

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT

RETROFIT DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO EM GRANDES TERMELÉTRICAS USANDO TECNOLOGIA NACIONAL: AINDA EXISTE ESPAÇO PARA EVOLUÇÃO? LIÇÕES APRENDIDAS EM UMA MÁQUINA DE 411MVA

**CRISTIANO BÜHLER; ALÉCIO GRZYBOWSKI JR. (1)
REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE (1)**

**GILBERTO UGGIONI; CLAITON A. MARCOS; ANDRÉ PASQUAL; ANDRÉ OLIVEIRA (2)
DIAMANTE GERAÇÃO DE ENERGIA (2)**

RESUMO

Mesmo em meio à renovação da matriz energética mundial, as centrais termelétricas representam um percentual considerável na geração de energia elétrica em muitos países. No Brasil, muitas plantas foram construídas antes dos anos 2000, e se faz necessária a modernização tecnológica de alguns equipamentos. Um deles é o Sistema de Excitação, fundamental para o correto funcionamento do gerador. A utilização de tecnologia desenvolvida e fabricada no Brasil é uma opção interessante, tanto sob o aspecto técnico como econômico. Ferramentas que facilitem a operação e manutenção são desejáveis, garantindo menores períodos de unidade parada. Detalhes da modernização em um gerador de 411 MVA serão apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Termelétricas; Sistema de Excitação; Retrofit; Tecnologia Nacional.

1.0 INTRODUÇÃO

Esse Informe Técnico apresenta detalhes do projeto e comissionamento da recente implementação de um novo Sistema de Excitação modelo RTX POWER na máquina 07 da UTE Jorge Lacerda.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta dados sobre a Geração Térmica no Brasil e no Mundo. O capítulo 3 traz um resumo sobre o Complexo Jorge Lacerda. O capítulo 4 apresenta o conceito dos Sistemas de Excitação e suas partes. O capítulo 5 argumenta sobre a modernização de ativos. O capítulo 6 apresenta detalhes da modernização do equipamento. O capítulo 7 apresenta resultados do comissionamento. No capítulo 8 são apresentadas as conclusões.

2.0 GERAÇÃO TERMELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO

Mesmo em meio à renovação da matriz elétrica, atualmente as centrais térmicas representam um percentual considerável na geração de energia elétrica no mundo. Em países onde são escassas as fontes renováveis de energia como água, vento e sol, as centrais movidas a combustíveis fósseis seguem sendo de extrema importância para muitos países, colaborando fortemente para o controle primário de frequência e também no controle de tensão.

No Brasil, tendo em vista a Matriz de Energia Elétrica por fonte em 2023, de um total de 202GW de base instalada, o total de geração térmica representa atualmente cerca de 40GW, divididas em centrais a gás, a vapor, a combustível fóssil e a biomassa, o que corresponde a quase 20% da base instalada [1]. Vide Figura 1.

Funcionando como um “seguro do sistema elétrico”, as térmicas costumam ser despachadas de acordo com a necessidade, privilegiando fontes de menor custo operacional. Portanto, como exemplo, o despacho no dia 22/06/2023 estava com 12% de geração térmica, conforme Figura 2.

Ressalta-se que, em função da crise hídrica em 2021, as centrais termelétricas foram responsáveis por quase 29% da energia elétrica gerada no Brasil.

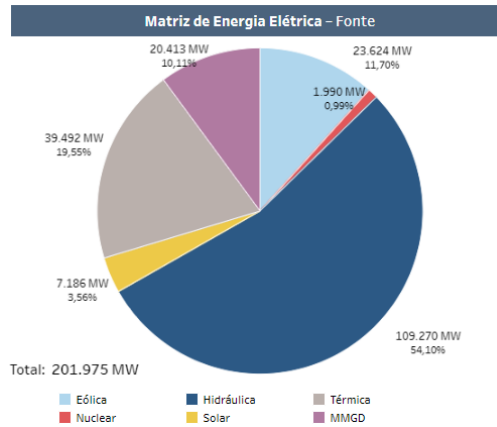


Figura 1: Matriz de Energia Elétrica Brasileira. Fonte: [1]



Figura 2: Carga e Geração no Brasil. Fonte: [2]

3.0 O COMPLEXO JORGE LACERDA

O Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda localiza-se no município de Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina. O nome é uma homenagem ao ex-governador catarinense Jorge Lacerda (1956-1958).

É considerado o maior complexo termoelétrico a carvão da América do Sul. Pode ser visto às margens da rodovia BR-101. Baseada em tecnologia alemã, tcheca e italiana, o complexo termoelétrico também contribuiu para outros ramos da atividade industrial, como o desenvolvimento da região carbonífera do estado de Santa Catarina, o incremento da Ferrovia Teresa Cristina, bem como na indústria cimenteira do sul do Brasil.

É constituído por sete grupos de geração, que estão agrupados em três usinas: Jorge Lacerda A (UTLA), com duas unidades geradoras de 50 MW cada e duas de 66 MW cada; Jorge Lacerda B (UTLB), com duas unidades de 131 MW cada; e a mais moderna, Jorge Lacerda C (UTLC), com uma unidade geradora de 363 MW.

