



**XXIII SNPTTE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/06
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – II

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT
MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO EM UMA TERMELÉTRICA A CICLO COMBINADO
UTILIZANDO TECNOLOGIA NACIONAL**

**Alécio José Grzybowski Jr. (*)
REIVAX**

**Edson Gonçalves de Oliveira
COPEL**

**Odenir Miranda Rodrigues
COPEL**

**Victor Manuel Lopes Santos
UEGA**

RESUMO

O desafio de manter altos índices de disponibilidade e confiabilidade em usinas termelétricas a ciclo combinado é mais acentuado, pelo fato de que a tecnologia empregada é totalmente importada, o que cria uma dependência externa para manutenção dos equipamentos.

Este trabalho apresenta um caso de sucesso no emprego de tecnologia nacional para substituição do regulador de tensão do gerador da unidade a vapor da UTE Araucária. A alternativa em continuar com a dependência do fornecedor original poderia acarretar grandes indisponibilidades da usina devido à dificuldade na obtenção de suporte técnico e reposição de sobressalentes, para um equipamento tecnologicamente ultrapassado.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de excitação, Regulador de tensão, Gerador síncrono, *Retrofit*, Ciclo combinado

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 Descrição da planta

A UEG Araucária Ltda. (UEGA) é uma parceria formada pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e a Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), para construir e operar uma planta de geração termelétrica a gás natural de ciclo combinado de 484,15 megawatts (MW) na Região Metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná, Brasil, conforme apresentado na Figura 1. A Figura 2 apresenta uma vista geral da planta.

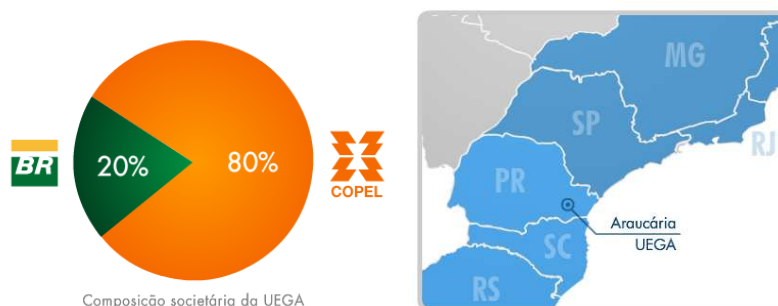


FIGURA 1 – Composição societária e localização da planta

Como parte do Programa Prioritário de Termelétricas (PPT) (2), entrou em operação em 2002 e foi recomissionada em 2006, após longo período de hibernação. A principal característica deste projeto é de ser totalmente importado e

(*) Rodovia José Carlos Daux, n° 600 - Tecnópolis – CEP 88.030-904 Florianópolis, SC, – Brasil
Tel: (+55 48) 3027-3734 – Fax: (+55 48) 3027-3735 – Email: ajg@reivax.com.br

haver grande dependência tecnológica. A usina foi construída na modalidade *turn-key*, em que os custos de aquisição são reduzidos, mas os custos de operação e manutenção são maiores, devidos principalmente à dificuldade de nacionalização de equipamentos e falta de suporte técnico nacional.



FIGURA 2 – Vista geral da UTE Araucária

A planta é composta por três unidades geradoras: duas a gás, denominadas CTG1 e CTG2 (*Combustion Turbine Generator*) e uma a vapor, denominada STG (*Steam Turbine Generator*) operando em ciclo combinado. A operação das unidades a gás só é possível quando combinada com a operação da unidade a vapor, devido à inexistência de “chaminé de *by-pass*” das caldeiras de recuperação de calor. Assim sendo, a indisponibilidade da STG gera indisponibilidade de toda a planta.

1.2 Análise da ocorrência (5)

Devido ao desligamento do centro de cargas 2 do serviço auxiliar 4,16kV da UTE Araucária, ocorreu subtensão geral nos centros de controle de motores (CCMs) das unidades geradoras CTG2 e STG. Não foi possível reenergizar o centro de cargas, devido à ocorrência de falha nas duas fontes.

O centro de cargas ficou desenergizado das 6h00 às 10h00 do dia 17/06/2014. As 09h44 ocorreu o desligamento da unidade STG, por falha no regulador de tensão do gerador. O restabelecimento completo do serviço auxiliar em 4,16 kV se deu após a substituição do relé digital de proteção danificado e a inspeção elétrica nos barramentos dos CCMs afetados. Ao acessar o compartimento do sistema de excitação da STG, foi observada a falha dos dois sistemas de refrigeração do ar HVACs (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), que têm fonte elétrica proveniente do CCM da STG. Com isto a temperatura no interior do cubículo atingiu valores acima de 50°C.

