



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

**OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E DE QUEDA BRUTA - ANÁLISE DE EVENTOS VERIFICADOS ENTRE
JANEIRO E MARÇO DE 2017 NA USINA HIDRELÉTRICA SANTO ANTONIO**

**ANDRÉ FLAVIO SCHIANTE DOS SANTOS(1); BRUNO MARQUES DO NASCIMENTO(2); SEBASTIÃO
SANTOS ALVES JUNIOR(3);
SAESA(1);SAESA(2);SAESA(3);**

RESUMO

Os níveis de montante e de jusante de um barramento hidrelétrico são parâmetros determinantes para o funcionamento de uma turbina hidráulica, pois estes influenciam diretamente na pressão de trabalho destas máquinas hidráulicas[1][2][3][4]. O presente trabalho abordará um fenômeno observado na UHE Santo Antônio, no ano de 2017, onde os níveis de montante e de jusante do barramento apresentaram um comportamento oscilatório.

Tais oscilações hidráulicas alteraram as potências das turbinas, em consequência os reguladores de velocidade reagiram às variações de potência e frequência. Conforme será abordado posteriormente, as respostas apresentaram defasagem entre máquinas, causando uma oscilação de potência entre as próprias unidades geradoras da UHE Santo Antônio.

PALAVRAS-CHAVE

Oscilação, Nível, Potência Ativa, Regulador de Velocidade, Turbina.

1.0 - INTRODUÇÃO

A UHE Santo Antônio está instalada no rio Madeira no município de Porto Velho em Rondônia, dispõe de 4 Grupos Geradores (GG1, GG2, GG3 e GG4/5), sendo, um na margem direita, um no leito do rio e dois na margem esquerda (figura 1). Conta 3 quilômetros de barragem além de 50 turbinas do tipo bulbo, sendo seis conectadas ao sistema Acre Rondônia e quarenta e quatro ligadas ao HVDC do complexo do Madeira.



Figura 1 – Usina Hidrelétrica Santo Antônio Energia.

Em março de 2017 o ONS informou à Santo Antônio Energia que registrou uma oscilação de potência ativa e de frequência na SE coletora, e que segundo seus estudos tinha origem na UHE Santo Antônio. Avaliando os dados no historiador da usina, foi comprovado que as oscilações realmente eram na UHE Santo Antônio e que estavam relacionadas com as oscilações de potência gerada e dos níveis de montante e de jusante da barragem. O estudo de caso mostrou que as oscilações de potência observada nas unidades geradoras causava oscilações de níveis de jusante e montante no barramento, causando novas oscilações de potência ativa, realimentando positivamente o processo oscilatório.

Segundo Paiva[5], as turbinas bulbo podem vir a operar com um erro de conjugação durante transitórios, este erro é causado pelo atraso das pás kaplan em relação ao movimento do distribuidor. O mesmo autor ainda afirma que a eficiência da turbina é alterada durante um evento em que ocorra um erro de conjugação. De acordo com J. Augusto[6], a variação da queda bruta também tem influência direta no rendimento da turbina.

2.0 - MOTIVO DO ESTUDO

As unidades geradoras da usina hidrelétrica Santo Antônio (SAESA) apresentaram ao menos nos dias 14/01/2017, 11/03/2017 e 21/03/2017 oscilações de potência ativa gerada sem que houvessem oscilações sistêmicas que justificassem as mesmas.

Em 21/03/2017 o departamento de engenharia da SAE recebeu do ONS um e-mail solicitando maiores informações das oscilações, visto que estas estavam comprometendo a estabilidade do Complexo Madeira (sistema isolado em CA conectado ao SIN por conversores CC pelos bipolos Porto Velho - Araraquara). Nesta comunicação o ONS confirmou que estas oscilações não foram observadas nas unidades geradoras de Jirau, a qual é conectada ao SIN também pelos bipolos de CC Porto Velho – Araraquara, de forma semelhante à conexão da UHE Santo Antônio.

2.1 ANÁLISE DOS DADOS

Como informado no item Tratamento dos Dados deste artigo, utilizando-se do historiador ELIPSE da SAE, foi possível avaliar que as oscilações eram causadas por fenômenos mecânicos e não tinham nenhuma relação com qualquer evento de perturbação ou comportamento sistêmico.

A característica principal de todos os fenômenos avaliados é que concomitantemente com as oscilações de potência ativa observadas em todos os grupos geradores da usina Santo Antônio havia oscilações de níveis de montante e de jusante.

Estas oscilações de níveis provocam oscilações de queda bruta (diferença, em metros dos níveis de montante e

de jusante) e líquida (queda bruta menos as perdas de carga do circuito hidráulico das unidades geradoras), provocando, por sua vez, oscilação da potência elétrica gerada pelas unidades geradoras, tendo em vista que esta energia gerada é, em parte, produto da queda líquida (energia potencial) acumulada e convertida pelas unidades geradoras.

