

## **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

### **MODERNIZAÇÃO DOS CONTROLADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE DA HIDRELÉTRICA COARACY NUNES**

**PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA(1); CRISTIANO BÜHLER(2); JORGE PELAES DANTAS(1);  
VALTER CIRINO DE CARVALHO JUNIOR(2); ANDRÉ DE SOUZA(2);  
CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S/A(1); REIVAX S/A AUTOMACAO E CONTROLE(2)**

#### **RESUMO**

A modernização de equipamentos em centrais hidrelétricas é um tema conhecido por todas as empresas de geração. Os ensaios de comissionamento costumam trazer desafios adicionais aos profissionais envolvidos. Um blackout regional, mantendo praticamente todo um estado às escuras por dias, não é desejável. Diante desse cenário, o tempo de máquina parada para comissionamento de um novo RTVX POWER precisou ser reduzido de 20 para 9 dias, visando retornar unidade geradora CNUGH-02 para atender a população local. Além disso, o trabalho apresenta validação dos modelos matemáticos através de ensaios em campo e os pontos observados pelo ONS visando maior robustez no RTVX.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Modernização – Usinas Hidrelétricas – Regulador de Velocidade – Regulador de Tensão – Regulador Integrado – Blackout

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

Esse Informe Técnico apresenta detalhes da implementação de um novo regulador integrado modelo RTVX POWER na UHE Coaracy Nunes em meio à um apagão regional.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta um resgate histórico sobre o sistema elétrico no estado do Amapá, sua interligação ao Sistema Interligado Nacional, e sobre a Usina Coaracy Nunes. O capítulo 3 apresenta um resumo do conceito de gestão antecipada para modernização de equipamentos. O capítulo 4 apresenta detalhes do projeto de modernização dos reguladores. O capítulo 5 apresenta resultados do comissionamento, e o capítulo 6 apresenta as conclusões.

#### **2.0 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA**

##### **A Usina [1]**

A usina hidrelétrica Coaracy Nunes é uma central hidrelétrica localizada no estado do Amapá, Brasil, cerca de 15 km distante de Ferreira Gomes e a 150 km de Macapá. Sua potência total é de 78 MW.

Esta usina utiliza o potencial hídrico do rio Araguari, e vem gerando energia para o estado desde 1975. Os primeiros estudos direcionados para a construção de uma usina hidrelétrica no rio Araguari, datam da década de 1950, porém, somente ao fim da década de 1960, estudos detalhados do projeto permitiram a viabilização da implantação da usina.

Em 27 de dezembro de 1967 foi aprovado o relatório de ensaio de modelo em escala reduzida. Tal estudo permitiu a aquisição inicial de duas turbinas Kaplan de eixo vertical de 20 MW cada, para queda de 23 m.

A ELETRONORTE S/A assumiu oficialmente a responsabilidade da usina desde a fase inicial de construção no início da década de 1970, concluindo as obras em 1975 que abrangeram os sistemas de geração e transmissão. Neste mesmo ano, as duas unidades geradoras foram colocadas em operação comercial. Prevendo o crescimento da demanda e considerando a hidrologia do rio Araguari, foi deixado pronto um bloco de concreto de primeiro estágio com as mesmas dimensões dos blocos das unidades em operação, para que, no futuro, fosse instalada mais uma

unidade geradora. Desde 1975, esta unidade opera em conjunto com o parque térmico de Macapá, passando a ser um sistema hidrotérmico isolado.

A expansão crescente e contínua do consumo de energia elétrica no estado do Amapá, da ordem de 10,5% ao ano, levou a ELETRONORTE S/A a assinar um contrato para o fornecimento da terceira unidade hidrogeradora dotada de turbina Kaplan, entrando em funcionamento em abril de 2000.

A Figura 1 apresenta um mapa do Sistema Interligado Nacional - horizonte 2024. Perceber o estado do Amapá no extremo norte do Brasil, estando a UHE Coaracy Nunes a 150 Km da cidade de Macapá.