O complexo é formado por três usinas térmicas a carvão, com potência total de 853 MW, construídas pela estatal Eletrosul, e foi privatizado em 1997. Em dezembro de 2020, a empresa ENGIE, seguindo uma política de descarbonização de seu portfólio, vendeu todo o complexo ao grupo Diamante Geração de Energia. [3]



Figura 3: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda. Fonte: [4]

A USINA TÉRMICA UTLC

Conforme já citado, a unidade geradora 07, presente na UTLC, é a mais recente do complexo termelétrico, e também a maior máquina. O gerador de 411,76 MVA foi fabricado pela empresa SKODA na República Tcheca, em 1988. A máquina primária é uma turbina a vapor composta por três etapas: alta, média e baixa pressão.

Na Figura 4 são apresentados uma visão geral do conjunto turbina-gerador, além dos dados de placa do gerador. Na Figura 5 é apresentada a curva de capacidade do gerador, para tensão terminal.



Figura 4: UG07 de Jorge Lacerda. a) Vista geral da turbina e gerador; b) Dados de Placa do Gerador da UG07.

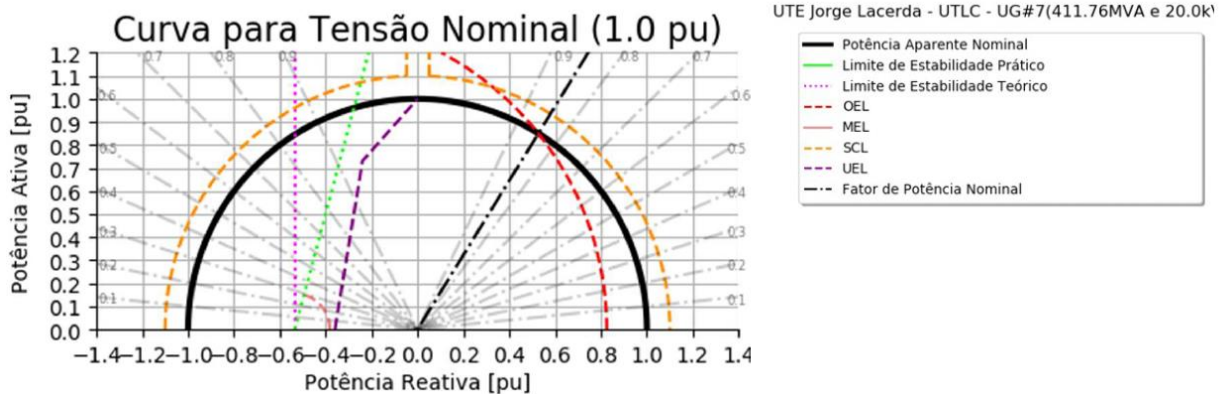


Figura 5: Curva de capacidade para tensão nominal. Fonte: [5]

4.0 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Um Sistema de Excitação é fundamental para a operação de qualquer máquina síncrona, inclusive em termelétricas.

Os principais elementos de um Sistema de Excitação Estático são: controlador programável, módulo de entradas e saídas, retificador de potência, contator de campo, sistema de proteção de sobretensão de campo (*crowbar*), resistor de descarga, e interface homem-máquina. Um diagrama unifilar de um Sistema de Excitação Estático típico é apresentado na Figura 6.

As redundâncias são definidas caso a caso. No caso da UTLC, o sistema de controle (CLP e IOs) é redundante (duplo canal), os retificadores são redundantes (3 pontes de tiristores totalmente controladas, cada um com seu sistema de geração de pulsos), além de redundâncias no sistema de ventilação, alimentação dos cubículos, dentre outras.

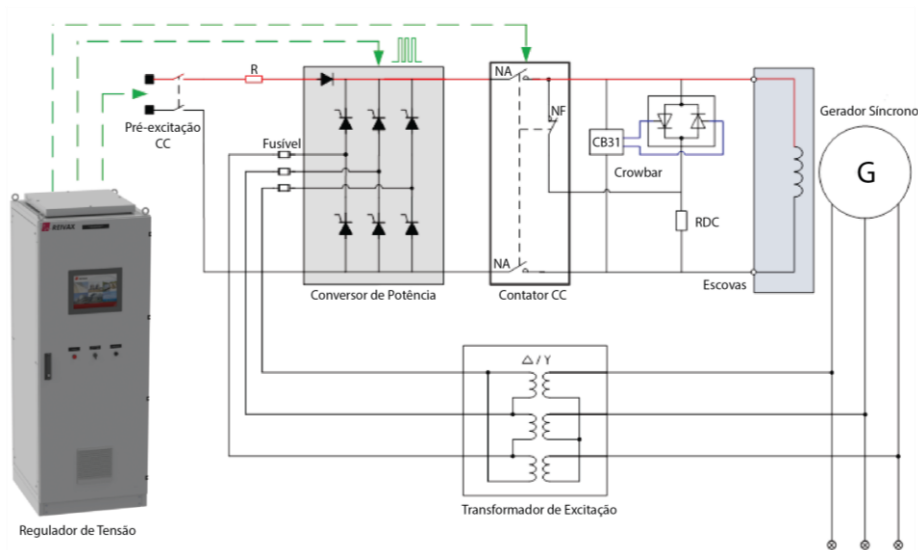


Figura 6: Diagrama unifilar de um Sistema de Excitação Estático típico. Fonte: [6]

