



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

FI/GOP/10
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP

**DESAFIOS PARA ESCOAMENTO DA ENERGIA DO COMPLEXO GERADOR DO MADEIRA NO HORIZONTE
DO PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DO SIN**

**A.F.C. AQUINO (*), A.A. BARBOSA, A.A. NOHARA, A. R. M. TENORIO, A.P. GUARINI, A.C.VINHAES,
G. S. FRANCISCO, J. M. F. FERREIRA, J. A. GOMES, K. S. HERSZTERG, L. D. PENNA, M. C. GUARINI,
M. L. R. ROBERTO, P. E. M. QUINTÃO, R. GÁRDOS, R. V. FARIA, S. L. A. SARDINHA, S. D. TICOM**

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS

RESUMO

O complexo gerador do rio Madeira é formado por duas usinas hidroelétricas, as UHE Santo Antônio e Jirau. A potência instalada dessas usinas na sua configuração final será de 3.568 e 3.750 MW, respectivamente, totalizando 7.318 MW, com 50 unidades geradoras cada.

O sistema de transmissão CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão) concebido para escoamento dessa energia é formado por dois bipolos de corrente contínua (2 x 3.150 MW, 600 kV CC) e linhas de transmissão CC associadas, que conectam as estações conversoras Coletora Porto Velho (RO) e Araraquara 2 (SP). Na SE Coletora Porto Velho, o sistema conta ainda com uma estação conversora *back-to-back* com tecnologia CCC (*Capacitor Commutated Converter*) composta de 2 blocos de 400 MW, conectada à SE Porto Velho 230 kV.

A integração desse sistema de transmissão CCAT (com linhas CC de 2.470 km, bancos de filtros CA de potência nominal elevada em relação às unidades geradoras) e das usinas Santo Antônio e Jirau (com unidades geradoras equipadas com turbinas tipo bulbo, de baixa inércia e cuja dinâmica apresenta grande sensibilidade às variações de queda líquida e vazão) constitui um grande desafio de engenharia, em especial para as equipes que conduzem os processos de planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional - SIN.

Este trabalho sintetiza os principais desafios enfrentados até o momento pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS e os desafios futuros para motorização completa das usinas e integração do sistema de transmissão na sua configuração final, tendo como foco a concepção e implantação de soluções de controle e proteção não convencionais e a adoção de estratégias operativas especiais.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas CCAT (HVDC); Transmissão a longa distância; Sistemas Especiais de Proteção – SEP; Estudos Pré-Operacionais; Energização de transformadores; Regulação de velocidade; Turbinas Bulbo.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Complexo Gerador do Rio Madeira é formado por duas usinas hidroelétricas, as UHE Santo Antônio e Jirau. A potência instalada dessas usinas na sua configuração final será de 3.568 e 3.750 MW, respectivamente, totalizando 7.318 MW, com 50 unidades geradoras cada. Ressalta-se que as últimas seis unidades geradoras da UHE Santo Antônio, diferentemente das demais, serão integradas ao SIN de forma independente do Complexo Gerador do Rio Madeira, conectadas de forma síncrona (em corrente alternada) na SE Porto Velho 230 kV.

O sistema de transmissão CCAT concebido para escoamento dessa energia, ilustrado na Figura 1, é formado por dois bipolos de corrente contínua (2 x 3.150 MW, 600 kV CC) constituídos pelas estações retificadoras de ± 600 kV,

(*) Rua Júlio do Carmo, n° 251 – 6° andar – Cidade Nova – CEP 20.211-160 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 3444-9563 – Fax: (+55 21) 3444-9411 – Email: aquino@ons.org.br

localizadas na subestação Coletora Porto Velho, no Estado de Rondônia, pelas estações inversoras de ± 600 kV localizadas na subestação Araraquara 2 e das linhas de transmissão de corrente contínua em ± 600 kV, com origem na subestação Coletora Porto Velho e término na subestação Araraquara 2. Na SE Coletora Porto Velho, o sistema de transmissão é complementado por uma estação conversora *back-to-back* com tecnologia CCC composta de 2 blocos de 400 MW (± 51 kV), conectada através de duas linhas de transmissão em 230 kV à SE Porto Velho. Ressalta-se que a alternativa original de planejamento previa a utilização de conversores *back-to-back* convencionais, além de compensadores síncronos na SE Porto Velho.

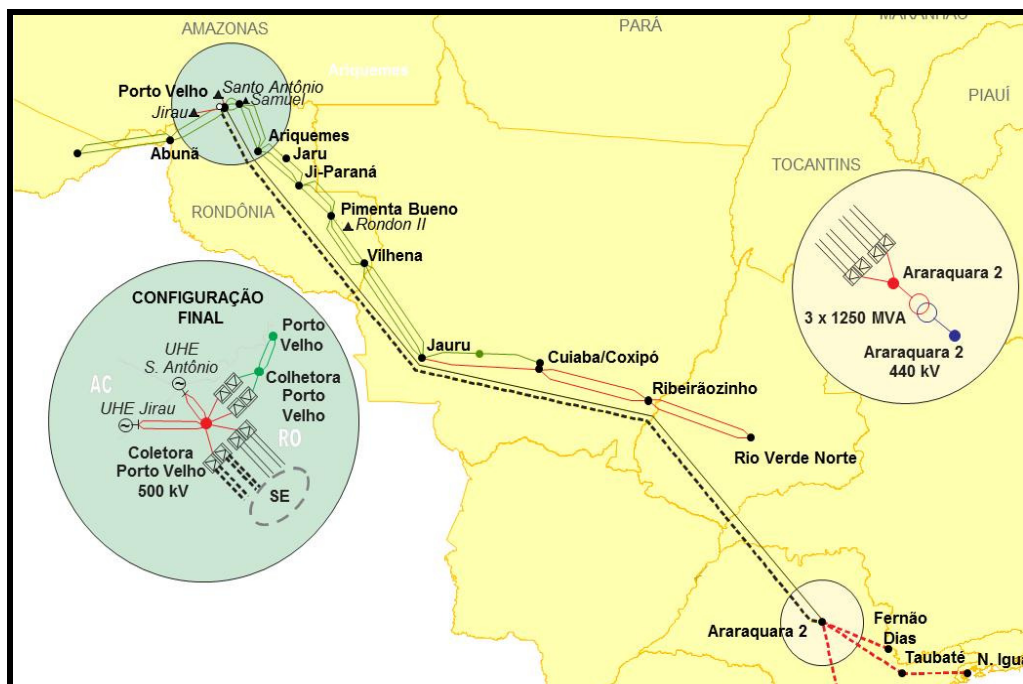


FIGURA 1 – Sistema de transmissão CCAT para escoamento da energia das usinas do rio Madeira