As tabelas 1 a 5 abaixo, compostas de dados obtidos do historiador da usina, mostram de forma simplificada que os três eventos observados possuem comportamento distintos.

Tabela 1 – Análise do evento de 14/01/2017

Item	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5
Amplitude da oscilação da posição do distribuidor	↑ 12%	↑ 8%	↑ 15%	↓ 10%	↓ 10%
Amplitude da oscilação do nível de montante	0,5m	0,3m	0,5m	0,5m	0,5m
Amplitude da oscilação do nível de jusante	↑ 1,5m	↑ 1,0m	↑ 2,0m	↓ 1,0m	↓ 1,0m
Amplitude da oscilação da queda bruta	1,4m	1,0m	1,6m	1,2m	1,2m
Queda bruta média	15,0m	15,5m	15,5m	15,3m	15,3m
Fase entre oscilação de jusante e posição do distribuidor	Fase	Fase	Fase	Fase	Fase
Tempo dos ciclos de oscilação	5m0s				

Tabela 2 – Análise do evento de 11/03/2017

Item	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5
Amplitude da oscilação da posição do distribuidor		↓ 9%	↑ 7%		
Amplitude da oscilação do nível de montante	0,1m	0,2m	0,4m	0,2m	0,2m
Amplitude da oscilação do nível de jusante	↓ 0,5m	↓ 1,8m	↑ 1,4m	↑ 0,5m	↑ 0,5m
Amplitude da oscilação da queda bruta	0,4m	1,5m	1,5m	0,5m	0,5m
Queda bruta média	12,1m	12,8m	12,9m	12,6m	12,6m
Fase entre oscilação de jusante e posição do distribuidor		Fase	Fase		
Tempo dos ciclos de oscilação	3m20s				

Tabela 3 – Análise do evento de 21/03/2017

Item	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5
Amplitude da oscilação da posição do distribuidor	~0m	↓ 11% (alguns distribuidores abertos 100%)	↑ 7% (alguns distribuidores abertos 100%)	~0m	~0m
Amplitude da oscilação do nível de montante	~0m	0,2m	0,3m	0,2m	0,2m
Amplitude da oscilação do nível de jusante	~0m	↓ 1,5m	↑ 1,2m	↓ 0,4m	↓ 0,4m
Amplitude da oscilação da queda bruta	~0m	1,1m	1,1m	0,3m	0,3m
Queda bruta média	11,8m	12,2m	12,3m	12,1m	12,1m
Diferença entre reguladores GE e Voith	Não	Não	Não	Não	Não
Tempo dos ciclos de oscilação	3m30s				

Tabela 4 – Análise do evento de 21/03/2017

Item	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5
Amplitude da oscilação da posição do distribuidor	~0m	↓ 8% (alguns distribuidores abertos 100%)	↑ 6%	~0m	~0m
Amplitude da oscilação do nível de montante	~0m	0,2m	0,4m	0,1m	0,1m
Amplitude da oscilação do nível de jusante	~0m	↓ 1,2m	↑ 1,0m	↓ 0,3m	↓ 0,3m
Amplitude da oscilação da queda bruta	~0m	0,8m	0,5m	0,3m	0,3m
Queda bruta média	11,8m	12,1m	12,2m	12,2m	12,2m
Fase entre oscilação de jusante e posição do distribuidor		Fase	Fase		
Tempo dos ciclos de oscilação	3m20s				

Tabela 5 – Análise do evento de 21/03/2017

Item	GG1	GG2	GG3	GG4	GG5
Amplitude da oscilação da posição do distribuidor	~0m	↓ 13% (alguns distribuidores abertos 100%)	↑ 3,5%	↓ 8% (alguns distribuidores abertos 100%)	↓ 8% (Voith) 3% (GE)
Amplitude da oscilação do nível de montante	0,33m	0,4m	0,63	0,2m	0,2m
Amplitude da oscilação do nível de jusante	~0m	↓ 1,9m	↑ 0,5m	90° 1,0m	90° 1,0m
Amplitude da oscilação da queda bruta	0,1m	1,7m	0,6m	1,3m	1,3m
Queda bruta média	12,0m	12,2m	12,4m	12,4m	12,4m
Fase entre oscilação de jusante e posição do distribuidor		Fase	Fase	Em Fase com GG2	Em Fase com GG2
Tempo de ciclos de oscilação	3m20s				