5.0 MOTIVAÇÕES PARA A MODERNIZAÇÃO DE ATIVOS

São listadas a seguir as principais motivações para a substituição de antigos por novos equipamentos:

Obsolescência tecnológica:

- Indisponibilidade de peças sobressalentes novas. Quando disponíveis, apresentam custo elevado, proibitivo;
- Dificuldades na manutenção dos equipamentos existentes, por estarem baseados em componentes já obsoletos, fora de mercado. Risco de obtenção de peças compatíveis (usadas, remanufaturadas), sem garantia;
- Poucos especialistas naquela marca/modelo de equipamento disponíveis no mercado. Quando disponíveis, apresentam preço elevado, proibitivo;
- Incompatibilidade com conceitos modernos de Controle e Automação (oscilografia automática, protocolos de comunicação com sistemas supervisórios, ferramentas de apoio à manutenção, possibilidade de operação remota, dentre outros).

Evolução tecnológica:

- Ajuste padronizado em controladores de diferentes máquinas (o que não era possível em sistemas mecânicos e difícil de implementar em sistemas analógicos);
- Programação em diagramas de blocos (mais intuitivo);
- Possibilidade de acrescentar lógicas e controles, facilmente implementados em software;
- Melhoria no desempenho (respostas mais rápidas) em função da evolução da plataforma de hardware e software;
- Redução de consumo de energia do equipamento, por se tratar de elementos discretos (digitais);
- Otimização de custos com Equipes de Operação e Manutenção, exigindo menor quantidade de profissionais, mas com melhor formação/escolaridade;
- Ferramentas de apoio à Manutenção: telas de ensaios para disparo de tiristores; ferramenta de apoio ao ajuste do regulador de tensão; resposta em frequência para apoio ao ajuste do estabilizador; entre outras;
- IHM gráfica facilita o entendimento e traz segurança aos Operadores;
- Sequência de eventos (SOE) e oscilografia permitem diagnósticos mais precisos;
- Protocolos de comunicação garantem Operação remota com segurança;
- Ferramentas de segurança cibernética protegem contra ataques maliciosos;
- Prognóstico de falhas pode ser implementado a partir dos dados disponíveis.

Tendo isso em vista, por questões de obsolescência de componentes do Sistema de Excitação, após 15 anos de operação em média, se faz necessária uma atualização tecnológica, visando aumento da vida útil da central bem como melhoria do desempenho.

Em sistemas legados, que já operaram durante anos, é possível realizar uma modernização parcial. Nesse caso, são substituídas as partes de controle, como CLP, módulos de I/Os, IHM gráfica, gerador de pulsos de disparo, entre outros. Por conta de sua maior vida útil quando comparada à etapa de controle, a etapa de potência é mantida, composta por: tiristores, contator de campo, resistor de descarga, dentre outros. Tal modalidade representa uma

fração do custo de uma modernização total, bem como permite uma redução considerável no tempo de máquina parada, para instalação e comissionamento, evitando grandes perdas de receita.

A utilização de tecnologia desenvolvida e fabricada no Brasil se apresenta como uma solução interessante, tanto em aspectos técnicos como nos aspectos econômicos, garantindo suporte local sempre que necessário.

6.0 MODERNIZAÇÃO NA UTLC

Uma modernização de ativos costuma passar por diferentes etapas, envolvendo diferentes equipes. Resumidamente, o processo possui as seguintes etapas:

- Elaboração da especificação técnica do equipamento;
- Tomadas de preços;
- Contratação do fornecedor;
- Projeto básico: diagramas construtivos; funcionais elétricos; catálogos dos equipamentos utilizados;
- Projeto executivo: manual de operação e manutenção; funções de transferência; protocolos de comunicação;
- Projeto complementar: manual de montagem; relatório de comissionamento; treinamento.

O RTX POWER é composto pelos seguintes cubículos: contator de campo CC e descarga; controle; retificador 1; retificador 2; retificador 3; e contator de campo CA. Uma vista externa frontal do equipamento é apresentada na Figura 7. Uma vista interna frontal é apresentada na Figura 8. Fotos do painel instalado estão na Figura 9.

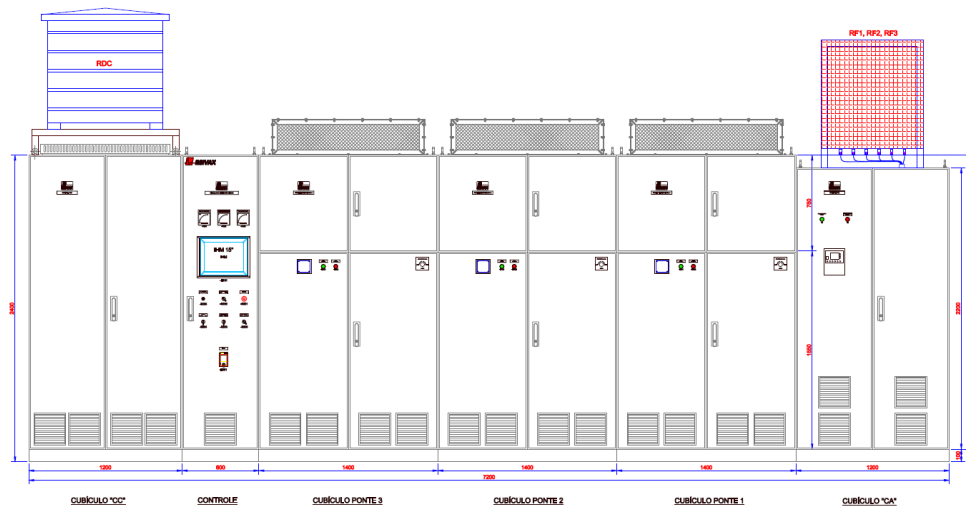


Figura 7: Vista externa frontal do RTX POWER. Fonte: [7]