Em função de suas características únicas, a integração do sistema de transmissão CCAT e das usinas Santo Antônio e Jirau constitui um grande desafio de engenharia, em especial para as equipes do ONS e agentes que conduzem os processos de planejamento e programação da operação do SIN.

Em face do grande volume de obras do projeto, com diversas mudanças dos cronogramas das obras da transmissão e geração, foram muitas as configurações analisadas. Como consequência, verificou-se aumento significativo da complexidade dos aspectos a serem analisados, exigindo a concepção e implantação de soluções não convencionais de controle e proteção nas unidades geradoras e sistema CCAT e a adoção de estratégias operativas especiais.

Os próximos capítulos apresentam algumas características especiais do Projeto Madeira e, como consequência destas características, alguns dos desafios já enfrentados pelo ONS para integração do empreendimento ao SIN. O trabalho apresenta ainda os desafios futuros para motorização completa das usinas e integração do sistema de transmissão na sua configuração final.

2.0 - CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS DO PROJETO MADEIRA

Este capítulo apresenta características específicas do Projeto Madeira, relacionadas às usinas, ao sistema CCAT e ao arcabouço institucional do projeto. De uma forma geral, as principais dificuldades enfrentadas na integração do empreendimento estão relacionadas às citadas especificidades do projeto, conforme aborda o presente trabalho.

2.1 Cronograma das obras de geração e transmissão e arcabouço institucional

A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, os empreendimentos de geração e transmissão que integram o Complexo Madeira, bem como os pontos de conexão desse sistema ao sistema Acre-Rondônia (na barra de 230 kV da SE Porto Velho) e à região Sudeste (na barra de 500 kV da SE Araraquara 2).

A integração desse complexo de geração ao SIN e a sua operação, considerando os cronogramas de obras de geração e transmissão em um cenário que envolve múltiplos agentes e diferentes fabricantes, se constituem em importantes desafios de coordenação para o ONS. Os editais de leilão da transmissão do Projeto Madeira, por exemplo, adotaram como premissa o fracionamento das instalações por meio de lotes, num total de 7 (sete), o que permitiu um maior nível de concorrência entre os investidores do setor elétrico, objetivando reduzir o valor ofertado pelas empresas no processo de licitação dos empreendimentos. Por outro lado, a estratégia adotada com foco no

aspecto econômico-financeiro teve impacto na concepção técnica de cada projeto associado às instalações de geração e transmissão. Para se ter uma ideia da complexidade operacional que resultou da estratégia de licitação adotada, a Tabela 1 resume a diversidade de agentes e de fabricantes envolvidos nos segmentos de geração e transmissão do Complexo Madeira.

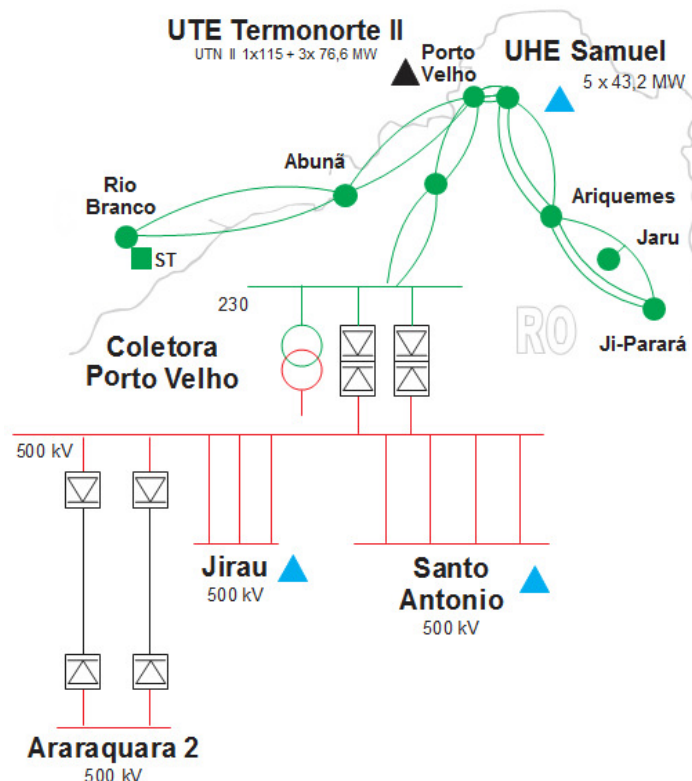


FIGURA 2 – Diagrama unifilar do Complexo Madeira – geração, transmissão e sistema Acre-Rondônia

Tabela 1 – Relação de agentes e fabricantes envolvidos no Complexo Madeira

Empreendimento	Agentes	Principais Fabricantes
Conversores do Bipolo 1	Eletronorte *	ABB
Conversores do Bipolo 2	IE Madeira	Alstom
Back-to-Back	Eletrosul **	ABB
SE Coletora Porto Velho	Eletrosul **, Eletronorte *, IE Madeira, SAE, ESBR	Siemens, ABB, Alstom
SE Araraquara 2	State Grid, Copel, Eletronorte *, IE Madeira, MSGT	Siemens, ABB, Alstom
UHE Santo Antônio	SAE	Alstom, Andritz, Voith
UHE Jirau	ESBR	ABB, Alstom, Reivax, Dong Fang
LTCC do Bipolo 1	IE Madeira	—
LTCC do Bipolo 2	Norte Brasil	—

