



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

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

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

OTIMIZAÇÃO DOS NÍVEIS OPERACIONAIS DE UMA USINA A FIO D'ÁGUA

Maria Elisa N. Delgado(*) CPFL Geração	Henrique G. Borduqui CPFL Geração	Francisco Galvão Junior CPFL Geração	Ricardo da Costa Rigolin ALSTOM Brasil
Benedito Marcio de Castro Oliveira ALSTOM Brasil		Márcio Lunardi Perin CERAN	Marco Aurélio Villar Cesar CERAN

RESUMO

Na busca pela eficiência operacional de uma usina a fio d'água estudou-se a flexibilização dos limites operativos de jusante, não expondo seus equipamentos a danos provenientes de operação em situações adversas. Os estudos foram realizados em conjunto com o fabricante e envolveram a revisitação dos projetos técnicos alinhados com o comportamento observado no histórico operacional e de afluência dessa usina. Como resultado alterou-se o nível máximo de operação de jusante trazendo um aumento da energia gerada em situações de alta afluência e redução da quantidade de partidas e paradas das unidades geradoras em um curto intervalo de tempo.

PALAVRAS-CHAVE

Usina fio d'água, Otimização, Restrição, Jusante, Kaplan

1.0 - INTRODUÇÃO

As usinas do tipo fio d'água são as usinas que não possuem reservatórios de armazenamento de água, assim sendo, seus níveis operacionais variam conforme a dinâmica de afluência de seus rios. No caso de grandes variações de afluência, os limites operacionais previstos no projeto da turbina podem levar a restrições operativas, que envolvem paradas e partidas em um curto intervalo de tempo, bem como redução na produção de energia.

Nesse contexto, o artigo estuda o caso da Usina Monte Claro com uma potência instalada de 130MW do tipo fio d'água, sendo composta por duas unidades geradoras do tipo Kaplan, localizada na região Sul do país. Conforme abordado nesse artigo, a Usina estudada apresenta um histórico operacional com grandes variações de afluências que não eram previstas na concepção do empreendimento, o que motivou a reavaliação dos limites operacionais práticos.

Assim sendo, o trabalho aborda a busca pela eficiência operacional através da flexibilização dos limites de montante e jusante, não expondo os equipamentos a danos provenientes de operação em situações adversas.

De um modo geral, os estudos envolvem a revisitação dos projetos técnicos construtivos das unidades geradoras e definição de principais pontos de monitoramentos on-line da unidade geradora, alinhados com o comportamento observado no histórico operacional e de afluência dessa usina.

Além do exposto, o trabalho apresenta os impactos comerciais e financeiros que a readequação proposta traz para o empreendimento e que pode também ser aplicado a outras usinas do tipo fio d'água com características similares da usina utilizada como estudo de caso.

2.0 - HISTÓRICO OPERACIONAL DA USINA

A UHE Monte Claro é uma usina sem reservatório de acumulação, localizada no Rio das Antas, no estado do Rio Grande do Sul. Possui duas unidades geradoras do tipo Kaplan de 65MW cada, totalizando uma potência instalada de 130MW.

2.1 Procedimento Operacional

A operação nessa usina é realizada respeitando-se os níveis operacionais determinados pelo fabricante, os quais estão apresentados na Tabela 1. Vale observar que as manobras de abertura do vertedouro são realizadas a partir da cota de montante de 150,00m.

Tabela 1 – Níveis Operacionais

Montante		Jusante	
Nível Máximo	148,00m	Nível Máximo	113,72m
Nível Mínimo	148,00m	Nível Mínimo	103,20m
Nível Normal	148,00m	Nível Normal	106,85m

A partir de dados hidráulicos da UHE Monte Claro nos anos de 2012, 2013 e 2014 observou-se que em geral a Usina não realiza parada exclusivamente por alto nível de montante, já que na maioria dos casos quando ocorre um alto nível de montante consequentemente a jusante atinge ou atingiu seu máximo operacional.

Assim, a quantidade expressiva de paradas das unidades geradoras em decorrência de níveis de jusante acima do atual nível operacional motivou o estudo descrito neste artigo, conforme dados da Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade de paradas de UG devido a alto nível de jusante

Ano	Horas	Total Horas Ano	% horas parada por NJ alto
2012	18	8.785,00	0,20%
2013	82	8.760,00	0,94%
2014	42	8.760,00	0,48%
Média	47,33	8.768,33	0,54%

2.2 Condições de Cheia

O gráfico apresentado na Figura 1 é resultado do monitoramento dos níveis operacionais onde são observadas variações bruscas da afluência e que por se tratar de uma usina a fio d'água impactam diretamente o nível de jusante.