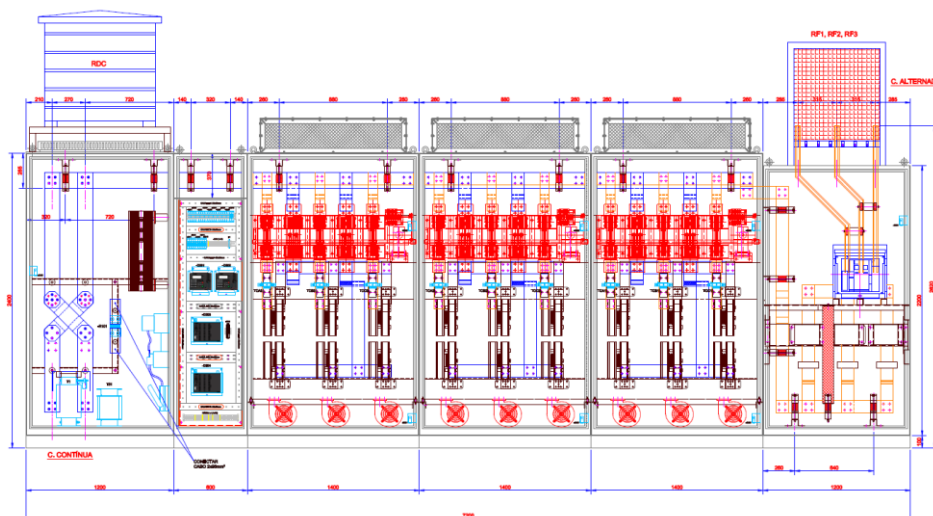


Figura 8: Vista interna frontal do RTX POWER. Fonte: [7]



Figura 9: Cubículo de controle do RTX POWER.

Após operar mais de 20 anos, o regulador de tensão RTX400 foi desativado. O cubículo de controle foi totalmente retirado do lugar, onde, no mesmo local, foram instaladas novas placas de montagem contendo o novo regulador RTX POWER. Nos cubículos das pontes de tiristores, foram instalados os novos circuitos de disparo, baseados no poderoso gerador de pulsos TTM01 [8]. Diferente do RTX400, que operava com a geração de pulsos de disparo baseados no sistema rampa-pedestal, através dos cartões DP20, formados pelo clássico integrado TCA-785, a TTM01 opera segundo a polarização cossenoidal, metodologia que garante maior velocidade de resposta, linearidade e robustez na geração de pulsos de disparo para os tiristores [9].

7.0 RESULTADOS DO COMISSIONAMENTO DO RTX POWER

Após a adequada instalação do RTX POWER, foram realizados todos os ensaios de comissionamento necessários para validar o correto funcionamento do sistema e suas redundâncias, bem como atendimento aos requisitos estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema através dos Procedimentos de Rede – submódulo 3.6 (atualizado pro submódulo 2.10) [10].

Como de praxe, a sequência de ensaios foi a seguinte:

- Ensaios com máquina parada, validando as conexões realizadas e o funcionamento do retificador tiristorizado foi o primeiro conjunto de ensaios;
- Ensaios em vazio, com máquina rodando mas fora do sistema, foram realizados, ajustando os limitadores dinâmicos, comutações de modo de controle e comutações de canal de controle;
- Ensaios em carga, com máquina conectada ao sistema, realizando testes de resposta ao degrau, ajuste dos limitadores, incluindo o ajuste do estabilizador de sistemas de potência.

Os resultados (de alguns) dos ensaios em vazio estão apresentados na Figura 10.

Os ensaios de resposta ao degrau em carga estão apresentados na Figura 11. Na figura 12 são apresentadas a tela de ensaio do estabilizador de sistemas de potência (do inglês PSS – *Power System Stabilizer*) bem como o diagrama de resposta em frequência obtida durante o ensaio.

Vale ressaltar que os modelos matemáticos do circuito de estabilização, limitadores dinâmicos e estabilizador de sistemas de potência tiveram os modelos matemáticos (funções transferência) validados com ensaios em campo, seguindo a exigência do ONS, usando a experiência da REIVAX em ensaios anteriores [11].