* Anteriormente, de responsabilidade da ETE

** Anteriormente, de responsabilidade da PVTE

Uma das consequências decorrentes do cenário descrito é a ocorrência de um grande número de configurações operativas necessárias para o escoamento da energia do Complexo Madeira que, diante de atrasos ou antecipações de cronograma de obras, não foi possível avaliar ou prever no âmbito do planejamento desse sistema. Neste sentido, foi necessário tratar de inúmeros aspectos no âmbito da operação, que ensejaram a instalação de sistemas especiais de proteção e a adoção de configurações operativas não previstas.

Deve-se ressaltar que a primeira e, provavelmente, a mais significativa alteração que houve no projeto do Complexo Madeira se deu na antecipação da entrada em operação e comissionamento das unidades geradoras da UHE Santo Antônio. Uma vez que não havia transmissão disponível àquela época, foi necessário instalar em caráter de urgência um transformador 525/230/13,8 kV – 465 MVA na SE Coletora Porto Velho. Este equipamento (TF-13), também denominado “transformador provisório”, mostrou-se importante para a mitigação de diversos problemas no período inicial de operação do Madeira, quais sejam:

- i. Comissionamento das primeiras unidades geradoras da UHE Santo Antônio;
- ii. Comissionamento das estações conversoras do *back-to-back* e do Bipolo 1;
- iii. Operação segura do SIN nas configurações iniciais com número insuficiente de unidades geradoras;
- iv. Operação segura do SIN nas configurações iniciais do Bipolo 1 e estações conversoras *back-to-back*, sem Controle Mestre e sem GSC (*Generation Station Coordinators*) das usinas;
- v. Escoamento das primeiras unidades geradoras da UHE Jirau quando do desligamento da UHE Santo Antônio no período úmido de 2014, devido à cheia histórica do Rio Madeira.

Mesmo na configuração atual, até que o processo de autorrestabelecimento das usinas do complexo seja finalizado, este equipamento é imprescindível para a recomposição do sistema CCAT na SE Coletora Porto Velho, na hipótese de desligamento total do mesmo.

Outro ponto que merece ser ressaltado foi o período da operação do Bipolo 1 e do *back-to-back* sem o Controle Mestre, durante o período de projeto e instalação pelas usinas dos GSC, que se constituem parte integrante do controle de Santo Antônio e Jirau, para o pleno funcionamento do Controle Mestre. Em face da complexidade desse sistema, as últimas perturbações ocorridas no Complexo Madeira têm evidenciado a necessidade de adequações nesses controles, especialmente em suas filosofias de atuação.

Destacam-se, a seguir, configurações operativas que foram vivenciadas no Complexo Madeira até o presente momento:

Março a Dezembro de 2012

- Primeiras unidades geradoras da UHE Santo Antônio em sincronismo com o SIN através do TF13;
- Sem *back-to-back* e sem Bipolo 1.

Dezembro de 2012 a Novembro de 2013

- Unidades geradoras da UHE Santo Antônio e Jirau em sincronismo com o SIN através do TF13;
- TF13 em operação, em paralelo com a estação *back-to-back* e sem Bipolo 1.

Novembro de 2013 a Fevereiro de 2014

- Unidades geradoras da UHE Santo Antônio e Jirau em sincronismo com o SIN através do TF13;
- TF13 em operação, sem *back-to-back* e com Bipolo 1 em operação monopolar com retorno metálico.

Fevereiro a Abril de 2014

- Unidades geradoras da UHE Santo Antônio desligadas (vazão histórica, baixa queda);
- Unidades geradoras da UHE Jirau em sincronismo com o SIN através do TF13;
- TF13 em operação, sem *back-to-back* e sem Bipolo 1.

Abril a julho de 2014

- Unidades geradoras da UHE Santo Antônio e Jirau em sincronismo com o SIN através do TF13;
- TF13 em operação, sem *back-to-back* e com Bipolo 1 em operação monopolar com retorno metálico.

Julho de 2014 até o presente

- Unidades geradoras da UHE Santo Antônio e Jirau formando um sistema assíncrono, com o TF13 fora de operação;
- Com *back-to-back* e com Bipolo 1 em operação bipolar.

Com a entrada em operação do Bipolo 2, a expansão do corredor de transmissão em 230 kV do sistema Acre-Rondônia, bem como as obras associadas ao sistema receptor em Araraquara 2, vislumbra-se novos desafios técnicos a serem vencidos até que se atinja a configuração definitiva da operação do Complexo Madeira. Para tanto, o ONS vem aprofundando as análises com os diversos agentes envolvidos, através de simulações digitais em ferramentas *off-line* (ANATEM, ATP, PSCAD/EMTDC) e através de simulação em tempo real (RTDS).

2.2 Usinas Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau

A Tabela 2 apresenta um resumo das características das usinas de Santo Antônio e Jirau, tendo como foco aspectos que afetam diretamente a dinâmica das turbinas e geradores. Fica bastante evidente o valor reduzido da inércia dos conjuntos turbina-gerador de ambas as usinas (inferior a 2 segundos) e a grande variação nos valores de constante de tempo da água (T_w) para queda mínima e máxima (de 0,8 a 3,7 segundos). Essas características exigiram grande esforço do ONS e dos agentes para estabilização das unidades geradoras nas diversas

configurações operativas, especialmente na operação isolada das usinas (operação assíncrona), verificada a partir de julho de 2014.