Assim, a unidade STG ficou operando na condição FSNL (*Full Speed No Load*), para investigação da ocorrência. Após a diminuição da temperatura no local, uma inspeção interna detalhada dos equipamentos, bem como uma verificação na oscilografia do gerador foi realizada, não detectando falhas aparentes. Uma tentativa de excitação da unidade foi realizada, sendo observado a entrada da pré-excitação, levando a tensão terminal da unidade ao patamar de 4,5kV, sinalizando na IHM (Interface homem-máquina) falha de tempo máximo da pré-excitação e falha no segundo estágio da excitação.

Devido ao alto custo de se manter as turbinas operando, a unidade geradora foi parada para investigação detalhada dos componentes internos do AVR (*Automatic Voltage Regulator*). A indisponibilidade da turbina a vapor acarretou a indisponibilidade de toda a UTE Araucária por 72 horas. A suspeita principal da causa das falhas em questão recaiu sobre o módulo de disparo das pontes e do módulo de chaveamento entre os dois canais de regulação e as duas pontes retificadoras.

Os mesmos foram ensaiados em bancada, verificando-se que apresentavam funcionamento normal. Após tentativas fracassadas de acesso à programação dos mesmos, através de interface serial em software específico, foi estabelecido contato com o suporte técnico do fabricante, que enviou o manual correspondente ao módulo em versão diferente da disponível no acervo técnico da usina. De posse deste manual, foi possível verificar problemas no recebimento do sinal de controle, detectando-se, assim, danos nos módulos responsáveis pelo envio do sinal para os módulos de geração de pulsos que estavam danificados, além de outro módulo de saída analógica, responsável pelo envio dos sinais de supervisão do AVR da STG ao sistema de controle digital e instrumentação local. Desta forma, com três cartões danificados e apenas um sobressalente, a solução foi indisponibilizar um dos canais de controle.

Após realização do teste de disparo em tensão das pontes retificadoras, com o auxílio de um gerador de sinais e alimentação externa, as formas de onda apresentaram operação normal dos elementos de potência. Assim sendo, a unidade foi liberada para a operação com um dos canais de regulação indisponível. A partida de toda a planta foi acompanhada atentamente, ocorrendo com normalidade.

1.3 Plano de ação emergencial

Após a recomposição de toda a planta, foi iniciado um plano de ação emergencial visando à modernização do sistema de excitação e consequente reestabelecimento dos níveis originais de redundância de canais de controle. O requisito fundamental para esta intervenção era possibilitar que a substituição pudesse ocorrer durante a parada da planta para manutenção geral, que estava programada para aproximadamente 90 dias após a data da ocorrência.

Tal restrição inviabilizou, de antemão, uma modernização total do sistema, por conta dos altos prazos de entrega envolvidos na importação dos componentes que compõe a etapa de potência, afetando significativamente os prazos de expedição. Assim, a solução se encaminhou para o *retrofit* parcial, considerando a modernização dos módulos de controle e aproveitamento da etapa de potência original.

Para garantir boas condições de manutenção preventiva e preditiva nos componentes que seriam mantidos, a instalação de novos sensores foi realizada, bem como implementação de novas funcionalidades. Neste contexto, a necessidade de uma interface homem-máquina (IHM) mais completa foi considerada no desenvolvimento da nova solução.

A preocupação em evitar ocorrências similares à descrita acima motivou também a inclusão de pontos redundantes de medição da temperatura ambiente na sala elétrica do AVR, possibilitando a detecção imediata de possíveis problemas nos sistemas de refrigeração.

2.0 - PROJETO DE INTERFACE

2.1 Arquitetura do sistema de excitação

O sistema de excitação aplicado à unidade geradora STG da UTE Araucária é de Autoexcitação Direta Simples (Excitatriz Estática Alimentada por Fonte de Tensão) (3), com a alimentação de potência realizada através de um transformador de excitação conectado aos terminais do gerador (sistema *bus-fed*). Possui redundância de módulos de controle e também de pontes retificadoras, as quais são tiristorizadas e com característica extraível, com capacidade individual de suprir integralmente a corrente nominal do sistema.

