉRIOS PARA ESPECIFICAÇÃO E PROJETO DE GERADORES: OS  
PARÂMETROS ELÉTRICOS E A ESTABILIDADE – ANÁLISE DE UM CASO**

Aderbal de Arruda Penteadado Jr.  
Lineu Belico dos Reis  
Depto. de Energia e Automação Elétricas  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav.3, 158  
05508-900 São Paulo, SP, Brazil  
[aderbal@pea.usp.br](mailto:aderbal@pea.usp.br)

Edson Leite Alves \*  
Mauro Uemori  
Neri Colombo  
ABB – Asea Brown Boveri Ltda.  
Depto. de Geração de Energia  
Av. dos Autonomistas, 1496, Osasco, SP, Brazil  
[edson-leite.alves@brabb.mail.abb.com](mailto:edson-leite.alves@brabb.mail.abb.com)

**RESUMO**

Os autores esperam que este artigo possa ser um agente catalisador de profunda reflexão coletiva, tanto para os engenheiros projetistas de hidrogeradores como para os clientes do produto final. Este informe técnico, conseqüência e aplicação de trabalho anteriormente apresentado, é também um convite à discussão sobre alguns antigos dogmas relativos à especificação da relação de curto-circuito (RCC) e da constante de inércia (H), que merecem uma revisão sob a luz da nova tecnologia agora disponível para reguladores de tensão e velocidade.

Aplicados os conceitos discutidos em (1), foram feitos estudos de estabilidade através da simulação dos principais transitórios provocados ao sistema no qual a máquina síncrona estaria acoplada, consideradas duas condições para permitir comparações. Na primeira, considerando a máquina projetada empregando conceitos clássicos e na outra (cuja máquina está em fase de fabricação), na qual foram adotados os novos critérios aqui discutidos.

Os resultados indicaram a importância da revisão dos limites aplicados a estes dois parâmetros, considerada a significativa redução de custo, sem prejuízo das condições operativas apresentadas pelo projeto com os novos critérios.

**PALAVRAS-CHAVE**

Geradores síncronos, Relação de curto circuito em hidrogeradores, constante de inércia, estabilidade

**1.0 INTRODUÇÃO**

A máquina síncrona operando acoplada a um sistema elétrico de potência, deve atender a alguns requisitos para garantir um adequado desempenho deste sistema. Estes requisitos são, em geral e historicamente, representados por limitações ou indicação de faixas aceitáveis para alguns de seus parâmetros, tais como a reatância síncrona de eixo direto  $X_d$  e a constante de inércia  $H$ . Tais variáveis e parâmetros têm também estreito vínculo com as técnicas de projeto e construção das máquinas.

O fato resulta em compromisso, em geral sinalizado pela indicação na especificação da máquina, de valores e limites aceitáveis para certos parâmetros e variáveis. Tal procedimento tem sido aplicado há muito tempo com bons resultados. Por outro lado, os valores e limites até então assumidos, não têm sido revisados para levar em consideração a evolução tecnológica. Isto pode resultar na manutenção inadvertida de uma margem de segurança muito maior do que a que seria necessária para um projeto econômico.

Este trabalho aborda exatamente esta questão, enfocando dois parâmetros fundamentais da máquina síncrona:

- A relação de curto-circuito (RCC), e
- A constante de inércia (H).