Tabela 2 – Características especiais das usinas de Santo Antônio e Jirau

Usina	Santo Antônio		Jirau (4 pás)	
Características	4 pás	5 pás	Margem Direita CFJ	Margem Esquerda Dong-Fang
Número de unidades	16	16	15	12
Potência do gerador (MVA)	82,250	82,250	83,334	83,334
Queda líquida mínima (m)	9,00	9,00	10,00	10,00
Queda líquida máxima (m)	20,69	21,30	19,60	19,60
Queda nominal (m)	13,90	13,90	15,20	15,20
Constante de tempo da água (queda mínima) (s)	3,70	3,38	3,0	3,0
Constante de tempo da água (queda máxima) (s)	1,10	0,82	1,5	1,5
Inércia do conjunto turbina-gerador (MW.s/MVA)	1,73	1,73	1,625	1,905

A Figura 3 ilustra a grande variação das vazões do rio Madeira (na UHE Santo Antônio) entre os anos de 2012 e 2014, atingindo cerca de 60.000 m³/s no período úmido de 2014 (cheia histórica) e vazões inferiores a 5.000 m³/s nos períodos secos desses anos. A curva em azul apresenta o valor médio das vazões na citada usina. Observa-se que a amplitude das variações é de cerca de 7 vezes, quando comparados os valores de vazão máxima e mínima.

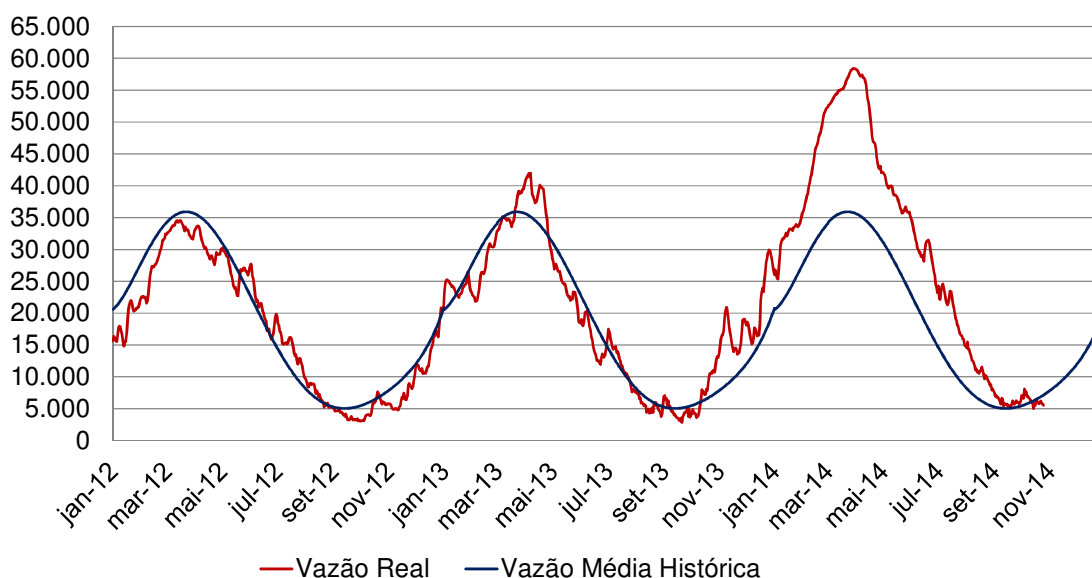


FIGURA 3 – Vazões (em m³/s) na UHE Santo Antônio entre 2012 e 2014 (fonte Santo Antônio Energia)

A Figura 4 apresenta os registros de queda líquida na UHE Santo Antônio, nos anos de 2013 e 2014. A curva azul, que apresenta o valor médio dessa grandeza, apresenta valores entre 10 e 23 metros. Observa-se que na cheia de 2014, o valor da queda líquida nessa usina atingiu valores inferiores a 9 metros, que constitui o valor mínimo para a operação das unidades geradoras (turbinas de 4 ou 5 pás, Tabela 2). Foi necessário o desligamento da usina, o que exigiu do ONS e dos agentes a adoção de uma série de medidas operativas para enfrentar tal condição.

Conforme pode ser observado na Tabela 2 e Figuras 3 e 4, são significativas as diferenças operacionais a que as usinas do rio Madeira estão submetidas ao longo do ano, com efeito direto na dinâmica das unidades geradoras. Como consequência, exige-se um considerável esforço do ONS e dos agentes no sentido de garantir desempenho dinâmico adequado desse sistema nas diferentes configurações operativas.

2.3 Sistema CCAT

Três aspectos merecem destaque em relação ao sistema CCAT destinado ao escoamento da energia das usinas do Rio Madeira. O primeiro aspecto está relacionado ao comprimento das linhas CC (2.470 km) dos bipolos e suas consequências no projeto e na operação do sistema CCAT. De fato, o comprimento das linhas exige cuidados específicos no ajuste dos sistemas de controle dos conversores, em ambos os bipolos. Adicionalmente, em relação à exposição das mesmas a falhas, as linhas podem ser vistas como combinação em série de 8 linhas longas de 300 km, o que dá uma ideia da complexidade associada.