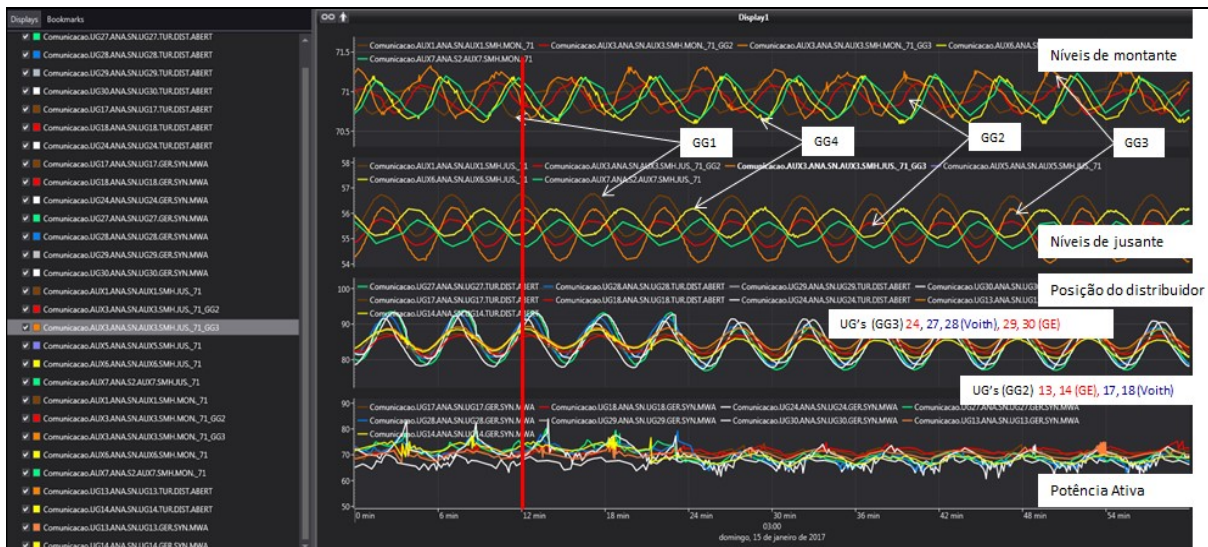


Figura 3 - Comportamento dinâmico durante as oscilações do dia 14/01/2017

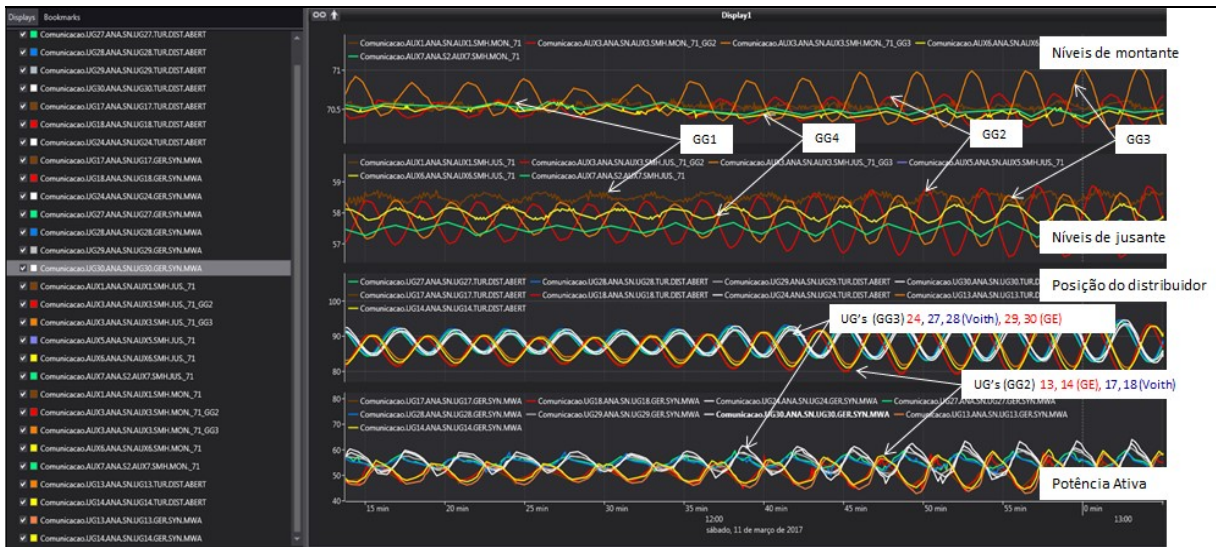


Figura 4 - Comportamento dinâmico durante as oscilações do dia 11/03/2017

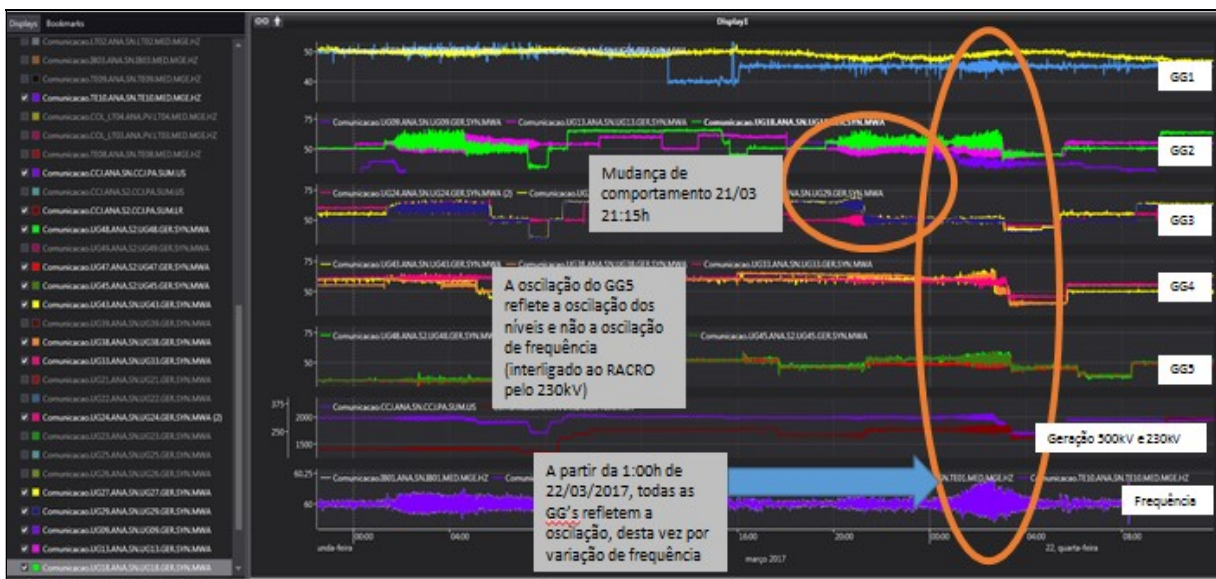


Figura 5 - Fases dos diferentes comportamentos dinâmicos das oscilações observadas no evento de 21/03/2017.

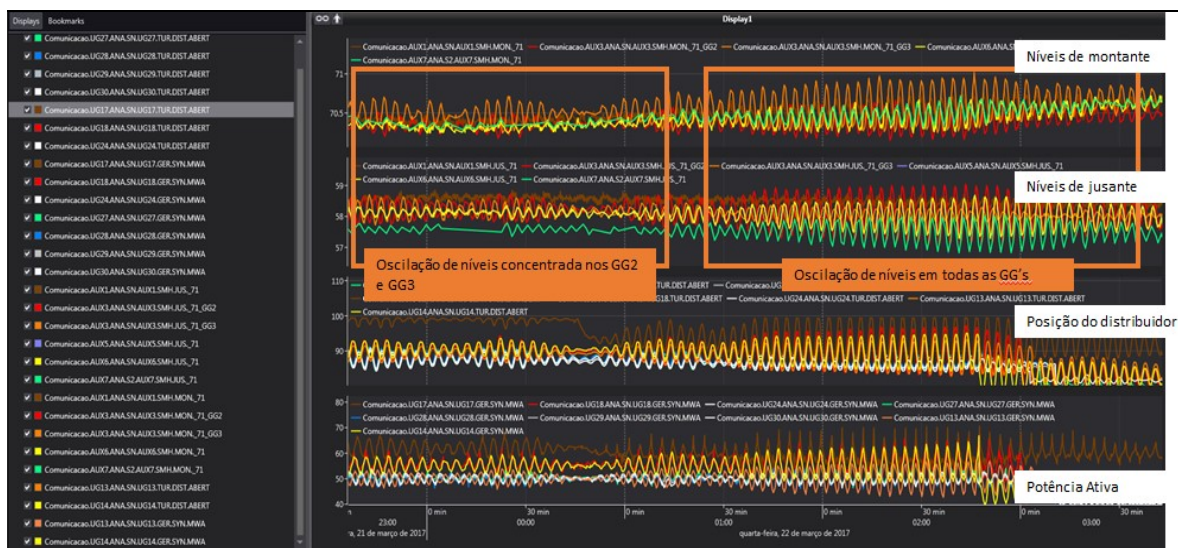


Figura 6 – Comparação do comportamento dos níveis de jusante e montante entre a segunda e a terceira etapa do evento.

Como mostrado na figura 3 e na tabela 1, no primeiro evento avaliado, observado em 14/01/2017 as oscilações de

níveis de montante e jusante observadas nos GG1 (marrom), GG2 (vermelho) e GG3 (laranja) possuíam fases de oscilações semelhantes e defasadas aproximadamente em 180° das mesmas observadas no GG4 (amarelo) e GG5 (verde).