**2.0 OS PARÂMETROS E SUA INFLUÊNCIA NO PROJETO E NO CUSTO FINAL**

Os fenômenos básicos associados à operação do sistema de potência, são, até certo ponto, dependentes do comportamento da máquina síncrona e portanto influ-

enciados pelos parâmetros dessas máquinas. São exemplos, a estabilidade dinâmica, o controle da tensão, transitórios de curta e longa duração e o desempenho harmônico. Neste contexto, situam-se diferentes ocorrências tais como: ações manuais ou automáticas para controlar a tensão e o fluxo de potência, partida do sistema, comportamento durante distúrbios e recuperação, energização, rejeição de carga, curto-circuitos e subsequente atuação da proteção. Embora seja muito difícil, em muitos casos, separar os efeitos dos parâmetros da máquina em tais ocorrências, é possível apontar os parâmetros mais importantes e as principais implicações a eles associadas :

**X<sub>d</sub>** – Reatância síncrona de eixo direto. Determina principalmente a relação de curto-circuito (RCC) e a capacidade da máquina de absorver potência reativa. Tem forte influência no sistema de controle da tensão, uma vez que a relação de curto circuito determina as variações na tensão terminal devidas às variações de corrente durante distúrbios.

**X<sub>q</sub>** – Reatância síncrona de eixo quadratura. Determina principalmente o limite de excitação de campo negativa e a capacidade de absorção de potência reativa.

**X'<sub>d</sub>** – Reatância transitória de eixo direto. Influi no comportamento da máquina nas condições de estabilidade, principalmente dinâmica, e picos transitórios de sobretensão durante a rejeição de carga e a energização.

**X''<sub>d</sub>** – Reatância subtransitória de eixo direto. Relacionada basicamente a dois aspectos: i ) Ao comportamento da máquina sob condições de estabilidade transitória e nas sobretensões instantâneas durante a rejeição e energização de carga; ii ) À potência de curto-circuito que determina, por exemplo, as sobretensões durante a rejeição de carga e energização de linhas.

**X''<sub>q</sub>/X''<sub>d</sub>** – A relação que define a saliência subtransitória influi no comportamento da máquina quanto à estabilidade, principalmente transitória (primeiro pico e amortecimento das oscilações). Estabelece também a capacidade de suportar correntes de sequência negativa e está diretamente relacionada com os componentes harmônicos durante falhas desbalanceadas.

**T'<sub>do</sub>** – Constante de tempo transitória de circuito aberto. Influencia principalmente o comportamento nas condições de estabilidade transitória.

**H** – Constante de inércia. É dependente da potência aparente, velocidade e Inércia. Tem relação direta com

o tempo mecânico de resposta da máquina em vários distúrbios, afetando principalmente o amortecimento de oscilações e o ajuste do regulador de velocidade.

Na definição e escolha da máquina síncrona para operar num sistema de potência, dois aspectos fundamentais governam a determinação de seus parâmetros e variáveis: O desempenho do conjunto máquina – sistema, e o aspecto técnico-econômico do projeto e construção da máquina.

O objetivo deste trabalho é apresentar à discussão, a aplicação destes conceitos no projeto da Usina de Rosal, que foi desenvolvido considerando duas premissas distintas, que resultaram em custos diferentes: O primeiro projeto foi desenvolvido para atender os requisitos de especificação clássica (projeto especificado). No segundo projeto flexibilizou-se alguns parâmetros para propiciar uma redução de custo do gerador (projeto proposto). Essa redução de custo, associada à equivalência do desempenho apresentada pelos dois projetos nos estudos de estabilidade, foram fatores decisivos para uma decisão favorável do cliente para a implantação do projeto proposto.

### 3.0 CARACTERIZAÇÃO DOS DOIS PROJETOS PARA A UHE ROSAL

A Usina de Rosal é localizada no rio Itabapoana, entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Consiste de dois geradores de eixo vertical, acionados por turbinas Francis, com arranjo de mancais W41, ou seja, um mancal de escora e guia combinados, acima do rotor e um mancal de guia abaixo do rotor, grau de proteção IP 44, sendo resfriados por ar em circuito fechado de ventilação, refrigerado por trocadores de calor ar água. As características básicas dos geradores estão indicadas na tabela 1 :

TABELA 1  
DADOS NOMINAIS DO GERADOR

Potência	28933	KVA
Número de pólos	12	
Tensão	6900	V
Frequência	60	Hz
Fator de potência	0.95	
Rotação nominal	600	rpm
Rotação de disparo	1100	rpm