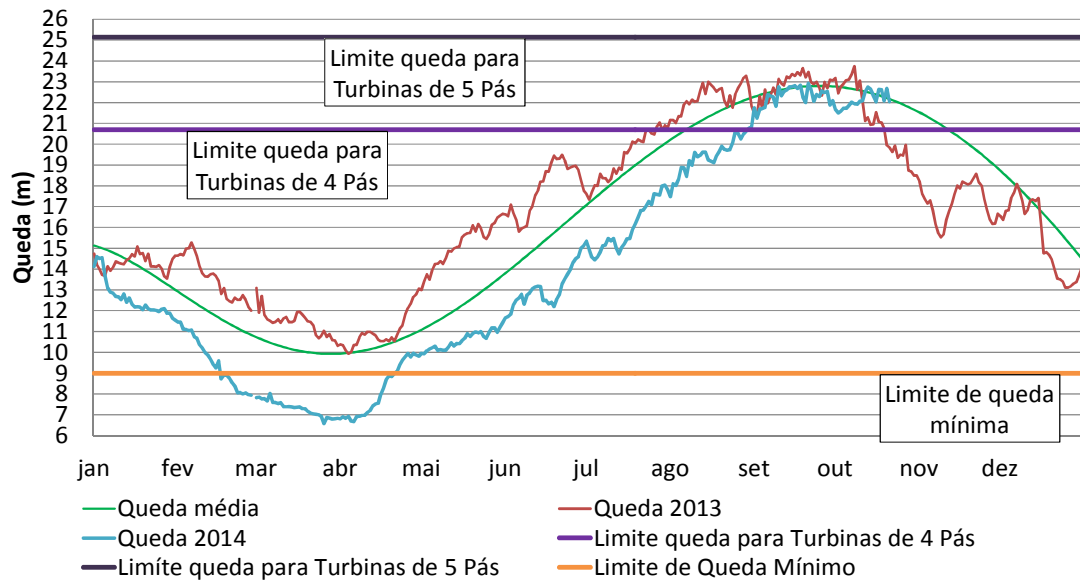


FIGURA 4 – Queda líquida (em metros) na UHE Santo Antônio em 2013 e 2014 (fonte Santo Antônio Energia)

O segundo aspecto está relacionado ao fato dos bipolos 1 e 2 serem de fornecimento de fabricantes distintos (conforme ilustra a Tabela 1). Esse fato apresenta importantes desafios para a completa integração do sistema CCAT e usinas, exigindo atenção especial do ONS e dos agentes na coordenação das estratégias de controle, visando a obter uma operação harmoniosa. Para tanto, o ONS e os agentes vêm desenvolvendo diversas análises por meio de simulações digitais, em ferramentas *off-line* (ANATEM e PSCAD/EMTDC) e através de simulações em tempo real (RTDS) realizadas com réplicas dos cubículos de proteção e controle dos citados bipolos.

O terceiro ponto está relacionado aos filtros CA na SE Coletora Porto Velho. Estes equipamentos apresentam potência nominal elevada (cerca de 260 Mvar) em relação às unidades geradoras (80 MVA). Como consequência, são significativas as dificuldades para controle da tensão na área, especialmente em configurações com número reduzido de unidades geradoras nas usinas de Santo Antônio e Jirau. Adicionalmente, foram necessárias diversas funções de controle e proteção para garantir a operação segura do sistema, evitando configurações proibitivas em face dos riscos de ocorrência de sobretensões dinâmicas e do fenômeno de autoexcitação.

3.0 - OSCILAÇÕES DE BAIXA FREQUÊNCIA OBSERVADAS NA OPERAÇÃO ASSÍNCRONA

A operação assíncrona representa um grande desafio para a operação do Complexo do Madeira. Nesta configuração operativa, a estabilização da frequência será realizada pela regulação primária das unidades geradoras das UHE Jirau e Santo Antônio e pela modulação de potência dos conversores, inserida artificialmente em seu sistema de controle (controle de frequência).

Ao operar nesta condição, foi constatado que eventos neste complexo desencadeavam um processo oscilatório sustentado de baixa frequência (0,15 Hz). Enquanto este sistema operava sincronizado com o SIN através do TF-13, este modo permanecia latente, mas o restante do SIN se encarregava da estabilização da frequência.

A Figura 5 a seguir apresenta uma comparação entre registros de campo das oscilações supracitadas e os resultados de simulação obtidos considerando condições de constante de tempo da água elevada e sem a contribuição do controle de frequência do elo CCAT (elo com potência constante).

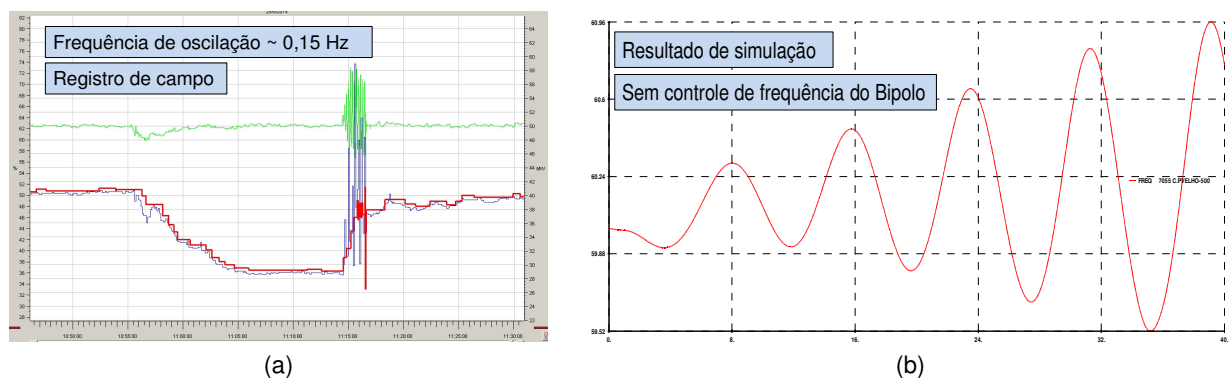


FIGURA 5 – Registros de campo das oscilações (a) (fonte Santo Antônio Energia) vs. resultado de simulação (b)

Em cenários de quedas baixas nas usinas, e consequentemente maiores valores para a constante T_w , as turbinas apresentam resposta mais lenta frente à abertura do distribuidor, de forma que os reguladores de velocidade mostravam desempenho inadequado. Neste sentido, reajustes nos controladores das usinas e do sistema de transmissão em corrente contínua se mostraram necessários para estabilizar este modo de oscilação.