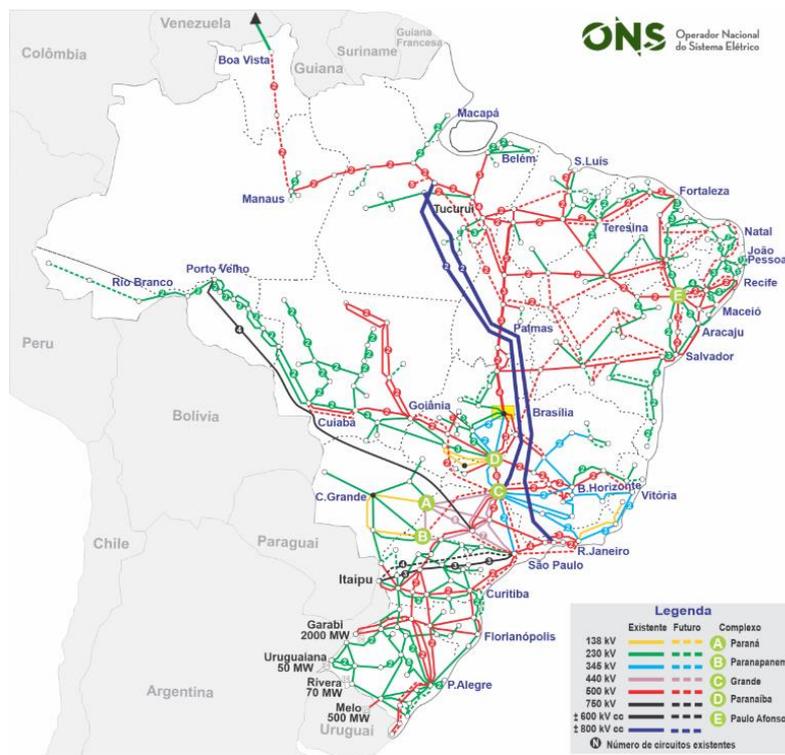


Figura 1: Mapa do Sistema Interligado Nacional - Horizonte 2024. Fonte: [2].

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentadas fotos da usina.



Figura 2: Vista geral da UHE - Vista externa da barragem. Fonte: ELETRONORTE.



Figura 3: Vista geral da UHE – Vista interna da casa de força (a e b). Fonte: ELETRONORTE.

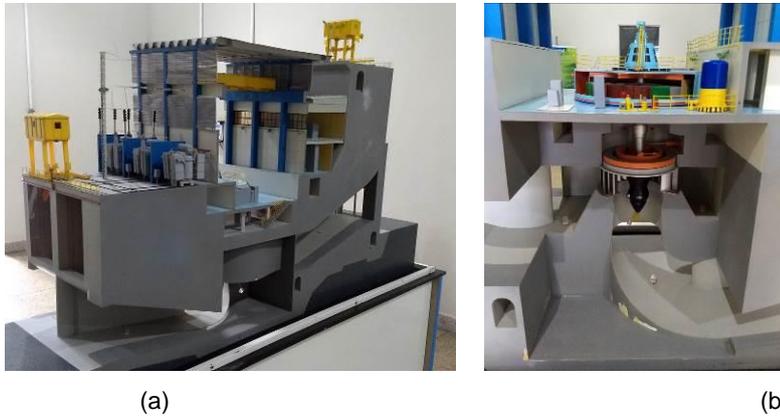


Figura 4: Visão geral da UHE: (a) Maquete da UHE; (b) Maquete com detalhes das UGs. Fonte: ELETRONORTE.

### Interligação do Amapá ao SIN

Após operar por décadas de forma isolada, em março de 2015 o Amapá foi conectado ao Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica (SIN), a partir da linha de transmissão Tucuruí-Macapá-Manaus, que permite a ligação dos estados do Amazonas, Amapá e oeste do Pará.

Com aproximadamente 1.800 quilômetros de extensão total em tensões de 500 e 230 kV em circuito duplo, ela passa por trechos de florestas e atravessa o rio Amazonas. A Figura 5 apresenta um digrama unifilar do sistema.



Figura 5: Sistema elétrico do Amapá, Amazonas, Maranhão, Pará, Roraima e Tocantins. Fonte: [3].

A primeira das três linhas de transmissão em 69kV, que interliga a Subestação Isolux Macapá foi energizada na tarde do domingo, dia primeiro, pela companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) e ELETROBRAS ELETRONORTE. De acordo com a diretoria Executiva da CEA, as outras duas linhas (Isolux Macapá a Macapá II) foram entregues na sequência, nos dias 15 e 29 de março, quando o sistema da Companhia de Eletricidade ficou totalmente conectado ao Sistema Interligado Nacional, incluindo a Subestação CEA-Laranjal do Jari que fica localizada no município do mesmo nome.

As obras de conexão do Sistema CEA com o Sistema Nacional trouxeram melhorias na qualidade da energia elétrica ao Amapá, que passou a dispor de energia firme, contínua e de qualidade, eliminando sua dependência de usinas térmicas movidas a óleo diesel.

### **Apagão em novembro de 2020**

No dia 03 de novembro de 2020 um incêndio destruiu o transformador que levava luz à maior parte da população do estado do Amapá (vide Figura 6). A falta de energia afetou o abastecimento de água, a compra e armazenamento de alimentos, serviços de telefonia e internet, entre outros. Quase 90% da população (cerca de 765 mil pessoas) foi afetada.