A desconexão com o campo é realizada no lado de corrente contínua, através de um contator de campo montado sobre barras composto por dois contatos de potência normalmente abertos (NA) e um contato adicional normalmente fechado (NF), responsável pela conexão do resistor de descarga de campo, o qual possui característica linear.

2.2 Componentes substituídos e acrescentados

A análise para definição dos componentes do sistema de excitação a serem substituídos levou em conta aspectos técnicos e logísticos. Os aspectos técnicos associados envolveram não só integridade dos componentes – garantida através de inspeção visual e ensaios – como também a compatibilidade na integração dos mesmos ao novo sistema. A Figura 3 apresenta uma visão geral do sistema, identificando os componentes que foram substituídos e/ou modernizados.

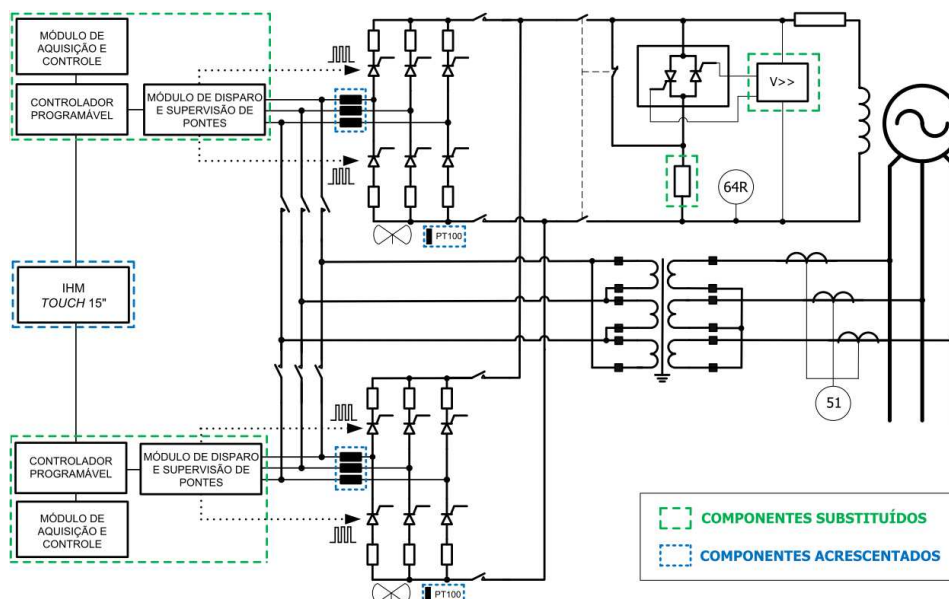


FIGURA 3 – Diagrama arquitetural identificando os componentes substituídos/acrescentados

Entre os componentes substituídos encontram-se todo o *hardware* de controle (controlador programável, módulo de aquisição e controle e módulo de disparo e supervisão de pontes tiristorizadas), resistência de descarga linear e módulo de proteção de sobretensão do campo do gerador (*crowbar*).

2.3 Definição da plataforma a ser adotada

A definição da plataforma de *hardware* a ser adotada levou em conta a padronização entre os novos módulos de controle e os já instalados nas unidades a gás (CTG1 e CTG2). Assim, além de proporcionar a redução da variabilidade de peças sobressalentes, aprimorou-se também a capacidade técnica das equipes da operação e manutenção, já familiarizadas com a plataforma em questão.

2.4 Novas funcionalidades implementadas

A instalação do novo regulador de tensão e a inclusão de novos sensores possibilitaram a implementação de novas funcionalidades no sistema, tais como:

a. Supervisão de condução dos tiristores e equalização de corrente entre retificadores em paralelo

Para medição individualizada das correntes de entrada de ambos os retificadores, foram instalados sensores de efeito *hall* em cada uma das fases, possibilitando assim a execução de rotinas de supervisão de condução e equalização de correntes. A supervisão de condução identifica falhas no disparo de cada um dos tiristores quando a leitura de corrente é inferior a um valor ajustável de *dropout*, otimizando as ações de manutenção, quando necessárias.