Avaliações a pequenos sinais, utilizando o programa PacDyn desenvolvido pelo CEPEL, indicaram que o controle de frequência dos bipolos possui influência benéfica para a estabilização deste modo, de forma que a elevação do ganho proporcional do citado controle de frequência representa maior amortecimento para o modo de oscilação em discussão. Este comportamento está ilustrado na Figura 6 a seguir, com os resultados obtidos do diagrama do lugar das raízes.

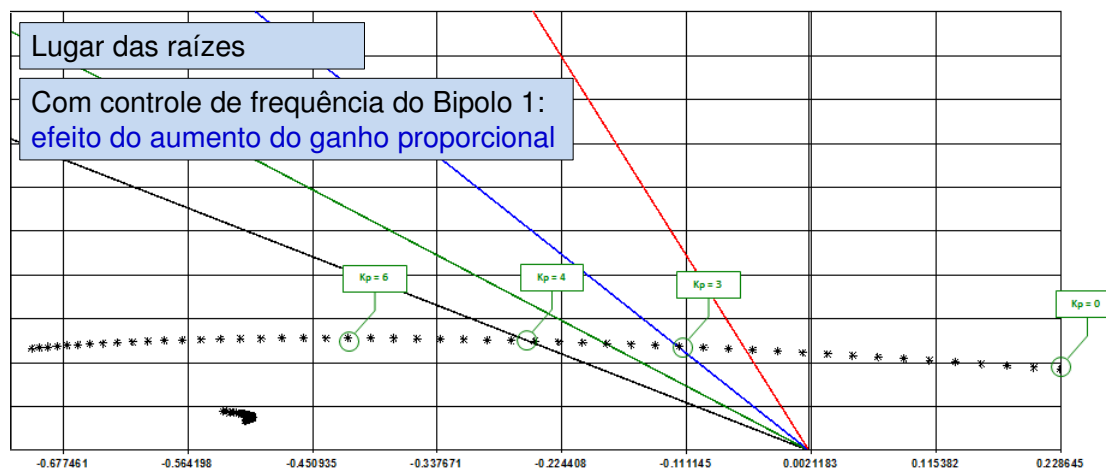


FIGURA 6 – Efeito do aumento do ganho proporcional do controle de frequência

Em face destes resultados, foram conduzidas análises complementares em ambiente de simulação RTDS no sentido de avaliar melhorias para o controle de frequência do Bipolo 1, onde uma delas foi a elevação do ganho proporcional de 3 para 4 pu MW/pu Hz.

Paralelamente, foram realizadas alterações nos sistemas de controle das usinas, ajustando os reguladores com um ganho apropriado para a condição de queda mínima e inclusão de filtros acelerométricos, com o objetivo de compensar o atraso existente entre a medição de frequência e a resposta do regulador de velocidade, melhorando o desempenho global do controle de frequência do Complexo Gerador do Rio Madeira.

4.0 - RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA

Conforme já mencionado, a recomposição do sistema CCAT pelas usinas de Santo Antônio e Jirau constitui outro importante desafio para o ONS e os agentes. São tais as características elétricas do sistema de transmissão e geração que ainda não foi possível definir um procedimento de recomposição seguro, exclusivamente por essas usinas, ou seja, sem fonte oriunda do sistema Acre-Rondônia. De fato, o processo de recomposição atual depende do “transformador provisório” (TF-13), sem o qual não são possíveis as manobras de energização de transformadores conversores [5] e o desbloqueio dos conversores na SE Coletora Porto Velho.

Para agregar maior segurança às manobras dos transformadores conversores na SE Coletora Porto Velho, equipamentos de cerca de 2 GVA de potência nominal, o ONS está avaliando o efeito da instalação de resistores de pré-inserção (RPI) nos disjuntores correspondentes aos citados transformadores. Simulações de transitórios eletromagnéticos desenvolvidas pelo ONS até então indicam que tal providência permitirá a energização segura dos equipamentos dos bipolos 1 e 2, mesmo na hipótese da indisponibilidade do TF-13.

Em relação às manobras de desbloqueio dos conversores, o ONS e os agentes de geração estão avaliando alternativas para dotar a regulação de velocidade das unidades geradoras de estratégias e malhas de controle específicas para tal condição. De fato, o desbloqueio dos conversores na SE Coletora Porto Velho impõe variação quase instantânea de potência elétrica nas unidades geradoras (de até 157 MW - 10% da potência nominal do bipolo), resultando em subfrequência significativa na hipótese de operação sem o TF-13.

Outra estratégia para a minimização das excursões de frequência nas usinas durante a recomposição sem o TF-13 considera o sincronismo de um número maior de unidades geradoras em vazio (maior que 15 unidades geradoras), condição operativa que não é trivial, mas está sendo avaliada pelo ONS e pelos agentes.

Em suma, a recomposição do sistema CCAT pelas usinas de Santo Antônio e Jirau (sem o TF-13) vem se apresentando como um importante desafio para o ONS e os agentes, desafio este não tratado na fase de planejamento do Complexo Gerador do Rio Madeira. As soluções exigem grande esforço de coordenação do ONS

e agentes e dependem de estudos de transitórios eletromagnéticos frente a manobras e da análise de aspectos da dinâmica do desempenho da regulação de frequência pelas usinas quando do desbloqueio das estações conversoras na SE Coletora Porto Velho.

5.0 - ANÁLISE DE PERTURBAÇÕES

O processo de análise de perturbações consiste na investigação da origem, da causa, da propagação e das consequências das perturbações. O processo abrange o comportamento do sistema, o desempenho dos sistemas de proteção e controle, o desempenho dos esquemas de religamento automático de linhas de transmissão e o desempenho dos SEP. Como conclusão, a análise da perturbação permite apontar soluções para os problemas encontrados e recomendar medidas corretivas e preventivas. O processo apresenta forte interdependência entre as áreas de estudos e proteção e tem impacto direto na segurança operacional, pois permite minimizar os efeitos de perturbações futuras.