Treze das dezesseis cidades do estado ficaram no escuro. Após forte chuva, houve uma explosão seguida de incêndio que comprometeu os dois transformadores na mais importante subestação do estado, que fica em Macapá.



Figura 6: Transformador que sofreu incêndio em subestação do Amapá. Fonte: [4].

Como medida paliativa, no dia 16 de novembro chegaram ao Amapá balsas com geradores termelétricos - movidos à combustível - para instalação em subestações de Macapá e Santana. Os equipamentos buscam aumentar e atingir 100% da capacidade de fornecimento de energia ao estado. Para garantir o abastecimento com segurança, foi necessária a instalação de um segundo transformador na subestação que pegou fogo em Macapá e causou o apagão. O transformador, que pesa cerca de 100 toneladas, começou a ser transportado de Laranjal do Jari, no sul do estado, numa operação logística que envolveu balsas e caminhões.

Após 2 blecautes totais e 22 dias de fornecimento em rodízio, a energia foi restabelecida no estado [4]. Antes do blackout havia acabado de iniciar a modernização do RTVX POWER integrado da unidade CNUGH-02 (manutenção programada), como a UHCN tem duas linhas de transmissão de 138KV direto para a subestação Santana (independente da subestação de interligação com o SIN), o retorno da unidade o mais rápido possível foi primordial para enfrentar os desafios da falta de energia.

### **3.0 GESTÃO ANTECIPADA APLICADA AOS NOVOS EQUIPAMENTOS**

A partir da experiência das equipes de manutenção e operação, dados históricos de falhas e melhorias já implementadas, elaborou-se o projeto e especificação técnica para aquisição de Reguladores de Velocidade e Reguladores de Tensão onde o objetivo principal foi a instalação de um equipamento com alto desempenho, confiabilidade e manutenibilidade, além de um baixo custo do ciclo de vida.

Dessa forma, a aplicação do processo de gestão antecipada [5] proporciona a prevenção da manutenção, com falha zero e com elevado tempo de vida útil. O resultado alcançado atingiu os objetivos do projeto, pois obteve-se partida vertical do equipamento, com falha zero desde a sua instalação até a presente data.

Para alcançar este desempenho, na especificação técnica da modernização do equipamento foram exigidas as seguintes condições especiais de fornecimento: apresentação do estudo do custo do ciclo de vida do equipamento (*Life Cycle Cost*); índice de disponibilidade operacional de 99%; cronograma detalhado de execução das etapas de projeto, construção e montagem, comissionamento e operação; para os principais componentes do equipamento fornecer FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*); fornecer a árvore de falhas detalhada do equipamento; fornecer estatística de falhas do equipamento de fornecimento a outras empresas. Todas estas exigências foram submetidas à aprovação da ELETROBRAS ELETRONORTE.

Além disso, a garantia sobre material e serviço, deverá ser de 05 (cinco) anos e de fornecimento de peças do sistema de controle como cartelas, CPUs, entre outros, que compõem o equipamento, por 10 (dez) anos, contados a partir da data de entrada em operação comercial. A contagem do tempo de garantia só terá início depois de sanadas todas as não conformidades identificadas no equipamento e com a emissão do certificado de aceitação definitiva.

Após o comissionamento foram registrados quatro Relatórios de Não Conformidade (RNC), os quais não comprometem o funcionamento do equipamento.

#### 4.0 MODERNIZAÇÃO DOS REGULADORES

A ELETROBRAS ELETRONORTE licitou a modernização dos Reguladores de Velocidade e Reguladores de Tensão. Após disputa técnica e comercial, a REIVAX foi adjudicada. Foi realizado levantamento de campo, no qual foram obtidos os dados das unidades geradoras. Vide Figuras 7 e 8.

GERADOR DE CORRENTE ALTERNADA					
TIPO	VTFKW	MODELO	RD	CÓDIGO	ASA G50.1 (1955)
K V A	25.300	R.P.M.	138.5	FASES	3
VOLTS	13.200	AMP'S	1106.6	FREQUÊNCIA	60 Hz
F.P.	0.95	CORRENTE EXCITAÇÃO			865 A
ELEVAÇÃO TEMPERATURA ESTATOR	70 K	ELEVAÇÃO TEMPERATURA ROTOR	70 K		
MFG. N°	1.07.143 - 2	DATA RECAPACITAÇÃO			2.004
TURBINA HIDRÁULICA					
TIPO	V K	MODELO		VAZÃO TURBINADA	
QUEDA EFETIVA		POTÊNCIA SAÍDA			
M A X.	22.81 m	24.000 kw		112.32 m <sup>3</sup> /s	
N O R.	21.00 m	23.080 kw		118.18 m <sup>3</sup> /s	
M I N.	18.70 m	20.920 kw		120.93 m <sup>3</sup> /s	
R.P.M.	138.5	CÓDIGO	JEC-TS1 (1980)		
MFG. N°	141849 - 1	DATA RECAPACITAÇÃO			2.004

Figura 7: Dados de uma das Unidades Geradoras. Fonte: ELETRONORTE.