Já o algoritmo de equalização permite o balanceamento das correntes entre as pontes em paralelo ou entre os tiristores (que ocupam a mesma posição) através de pequenas variações no ângulo de disparo. Tal sistema garante melhor equilíbrio térmico dos componentes bem como desgaste mais uniforme dos mesmos, garantindo aumento da vida útil do sistema como um todo.

b. Supervisão de temperatura das pontes retificadoras e da sala elétrica

A instalação de novos sensores do tipo *PT100* nos pontos de entrada e saída de ar das pontes retificadoras, bem como em pontos estratégicos da sala elétrica, possibilitou uma monitoração térmica mais completa, garantindo assim a identificação imediata de problemas na ventilação das pontes retificadoras e nos sistemas de refrigeração da sala elétrica.

c. Aplicação de degrau e controle do disparo em malha aberta incorporada às rotinas de ensaios e testes

A possibilidade de aplicação de degraus para verificações da resposta dinâmica, bem como a funcionalidade de comando direto em malha aberta (variando a referência do ângulo de disparo dos tiristores) facilitam os ensaios de comissionamento e as rotinas de manutenção.

3.0 - INSTALAÇÃO

3.1 Aspectos construtivos

A facilidade na instalação foi premissa básica na definição dos detalhes construtivos das placas de montagem que comportam os novos componentes de *hardware*, tendo sido dispostas de forma a ocupar os mesmos espaços físicos internos dos painéis antigos e permitir o aproveitamento de todos os cabos de interface externa. Desta forma, a etapa de desmontagem do antigo sistema mereceu atenção especial na identificação de componentes e conexões elétricas, bem como o máximo cuidado para não afetar a integridade física dos componentes a serem mantidos.

A Figura 4 apresenta as disposições físicas do sistema, antes e depois da intervenção.

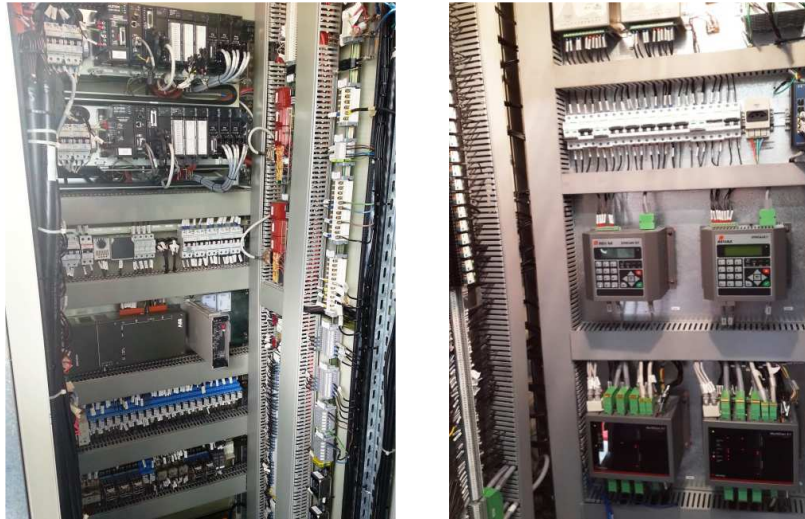


FIGURA 4 – Comparativo de hardware do controlador: antes (esquerda) e depois (direita).

Para a instalação de sensores de efeito *hall* de monitoramento das correntes de entrada das pontes retificadoras foi necessária a desmontagem de todos os barramentos da etapa de potência, para a fixação dos mesmos nos pontos específicos.

A substituição da interface de operação local foi facilitada por conta de sua característica modular, sendo fornecida uma nova placa com as mesmas dimensões, com os componentes previamente montados. A Figura 5 apresenta um comparativo entre ambas.

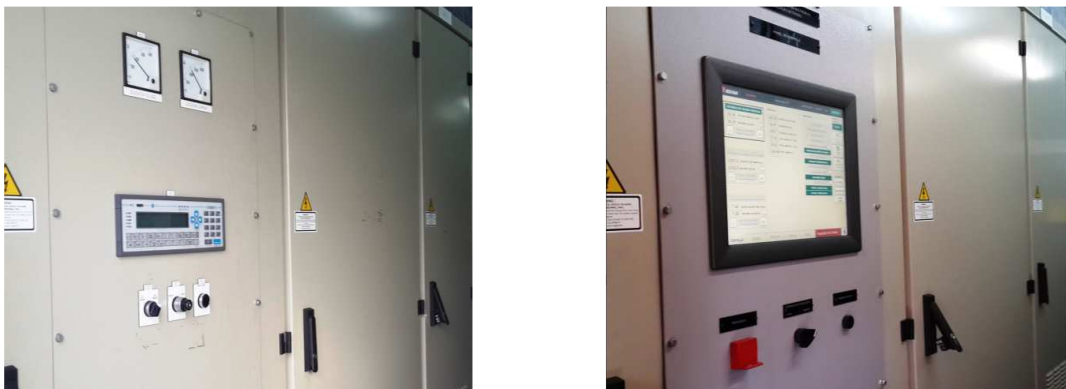


FIGURA 5 – Comparativo de interfaces de operação: antes (esquerda) e depois (direita).