No caso do Complexo Gerador do Rio Madeira, são muitos os agentes de transmissão e geração envolvidos. Não raro, há cerca de 10 (dez) agentes envolvidos em uma determinada perturbação na área, o que aumenta muito a complexidade do processo de análise. São significativas as dificuldades para tratamento e análise dos registros de oscilografia, bem como para obtenção do diagnóstico preciso com caracterização das causas e cronologia dos eventos.

Há que se registrar, ainda, os benefícios que vêm sendo obtidos no processo de análise de grandes perturbações com a utilização dos registros de Medição Fasorial Sincronizada através de PMU (*Phasor Measurement Units*), informações que têm se mostrado imprescindíveis para a obtenção de um diagnóstico adequado, com a celeridade que o processo exige.

6.0 - CONCLUSÕES

A integração do Complexo Gerador do Rio Madeira, considerando as especificidades dos sistemas de transmissão e geração envolvidos, constitui um grande desafio de engenharia, em especial para as equipes do ONS e dos agentes que conduzem os processos de planejamento e programação da operação.

Entre os desafios enfrentados pelo ONS e agentes, podem ser citados: (i) os estudos e análises para dotar o Complexo Gerador do Rio Madeira de uma estratégia de recomposição independente de fonte externa; (ii) os estudos para ajuste dos controladores das usinas e sistema CCAT, em face da grande variabilidade observada na dinâmica das turbinas ao longo do ano; (iii) o processo de integração dos dois bipolos de corrente contínua, fornecidos por dois fabricantes diferentes e, portanto, com estratégias de controle distintas; (iv) as dificuldades observadas no processo de análise das perturbações naquele sistema, em face da complexidade operativa e diversidade de agentes e fabricantes; e (v) as funções de proteção e controle necessárias para garantir a operação segura do sistema, considerando as características dos filtros e unidades geradoras na SE Coletora Porto Velho.

De forma a mitigar os riscos para a operação do Complexo Madeira, o ONS vem buscando: (i) a intensificação do uso de registros de PMU, de registros do sistema de supervisão e de ferramentas de análise; (ii) a melhoria dos modelos de simulação do sistema CCAT disponíveis para os programas ATP, ANATEM e PSCAD/EMTDC; (iii) o aprofundamento das simulações em tempo real (RTDS), considerando as réplicas dos cubículos de proteção e controle do sistema CCAT; (iv) a intensificação da interação entre as equipes técnicas do ONS e agentes de geração e transmissão, especialmente no que se refere a aspectos de controle e proteção; e (v) a intensificação da formação e valorização dos profissionais.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brasil D.O.C et al., "The ± 600 kV Madeira River Transmission System Design", Cigre 2012, paper B4-112, Aug/2012, Paris.
- (2) MacLeoud N.M., Chackravorty S., Barrett B.T., "Design studies for the 3150 MW, ± 600 kV UHVDC Bipole 2 of the Rio Madeira long distance transmission project in Brazil", Cigre 2010, paper B4-208, Aug/2010, Paris.
- (3) Esmeraldo P.C.V., Araújo E.M.A., Carvalho Jr D.S., "HVDC Madeira Transmission System – Planning Development and Final Design", Cigre 2010, paper B4-306, Aug/2010, Paris.
- (4) Gárdos R. et al., "Alternativas provisórias para a Operação do Sistema acre e Rondônia, Considerando a estação Conversora Back-to-Back 525/230KV, 1º Bipolo ± 600 kV e Transformador Provisório 525/230 KV em Paralelo CA/CC", XXII SNPTEE, Out/2013, Brasília.
- (5) A.P. Guarini, A.R.M. Tenório, P.E.M. Quintão, "Operational Experience of Madeira River Project in the Brazilian Interconnected Power System under Initial Configuration", paper B4-104, Aug/2014, Paris.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Antonio Felipe da Cunha de Aquino concluiu os cursos de graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ em 1999 e 2000, respectivamente. Em 2003, concluiu o curso de pós-graduação *latu sensu* de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos, na UFRJ. Em 2010, concluiu o MBA em gestão na PUC-RJ. Em 2012, concluiu o doutorado em engenharia elétrica, pela COPPE/UFRJ e o curso de extensão em Coordenação da Operação de Sistemas Eletro-Energéticos, pela UNICAMP. Desde 2000 trabalha no ONS com a análise de sistemas elétricos de potência. Suas áreas de interesse técnico são estabilidade transitória, interligação de sistemas elétricos, eletrônica de potência, FACTS e sistemas HVDC. Atualmente, ocupa a Gerência de Estudos Especiais - GPE2 do ONS.

Adriano de Andrade Barbosa graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFJF, em 1995, e obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ, em 1999. Em 2011 concluiu o MBA em Gestão de Energia Elétrica, pela PUC/RJ. Desde 2001, atua como engenheiro no Operador Nacional do Sistema Elétrico, onde coordena e desenvolve estudos pré-operacionais de instalações de geração e transmissão do Sistema Interligado Nacional, com foco na análise de desempenho dinâmico e estabilidade eletromecânica.

Alexandre Akio Nohara, engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2010. Atua no ONS desde 2011 na área de proteção, controle e estudos especiais para a operação elétrica do SIN.

Antônio de Pádua Guarini, engenheiro eletricitista formado pela Escola Federal de Itajubá (EFEI) em março de 1974, M Sc pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em agosto de 1981, e CAISE pela PUC-RJ em 2009. Trabalhou no CEPEL no período de maio de 1974 a novembro de 1996. Atua no ONS desde 1999 nas áreas de recomposição do SIN, esquemas de controle de emergência e segurança e de sistemas CCAT.