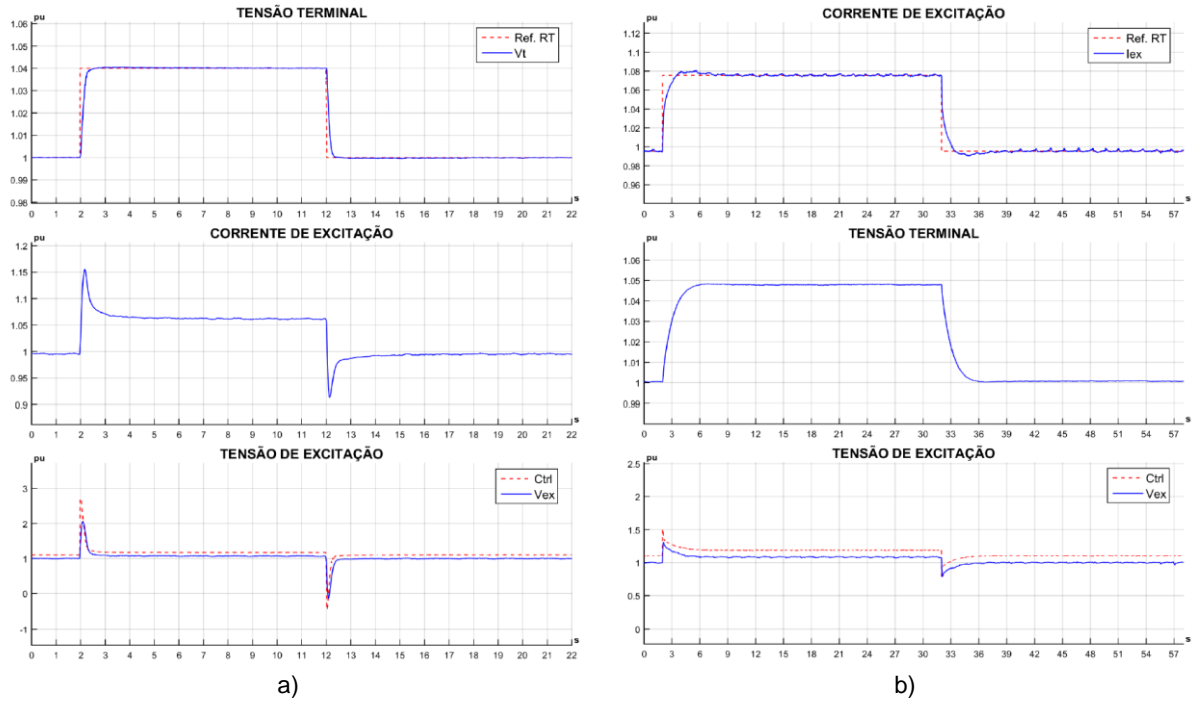


Figura 10: Resposta ao degrau em vazio. a) Modo automático; b) Modo Manual. Fonte: [5]

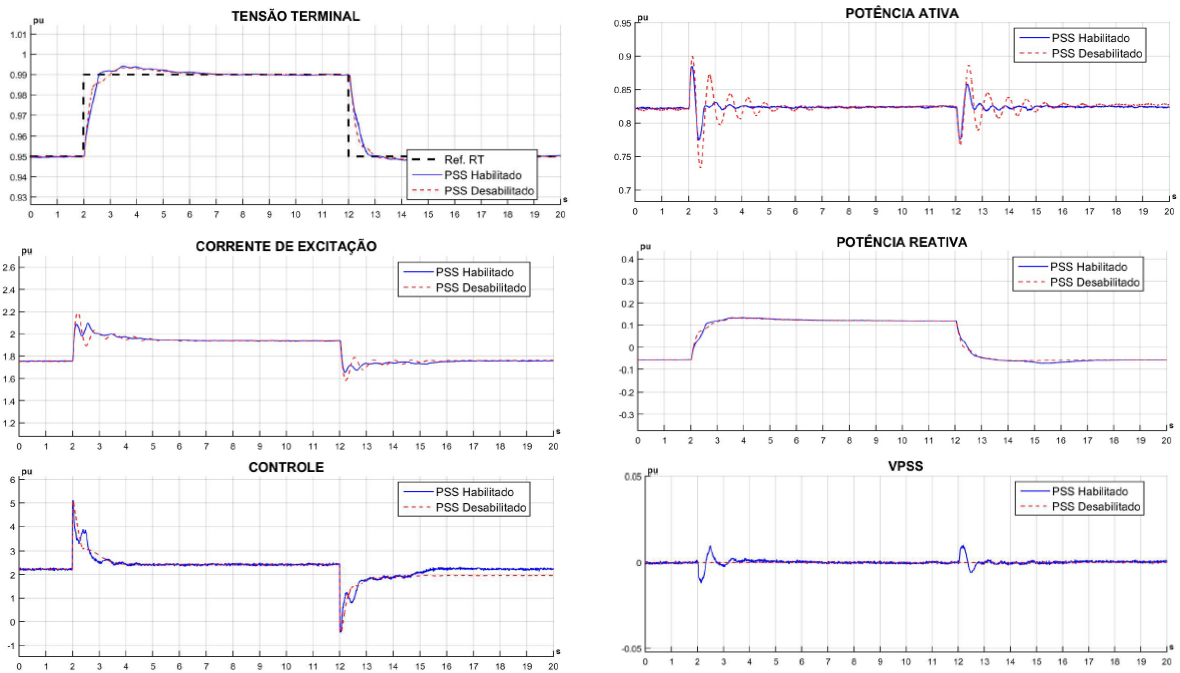


Figura 11: Ensaios em carga: degrau de tensão para ajuste do PSS. Fonte: [5]