A vista vertical da máquina, é mostrada na figura 1:

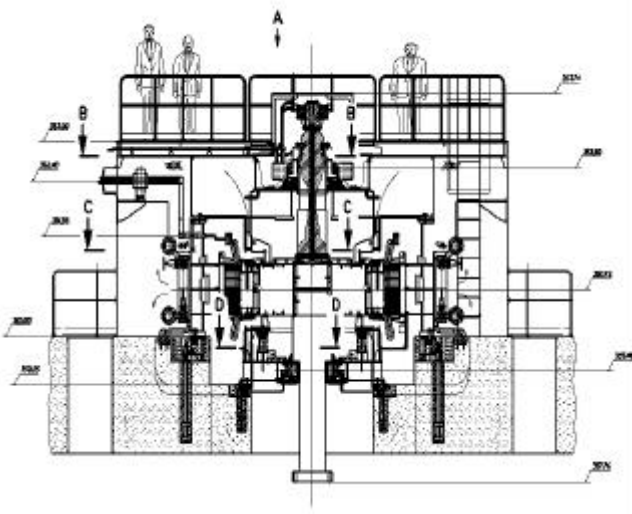


FIGURA 1 CORTE VERTICAL DE ROSAI

Uma vista em planta da máquina projetada com parâmetros flexibilizados é mostrada na figura 2:

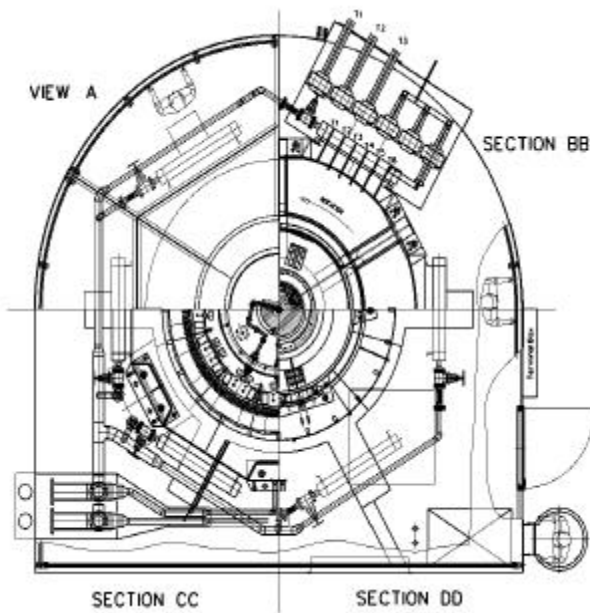


FIGURA 2 VISTA EM PLANTA DE ROSAI

Para compatibilizar o projeto proposto com o especificado foram mantidas as seguintes restrições, impostas pela especificação técnica original:

- Mesma elevação de temperatura nos enrolamentos do estator e rotor, no núcleo do estator e no anel coletor;
- Enrolamentos classe F;
- Tensões mecânicas máximas limitadas ao mesmo valor na rotação de disparo das partes rotativas ou

na mais severa condição de operação das partes estáticas;

- Mesmo rendimento para o gerador operando na condição nominal;
- Reatância transitória de eixo direto ( $X''_d$ ), reatância subtransitória de eixo direto ( $X''_q$ ), e relação  $X''_q/X''_d$  dentro dos limites especificados originalmente;
- Mesma forma construtiva (W41, IP44).