Já o evento observado em 11/03/2017, mostrados na figura 4, as oscilações de nível de montante e jusante dos GG2 e GG3 estavam defasadas em aproximadamente 180° , como visto tabela 2. Os GG1, GG4 e GG5 possuíam também oscilações de nível, entretanto, com amplitudes muito inferiores às observadas nos GG2 e GG3 e por isso não foram analisados diretamente com os dados do Elipse.

No dia 21/03/2017 tivemos mostrados nas figuras 5 e 6 dois eventos de oscilação de potência ativa, o primeiro evento iniciou às 01h38min e encerrou às 07h48min (duração de 6h), o segundo evento iniciou às 20h06min e encerrou às 05h08min do dia seguinte (duração de 9h). O primeiro evento de 21/03/2017 foi similar ao evento do dia 11 de março de 2017. O segundo evento do dia 21/03/2017 teve comportamento diferente dos eventos analisados anteriormente. Este evento pôde ser dividido em três etapas:

1. Na primeira etapa, compreendida entre 20h06min e 21h15min do dia 21 de março, o comportamento foi similar ao evento do dia 11 de março (tabela 3);
2. A segunda etapa iniciou às 21h15min quando se observou uma diminuição drástica na amplitude de variação de nível na jusante do GG3, os demais itens avaliados continuaram com as mesmas características da primeira etapa (tabela 4);
3. A terceira etapa, iniciada à 01h00min do dia 22 de março de 2017, caracteriza-se pelo início do incremento da amplitude da variação de frequência do sistema de 500kV, a partir deste momento, todas os demais itens avaliados são afetados (tabela 5).

Embora não tenham sido mostrados neste artigo ao menos outros 5 eventos de oscilação de potência foram observados na usina de Santo Antônio Energia entre os dias 05/04/2017 e 18/05/2017. Todos eles com as mesmas características dinâmicas do evento de 11/03/2017, com oscilações concentradas nos GG2 e GG3 e defasadas aproximadamente 180° entre si. Por este motivo, o evento de 11/03/2017 será analisado com mais detalhe.

Os inícios dos eventos de oscilação em todos os casos avaliados não ficaram esclarecidos, nota-se que em alguns casos, antes do início das oscilações ocorreram algumas variações de carga em uma ou mais unidades geradoras, como no caso mostrado na figura 7 aonde as oscilações iniciaram quando ocorreu a tomada de carga da UG32.

Assim como o início dos eventos, a parada das oscilações também não teve motivos esclarecidos. Nota-se pela figura 8 que mesmo com a variação de carga em algumas UGs, as oscilações continuavam, mesmo naquelas UGs que tinham sua geração alterada.

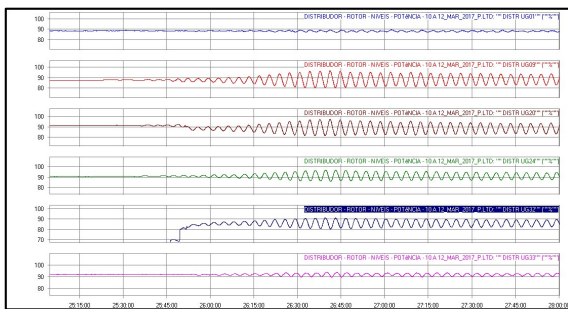


Figura 7 – Início da oscilação com a tomada de carga da UG32.

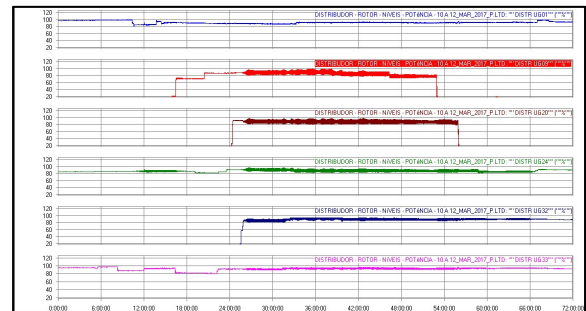


Figura 8 – Evento completo do dia 11/03/2017.

2.2 ANÁLISE DO EVENTO DE 11/03/2017

Este evento tem como característica principal oscilações defasadas de aproximadamente 170° entre as oscilações de abertura do distribuidor e rotor e da ordem de 200° entre os níveis de queda bruta (e líquida) entre as medições realizadas no GG2 e no GG3, identificadas na tabela 6.