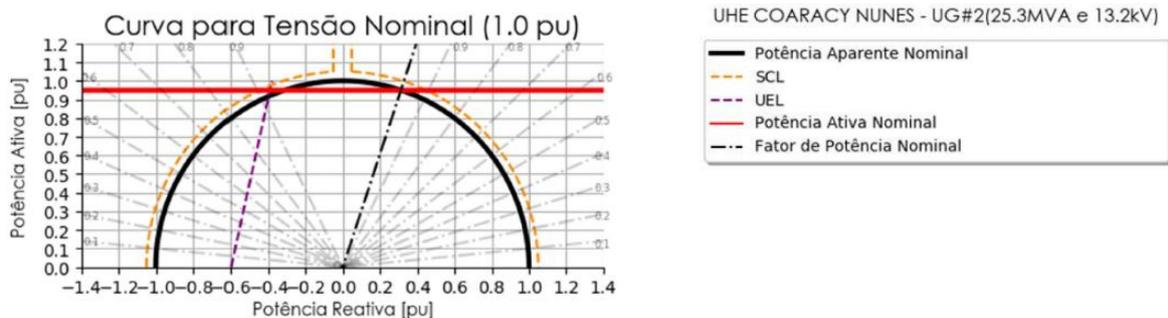


Figura 8: Curva de Capacidade. Fonte: [6].

Foi então proposta uma modernização parcial por um novo Sistema Integrado de Regulação de Tensão e Velocidade, modelo RTVX POWER, mantendo elementos antigos, como as pontes de tiristores, o contator de campo e unidade hidráulica.

Os equipamentos instalados são mostrados nas Figuras 9 e 10.



Figura 9: Visão geral do RTVX POWER: a) Painel de controle (vista externa); b) Painel de controle (vista interna).  
Fonte: ELETRONORTE.

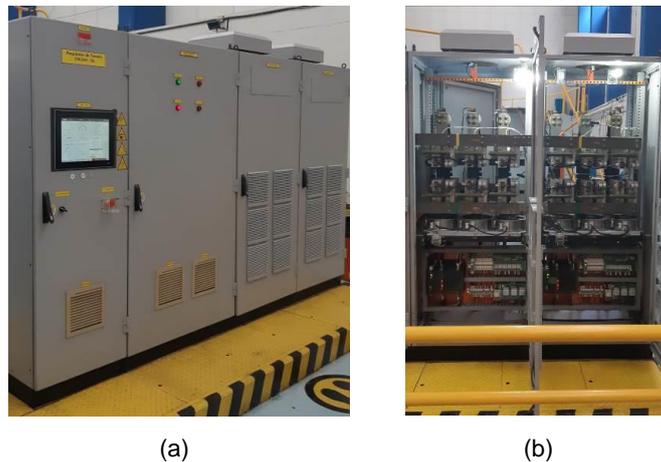


Figura 10: Visão geral do RTVX POWER: a) Painel de potência (vista externa); b) Painel de potência (vista interna).  
Fonte: ELETRONORTE.

## 5.0 COMISSIONAMENTO DO RTVX POWER

Tipicamente o comissionamento de um novo regulador demanda ensaio em três etapas: ensaios em água morta, ensaios em vazio e ensaios em carga.

Além das lógicas de controle, comunicação e tantas outras funcionalidades, um sistema de aquisição de dados incorporado ao regulador traz inúmeros benefícios ao comissionador e também às equipes de manutenção da usina. Tal aquisitor pode operar de forma automática, a partir de gatilhos (fechamento/abertura do 52, etc) ou de forma manual, como no REIVAX SEC Online.

Sinais de potência, tensão, distribuidor, etc, são salvos com taxa de amostragem de até 1ms, através do SEC, e manipulados posteriormente pelo REIVAX SVC, visando elaboração de relatórios, etc. (Pode ser entendido como um exame médico, apoiando a decisão do profissional de saúde quanto ao tratamento a ser prescrito ao doente.)

Tal sistema de aquisição de dados não é comum em implementações baseadas em CLP de mercado, trazendo algumas dificuldades tanto durante o comissionamento como posteriormente na Operação e Manutenção da unidade geradora.