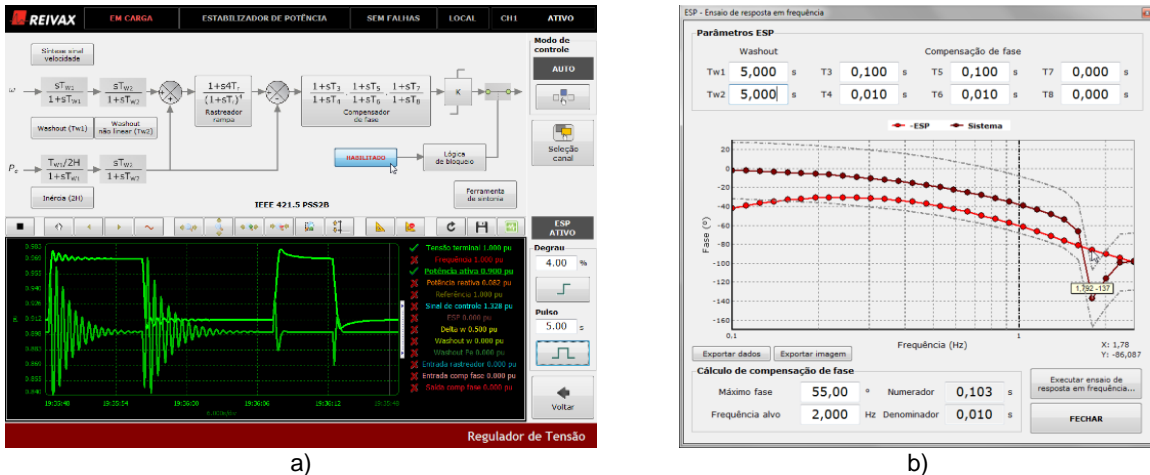


Figura 12: Ensaio de resposta em frequência do PSS. a) Tela de ensaio na IHM. b) Resultado do ensaio. Fonte: [6]

Foi realizado também ensaio de equalização de corrente entre pontes retificadoras operando em paralelo. O objetivo do ensaio é observar se o sistema de excitação distribui a corrente de campo total entre os retificadores habilitados, de maneira uniforme.

Esse processo se dá através de um algoritmo implementado no módulo TTM01, operando continuamente, independente da condição do RTX POWER (vazio e carga) bem como independente do modo de controle habilitado (tensão, corrente, reativo, fator de potência). Os resultados obtidos durante os ensaios estão apresentados na Figura 13. Mais detalhes sobre esse algoritmo podem ser obtidos na referência [12].

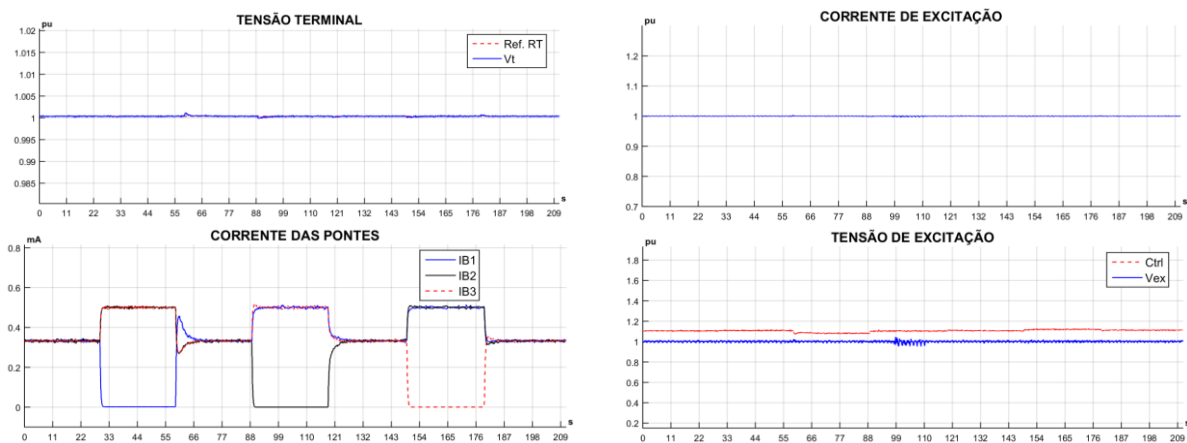


Figura 13: Algoritmo de equalização de corrente entre retificadores operando em paralelo. Fonte: [5]

Visando maior transparência na operação do equipamento, foi implementado sistema de supervisão das pontes de tiristores, no qual são monitoradas variáveis importantes do sistema: condução de corrente em cada tiristor e total do retificador; temperatura de cada tiristor; sistema de ventilação ativo/stand-by; fusível ok/queimado. Na Figura 14 é apresentada a tela de Monitoração de uma das pontes.

O RTX POWER foi programado para operar em uma condição especial, quando há perda de duas das três pontes retificadoras, evitando o *trip* da unidade. Essa condição degradada, conhecida na usina como "Run-back", quando atingida, provoca a redução do nível de carga da máquina, provocando inclusive uma limitação de operação em pontos de reativo menores (diminuição da curva de capacidade). Para mais informações sobre essa função, consultar a documentação do projeto (relé -K205 apresentado em [14]).