3.2 Cronograma executado

A Figura 6 apresenta o cronograma executado, em um tempo total de 89 dias desde o início do plano emergencial.

Etapa	Duração	jul 2014				ago 2014				set 2014			
		6/7	13/7	20/7	27/7	3/8	10/8	17/8	24/8	31/8	7/9	14/9	21/9
1	PROJETO	56d											
2	FABRICAÇÃO	60d											
3	EXPEDIÇÃO	5d											
4	INSTALAÇÃO	7d											
5	COMISSIONAMENTO	3d											
	TEMPO TOTAL	89d											

FIGURA 6 – Cronograma geral do projeto de modernização

Destacam-se aqui os prazos envolvidos nas etapas de campo, que totalizaram dez dias. O serviço de instalação envolveu uma equipe formada por um supervisor, três técnicos eletricitas e dois ajudantes, sendo executado em apenas sete dias, em uma jornada de doze horas diárias. Já a etapa de comissionamento, dividida entre ensaios com máquina parada, em vazio e em carga foi executada em três dias.

4.0 - ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo na unidade geradora STG envolvem restrições quanto ao tempo máximo de operação a vazio (FSNL) e uma grande pressão para que não ocorram desligamentos indesejados durante os ensaios em carga, por conta da interferência com os ensaios paralelos de tomada de carga nas unidades a gás. Tais restrições aumentam a exigência quanto a uma programação detalhada dos ensaios com a máquina rodando, para melhor aproveitamento do tempo. A seguir são apresentados alguns comparativos técnicos entre ambos os sistemas, quanto aos resultados obtidos em campo.

4.1 Estabilizador de Sistema de Potência (*Power System Stabilizer*)

O Estabilizador de Sistema de Potência do sistema de excitação antigo era baseado na topologia PSS2A (4), sendo substituída pela topologia PSS2B (5) do novo sistema. Ambos os diagramas são apresentados nas Figuras 7 e 8. Pode-se notar que são topologias muito similares que se diferenciam apenas quanto à quantidade de blocos de avanço-atraso na saída da malha de controle, de dois para três.

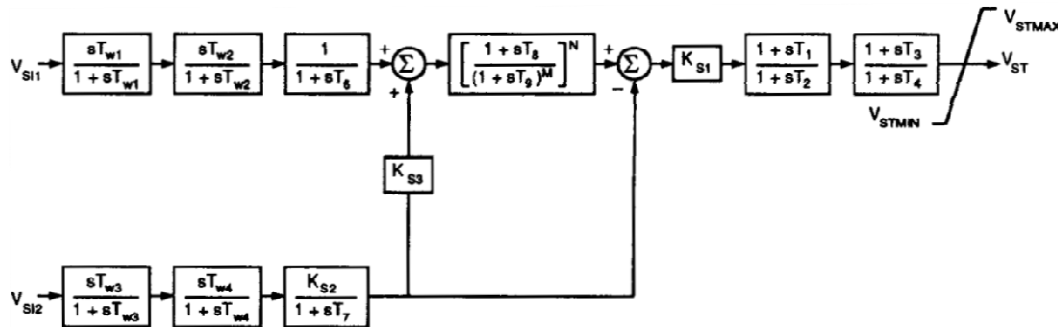


FIGURA 6 – Diagrama de blocos PSS2A (4).