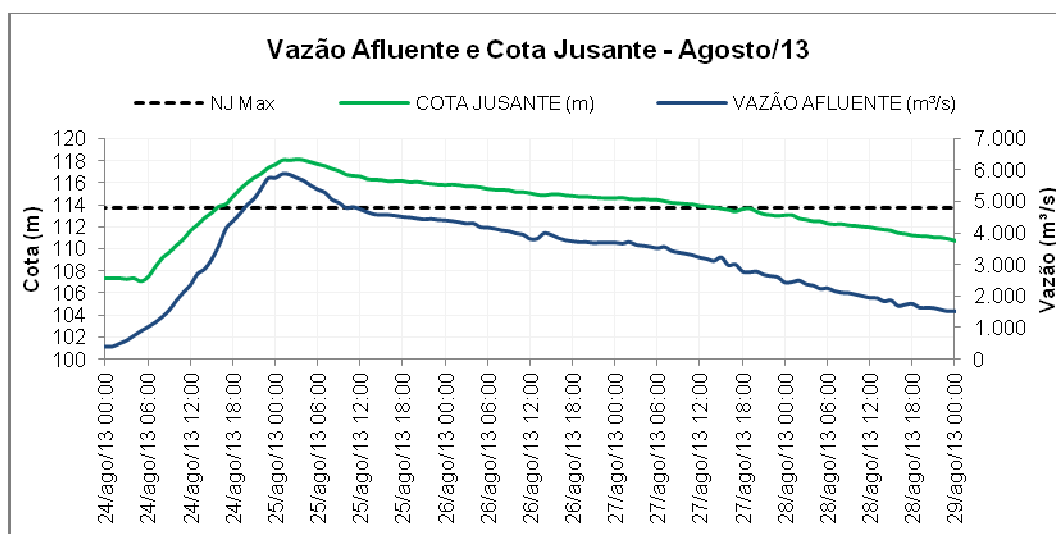


Figura 1 – Perfil da vazão afluente e nível de jusante em agosto/13

Conforme pode ser observado, em diversas situações ocorre a elevação da cota jusante ultrapassando os limites operacionais previstos no projeto da turbina, levando a restrições operativas, que envolvem paradas e partidas de unidades geradoras em um curto intervalo de tempo e reduções na capacidade de produção de energia.

A partir da análise do perfil da vazão afluente geralmente observa-se uma forte inclinação da curva de afluência no momento de sua chegada, havendo a necessidade da parada de geração da Usina devido a um nível de jusante acima do seu máximo operacional de projeto, e uma inclinação mais suave nos momentos seguintes, até o respectivo nível voltar a valores operacionais. Conforme esta apresentado no trabalho, o maior ganho de produção é na redução da afluência.

3.0 - OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO

Conforma já comentado, buscando a otimização operacional, foi desenvolvido um estudo, juntamente com o fabricante, que forneceu os subsídios técnicos para a flexibilização do nível de jusante, basendo-se no histórico operacional e nas medições do sistema de monitoramento e diagnóstico instalado na usina.

3.1 Importância do *Feedback* Operacional para o Fabricante

A UHE Monte Claro tem 2 (duas) turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical com rotor (roda) da turbina de 6 (seis) pás, sendo que cada pá possui um munhão separado, montado internamente a alavanca, acionada por um servomotor a óleo sob pressão do sistema de óleo do Regulador de Velocidade.

O projeto hidráulico de Monte Claro foi baseado em um ensaio de modelo realizado nas plataformas de ensaio da Alstom em Grenoble-FR. Com o resultado deste ensaio e cálculos CFD para adaptações feitas na caixa espiral e tubo de sucção foi feita a transposição dos resultados do modelo ao protótipo. As pás do rotor foram cuidadosamente acabadas para atender a homologia geométrica do modelo reduzido da turbina.