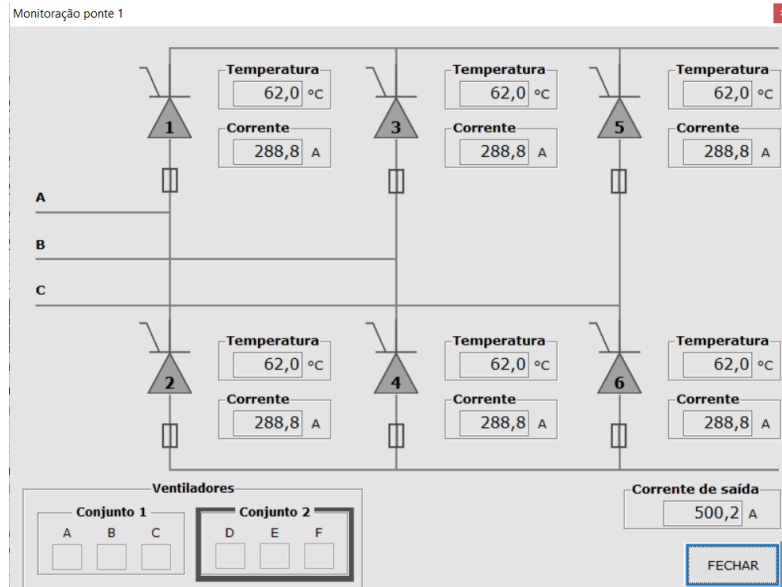


Figura 14: Tela de Supervisão de Pontes na IHM do RTX POWER. Fonte: [13]

8.0 CONCLUSÕES

A atualização tecnológica de ativos se faz necessária quando existe o risco de parada de máquina em função de falha nos equipamentos, principalmente quando não estão disponíveis peças sobressalentes. Caso isso ocorra, o tempo de máquina parada provoca grandes prejuízos pela energia não gerada.

Os diferentes componentes de uma central de geração possuem diferentes tempos de vida útil. Os equipamentos de controle e automação, recentemente, possuem vida útil entre 15 e 20 anos, em média. Dessa forma, os agentes de geração precisam programar a contratação de novos equipamentos com antecedência tal que evite riscos de longas paradas por falta de componentes.

O processo de modernização do Sistema de Excitação de um legado RTX400 pelo novo RTX POWER substituindo somente as partes de controle (CLP, módulos de I/Os, módulos de disparo, fontes, etc) foi uma opção interessante, já que reduziu sobremaneira o investimento no processo, bem como reduziu o tempo de máquina indisponível para a modernização.

Novas funcionalidades incorporadas ao novo equipamento trazem maior segurança aos operadores e mantenedores da planta, garantindo maior transparência e agilidade nos processos.

Conforme já apresentado em [15], a opção por tecnologia nacional incentiva a manutenção e incremento dos investimentos na Engenharia Nacional, gerando riqueza ao Brasil. Com equipamento certificado internacionalmente [16] e com atuação global, tendo profissionais de engenharia, pesquisa e desenvolvimento, suporte técnico, dentre outros, lotados no país, e no mesmo estado inclusive, garantem maior agilidade em todo o processo de modernização.

Respondendo à pergunta/provocação no título do trabalho “ainda existe espaço para evolução?”, afirmamos que existe sim espaço para evolução. Como já comentado, as ferramentas de apoio ao comissionamento, operação e manutenção são pontos relevantes. Funcionalidades de monitoramento, como temperatura e corrente das pontes de tiristores, trazem mais segurança à operação, bem como novos protocolos de comunicação possibilitam melhor interação com outros equipamentos e centralização dos dados da planta.

O equipamento foi comissionado no final do ano de 2020 e está em operação comercial desde então.