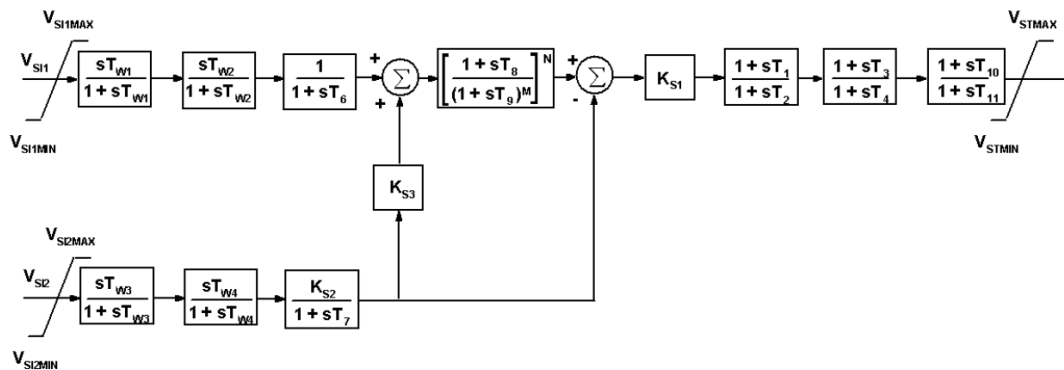


FIGURA 7 – Diagrama de blocos PSS2B (5).

A resposta dinâmica do sistema a partir de degraus na referência de tensão terminal do regulador de tensão pode ser verificada a seguir. A Figura 8 apresenta as curvas de resposta para um degrau de -2% registrado no relatório de comissionamento do sistema antigo.

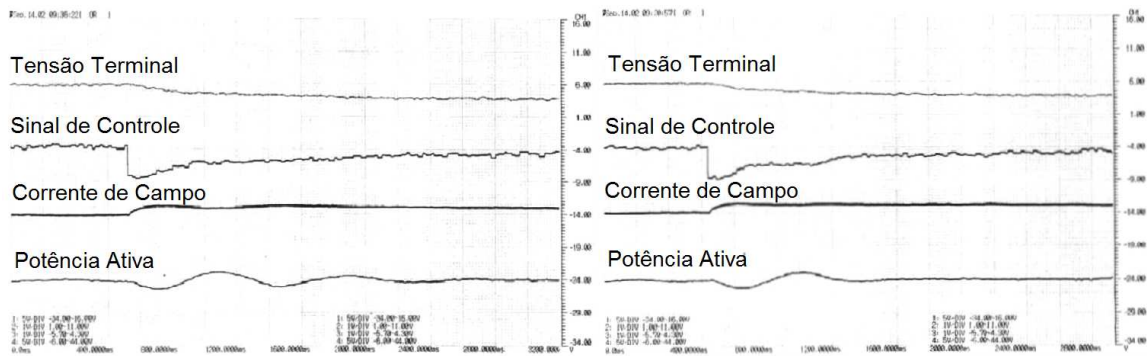


FIGURA 8 – Resposta ao degrau de 2% com PSS desabilitado/habilitado - sistema antigo (1).

Já a Figura 9 apresenta a resposta dinâmica do novo sistema, a partir de degraus de 3% na referência de tensão terminal do regulador de tensão, sendo que o primeiro degrau foi realizado com o PSS desabilitado, sendo o mesmo habilitado para o segundo degrau. É perceptível o amortecimento das oscilações na Potência Ativa.

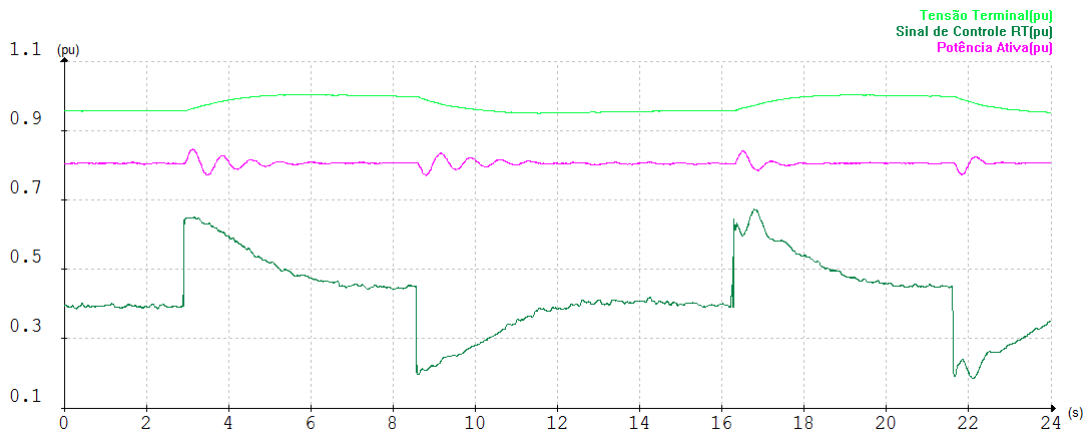


FIGURA 9 – Resposta a degraus de 3% com PSS desabilitado/habilitado – novo sistema

4.2 Limitadores do Regulador de Tensão

O ajuste dos limitadores dinâmicos do novo sistema foi baseado na curva de capacidade da máquina síncrona, apresentada na Figura 10, e nos ajustes aplicados ao sistema antigo (1).