Durante os ensaios, foram coletadas as oscilografias apresentadas a seguir através da ferramenta REIVAX SEC. Na Figura 11 são apresentados os registros dos ensaios em água morta. Na Figura 12 são apresentados os registros dos ensaios em vazio e em carga.

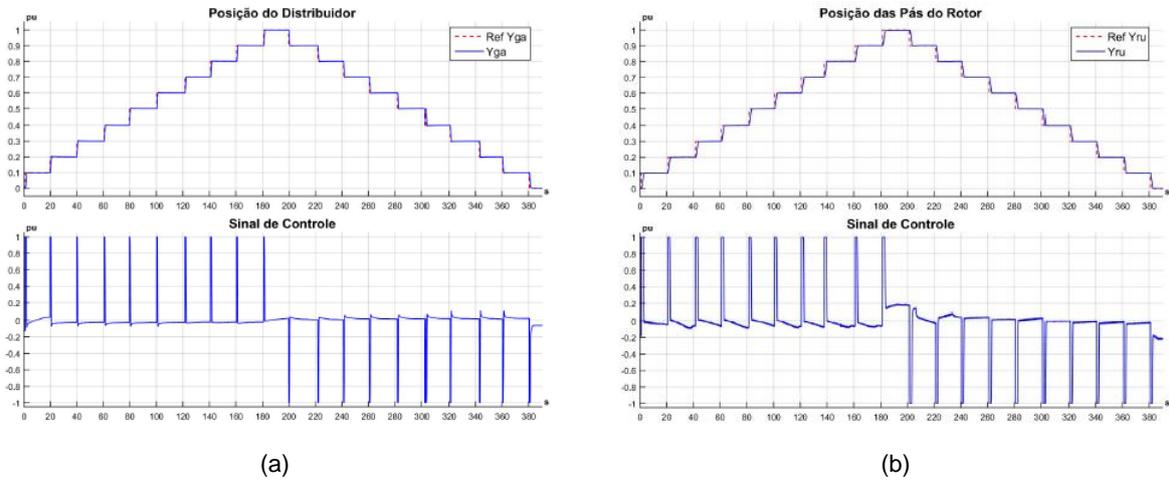


Figura 11: Ensaio em água morta. Degrau na referência: a) do distribuidor; b) das pás Kaplan. Fonte: [6].