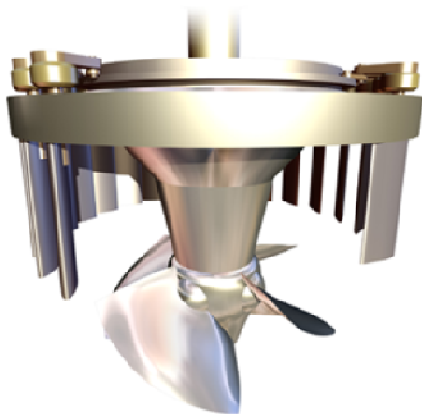


Figura 2 - Turbina Kaplan Vertical Típica

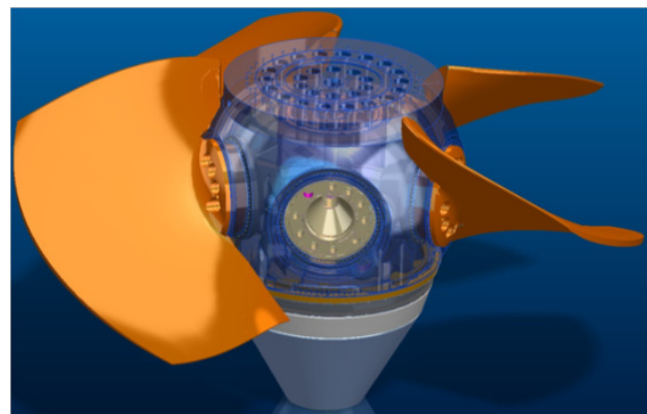


Figura 3 - Rotor Kaplan Típico

Através do histórico de operação, verificou-se que mesmo com os níveis de jusante acima dos de projeto as quedas líquidas estão dentro da faixa operacional da máquina. Isto foi possível devido o nível de montante estar em um máximo operacional não considerado juntamente com o máximo de jusante. Outras quedas observadas estão fora da faixa operacional, mas com possibilidades de operação.

Com a finalidade de se definir novos níveis para melhoria da eficiência operacional foram realizadas verificações no projeto hidráulico e mecânico, conforme descrito a seguir:

- Cavitação de cubo: Devido ao aumento do nível de jusante, e considerando a operação com a mesma vazão, sabe-se que o *Net Positive Suction Head* (NPSH) da instalação será maior, conforme indicado nas equações abaixo, o que fará com que a margem de NPSH aumente, portanto não havendo aparição de cavitação de cubo.

$$\uparrow H_s = \uparrow \text{Nível}_{\text{jusante}} - \text{Nível}_{\text{LCrotor}}$$

Equação 1

$$\uparrow \text{NPSH}_{\text{instalação}} \uparrow = H_s + H_{\text{atm}} - p_v$$

Equação 2

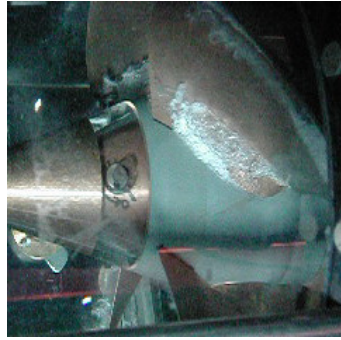


Figura 4 – Cavitação de cubo



Figura 5 – Cavitação de entrada

- Cavitação de entrada: No caso da diminuição da queda líquida significa que poderia estar entrando na cavitação de entrada lado pressão (ICPS). Para evitar qualquer possível problema não previsto no projeto inicial, foi limitado o cálculo da energia adicional sem entrar na faixa de início de cavitação de entrada, como pode ser visto o exemplo na Figura 6 referente a um ponto com a modificação do nível jusante.

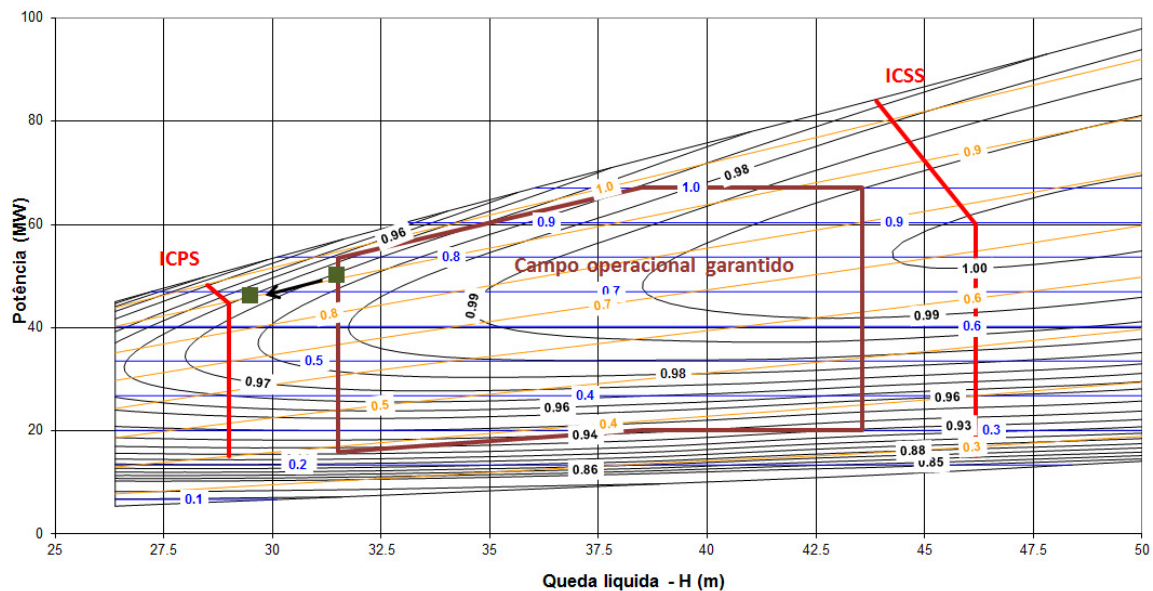


Figura 6 – Colina protótipo com limites da cavitação de entrada

- Contra Empuxo devido à rejeição de carga: Devido ao aumento do nível de jusante em 2 metros, houve um aumento do contra empuxo durante a rejeição de carga em torno de 6%. O rotor foi submetido às verificações mecânicas devido a esta alteração.

3.2 Monitoramento

Apesar dos estudos apontarem que é viável o aumento do nível máximo de jusante, com confiabilidade operacional, 2 metros acima do valor de projeto, o comportamento da máquina será acompanhado pelo sistema de monitoramento e diagnóstico para a validação. As grandezas principais a serem monitoradas estão apresentadas a seguir.

- Verificação da vibração dos mancais e oscilação dos eixos (normas ISO 7919 e ISO 10816)
- Verificação do comportamento em rejeição de carga (sobrepessão, sobrevelocidade, pressão na câmara dos servos)
- Verificação da conjugação

4.0 - READEQUAÇÃO DOS NÍVEIS OPERACIONAIS

A partir do estudo do comportamento da vazão afluente e da verificação do fabricante referente a operação hidráulica e mecânica segura das novas quedas, observou-se a possibilidade de ganho operativo na UHE Monte Claro com o aumento do nível máximo operacional do nível de jusante.

4.1 Readequação Proposta

A readequação proposta foi fundamentada em estudos que envolveram a revisitação dos projetos técnicos construtivos das unidades geradoras e definição de principais pontos de monitoramentos on-line da unidade geradora, alinhados com o comportamento observado no histórico operacional e de afluência dessa usina.

A revisitação dos projetos técnicos construtivos permitiu verificar pontualmente, através de cálculos matemáticos, a condição operacional das unidades geradoras para o nível máximo operacional de 115,72 m, ou seja, de 2 metros acima da cota de projeto, que é de 113,72 m.

Para evitar qualquer risco adicional a unidade continua operando dentro da faixa sem cavitações de entrada. Devido ao aumento do contra empuxo foram feitas as verificações mecânicas necessárias e confirmado a condição segura devido possibilidade de *uplift* da unidade.

O monitoramento on-line da unidade geradora garante que a mesma está operando dentro dos parâmetros aceitáveis de vibração, pulsação de pressões entre outros. Apesar de que foi comprovado pelas verificações ao projeto hidráulico e mecânico que tanto a vibração, como a pulsação de pressão estará dentro dos valores previstos no projeto básico.

4.2 Ganhos Obtidos

A partir do aumento do nível máximo operacional de jusante para 115,72 m os ganhos operativos relacionam-se à redução da quantidade de partidas e paradas das unidades geradoras e aumento da energia gerada em períodos de alta afluência.

Sabe-se que grandes quantidades de partidas e paradas são prejudiciais as unidades, e levam mais rapidamente a desgastes os componentes e submetem os mesmos a um stress maior, apesar de não comprovado o quanto isto afeta a vida útil dos equipamentos. Portanto a redução da quantidade de partidas e paradas em um curto intervalo de tempo devido à operação das unidades em níveis jusantes maiores é um ganho a todo equipamento eletromecânico.

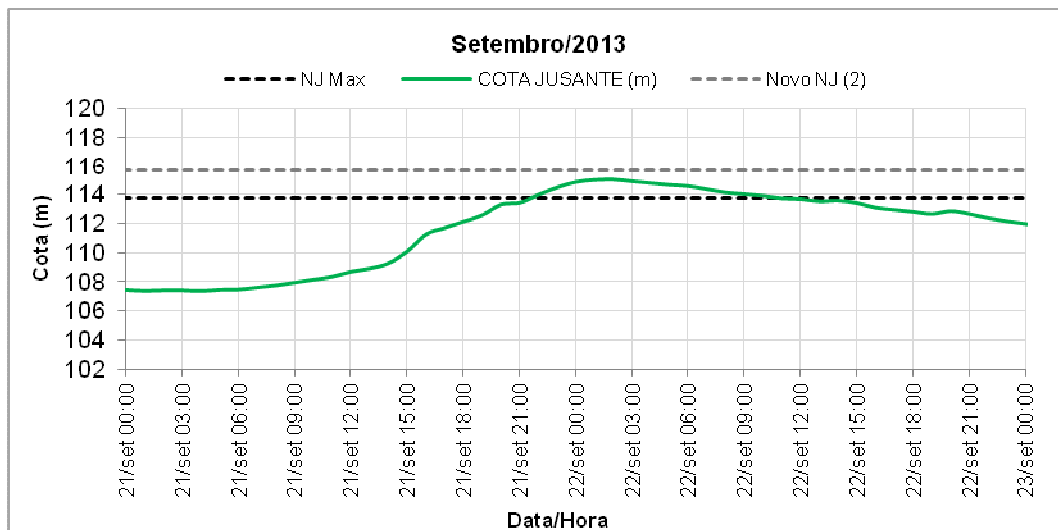


Figura 7 – Simulação do benefício da alteração do nível de jusante em setembro/13 evidenciando a redução de partidas e paradas de unidades geradoras

Em situações que o nível de jusante vai além da cota 115,72 não é possível evitar a partida e parada das UG's, no entanto consegue-se aproveitar por um tempo maior a vazão afluente disponível, conforme mostra a Figura 8, em que se aumentou o tempo de geração em plena carga em aproximadamente 39 horas.

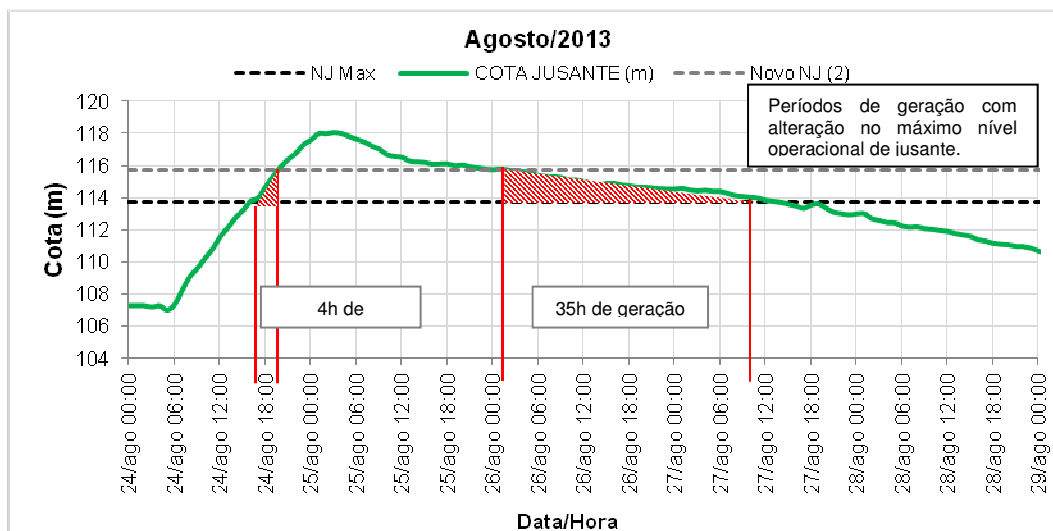


Figura 8 – Ganho de geração em Agosto/13 a partir da alteração do nível máximo de jusante.