A frequência predominante neste evento foi de 4,785mHz (mili-hertz) ou período de 208,99s (3min48seg). As figuras 7 a 10 mostram o resultado das análises espectrais das oscilações dos distribuidores dos GG1, GG2, GG3 e GG4 respectivamente. Todos os outros itens avaliados (posição do rotor, níveis de montante e jusante e potência ativa gerada) apresentaram a mesma distribuição espectral das posições dos distribuidores mostrada nos gráficos das figuras 9 a 11.

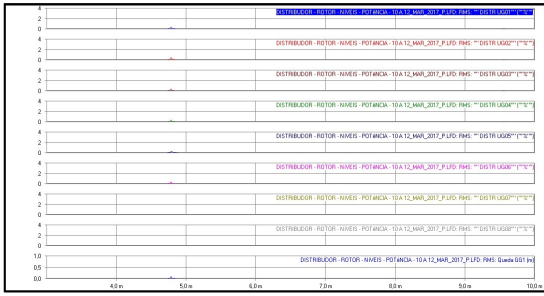


Figura 9 – Análise espectral das oscilações dos distribuidores do GG1.

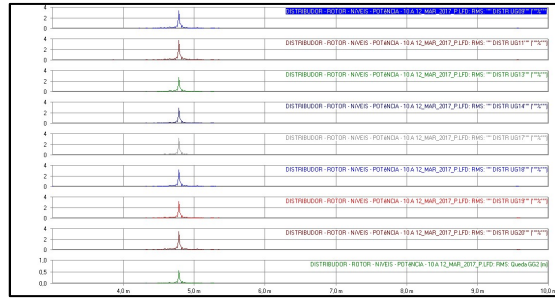


Figura 10 – Análise espectral das oscilações dos distribuidores do GG2.

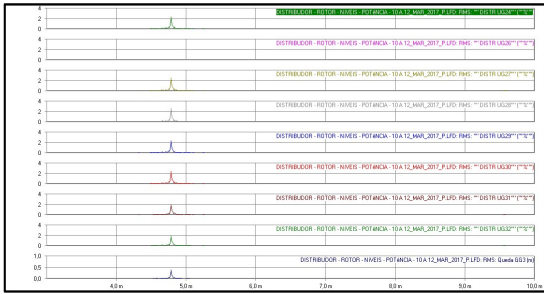


Figura 11 – Análise espectral das oscilações dos distribuidores do GG3.

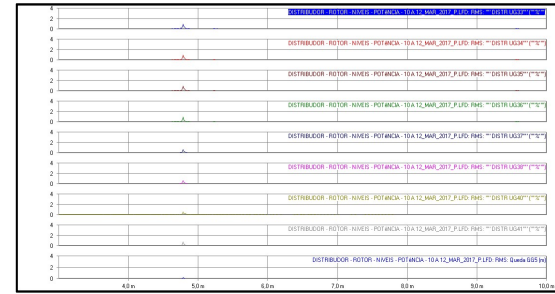


Figura 12 – Análise espectral das oscilações dos distribuidores do GG4.

UG	GG1								GG4								GG2								GG3							
	1	2	3	4	5	6	8	33	34	35	36	37	38	40	41	9	11	13	14	17	18	19	20	24	27	28	29	30	31	32		
Freq	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785			
Distribuidor [% RMS]	0,39	0,44	0,39	0,39	0,29	0,34	0,10	0,94	0,93	0,93	0,89	0,81	0,84	0,87	0,72	3,38	3,74	2,70	2,86	3,17	3,19	3,20	3,42	2,37	2,53	2,62	2,29	2,41	1,97	1,88		
Distribuidor [Base grav]	-148,10	-148,54	-147,29	-149,28	-134,03	-155,94	-113,09	59,34	36,60	37,90	36,09	22,30	27,42	14,75	49,19	-94,53	-92,58	-119,73	-111,83	-87,43	-91,11	-86,80	-85,70	66,78	95,54	96,30	66,16	86,33	72,43	70,70		
Fase média	-142,04							32,86								-90,06								76,60								
Dif Fase								175,00								-129,02								172,67								
Rotor [% RMS]	0,33	0,33	0,38	0,30	0,28	0,37	0,11	1,32	1,30	1,28	0,93	2,16	2,31	1,38	2,37	3,44	4,43	6,82	6,89	7,75	6,07	7,90	8,97	6,12	6,23	6,82	5,84	5,50	2,25	1,83		
Rotor [Base grav]	-159,47	-152,78	-153,00	-159,01	-113,85	-139,88	-158,04	36,75	37,38	36,93	32,63	27,44	32,13	4,20	54,80	-92,19	-92,16	-111,75	-103,84	-83,07	-78,21	-83,02	-79,89	70,24	97,68	96,77	71,82	76,90	74,08	71,29		
Fase média	-148,00							32,78								-90,52								80,28								
Dif Fase								180,79								-123,30								170,77								
Potência [% RMS]	0,33	0,31	0,32	0,34	0,33	0,35	0,04	0,52	0,49	0,51	0,47	0,86	0,85	0,61	0,55	1,87	2,03	3,29	3,00	1,97	2,21	2,12	2,41	2,53	1,36	1,37	2,12	2,86	1,82	1,85		
Potência [Base grav]	103,81	106,19	108,10	106,68	78,86	88,43	179,17	-19,31	-23,31	-23,30	-36,81	-34,48	-14,64	-56,60	30,33	187,25	-178,88	-177,80	-188,29	-143,91	-159,11	-143,32	-142,17	2,78	52,81	48,38	0,08	2,05	-31,35	-35,73		
Fase média	111,62							-21,00								-119,03								67,2								
Dif Fase								-132,62								-87,03								124,75								
Freq Quebra	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785	0,004785		
Quebra Bruta GG [% RMS]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37		
Quebra Bruta GG [Base grav]	60,47	60,47	60,47	60,47	60,47	60,47	60,47	-114,31	-114,31	-114,31	-114,31	-114,31	-114,31	-114,31	-114,31	103,79	103,79	103,79	103,79	103,79	103,79	103,79	103,79	-88,49	-88,49	-88,49	-88,49	-88,49	-88,49	-88,49		
Fase média	60,47							-114,31								103,79								-88,49								
Dif Fase								-174,76								216,10								-302,28								