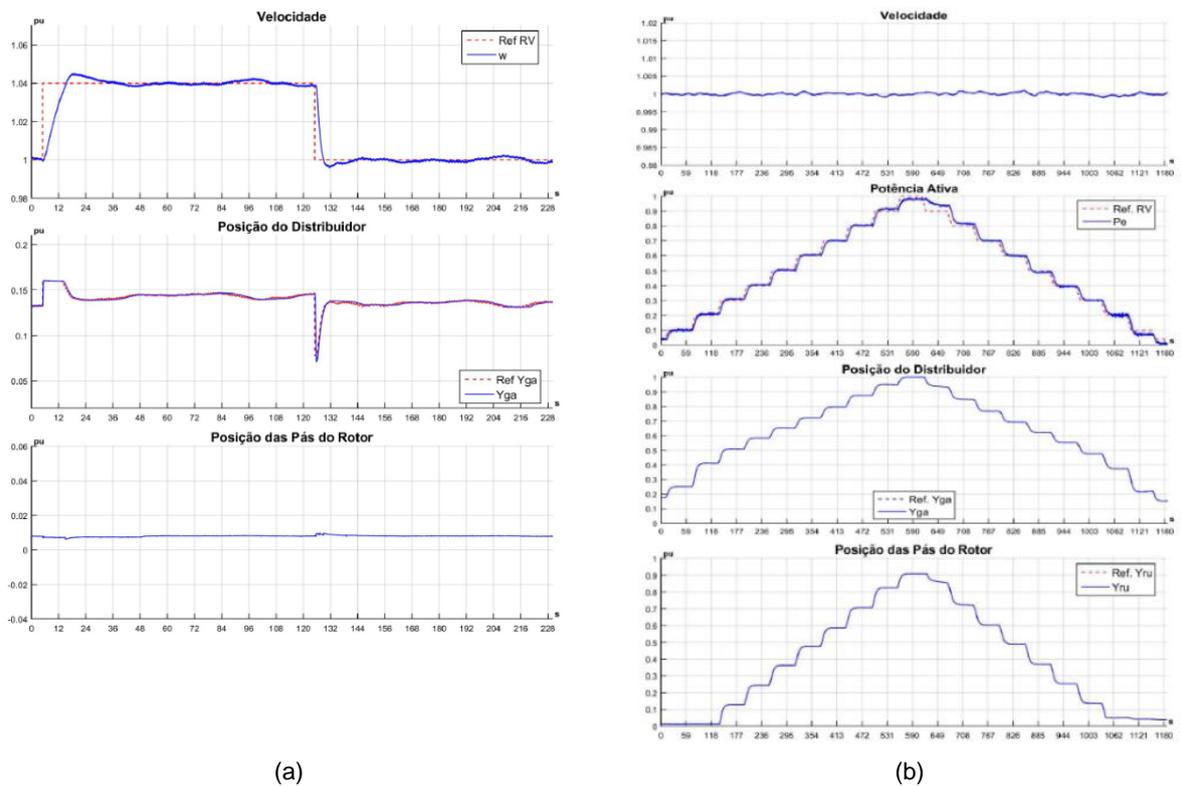


Figura 12: Ensaio em vazio e em carga. a) Degrau na referência de  $W_b$  b) Tomada gradativa de carga. Fonte: [6]

Visando o ajuste ótimo do regulador de velocidade, foi realizado o ensaio de Rede Isolada Simulada. Baseado nas normas [7] e [8], garante um ajuste adequado do RV para diferentes condições de operação: uma máquina atendendo uma carga ou um conjunto de cargas; um conjunto de máquinas (uma usina) atendendo uma carga ou um conjunto de cargas; ou a máquina operando interligada a um grande sistema elétrico de potência (SIN).

A REIVAX atualmente dispõe dessa funcionalidade já implementada em software, com acesso pela IHM, facilitando a realização do ensaio. Durante os ensaios, foram coletadas as oscilografias apresentadas na Figura 13.

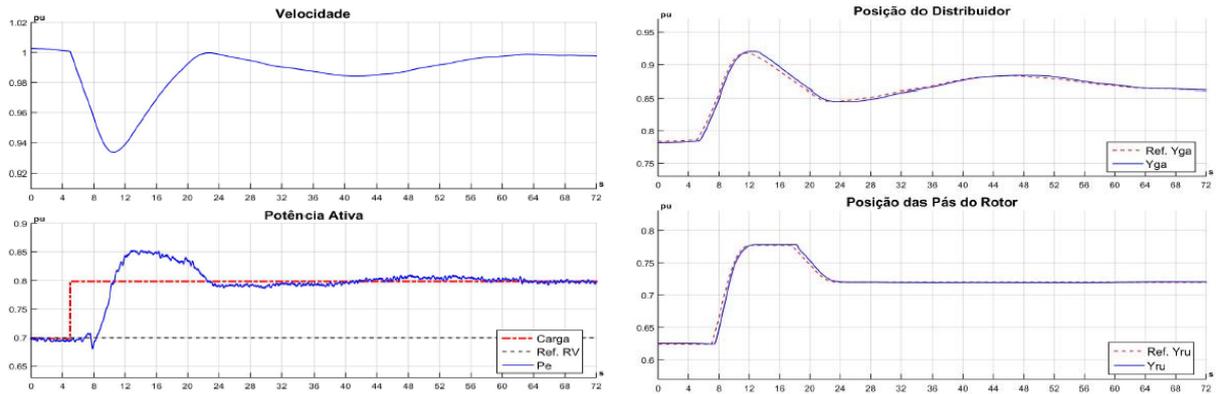


Figura 13: Ensaio em carga: Resposta ao Degrau em Rede Isolada Simulada. Fonte: [6]

No futuro, poderá ser realizado esse mesmo ensaio, mas com duas máquinas operando em paralelo, conforme apresentado em [9].

O sistema integrado RTVX POWER possui também todas as lógicas de controle de um Sistema de Excitação. Portanto, foram realizados todos os ensaios necessários visando o correto e seguro funcionamento do mesmo.

Durante os diversos ensaios, foram coletadas as oscilografias referentes ao ajuste do Estabilizador de Sistemas de Potência, apresentadas na Figura 14.