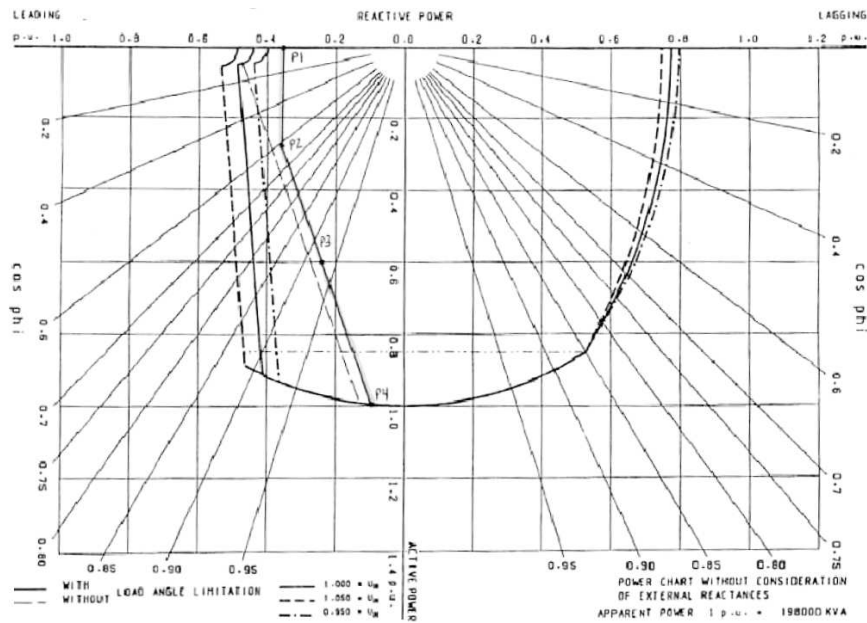


FIGURA 10 – Curva de capacidade indicando ajustes dos limitadores antigos (1).

Na Figura 11 é apresentada a representação gráfica do ajuste dos limitadores do novo sistema de excitação: limitador de subexcitação (UEL - *under excitation limiter*), limitador de corrente estatórica (SCL - *stator current limiter*), limitador de máxima corrente de campo (OEL - *overexcitation limiter*) no nível térmico (th) e de pico (pk).

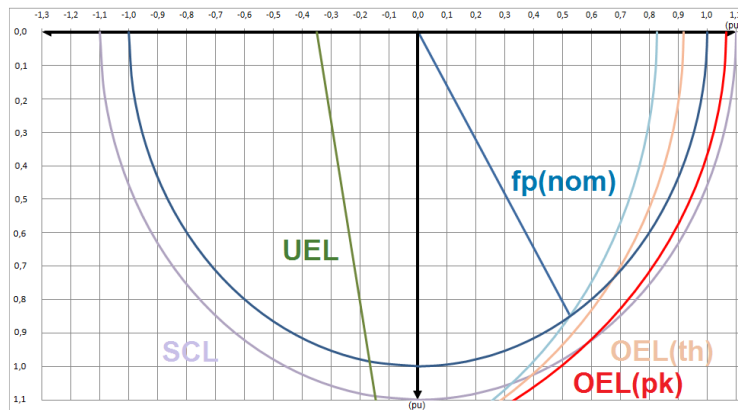


FIGURA 11 – Representação gráfica do ajuste dos limitadores do novo sistema.

5.0 - ASPECTOS ECONÔMICOS

Ainda que a variável tempo tenha sido decisiva na opção pelo *retrofit* parcial, a solução se mostrou de alta viabilidade econômica quando comparada a uma modernização integral do sistema, neste caso. O alto nível de customização da solução onerou uma quantidade maior de homem-hora de projeto, custos adicionais de produção e um maior tempo de instalação. Em contrapartida, o reaproveitamento dos componentes de potência promoveu uma redução considerável nos custos de material. Tal redução tende a ser mais significativa em equipamentos de grande potência instalada.