Tabela 6 – Resultado das análises das oscilações nas Casas de Força (GGs).

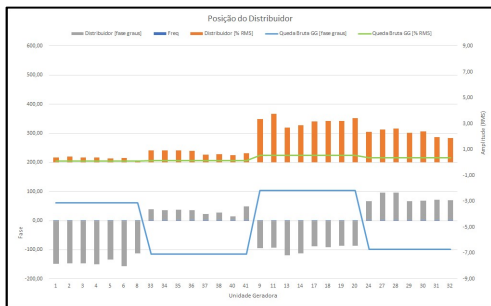


Figura 8 – Distribuição espectral (amplitude e fase) das oscilações.

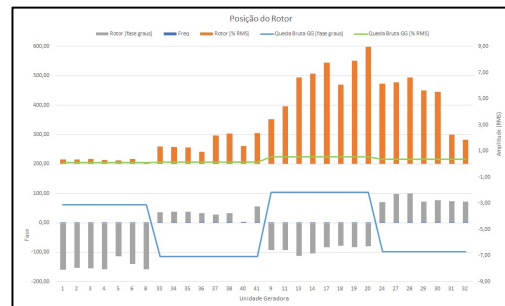


Figura 9 – Distribuição espectral (amplitude e fase) das oscilações.

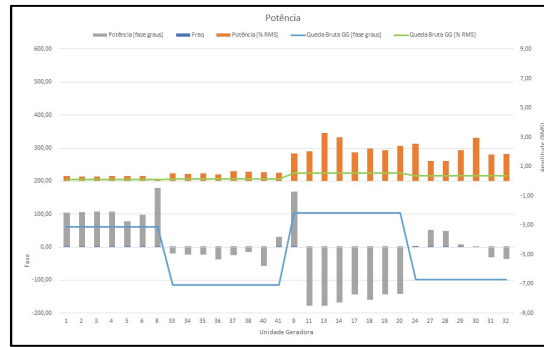


Figura 10 – Distribuição espectral (amplitude e fase) das oscilações das potências de todas as UGs.

3.0 - CONCLUSÃO

Evidenciamos diferenças significativas nos quatro eventos avaliados 14/01/17, 11/03/17 e os dois do dia 21/03/17.

No evento de 14/01/2017, os níveis de jusante do GG1, GG2 e GG3 oscilaram em fase entre si e em contra fase com os mesmos níveis do GG4 e GG5. Neste evento, observamos oscilação de potência ativa total gerada no sistema de 500kV da ordem de 60MW o que pode ter gerado oscilação de frequência neste sistema. Em resposta a esta variação de frequência, observamos oscilação de potência em todas as UG's do 500kV. Ainda neste evento, observamos respostas das UG's do 230kV, no entanto, como estas UG's estão conectadas à sistemas elétricos diferentes, concluímos que a oscilação de potência das UG's do 230kV reflete a oscilação dos níveis de montante e jusante do GG4/GG5. Não se observa diferenças na resposta dos reguladores de velocidade neste evento.

No evento de 11/03/2017 e no primeiro evento de 21/03/2017, as oscilações de níveis de jusante entre GG2 e GG3 ocorreram em contra fase, conseqüentemente, houve uma compensação da oscilação de potência ativa entre as UG's destes GG's. Esta compensação, evidenciada pela pequena variação de potência ativa total gerada, da ordem de apenas 15MW não provocou níveis significativos de oscilação de frequência, restringindo o evento às UG's dos GG2 e GG3. Nos demais GG's, as oscilações de níveis e de posição do distribuidor não tiveram valores significativos. Não observamos diferença na resposta dos reguladores de velocidade dos fabricantes GE e Voith.