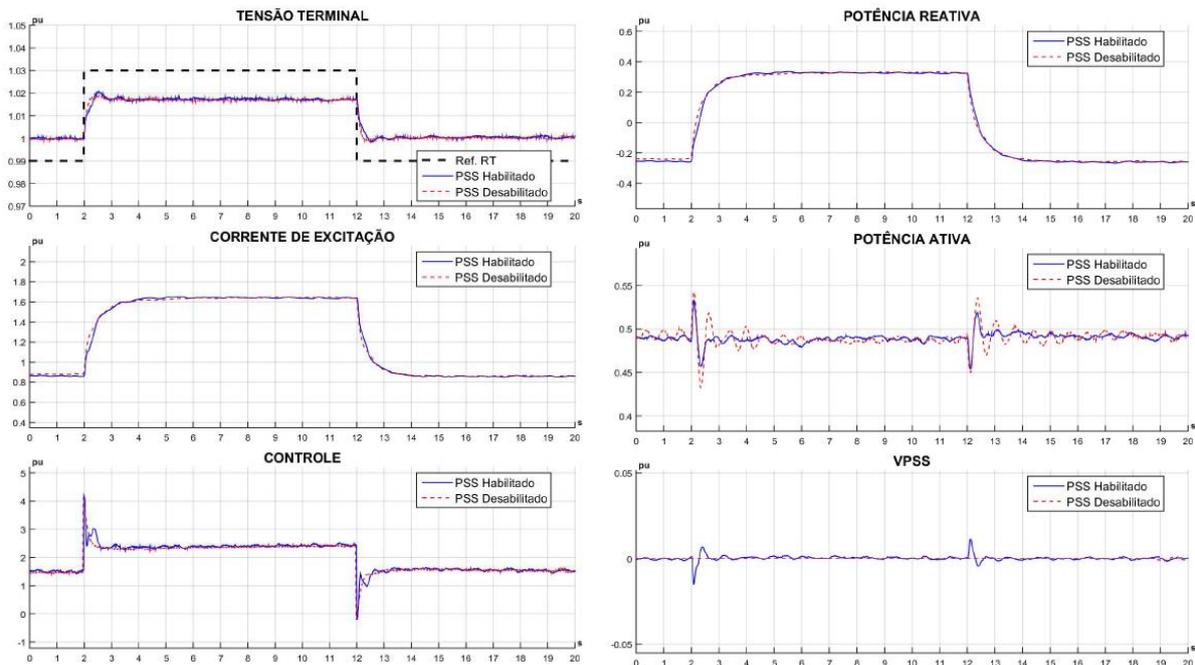


Figura 14: Ensaio em carga do RT: Resposta ao Degrau do Estabilizador de Sistemas de Potência. Fonte: [6]

Após o comissionamento dos controladores, foram realizados ensaios visando a validação dos modelos matemáticos do gerador, turbina, regulador de velocidade e regulador de tensão.

Tendo em vista a importância da validação de modelos através de ensaios em campo, conforme defendido em [10] e [11], foram realizados ensaios complementares visando coletar as curvas necessária para a citada validação.

As simulações na ferramenta CEPEL ANATEM foram realizadas posteriormente, em fábrica, quando foram comparados os sinais gerados por simulações com os ensaios de campo, garantindo melhor aderência dos modelos aos sistemas físicos/reais. Tais resultados compõe o Relatório de Comissionamento padrão ONS.

## 6.0 CONCLUSÕES

A partir da experiência das equipes de manutenção e operação da ELETRONORTE, dados históricos de falhas e melhorias já implementadas, elaborou-se o projeto e especificação técnica para aquisição onde o objetivo principal foi a instalação de um equipamento com alto desempenho, confiabilidade e manutenibilidade, além de um baixo custo do ciclo de vida. Dessa forma, a aplicação do processo de gestão antecipada previne necessidade de manutenção, buscando falha zero no equipamento e elevada vida útil.

O comissionamento de novos equipamentos sempre traz desafios, mas no caso aqui apresentado, os desafios foram ainda maiores. Segundo relato dos profissionais que estavam na usina Coaracy Nunes realizando o comissionamento, na cidade onde estavam hospedados não havia energia elétrica, e foi necessário se alimentar de enlatados, visando garantir a segurança alimentar. Ainda por falta de energia elétrica no hotel, foi necessário tomar banho frio durante alguns dias. E como não havia bombeamento de água para o reservatório superior, obrigou os profissionais a tomar banho no próprio rio. Transtornos durante a noite em função do calor característico da região, além da presença de mosquitos nos quartos, foram enfrentados pelos profissionais também. Os sistemas de telefone e internet foram também afetados, limitando a comunicação dos profissionais com as empresas e suas famílias durante aquele período, naquela região.

Diante desse cenário, num contexto ainda mais complexo do que o normalmente enfrentado nas modernizações em usinas, visando reduzir o tempo de máquina parada, foi necessário um esforço extra das equipes envolvidas. Com muita garra e profissionalismo, os engenheiros e técnicos conseguiram reduzir o tempo total de instalação e comissionamento de 20 para 9 dias, entregando a máquina para operação comercial, sem restrições.