Ressalta-se que em determinados casos o custo da modernização parcial pode ser significativo em relação à modernização total, principalmente quando a tecnologia utilizada nos conversores originais é muito antiga, gerando muitas dificuldades de adequação, como, por exemplo, a instalação dos sensores de corrente.

6.0 - CONCLUSÃO

Tomando como referência para análise o período de tempo transcorrido entre a ocorrência de indisponibilidade até a entrega da unidade geradora para operação, com o novo sistema de excitação já comissionado, pode-se perceber que todas as ações ocorreram de forma satisfatória e dentro do prazo previsto, indicando o sucesso na execução do projeto como um todo.

A adoção de uma plataforma de tecnologia nacional, de alta flexibilidade, garantiu não só a segurança de um atendimento técnico mais rápido e efetivo, como também a total integração dos componentes existentes com o novo sistema. Os novos pontos de monitoração acrescentados, bem como a instalação de uma interface homem-máquina mais completa e amigável, proporcionaram melhores condições de operação e manutenção.

A viabilidade econômica da solução escolhida mostrou-se satisfatória, mesmo dentro de um contexto emergencial no qual, naturalmente, os custos envolvidos se tornam mais elevados.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ALSTOM *Power Service GmbH* GME7 070 389 – *Comissioning Record of the Excitation Equipment*. Araucária, PR, Brasil. Julho de 2002.
- (2) BRASIL. Decreto no 3.371, de 24 de Fevereiro de 2000. Diário Oficial da União. Brasília, DF, Brasil.
- (3) CIGRÉ-BRASIL. Cigré-Brasil FT38.01.09 – Requisitos e desempenho de sistemas de excitação: Guia para especificação de sistemas de excitação para máquinas síncronas. Brasil, Setembro 1998.
- (4) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. IEEE 421.5:1992: IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies. Nova Iorque, NY, Estados Unidos da América, 1992.
- (5) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. IEEE 421.5:2005: IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies. Nova Iorque, NY, Estados Unidos da América, 2005.
- (6) OLIVEIRA, E.G.D.; RODRIGUES, R.M. Relatório de ocorrência 0080/2014 OMNI - Gestão de Operação e Manutenção Integradas. Araucária, PR, Brasil. Fevereiro de 2015.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Autor de contato:



Nome: Alécio José Grzybowski Jr.
 Local/Ano nascimento: Curitiba/PR, 1982
 Formação: Engenheiro Eletricista
 Instituição de ensino: Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR.
 Experiência profissional: Desde 2006 atua na área de sistemas de regulação, proteção e automação voltados à geração de energia elétrica. Em 2010 integrou-se à equipe de Projeto Elétrico da Reivax S/A, onde desenvolve soluções de aplicação para centrais hidrelétricas, térmicas e subestações (compensadores síncronos).

Autor 2:



Nome: Edson Gonçalves de Oliveira
 Local/Ano nascimento: Curitiba/PR, 1964
 Formação: Engenheiro Eletricista
 Instituição de ensino: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR.
 Experiência profissional: Desde 1988 atua na área de sistemas de supervisão e controle digitais de usinas hidrelétricas e termelétricas. Especialista em Controle Avançado de Sistemas de Potência pela UFSC em 1994. Desde 2005 é responsável pela equipe de controle e instrumentação da UTE Araucária.

Autor 3:



Nome: Odenir Miranda Rodrigues
 Local/Ano nascimento: Jaguari/RS, 1972
 Formação: Engenheiro Eletricista
 Instituição de ensino: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.
 Experiência profissional: Engenheiro Eletrônico com atuação em projetos de produtos eletrônicos e microprocessados, desde 1999 até 2010. Atuação também como professor de ensino técnico. Em 2011 ingressou na COPEL na área de manutenção em controle e regulação.

Autor 4:



Nome: Victor Manuel Lopes Santos
 Local/Ano nascimento: Boavista, 1960
 Formação: Engenheiro Eletricista
 Instituição de ensino: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba/PR.
 Experiência profissional: Desde 2001 exercendo engenharia na UEG Araucária Ltda participando do projeto, da construção e da supervisão técnica da manutenção da Usina Termoeletrica de Araucária.