O segundo evento do dia 21/03/2017 pode ser dividido em três etapas distintas.

A primeira etapa teve características similares ao evento do dia 11/03/2017 com oscilação contida entre GG2 e GG3.

A segunda etapa caracteriza-se por uma diminuição abrupta da oscilação dos níveis de jusante do GG3.

A terceira e última etapa caracteriza-se por um aumento gradual da variação da potência ativa total gerada e da oscilação de frequência. Nesta etapa todos os GG's, incluindo o GG5, responderam a oscilação da frequência assim como ocorreu no evento do dia 14/01/2017. Possivelmente, o acréscimo da amplitude da oscilação de frequência é reflexo da diminuição das oscilações do GG3 (segunda etapa) o que pode ter desequilibrado a compensação da potência ativa entre GG2 e GG3 aumentando os níveis de oscilação de potência total gerada e frequência. Nesta terceira etapa verificamos diferença na amplitude da resposta dos reguladores de velocidade dos fabricantes GE e Voith, os da GE responderam com amplitudes de oscilação da posição do distribuidor menores do que os reguladores da Voith, as fases das movimentações dos distribuidores dois fabricantes estavam similares.

Não temos nenhuma evidência que nos indique quem é a causa e quem é o efeito destas oscilações, assim como não temos evidência do motivo das mudanças de comportamento observadas nas três etapas do evento do dia 21/03/2017. Podemos verificar, no entanto, que a oscilação de abertura do distribuidor provocada por resposta das malhas de potência dos reguladores de velocidade à variação de potência excita a oscilação dos níveis de jusante e montante que por sua vez contribui com o aumento da oscilação de potência realimentando assim o processo.

Não há evidência, também, do que causava o início das oscilações nem mesmo o que causava o seu encerramento, no entanto, durante um evento de oscilação foi possível fetuar um teste de "congelamento" no SDSC da usina do valor de queda enviada à todos os reguladores de velocidade. Com este congelamento, houve a paralisação do evento oscilação, evidenciando que a variação da posição do rotor Kaplan em função da variação de queda além da sua variação normal em função da posição do distribuidor contribuía de forma significativa para a ocorrência da oscilação.

Tendo como base o teste citado acima, foi implementado na usina um filtro na medição de queda enviada para

todos os reguladores. Com a implantação deste filtro o valor de queda enviada para todos os reguladores é o resultado da média aritmética dos valores de queda medida de quinze em quinze minutos. O tempo de quinze minutos foi escolhido observando que este tempo deveria ser maior que o período das oscilações observadas e não pode prejudicar a regulação de potência e velocidade das unidades geradoras.

Nos anos de 2018 e 2019 não foram observadas estas oscilações.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GUIMARÃES, L.B. Máquinas hidráulicas. Curitiba: UFPR, 1991.
- (2) HENN, E.A.L. Máquinas de fluido. 2ª ed, Porto Alegre: UFSM, 2006.
- (3) MACINTYRE, A.J. Máquinas motrizes hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- (4) SOUZA, Z.; FUCHS, R.D.; SANTOS, A.H.M. Centrais hidro e termelétricas. São Paulo: Ed. Blücher, 1983.
- (5) PAIVA, R. B.D., et al – Validação do modelo matemático da turbina bulbo de cinco pás da UHE de Santo Antônio para estudos de transitórios eletromecânicos, XXII CBA, 2018.
- (6) J. Augusto, OSCILAÇÃO EM MASSA E ESTABILIDADE HIDRÁULICA DE SISTEMAS COMPLEXOS DE CHAMINÉS DE EQUILÍBRIO, FEUP, 2014.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- (1) Engenheiro Eletricista formado em 2003 pela Universidade São Judas Tadeu (SP), atualmente coordenador de engenharia na Usina Hidrelétrica Santo Antônio.



- (2) Operador de Usinas Hidrelétricas (2018), formado pelo IESB - Instituto Escolar Somos Brasileiros. Estagiário na Usina Hidrelétrica Santo Antônio, atualmente cursando Bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Rondônia (UNIR).



- (3) Técnico em Eletrotécnica (2012), formado pelo SENAIS. Técnico em Eletrônica, formado pelo Instituto Monitor. Bacharelado em Engenharia Elétrica em andamento na Faculdade Metropolitana de Porto Velho. Atualmente trabalha como técnico em controle e automação, com especialidade em controle de geração na Usina Hidrelétrica Santo Antônio.