## REFERENCIAS

- [1] WIKIPEDIA. **Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes**. Disponível através do link: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina\\_Hidrel%C3%A9trica\\_Coaracy\\_Nunes](https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_Coaracy_Nunes)
- [2] ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapa do Sistema Interligado Nacional – Horizonte 2024**. Disponível pelo link: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>
- [3] EPE. **Estudo para Expansão da Transmissão. Diagnóstico Regional da Rede Elétrica – PDE 2030. Volume I – GET Norte**. Ministério de Minas e Energia. Abril de 2021. Disponível no link: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/ArquivosGrupoEstudosTransmissao/EPE-DEE-RE-027-2021-rev0%20-%20Diagnostico-GET%20Norte.pdf>
- [4] GLOBO. **Apagão no Amapá**. Disponível pelo link: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/18/apagao-no-amapa-veja-a-cronologia-da-crise-de-energia-eletrica.ghtml>
- [5] VILHENA, P. R. M.; RODRIGUES, B. G. D. **A Importância da Gestão Antecipada na Melhoria Contínua do Processo de Aquisição de Novos Equipamentos**. In: XVII Encontro Regional Iberoamericano Del Cigre, 2017, Del Este. CE-A1 Máquinas Rotativas, 2017.
- [6] REIVAX – **Relatório de Comissionamento do RTVX POWER** do projeto F19032. Florianópolis, 2021.
- [7] IEC 60308-2005 – **Hydraulic Turbines – Testing of control systems**. CEI/IEC 60308:2005. Suíça.
- [8] IEEE STD 1207-2011, **IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydro Generating Units**. EUA.
- [9] BÜHLER, C., PAIVA, R.B., SANTOS, A.F.S., JUNIOR, S.A.A. **Método Inovador na Avaliação do Controle Primário de Frequência Aplicando Rede Isolada Simulada em Duas Máquinas Simultaneamente: Estudo de Caso na UHE Santo Antonio**. XXVI SNPTEE. Rio de Janeiro, 2022.
- [10] BÜHLER, C., PAIVA, R., SOARES, J.M.C., MANSO, L., PAIVA, P.M.P. **Importância da Validação dos Modelos dos Sistemas de Excitação com Ensaios de Campo para Estudos de Transitórios Eletromecânicos**. CIGRÉ SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu.
- [11] PAIVA, R., BÜHLER, C., SOARES, J.M.C., MANSO, L., PAIVA, P.M.P. **Importância da Validação dos Modelos Através de Ensaios em Campo para Estudos de Regulação Primária e Repotencialização em Usinas Hidrelétricas**. CIGRÉ SNPTEE, 2015, Foz do Iguaçu.

## DADOS BIOGRÁFICOS

### (1) PAULO ROBERTO MOUTINHO DE VILHENA

Possui graduação em Tecnologia em Informática pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (2002), graduação em Engenharia Elétrica (UFPA, 2005), especialização em Engenharia de Sistemas pelo Centro Universitário do Estado do Pará (2005), mestrado em Engenharia Elétrica (UFPA, 2008) e doutorado em Engenharia Elétrica (UFPA, 2015). Atualmente é engenheiro de manutenção elétrica da Centrais Elétricas do Norte do Brasil. Tem experiência na área de engenharia de manutenção elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: manutenção corretiva, preventiva e preditiva de hidrogeradores.

### (2) 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, colabora com a área de Energia Solar da empresa. É membro do IEEE e do CIGRÉ.

### (3) JORGE PELAES DANTAS

Formado Licenciatura Plena em Matemática- Universidade Federal do Amapá , Engenharia Elétrica- Universidade Federal do Amapá, Especialização em Engenharia Eletrica-Universidade Federal do Pará, Especialização em Ciencia da Computação-Universidade Federal de Santa Catarina, Mestrado em Engenharia Elétrica- Universidade Federal do Pará, atua na ELETRONORTE com estudos, projetos, especificação técnica e manutenção de equipamentos. Atualmente é gerente de departamento da coordenação técnica da geração hidráulica da Eletronorte.

### (4) VALTER CIRINO DE CARVALHO JUNIOR

Graduado em Engenharia Elétrica (UFSC, 2016), cursou as disciplinas do Mestrado em Controle de Sistema de Potência (UFSC, 2018). Desde 2018 atua como Engenheiro de Campo na REIVAX, realizando teste e comissionamento de Sistemas de Excitação, Reguladores de Velocidade e Sistemas de Automação.

### (5) ANDRÉ DE SOUZA

Projetista Elétrico de Sistemas de Excitação e Reguladores de Velocidade. Especializado em projetos elétricos, destaque para habilidade em modernizar e aprimorar os sistemas existentes, proporcionando maior eficiência e confiabilidade para as usinas. Formação Acadêmica: Formado em Eletrotécnica. Formação inclui cursos e treinamentos específicos na área de usinas hidroelétricas. Experiência Profissional: 14 anos de Reivax, na area de projeto elétrico. Expertise em análise de sistemas existentes, identificação de pontos de melhoria, desenvolvimento de projetos técnicos, coordenação de equipes e acompanhamento da implementação.