REFERÊNCIAS

- [1] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O Sistema em Números. Evolução da Capacidade Instalada do SIN – Junho2023/ Dezembro 2027**. Disponível pelo link: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>
- [2] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Energia Agora. Carga e Geração**. Disponível pelo link: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>
- [3] WIKIPEDIA - **Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda**. Disponível através do link: https://pt.wikipedia.org/wiki/Complexo_Termoel%C3%A9trico_Jorge_Lacerda
- [4] NDMAIS – **Foto do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda**. Disponível através do link: <https://static.ndmais.com.br/2021/02/engje-800x533.jpg>
- [5] REIVAX – **Relatório de Comissionamento do RTX POWER** do projeto F19031. Florianópolis, 2019.
- [6] REIVAX – **Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão para Máquinas Síncronas**. Webinar transmitido em 2020. Disponível através do link: <https://www.reivax.com/pt/webinars/sistemas-de-excitacao-e-reguladores-de-tensao-para-maquinas-sincronas/>
- [7] REIVAX – **Desenhos Construtivos do RTX POWER** do projeto F19031. Florianópolis, 2019.
- [8] REIVAX – **Manual do Usuário do módulo TTM01 – Triggering Thyristor Module**. Florianópolis, 2018.
- [9] WISBECK, T.T., CAMPOS, M.A.C., ZENI JR, NELSON. **Trigger Pulses Control in Thyristor Bridge using Digital Signal Processor**. VI INDUSCON, 2004. Joinville/SC/Brasil.
- [10] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede – Submódulo 2.10**. Disponível pelo link: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/S%C3%BAmodulo%202.10-RQ_2023.1.pdf
- [11] BÜHLER, C., PAIVA, R., SOARES, J.M.C., MANSO, L., PAIVA, P.M.P. **Importância da Validação dos Modelos dos Sistemas de Excitação com Ensaio de Campo para Estudos de Transitórios Eletromecânicos**. CIGRÉ SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu.
- [12] WISBECK, T.T., MENARIN, H.A., ZENI JR, N., KLITA, R.H., FENILI, M.P., GOSMANN, R.P., BÜHLER, C. **Active Current Equalization in Parallel Bridges of Static Excitation Rectifiers for Synchronous Generators**. Poster Session. IEEE PES GM. Atlanta, USA, 2019.
- [13] REIVAX – **Manual de Operação e Manutenção do RTX POWER** do projeto F19031. Florianópolis, 2019.
- [14] REIVAX – **Funcionais Elétricos do RTX POWER** do projeto F19031. Florianópolis, 2019.
- [15] GRZYBOWSKI JR, A.J., SANTOS, V.M.L., OLIVEIRA, E.G., RODRIGUES, O.M. **Modernização do Sistema de Excitação em uma Termelétrica a Ciclo Combinado Utilizando Tecnologia Nacional**. CIGRÉ SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu.
- [16] MENARIN, H.A., LIMA, L., SOARES, J.M.C., MUSSATO, R., KLITA, R.H. **Avaliação Independente do Desempenho de Sistemas de Excitação baseado em Testes em Tempo Real**. CIGRÉ SNPTEE, 2013, Brasília.

DADOS BIOGRÁFICOS

(1) CRISTIANO BÜHLER

Cursou Engenharia Elétrica (UFSC, 2006), Mestrado em Sistemas de Potência (UFSC, 2015-incompleto), MBA em Gestão Empresarial (FGV, 2019) e Gestão da Tecnologia - Roadmap&Development (MIT Professional Education, 2023). Atua na REIVAX desde 2006 com teste e comissionamento de controladores, realizou estudos de modelagem de máquinas e controladores, projetou equipamentos e ministrou treinamentos para profissionais de mais de 20 países. Atualmente atua como Gestor dos Produtos REIVAX, coordena projetos de P&D&I, e colabora com a área de Energia Solar da empresa. É membro do IEEE e do CIGRÉ.

(2) ALÉCIO GRZYBOWSKI JR.

Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal do Paraná. Desde 2006 atua na área de sistemas de regulação, proteção e automação de centrais de geração. Em 2010 integrou-se à equipe de Projeto Elétrico da REIVAX S/A, onde até hoje desenvolve soluções de aplicação para centrais hidrelétricas, térmicas e subestações (compensadores síncronos) para o mercado global.

(3) GILBERTO DAGOSTIM UGGIONI

Engenheiro Eletricista da DIAMANTE GERAÇÃO DE ENERGIA desde 2021 e TRACTEBEL ENERGIA/ENGIE BRASIL ENERGIA entre 2012 e 2020, atuando nas áreas: manutenção, projetos e comissionamentos de sistemas de excitação, sistemas de proteção e sistemas de alimentação segura CA e CC; ensaios de campo e validação de modelos matemáticos de controladores e parâmetros de máquinas síncronas. Graduado em Engenharia Elétrica em 2011 pela SATC - Sociedade de Assistência aos Trabalhadores de Carvão.

(4) CLAITON ALCIDES MARCOS

Chefe de equipe de manutenção elétrica da MANT DIAMANTE GERAÇÃO DE ENERGIA, desde 1989 atuou nas áreas de manutenção elétrica e equipamentos das usinas tais como; proteção de média e baixa tensão, alimentadores, regulador de tensão, manutenção e ensaios de gerador, transformadores e motores de baixa e média tensão. Formação técnica em Eletrotécnica pela ETFSC / Florianópolis – SC.

(5) ANDRÉ SCHONARDIE PASQUAL

Gerente de Engenharia e Manutenção da DIAMANTE GERAÇÃO DE ENERGIA desde 2022, Engenheiro Eletricista da TRACTEBEL ENERGIA/ENGIE BRASIL ENERGIA entre 2008 e 2021, Especialista em manutenção, projetos e comissionamentos de Turbogeneradores e motores de grande porte, sistemas de excitação, análise de novos projetos e ativos de geração de energia. Graduado em Engenharia Elétrica em 2006 pela Unioeste - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

(6) ANDRÉ MARTINS DE OLIVEIRA

Coordenador de manutenção elétrica da DIAMANTE GERAÇÃO DE ENERGIA desde 2001 atuou nas áreas de laboratório de manutenção eletroeletrônica, eletrônica de potência (retificadores/nobreak/inversores), calibração e manutenção de sistemas de medição e faturamento SMF, manutenção preventiva/corretiva de equipamentos elétricos das usinas e proteção de baixa e média tensão. Bacharel em Engenharia Elétrica pela UNISATC / Criciúma - SC.