Antonio Ricardo de Mattos Tenório graduou-se em engenharia elétrica em 1982 na Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Completou o curso do CESE na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1985. Concluiu o seu MSc em Sistemas Elétricos de Potência na University of Manchester (UMIST, Reino Unido) em 1995. Em 2011 concluiu o MBA em Gestão de Energia Elétrica pela PUC-Rio. Ingressou em 1982 na Chesf como engenheiro na área de Estudos de Sistema permanecendo até o ano 2000. Neste ano foi trabalhar na ABB Power Systems (Suécia) e lá permaneceu até 2004. Ingressou no ONS no ano 2004 onde até hoje trabalha como engenheiro especialista na Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle.

Arjan Carvalho Vinhaes, nascido no Rio de Janeiro, Brasil, em 08 de Fevereiro, 1980. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, atuando desde 2008 no ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) na Gerência de Estudos Especiais, com análise de sistemas de potência e transitórios eletromagnéticos (TEM).

Gustavo de Souza Francisco é engenheiro eletricitista formado em 1981 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro com Especialização em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá em 1998. Possui o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica - Área de Sistemas Elétricos de Potência, pela Universidade Federal de Itajubá (2005) e MBA em Gestão de Energia Elétrica pela PUC/RJ (2012). Em 1982 ingressou na IESA - Internacional de Engenharia S.A., onde trabalhou na Área de Estudos Elétricos de Sistemas de Potência, desenvolvendo diversos projetos de engenharia. Em 1985 deixou a iniciativa privada indo para Eletrobrás onde participou das atividades do GCOI. Desde 2000 faz parte do ONS onde atua na Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle.

João Marco Francischetti Ferreira graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFJF, em 1997, e obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela UFSC, em 2000. Desde 2004, trabalha como engenheiro no Operador Nacional do Sistema Elétrico, onde atua na área de estudos de planejamento e programação da operação elétrica.

José Augusto Gomes graduou-se em engenharia elétrica em 1984 na Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Completou curso de pós-graduação em Sistemas Elétricos de Potência na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1992. Em 1987 ingressou na ELETROBRAS como engenheiro na área de Estudos de Planejamento da Operação permanecendo até 1999. Ingressou no ONS no ano 2000 onde até hoje atua na área de planejamento de curto prazo, atualmente é gerente da área de programação elétrica.

Karina Stockler Herszterg é engenheira eletricitista formada pelo CEFET/RJ, em 1999, obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ em 2004. Atua como engenheira no Operador Nacional do Sistema Elétrico, onde desenvolve estudos pré-operacionais de instalações de geração e transmissão do Sistema Interligado Nacional, com foco na análise de transitórios eletromagnéticos.

Leandro Dehon Penna graduou-se em engenharia elétrica em 1997 na UFJF e obteve o grau de mestre em Engenharia Elétrica em 2005 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Desde 2001 está no ONS na área de Planejamento da Operação Elétrica.

Marcelo de Castro Guarini é engenheiro eletricitista formado pela UFRJ, em 2003, obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ, em 2009. Trabalhou no MGP Consultoria no período de Agosto de 2003 a Agosto de 2004. Trabalha no ONS desde Setembro de 2004 na Gerência de Programação Elétrica - GPD2. Participa do planejamento elétrico da operação de curto (Mensal), análise de intervenções e indisponibilidade de equipamentos do SIN, programação diária da operação e planejamento especial para operação em períodos de eventos de grande relevância que demandem um grau de segurança adicional para o SIN. Atualmente suas principais atividades são a análise de intervenções da área Acre/Rondônia e Sistema do Madeira e a programação diária da operação.

Marcio Leonardo Ramos Roberto nasceu em Leopoldina, em 1974. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela UERJ, em 1998, e obteve o título de mestre em Computação Aplicada a Sistemas de Potência pela UFF/RJ, em 2004. Em 2015 concluiu o MBA em Gestão de Energia Elétrica, pela PUC/RJ. Desde 2001, atua como engenheiro no Operador Nacional do Sistema Elétrico na Gerência de Programação e Desligamentos - GPD. Participa de análises de desempenho em regime permanente e dinâmico com foco em redes alteradas por intervenções e também na avaliação da programação diária eletro-energética. Atualmente sua principal atividade é o projeto do HVDC do Rio Madeira.

Paulo Eduardo Martins Quintão, engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em 1993, pós-graduado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Trabalhou no CEPEL no período de março de 1994 a junho de 2008. Trabalha no ONS desde julho de 2008 na Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle - GPE. Participa em projetos de estabilização de sistemas através de reajustes nos controladores de unidades geradoras, além de estudos pré-operacionais de novos empreendimentos que integrarão o SIN. Atualmente sua principal atividade é o projeto do HVDC do Rio Madeira.

Raphael Gárdos graduou-se em engenharia elétrica em 2001 na UERJ e obteve o grau de mestre em sistemas de energia na COPPE - UFRJ em 2008. Ingressou no ONS em 2002 onde atua na área de Planejamento da Operação Elétrica.

Rodrigo Villela de Faria graduou-se em engenharia elétrica em 2007 na UERJ. Desde 2008 está no ONS na área de planejamento da operação elétrica.

Sumara Duarte Ticom graduou-se em engenharia elétrica em 1994 na UERJ. Especializou-se em engenharia econômica e desenvolvimento industrial na UFRJ em 1998, bem como em Sistemas Elétricos de Potência na EFEI-MG em 2002. Em 2007 participou do MBA na escola de Negócios da PUC-Rio - IAG Master em Desenvolvimento Gerencial - ONS. Ingressou no ONS em 1999, na área de Planejamento da Operação Elétrica. Desde 2011 ocupa o cargo de gerente da Gerência de Planejamento da Operação Elétrica.

Sergio Luiz de Azevedo Sardinha graduou-se em engenharia elétrica em 1974 na Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Completou curso de pós-graduação em Sistemas Elétricos de Potência na Universidade Federal de Santa Catarina em 1981. Em 1975 ingressou na ELETROBRAS como engenheiro na área de Estudos de Planejamento da Operação permanecendo até 1992. Ingressou no ONS no ano 2000 onde até hoje presta serviços como engenheiro especialista na Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle.