



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPL/23

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**UMA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DO ELO CC DE FURNAS NA SUBESTAÇÃO DE FOZ DO IGUAÇU
TRANSMITINDO ENERGIA DE ITAIPU 60 Hz**

**Evonyr Bordin Filho (*)
ITAIPU BINACIONAL**

**Jaime Javier Vera Moreira
ITAIPU BINACIONAL**

**Robson Almir de Oliveira
ITAIPU BINACIONAL**

RESUMO

A usina de ITAIPU pertence ao Brasil e ao Paraguai e possui dois setores, um em 50 Hz e outro em 60 Hz. Atualmente o ELO de Corrente Contínua associado a ITAIPU 50 Hz já apresenta capacidade de transmissão ociosa, com tendência de aumento nos próximos cinco anos devido ao significativo crescimento da demanda de energia do sistema elétrico paraguaio. Esta capacidade ociosa pode se transformar numa oportunidade de ganhos de confiabilidade, segurança e de otimização energética para o SIN-BR se for possível utilizar parte desse ELO de Corrente Contínua operando conectado à usina de ITAIPU 60 Hz. Este artigo apresenta uma proposta dessa utilização e as vantagens sistêmicas advindas dessa prática.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de transmissão, planejamento energético, ociosidade, ELO CC, ITAIPU.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de ITAIPU Binacional pertence ao Brasil e ao Paraguai e é composta por 20 unidades geradoras com potência nominal de 700 MW cada uma, totalizando uma capacidade instalada de 14.000 MW. Em função da diferença das frequências utilizadas no Brasil e Paraguai, metade foi projetada para operar em 60 Hz, frequência utilizada no Brasil e metade em 50 Hz, frequência utilizada no Paraguai. No ano de 2016, a usina atingiu uma produção recorde de 103.098.300 MWh, e foi responsável pelo suprimento de 16,8 % do mercado de energia elétrica brasileiro e 75,6 % do mercado de energia elétrica paraguaio. Dessa energia, 53 % foi gerada no 50 Hz e 47 % foi gerada no 60 Hz, sendo 88,1 % para o Brasil e 10,9 % para o Paraguai.

O tratado de ITAIPU estabelece no artigo XIII que "... - A energia produzida pelo aproveitamento hidrelétrico..... será dividida em partes iguais entre os dois países, sendo reconhecido a cada um deles o direito de aquisição, ... , da energia que não seja utilizada pelo outro país para seu próprio consumo." Em outras palavras o que um país não consumir o outro pode adquirir.

Quando a usina foi construída, a carga do Paraguai era de apenas 140 MW, o que levou ao projeto do ELO CC com capacidade de transmitir todo o setor de 50 Hz. Atualmente o sistema Paraguaio já alcançou 2.500 MW de potência de ITAIPU 50 Hz nos horários de ponta, limitando a 4.5000 MW a disponibilidade de potência para o ELO de corrente contínua. Desta forma, não está sendo explorado o máximo da transmissão pelo ELO CC (*High Voltage Direct Current*) e, por consequência, há o aparecimento de uma capacidade ociosa importante. Face ao aumento crescente da capacidade ociosa, este artigo apresenta uma proposta de utilização do ELO CC para transmitir energia gerada pelas unidades geradoras de 60 Hz de ITAIPU, com ganhos energéticos e elétricos para o SIN-BR, aproveitando uma instalação existente.

(*) Avenida Tancredo Neves, n° 6.731 – CEP 85866-900 - Foz do Iguaçu - PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3520-2626 – Fax: (+55 45) 3520-2076 – Email: bordin@itaipu.gov.br

2.0 - A UTILIZAÇÃO DE ELO CC

Segundo [1] a utilização de ELO CC vem se expandido rapidamente nas últimas décadas, como resultado da evolução das tecnologias empregadas na conversão de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC). Os sistemas ELO CC permitem transferir potência entre sistemas que operam com frequências diferentes (assíncronos). Outras aplicações importantes, com vantagens de custos sobre a transmissão em corrente alternada, são a transmissão de grandes blocos de potência a longas distâncias e a interligação de sistemas por cabos submarinos e/ou subterrâneos.

Além das aplicações acima, ainda segundo [1] sistemas ELO CC proveem outras características interessantes para a operação se inseridos a sistemas interligados AC. Por exemplo, ELOs CC oferecem completo controle sobre o fluxo de potência, de forma que a direção do fluxo de potência pode ser alterada e as tensões operacionais reduzidas quando necessário. Outra vantagem, não aumentam os níveis de correntes de curto-circuito, portanto não implicam a necessidade de substituição de disjuntores devido a superação de capacidade de interrupção. Há de se considerar também que sistemas ELO CC possuem altos índices de disponibilidade e de confiabilidade, conforme mostra acompanhamento do desempenho dos conversores do ELO CC de Furnas associado à UHE-ITAIPU, com índices de disponibilidade superiores a 95 %, conforme relatório trimestral de acompanhamento da operação interligada ANDE/ITAIPU/Furnas.

No Brasil, mais de 75 % da energia elétrica é de origem hidráulica, com as grandes usinas a distâncias consideráveis dos centros de carga, e são interligadas por longas linhas de transmissão em EAT. Assim sendo, segundo [2][3] pelas características intrínsecas dos sistemas ELO CC, se instalados em locais adequados, podem ser interessantes para atender o aumento da demanda do SIN, criando menor impacto ambiental que um empreendimento em corrente alternada de capacidade equivalente, e com custos menores para distâncias superiores a 700 km.

Ainda segundo [2][4], algumas características dos ELO CC podem trazer benefícios para a operação de sistemas de corrente alternada em regime permanente no aumento dos limites de fluxo nas interligações regionais e dinâmico quando operando em paralelo com linhas de corrente alternada provendo melhoria da estabilidade do sistema. Quando um ELO CC é conectado em paralelo com linhas AC, a modulação da potência ativa no ELO CC pode amortecer as oscilações nas interligações em AC. Exemplos desta estratégia podem ser verificados nos projetos Rihand-Delhi e Chandrapur-Padghe na Índia.

3.0 - ELO CC DE FURNAS ASSOCIADO À ITAIPU 50 HZ

O ELO CC associado a ITAIPU 50 Hz foi concebido para transmitir para o SIN-BR a energia gerada pelas nove unidades geradoras de ITAIPU 50 Hz que não fosse consumida pelo sistema paraguaio. A usina se conecta à subestação retificadora em Foz do Iguaçu por quatro linhas de 500 kV. No terminal de Ibiúna, a estação inversora se conecta ao sistema Sudeste e ao sistema Sul por linhas 345 kV e 500 kV.

Este sistema ELO CC é constituído de dois bipolos de ± 600 kV, ponto a ponto, com 1.575 MW de potência nominal por polo, totalizando uma capacidade instalada de 6.300 MW. A estação retificadora está localizada em Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, e a estação inversora em Ibiúna, no estado de São Paulo, distantes aproximadamente 800 km.

A Figura 1 apresenta o diagrama esquemático atual do sistema ELO CC de Furnas associado a ITAIPU 50 Hz, com o sistema receptor no SIN-BR e a interligação ITAIPU/ANDE, isto é, a interligação que atende ao Paraguai.

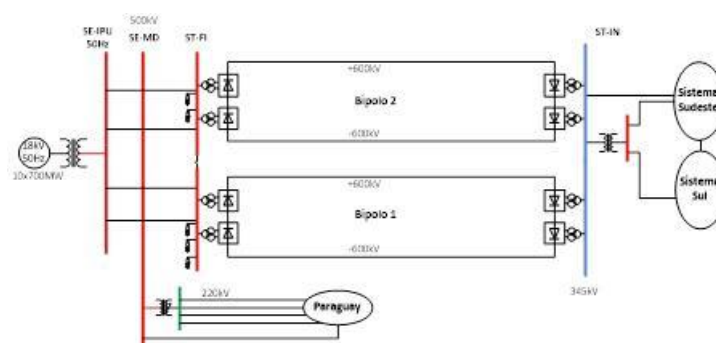


Figura 1

(*) Avenida Tancredo Neves, n° 6.731 – CEP 85866-900 - Foz do Iguaçu - PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3520-2626 – Fax: (+55 45) 3520-2076 – Email: bordin@itaipu.gov.br

A entrada em operação do ELO CC foi gradativa, se iniciando em 1984 e concluída em 1988. Inicialmente, a demanda do Paraguai era de 140 MW, portanto todo excedente de energia da usina de ITAIPU em 50 Hz era fornecido para o Brasil, aproveitando, à época, a plena capacidade do ELO CC. Em 2005, com a instalação da décima e última unidade geradora de 50 Hz, o ELO CC voltou a ser explorado plenamente. Atualmente o ELO CC fica limitado pelo intercâmbio ITAIPU/ANDE, atingindo valores de até 5.600 MW no período de carga mínima da ANDE.

Embora os dois bipolos possam operar independentes, atualmente o controle é feito no nível da estação, sendo responsável pela ordem de potência para os conversores. Normalmente o ELO CC opera com distribuição balanceada de potência pelos conversores em operação.

Para prover suporte de reativos e filtragem das harmônicas do processo de conversão AC/DC, no terminal de Foz do Iguaçu, a estação conversora possui cinco filtros de corrente alternada. No lado de Ibiúna, a estação conversora possui 14 filtros de corrente alternada e dois compensadores síncronos.

4.0 - EVOLUÇÃO DA DEMANDA DO SISTEMA ELÉTRICO PARAGUAIO

O sistema elétrico paraguaio é operado pela ANDE (Administración Nacional de Eletricidad), sendo constituído por uma rede de 220 kV/66 kV conectando cinco regiões do país, Norte, Sul, Leste, Central e Metropolitana. Possui como principais fontes de geração a Usina de ITAIPU 50 Hz, a Usina de Acaray (200 MW) e a usina de Yacretá (3.300 MW), que é uma usina binacional entre o Paraguai e a Argentina. Atualmente, devido problemas de estabilidade, o SIN-PY opera com dois subsistemas isolados, o SS1 com a usina de Acaray em paralelo com ITAIPU 50 Hz suprindo as regiões Leste, Norte, Central e a maior parte da região Metropolitana e o SS2 com a usina de Yacretá suprindo as regiões Sul e a outra parte da região Metropolitana.

A interligação ITAIPU/ANDE é constituída de quatro linhas de 220 kV, duas para o sistema Leste e duas para a região metropolitana, e uma linha de 500 kV para a região metropolitana.

Segundo a ANDE [10], a demanda de energia do Paraguai vem apresentando um crescimento de aproximadamente 7 % ao ano. Conforme o documento “Plan Maestro de Generación y Transmisión - período 2014 – 2023”, planejamento decenal do sistema ANDE, onde se indicam as obras de ampliação e reforços de geração e transmissão, se estima que nesse período sejam necessárias as injeções de potência das usinas de ITAIPU e Yacretá indicadas na Figura 2, durante a carga média do sistema ANDE, onde se observa que um aumento sensível do intercâmbio ITAIPU/ANDE, limitando cada vez mais a disponibilidade do 50 Hz para o sistema brasileiro. Atualmente, o intercâmbio na ponta de carga já atinge 2.469 MW (dados de março de 2017). Pelo mesmo plano, o intercâmbio com ITAIPU na carga leve em 2023 deve atingir o patamar de 2.472 MW.

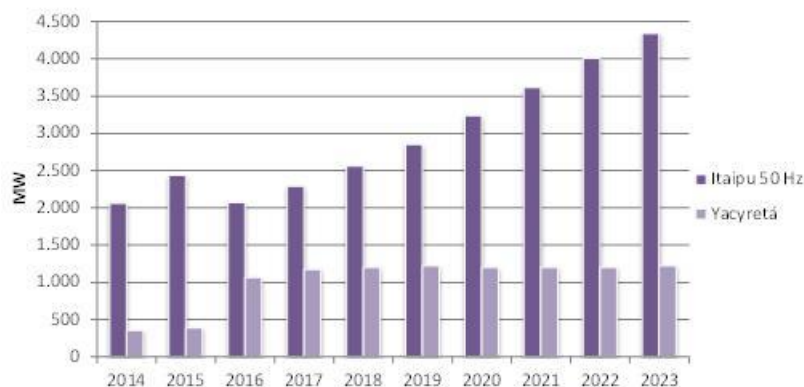


Figura 2 - Injeções de potência de ITAIPU 50 Hz e Yacretá ao SIN-PY (MW)- Carga média

5.0 - BIPOLO 2 DO ELO CC DE FURNAS EM FOZ DO IGUAÇU OPERANDO COM A UHE ITAIPU 60 HZ

No médio prazo, o ELO CC de Furnas associado a ITAIPU 50 Hz apresentará uma capacidade ociosa de 50 % de sua capacidade nominal (3.150 MW), consequência do aumento do intercâmbio ITAIPU/ANDE, que atingirá valores superiores a 3.500 MW, praticamente metade da disponibilidade de potência de ITAIPU 50 Hz (7.000 MW).

Considerando que existem restrições à transmissão da energia de ITAIPU 60 Hz para o SIN-BR, influenciadas principalmente pela exportação do Sul para o Sudeste, que impedem o aproveitamento ótimo da energia de ITAIPU 50 Hz e 60 Hz, uma alternativa para minimizar essas restrições seria aproveitar a capacidade ociosa do ELO CC, utilizando, por conveniência, o bipolo 2 do ELO CC de Furnas em Foz do Iguaçu, para transmitir energia gerada por

(*) Avenida Tancredo Neves, n° 6.731 – CEP 85866-900 - Foz do Iguaçu - PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3520-2626 – Fax: (+55 45) 3520-2076 – Email: bordin@itaipu.gov.br

ITAIPU 60 Hz. Neste sentido, se analisará a seguir os arranjos necessários bem como os benefícios elétricos e energéticos advindos desta operação.

5.1 Arranjos Físicos

Conforme se observa no campo, o arranjo físico dos setores de 50 Hz e 60 Hz do pátio de 500 kV da subestação de Foz do Iguaçu de Furnas foi concebido de forma tal, que possibilita a realização de modificações na configuração, tais como seccionamento e interligação dos barramentos de ambos setores.

A alternativa aqui proposta é que o bipolo 2 seja conectado de forma a operar interligado a ITAIPU 60 Hz. A configuração dessa alternativa é mostrada na Figura 3, em que são consideradas as seguintes modificações na configuração atual:

- Isolação das semi-barras de 500 kV do bipolo 1 e bipolo 2 pela abertura das seccionadoras existentes;
- Interligação das barras de 500 kV de 60 Hz com a semi-barra do bipolo 2;
- Isolação das linhas LI 500 kV MD-FI 3 e 4 na ST-FI 50 Hz (estas linhas podem ser redirecionadas para as barras do bipolo 1);
- Aquisição/adequação dos filtros de corrente alternada sintonizados para 60 Hz;
- Reajuste do controle do bipolo para operar na frequência de 60 Hz.

Nessa alternativa se considerou que os transformadores conversores existentes podem operar em 60 Hz, e que não há necessidade de quaisquer controles adicionais no ELO CC, sendo necessário uma adaptação no controle para 60 Hz. Caso os transformadores conversores não possam operar em 60 Hz deve se avaliar se o custo de sua substituição é vantajoso frente a implantação de um novo empreendimento de transmissão equivalente.

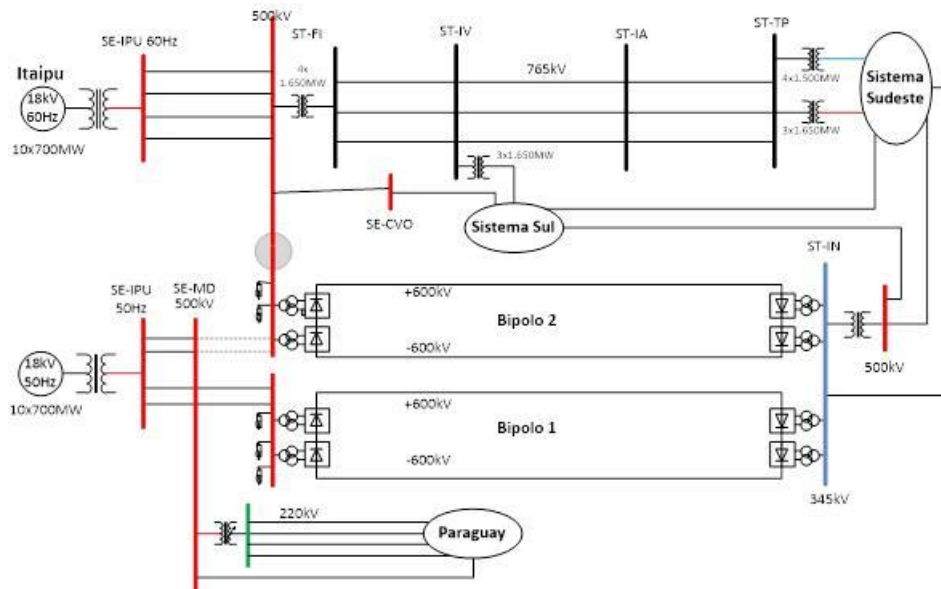


Figura 3 – Configuração proposta

5.2 Fluxo de potência

Atualmente o limite de recebimento pelo Sudeste (RSE) é função da geração de ITAIPU 60 Hz e da exportação do Sul para o Sudeste (FSUL). Portanto, grandes valores de exportação do Sul para o Sudeste implicam restrições à geração de ITAIPU 60 Hz.

Para verificar os benefícios da operação do bipolo 2 com Itaipu 60 Hz se avaliaram 3 casos de fluxos de potência; um considerando a configuração atual com Itaipu 60 Hz transmitindo pelo 765 kV e o ELO CC com 3.000 MW, e dois considerando a configuração proposta com 3.000 MW de Itaipu 60 Hz pelo bipolo 2, um explorando a geração do Sul (C1) e outro não (C2). Em todos os casos se considerou Itaipu 60Hz com 10 unidades geradoras e gerando 7.500 MW. A Tabela 1 apresenta os resultados dos principais fluxos (ver Figura 4) de influência na interligação Sul/Sudeste em MW.

Tabela 1 – Resultados comparativos do fluxo de potência

	FIV	FFICVO	FSE	RSE	FBA-IN	FLON-ASS	RSUL	ELO CC_50	ELO CC_60	RSE+Elo CC
Atual [MW]	6.393	1.093	6.605	9.690	1.449	1.176	2.296	3.000	0	12.690
Proposta Caso 1 [MW]	4.367	118	6.086	9.486	1.524	1.333	-5.023	3.000	3.000	15.486
Proposta Caso 2 [MW]	4.116	370	5.091	6.924	815	735	-2.474	3.000	3.000	12.924

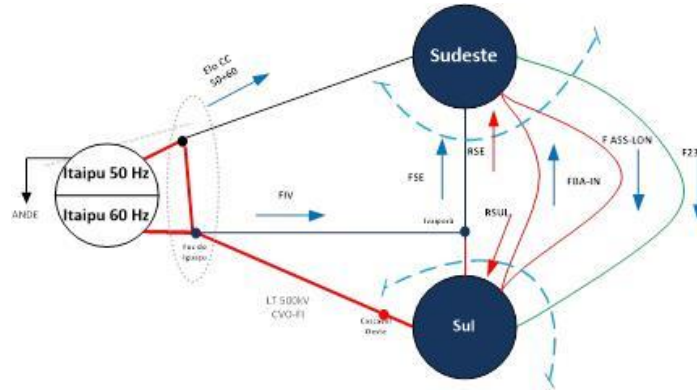


Figura 4 – Fluxos de interesse

No caso 1 se explorou toda a geração disponível no Sul até atingir os limites de RSE, conseqüentemente, se consegue uma injeção adicional de aproximadamente 2.700 MW no sistema Sudeste. Desta forma, é possível explorar toda a geração de Itaipu 60 Hz mesmo com geração alta no Sul.

No caso 2, que considera uma condição hidrológica não tão favorável no Sul, se obtém um alívio nos fluxos do sistema de 765 kV com pois parte da geração de Itaipu 60 Hz flui pelo ELO CC_60. Desta forma, se obtém melhor condição de controle de tensão no sistema de 765 kV.

Outro aspecto a ser considerado, no caso 2, é que permite a diminuição das restrições operativas a serem impostas durante intervenções no sistema de 765 kV, em que é possível diminuir a transmissão pelo tronco de 765 kV aumentando o fluxo pelo ELOCC_60, de forma a manter Itaipu 60 Hz com geração alta.

5.3 Limites Dinâmicos

Os limites dinâmicos de ITAIPU 60 Hz com rede completa atualmente são determinados pela perda de duas linhas de 765 kV entre Foz do Iguaçu e Ivaiporã, critério N-2. Para essa contingência, com níveis de geração de 7.500 MW em ITAIPU 60 Hz, verifica-se que para manter ITAIPU 60 Hz ligada ao SIN-BR é necessário que, a lógica do ECE instalado no sistema de 765 kV para a perda dupla desses circuitos, desligue quatro unidades geradoras para manter a estabilidade do sistema.

Entretanto, esta mesma contingência na configuração proposta, utilizando a capacidade de sobrecarga temporária do bipolo, controlado pelo STOL (short time over load), necessita do desligamento de apenas uma unidade geradora para manter ITAIPU 60 Hz conectada ao SIN-BR, demonstrando a possibilidade de aumento sensível nos limites de geração de ITAIPU 60 Hz e diminuição de sua influencia nos limites da interligação N-S simultaneamente. As Figura 5 e Figura 6 apresentam os resultados dessa simulação no ANATEM em termos da frequência e da tensão na SE – Tijuco Preto 765 kV. Estas simulações consideraram o caso base do ONS de novembro de 2016.

Adicionalmente, caso se queira maximizar a geração do Sul ainda se consegue manter uma geração alta, em torno de 6.800 MW, em Itaipu 60 Hz. Neste caso se obteve um RSUL de aproximadamente 5.000 MW, porém foi necessário efetuar o desligamento de quatro unidades geradoras pelo ECE para perda dupla entre Foz e Ivaiporã.

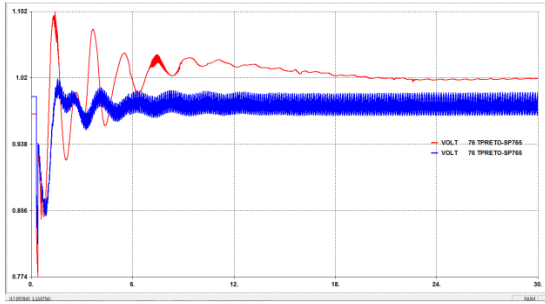


Figura 5 – tensão em Tijuco Preto (vermelha – situação atual, azul – proposta)

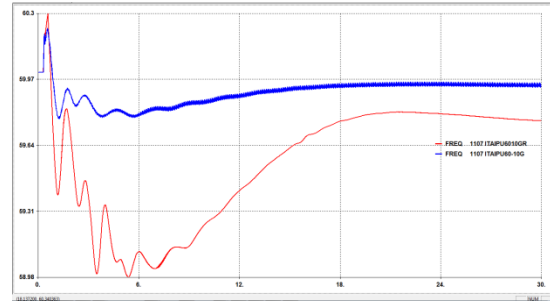


Figura 6 - Frequência em ITAIPU 60 Hz (vermelha – situação atual, azul – proposta)

6.0 - BENEFÍCIOS HIDROENERGÉTICOS DA EQUALIZAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO ENTRE SETORES

Conforme visto no fluxo de potência, com a utilização de um bipolo operando em 60 Hz pode-se ter um melhor aproveitamento quando de condições hidrológicas favoráveis simultâneas para ITAIPU e para o sistema Sul. Em consequência há diminuição das vazões vertidas turbináveis em ITAIPU, que atualmente ocorrem quando da exportação do Sul para o Sudeste.

O despacho de geração de ITAIPU tem a singular característica de operação a frequências diferentes em função da interligação em 50 Hz com o Paraguai. Esta particularidade possibilita a interligação dos sistemas elétricos brasileiro e paraguaio, através do ELO CC que une as subestações Ibiúna e Foz de Iguaçu. Este sistema é usualmente preferido pelo ONS para o despacho energético em função dos limites de transmissão sistêmicos existentes no setor 60 Hz, especialmente importantes nos cenários do submercado Sul exportador. Esta situação provoca uma ineficiência inerente na operação de ITAIPU quanto à vazão turbinada, já que obriga a ambos os setores a trabalhar em zonas de operação de baixa produtividade da curva de eficiência do conjunto turbina-gerador. No caso do setor 50 Hz, o ponto de operação permanece na zona do limite de disponibilidade de potência (à direita do ponto ótimo de operação), enquanto que no setor 60 Hz permanece na zona próxima ao limite de potência mínima das unidades geradoras (à esquerda do ponto ótimo de operação), notadamente no período de carga leve. Este regime de operação tem dois principais efeitos:

- a. Disponibilidade prioritária das unidades geradoras do setor 50 Hz, fator que interfere no cronograma de intervenções; e
- b. Excesso de partidas/paradas no setor 60 Hz para minimizar a vazão turbinada do setor.

Ao analisar esta operação, observa-se que se o setor 60 Hz pudesse ser mais explorado nos períodos de elevada competição com o Sul, haveria possibilidade de deslocar o ponto de operação conjunto de ambos os setores em direção a zonas de operação mais eficientes, com conseqüente economia da vazão turbinada e redução das partidas/paradas do setor. Isso também implicaria em maior flexibilidade para a realização de manutenções preventivas em ambos os setores, já que a prioridade de exploração de cada setor não estaria mais associada à condição de exportador do Sul, e sim ao excesso/escassez de oferta hidráulica.

Partindo da premissa básica de que tal exploração não é possível unicamente devido aos limites de transmissão sistêmicos no tronco 765 kV, surge a alternativa natural do uso da capacidade ociosa do ELO CC através da “realocação” da geração entre setores. A proposta consiste em reduzir um determinado montante de geração no setor 50 Hz e redirecioná-lo para o setor 60 Hz. O valor de produção total seria o mesmo, com conseqüente economia da vazão turbinada. Essa economia d’água será preservada no reservatório para uso posterior. Outra forma de observar a proposta é a possibilidade de aumentar a geração total escoada mantendo a mesma vazão turbinada em cada intervalo horário. Nesse caso, todas as variáveis hidrológicas permaneceriam inalteradas, e a geração total escoada será produto da mudança do ponto de operação de ambos os setores de ITAIPU.

Como exemplo da proposta se utilizará dados correspondentes ao ano 2014 para determinar os ganhos hidroenergéticos possíveis com este simples procedimento. A razão da seleção do ano 2014 é que nesse ano foi verificada exportação do Sul ao SE/CO em 70,38% do tempo [5], além de ser considerado como um ano hidrológico seco para ITAIPU. O problema da realocação da geração foi formulado como um problema de otimização, de acordo com o modelo da operação hidroenergética de Itaipu [6] [7], com intervalos horários. A função objetivo procurada é a maximização do montante total de vazão turbinada economizada, mantendo constante o montante de geração total a cada intervalo. Para a solução do modelo formulado foi utilizado o entorno de modelagem Pyomo para problemas de otimização [8] [9], junto com o solver não linear IpOpt [10], ambos open-source e de licença aberta.

Na Figura 7 são observados os resultados do modelo de otimização programado, e a influência da política de realocação proposta no armazenamento do reservatório. A economia de vazão turbinada eleva a cota do reservatório ao longo do período considerado até finalizar a simulação com um replecionamento de 1,72 m ou 2.104 hm³ de armazenamento adicional, ou aproximadamente 584 GWh de energia adicional armazenada. Observa-se que existe uma tendência de aumento da vazão economizada ao longo da simulação, o que era esperado em função da ação combinada do aumento progressivo da cota do reservatório e redução da cota do canal de fuga, diretamente atrelada à vazão descarregada, com conseqüente aumento na queda bruta disponível. Os resultados mostraram uma realocação média de 167 MW e dispersão de 221 MW, com picos de 1.249 MW. Outro comportamento observado é que as realocações são mais intensas nos horários de carga média e pesada.

Na Figura 8 são observados os resultados obtidos para uma função objetivo diferente. Neste caso foi considerada a maximização da geração adicional total, que é obtida turbinando a vazão economizada por realocação da geração entre setores. Sendo assim, como a descarga total fica inalterada a cada intervalo do período considerado, a cota do reservatório e a queda bruta também permanecem inalteradas, a diferença do caso anterior. Para este caso foi considerado que não existe limitação na transmissão pelo ELO CC, já que a potência adicional obtida seria transmitida por esse sistema. Observa-se que as realocações são ligeiramente mais intensas em relação ao modelo anterior, com picos de até 1.405 MW, o que mostra a relevância das realocações na operação. A potência adicional obtida é bastante dispersa, e com picos de até 343 MW. A energia adicional obtida por turbinar a vazão economizada está em torno a 155 GWh, inferior ao caso anterior. De igual forma que no modelo anterior, a potência adicional obtida é mais intensa nos períodos de carga média e pesada.

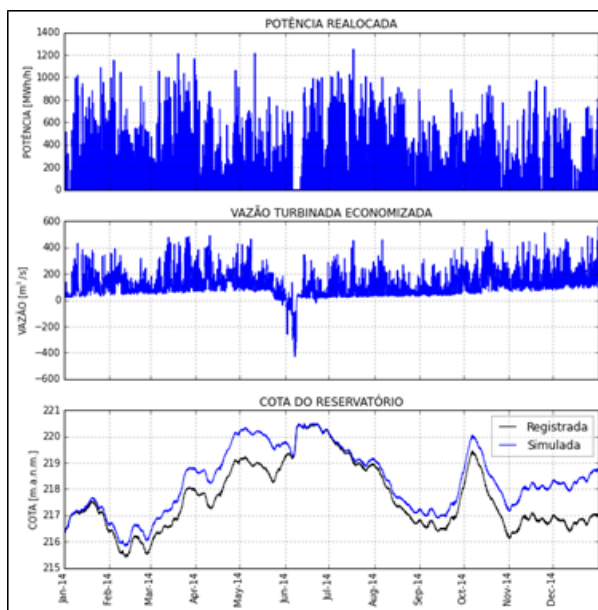


Figura 7: Resultados considerando economia da vazão turbinada guardada no reservatório