Foram flexibilizadas as seguintes restrições especificadas originalmente:

- Reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ );
- Constante de inércia do gerador ( $H$ )

Para assegurar operação satisfatória da turbina em condição de rejeição plena de carga, foi consultado o fabricante da turbina quanto ao mínimo valor possível para a inércia do gerador projetado, que se mostrou inferior ao anteriormente proposto. Assim, com a nova constante de inércia proposta, obteve-se uma sobrevelocidade de 65%, valor atualmente aceitável para o sistema de excitação, em função da eficiência tecnológica dos novos reguladores de tensão. Com relação ao dimensionamento obteve-se o resultado apontado na Tabela 2, face à otimização do projeto

TABELA 2  
CARACTERIZAÇÃO DOS DOIS PROJETOS EXECUTADOS

	Projeto especificado	Projeto proposto	Comparação
Reatância $X_d$ (pu)	1.20	1.65	+27.3 %
Constante inércia ( $H$ ) (s)	2.7	2.22	-21.6 %
Dia. interno estator (mm)	2790	2780	-0.4 %
Compr. do núcleo (mm)	850	750	-13.3 %
Fator aproveitamento ( $K_d$ )	7.29	8.32	
Tensão enrol. campo (V)	173	163	-6.1 %
Corrente enrol. campo (A)	537	542	+0.9 %
Potência excitação (kW)	92.9	88.2	-5.2 %
Peso estator (t)	31.8	30.2	-5.5 %
Peso rotor (t)	51.8	46.7	-11.0 %
Peso total (t)	107.4	100.1	-7.3 %

As Tabelas 3 e 4 apresentam uma comparação de custos entre os dois projetos descritos:

TABELA 3  
CUSTOS ASSOCIADOS E COMPARAÇÃO

	Projeto especificado	Projeto proposto	Comparação
Estator	100 %	95.2 %	-5.0 %
Rotor	100 %	90.9 %	-10.0 %
Cruzetas e mancais	100 %	95.2 %	-5.0 %
Custo adicional	100 %	99.5 %	-0.5 %
Custo total	100 %	94.8 %	-5.5 %

TABELA 4  
CUSTOS ASSOCIADOS E COMPARAÇÕES

	Projeto especificado	Projeto proposto
Estató	26.5 %	26.7 %
Rotor	31.8 %	30.5 %
Cruzetas e mancais	21.4 %	21.5 %
Custo adicional	20.3 %	20.3 %
Custo total	100 %	100 %

Como resultado, houve redução do custo do gerador em 5,5%. Cabe ressaltar que esta otimização reduz também o custo do sistema de excitação, da casa de força e da ponte rolante, impactos não quantificados neste trabalho.

#### 4.0 ESTUDO DE ESTABILIDADE

Para se confirmar a adequação da revisão de critérios e certificação de que a máquina proposta garante um comportamento adequado durante contingências no sistema, procedeu-se a estudos de estabilidade transitória. Estes estudos foram conduzidos em duas etapas, uma delas considerando a usina conectada a um barramento infinito e a outra, com simulação completa do sistema com representação de “N” usinas

O primeiro estudo, exploratório, considerando a usina conectada a um barramento infinito, foi feito usando programa da ABB - Synchronous Machine Transient Simulation (SMTS), com os principais resultados mostrados nas Figuras 3 a 8.

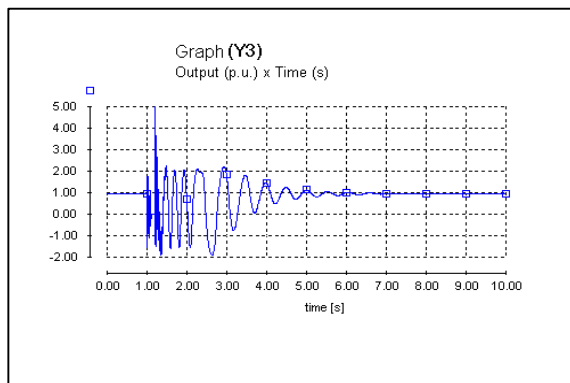


FIGURA 3 POTÊNCIA - CURTO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA- PROJETO ESPECIFICADO

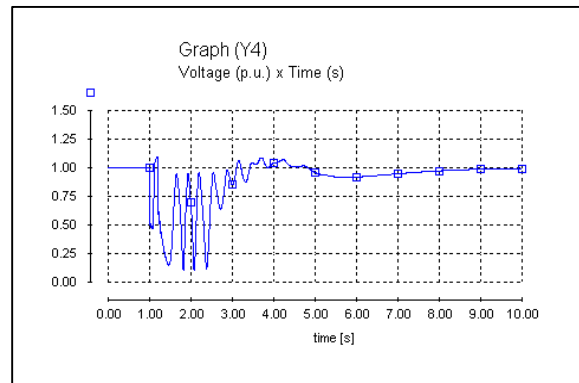


FIGURA 4 TENSÃO – CURTO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA- PROJETO ESPECIFICADO

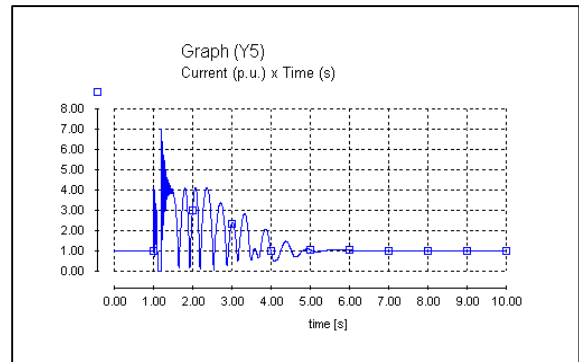


FIGURA 5 CORRENTE - CURTO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA- PROJETO ESPECIFICADO

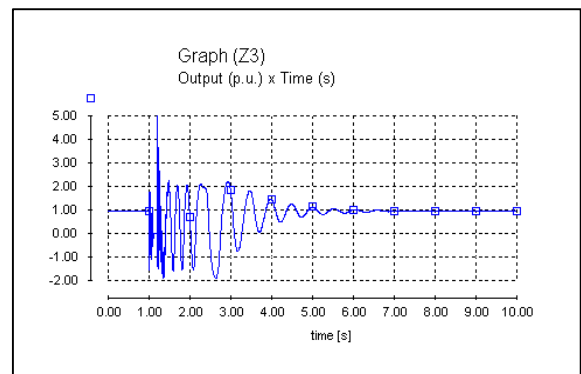


FIGURA 6 POTÊNCIA - CURTO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA- PROJETO PROPOSTO

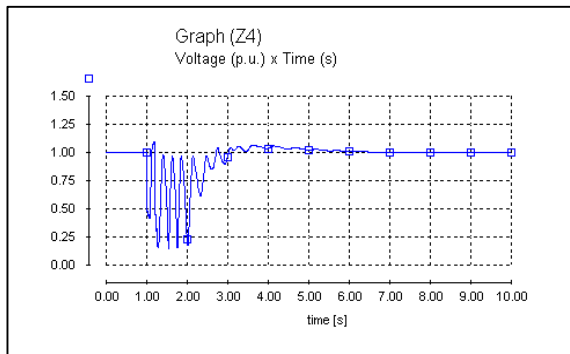


FIGURA 7 TENSÃO - CURTO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA- PROJETO PROPOSTO

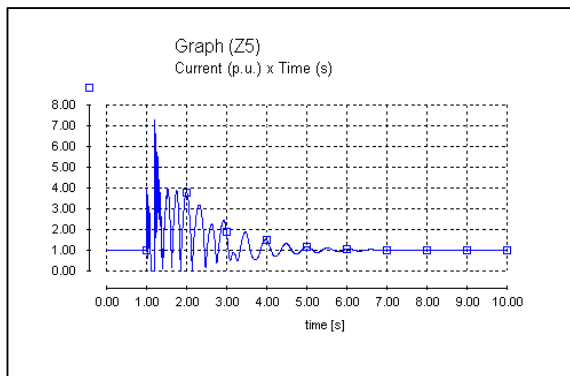


FIGURA 8 CORRENTE - CURTO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA- PROJETO PROPOSTO

Neste caso, para verificar o impacto do procedimento de revisão dos parâmetros da máquina no comportamento transitório, um projeto alternativo, denominado projeto proposto, foi realizado para uma máquina fabricada pela ABB (UHE Serra da Mesa) e simulações foram feitas em um programa de estabilidade que permite a representação de uma usina, ou máquina, conectada a um barramento infinito. Tais simulações foram efetuadas considerando tanto a máquina fabricada, como a com os parâmetros revisados. Os resultados mostraram um comportamento muito similar para ambas alternativas. Algumas discussões foram então realizadas para validar o modelo geral, uma vez que o barramento infinito absorve os distúrbios principais. Concluiu-se pela importância de se fazer um estudo de estabilidade num sistema, com várias máquinas operando.

A oportunidade para este estudo ocorreu na ocasião do projeto das máquinas para a UHE Rosal. Assim numa segunda etapa, foram realizados estudos de estabilidade transitória usando um programa de computador que permite a representação de N máquinas e uma simula-

ção detalhada do sistema de potência, dos geradores e seus sistemas de regulação de tensão e velocidade.

Para a usina de Rosal, houve necessidade de se estudar a estabilidade para duas diferentes configurações do sistema, devido ao novo cenário do setor elétrico brasileiro. Durante a etapa de projeto da máquina, negociações estavam sendo realizadas para determinar a melhor condição de venda da energia, para a CERJ ou ESCELSA, duas empresas privadas. Daí, o estudo ter sido desenvolvido considerando ambas as possibilidades.

Nas duas configurações, as máquinas de Rosal seriam conectadas ao mesmo barramento na subestação de geração. A principal diferença estava relacionada com a conexão entre a subestação e o sistema de transmissão, cuja determinação também era parte do projeto.

No caso da CERJ, esta conexão seria provida através de 2 circuitos paralelos entre a subestação e o barramento de interconexão. Neste caso a capacidade de transferência de energia é mantida, mesmo perdendo um circuito.

No caso da ESCELSA, por outro lado, duas linhas de transmissão conectam o barramento de geração a dois pontos diferentes de interconexão ao sistema. Tomada esta decisão, por razões econômicas e outras, que não cabe discutir neste trabalho, se uma destas linhas se perde, a linha remanescente não terá capacidade suficiente de transmitir a energia gerada pelas duas máquinas de Rosal. A potência gerada deve então, ser ajustada num nível menor. Durante condições transitórias, ações protetivas serão necessárias para manter a operação viável nas condições pós transitório. Esta situação foi verificada durante os estudos quando as condições mais críticas do ponto de vista de estabilidade foram simuladas.

Alem disso, os dois conjuntos alternativos de parâmetros já descritos, foram considerados para a UHE Rosal: a) os parâmetros da máquina considerando os limites clássicos, o projeto especificado; e b) os parâmetros propostos com base na revisão de critérios, o projeto proposto.

Em todos os casos simulados, o comportamento das máquinas de Rosal foi muito parecido, como mostram as Figuras 3 a 8 (barramento infinito) e as Figuras 9 a 12 (simulando N geradores e o sistema completo). Estas Figuras (9 a 12) apresentam a potência das máquinas no caso crítico já citado, de conexão à ESCELSA em que uma ação protetiva voltada para diminuir a potência gerada é necessária para garantir

a estabilidade do sistema. A ação protetiva adotada nesta etapa dos estudos foi o desligamento de um dos geradores (Figuras 11 e 12)

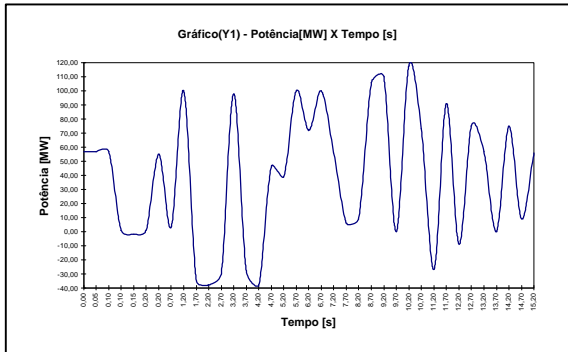


FIGURA 9 CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA - PROJETO ESPECIFICADO

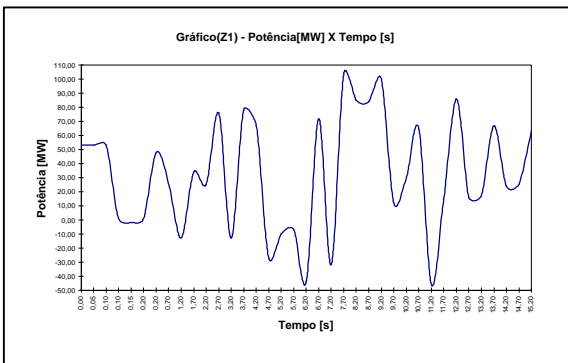


FIGURA 10 CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO E ABERTURA DE LINHA - PROJETO PROPOSTO

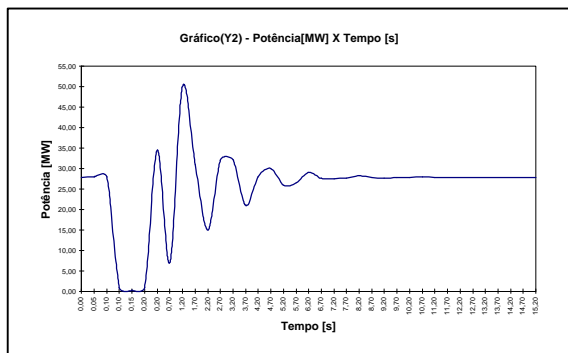


FIGURA 11 CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO, ABERTURA DE LINHA E DESLIGAMENTO DE UM GERADOR DE ROSAL - PROJETO ESPECIFICADO

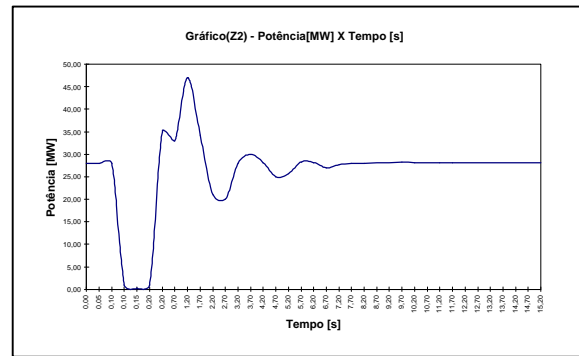


FIGURA 12 CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO, ABERTURA DE LINHA E DESLIGAMENTO DE UM GERADOR DE ROSAL - PROJETO PROPOSTO

## 5.0 CONCLUSÃO

Os resultados confirmaram que os critérios clássicos no projeto de geradores podem ser revisados, com sucesso, em função dos avanços no desenvolvimento de materiais e no projeto dos geradores e dos reguladores de tensão e velocidade.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PENTEADO JR. A. A.; REIS L. B.; ROCHA E. J. J.; UEMORI M. K., "Relação de curto circuito e a saliência subtransitória em hidrogeradores: Um convite à discussão", SNPTEE – ELETRONORTE/CIGRÉ, Belem 1997, GMR 17, Grupo XII (CD-Rom).
- (2) PENTEADO JR. A. A.; REIS, Estudo de estabilidade da UHE Rosal ABB/USP
- (3) PROGRAMA HT203 – programa de calculo eletromagnético da ABB
- (4) PROGRAMA STMS – ABB Synchronous Machine Transient Simulation