Foram mapeados os ganhos operativos nos anos de 2012, 2013 e 2014 e com a readequação proposta, 65% das ocorrências de paradas da Usina por alto nível de jusante de projeto seriam absorvidas pela nova diretriz operativa.

Tabela 1 – Comparação da quantidade de paradas da Usina relacionadas ao nível de jusante, antes e depois da alteração realizada.

Ano	NJ de Projeto	NJ Alterado
2012	18	0
2013	82	31
2014	42	18
Média	47,33	16,33

Os ganhos de geração variam conforme os perfis da vazão afluyente da Usina, assim, existem anos que apesar da condição hidrológica não ser muito favorável esse perfil pode se realizar várias vezes, e vice-versa. Os ganhos simulados nos anos estudados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Ganhos de geração de energia com a alteração do nível máximo de jusante

Ano	MWh
2012	1.760,74
2013	5.730,49
2014	2.677,82
TOTAL	10.169,05
Média	3.389,68

Sendo o consumo residencial médio de 0,167 MWh/mês no Brasil, conforme dados da EPE de 2013, a geração de 10.169,05 MWh seria capaz de fornecer energia para 61 mil residências durante um mês.

Em agosto de 2013, situação evidenciada na Figura 7, a readequação do nível de jusante traria um ganho de geração de 4.139,71 MWh. A título de comparação, esse incremento de geração distribuído nas 39 horas mencionadas, pouparia a operação da UTE Xavantes, usina térmica de 54MW da região Sudeste com um dos maiores CVU do SIN (CVU Ago/13 = R\$ 1.167,52/MWh) durante três dias a plena carga, proporcionando um custo evitado de aproximadamente R\$ 4.833.194,22 para o Sistema Interligado Nacional – SIN.

Considerando a crítica situação hidroenergética atual e visando estimar os impactos de longo prazo do incremento médio de geração de 3.389,68 MWh/ano da UHE Monte Claro, foram realizadas simulações no NEWAVE e foi obtido uma redução no Custo Marginal de Operação (CMO) do subsistema Sul no ano de 2015 de aproximadamente 0,4%. Resultado esse que podemos considerar significativo, tendo em vista ser esta a contribuição de apenas uma Usina de 130MW.

Tabela 3 – Simulações NEWAVE do impacto da alteração do NJ no Custo Marginal de Operação de cada subsistema

Ano	CMO (R\$/MWh) - NJ de projeto				CMO (R\$/MWh) - NJ após readequação				Redução do CMO devido à alteração do NJ (R\$/MWh)			
	Subsistema				Subsistema				Subsistema			
	SE	S	NE	N	SE	S	NE	N	SE	S	NE	N
2015	1.348,1	1.310,1	1.123,9	988,1	1.345,8	1.305,2	1.123,7	987,1	-2,3	-5,0	-0,1	-1,0
2016	483,4	491,1	318,5	269,8	479,1	489,0	320,6	278,7	-4,3	-2,1	2,1	8,9
2017	206,7	216,2	114,1	102,1	206,1	218,2	114,5	101,9	-0,5	2,0	0,4	-0,2
2018	132,4	136,0	97,9	90,6	133,5	135,5	98,3	90,9	1,1	-0,6	0,4	0,3
2019	92,5	90,9	76,2	70,1	92,0	90,8	76,3	70,3	-0,5	-0,1	0,1	0,1

Trazendo para a situação energética atual, se considerarmos em 2015 o incremento de geração média de 3.389,68 MWh da UHE Monte Claro poupando a operação da mesma UTE Xavantes (CVU Mar/15 = R\$ 1.167,52/MWh), teríamos um custo anual evitado de aproximadamente R\$ 3.957.519,19 para o Sistema Interligado Nacional – SIN.

5.0 - CONCLUSÃO

O trabalho proposto mostrou que variações bruscas de afluência levam a elevação da cota de jusante a valores que ultrapassam os limites operacionais previstos no projeto da turbina, levando a restrições operativas, que envolvem paradas e partidas de unidades geradoras em um curto intervalo de tempo.

Através da revisitação técnica dos projetos pelo fabricante e do histórico operacional da UHE Monte Claro, verificou-se que mesmo com os níveis de jusante acima dos de projeto tem-se quedas líquidas que estão dentro da faixa operacional da máquina. Assim, observou-se a possibilidade de ganho operativo na UHE Monte Claro com o aumento do nível máximo operacional de jusante.

Com isso, a principal contribuição para o setor elétrico é apresentar um estudo de caso real e a respectiva solução adotada, a qual pode refletir em ganhos para outras usinas do tipo fio d'água com características similares à da UHE Monte Claro, já que a operação ótima de uma usina resulta em ganhos para o empreendedor e para o setor elétrico como um todo.

Também fica clara a importância do *feedback* operacional do agente para o fornecedor, uma vez que ocorrem ganhos operacionais e eventuais otimizações de projeto que podem ser aplicadas em empreendimentos futuros.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013 – Rio de Janeiro: EPE, 2014.

(2) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC/CEI) HYDRAULIC TURBINES, STORAGE PUMPS AND PUMP-TURBINES – Model acceptance tests IEC/CEI publication 60193 – Second Edition, 1999 – 11

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Maria Elisa Novaes Delgado nasceu em Campinas/SP em 1982. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 2008, pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Possui pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho em 2012, pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Atualmente é Engenheira de Operação da Geração na CPFL Geração de Energia.

Henrique Gabriele Borduqui nasceu em São José do Rio Preto/SP em 1985. Graduiu-se em Engenharia Mecânica em 2010, pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Atualmente é Engenheiro de Manutenção da Geração na CPFL Geração de Energia.

Francisco João Di Mase Galvão Jr. nasceu em Campinas/SP em 1981. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 2004, pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Possui mestrado em Sistema Elétrico de Potência pela UNIFEI e está cursando doutorado pela UNIFEI. Atua no setor de geração de energia há 10 anos, tendo atuado nas empresas ALSTOM e GE e atualmente é Coordenador de Operação e Manutenção da Geração da CPFL Geração de Energia.

Ricardo da Costa Rigolin nasceu em São Paulo/SP em 1977. Graduiu-se em Engenharia Mecânica em 1996, pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Possui especialização em máquinas hidráulicas pela EPFL – “École Polytechnique Fédérale de Lausanne” em 2012. MBA em Gestão de Marketing Estratégico pela USP – Universidade de São Paulo (em andamento). Atualmente é Gerente de Engenharia na área de engenharia de aplicação e “Hydraulic Principal Engineer” da Alstom Energias Renováveis.

Benedito Marcio de C. Oliveira nasceu em Taubaté/SP em 1958. Graduiu-se em Engenharia Mecânica em 1980, pela Universidade de Taubaté (UNITAU). Possui pós graduação em Administração, Materiais e Produção pela UNITAU/INPG em 1988 e em Marketing, pela UNITAU/INPG em 1990. Possui MBA em Gestão Empresarial pela INPG (2000-2002), Nível II - Inspetor de Soldagem Off Shore e Estrutura Marítima Metálica pela Petrobrás, formação técnica Neyrpic na França Grenoble (1990 – 1992) e foi expatriado para a ALSTOM França-Grenoble de 2005 a 2010. Possui também certificado do Lean Product Development certification Program da Michigan University em 2009.

Márcio Lunardi Perin nasceu em Veranópolis/RS em 1983. Graduiu-se Bacharel em Sistemas de Informação em 2008, pela Universidade de Caxias do Sul (UCS). Possui pós-graduação em Gestão Estratégica e Negócios em 2013, pela Universidade de Caxias do Sul (UCS). Ocupou cargo de Técnico de manutenção no período de 2002 a 2011 na Companhia Energética Rio das Antas onde atualmente é Coordenador de Operação.

Marco Aurélio Villar Cesar nasceu em Dracena/SP em 1970. Graduiu-se em Engenharia Mecânica em 1992, pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Possui pós-graduação em Refrigeração e Ar Condicionado pela Faculdade de Engenharia Industrial da Fundação de Ciências Aplicadas (FEI) em 1993. Possui MBA em Gestão Comercial pela Fundação Getúlio Vargas (Bi-FGV) em 2005 e Gestão de Negócios com ênfase no Setor Elétrico pela Fundação Instituto de Administração (FIA) em 2011. Atualmente é Gerente de Serviços da CPFL Geração de Energia S.A. atuando na Gerência de Operação e Manutenção da Companhia Energética Rio das Antas (CERAN).