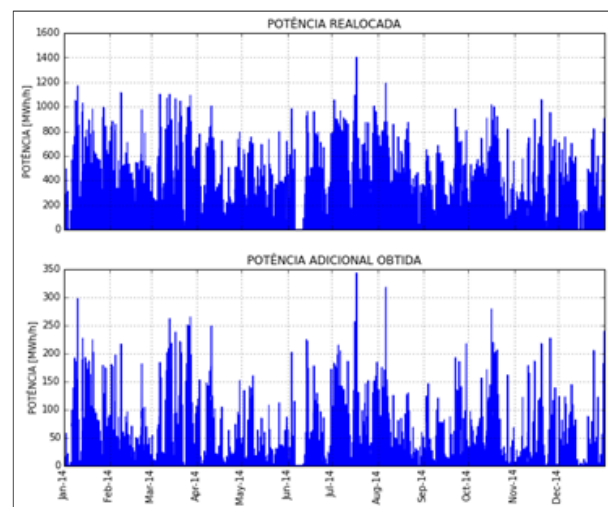


Figura 8: Resultados considerando uso da economia da vazão turbinada para geração adicional

De acordo com os resultados de cada função objetivo, os ganhos energéticos obtidos por guardar a vazão turbinada economizada com realocação da geração no reservatório trazem maiores benefícios energéticos no longo prazo. A necessidade de realocação se torna mais evidente ao analisar o aumento da potência adicional gerada no segundo caso, já que foram mais intensas que no primeiro caso, mas com poucos benefícios energéticos adicionais.

Para analisar a influência do crescimento do intercâmbio de ITAIPU com o sistema paraguaio, SIN-PY, na operação hidroenergética e no intercâmbio com o SIN-BR, se analisou um caso base com a mesma hidrologia, disponibilidade de unidades geradoras e o perfil do intercâmbio registrado de ITAIPU com o SIN-PY do ano 2014. A geração obtida no caso base desconsidera qualquer restrição de intercâmbio, além de considerar previsão de vazões perfeita. Em outras palavras, é a máxima produção possível com a hidrologia do ano 2014. A percentagem da geração 50 Hz do caso base será utilizada como referência para o aumento do intercâmbio de ITAIPU com o SIN-PY mantendo o mesmo perfil do ano 2014. A Tabela 2 mostra os ganhos obtidos quando se considera a possibilidade de escoar parte da geração 60 Hz pelo Elo CC em relação à configuração atual, se o limite de fluxo pelo tronco 765kV fosse a geração 60 Hz registrada em 2014. Os ganhos obtidos são ligeiros se analisados como percentagem, mas podem apresentar mais de 1.000 GWh de energia adicional suprida ao SIN-BR. Também se observa que, tanto mais aumenta o intercâmbio com o SIN-PY, a produção total se aproxima ao caso base, já que existe maior espaço na transmissão para alocação dos recursos disponíveis.

Tabela 2 – Ganhos obtidos considerando escoamento da geração 60 Hz pelo Elo CC em presença de limites de fluxo pelo tronco 765 kV em relação ao crescimento do intercâmbio de ITAIPU com o SIN-PY

Caso intercâmbio ITAIPU com o SIN-PY	Perda de produção em relação ao caso base	% Intercâmbio SIN-BR	Energia adicional suprida	% Aumento da energia suprida
2014 (22 % geração 50 Hz)	0,55 %	18,28 %	790 GWh	0,98 %
30 % geração 50 Hz	0,31 %	21,56 %	1.009 GWh	1,30 %
40 % geração 50 Hz	0,14 %	26,28 %	1.168 GWh	1,60 %
50 % geração 50 Hz	0,05 %	31,17 %	1.254 GWh	1,83 %

Se bem os resultados mostrados são valores ideais obtidos de um modelo de otimização, eles indicam claramente a existência real da possibilidade de melhoria significativa da produção com a proposta sugerida. Também é importante mencionar que nas análises não foi feitas alterações na política operativa realizada, contudo existe a possibilidade de maior flexibilidade no gerenciamento dos recursos energéticos, com conseqüente melhoria na alocação no tempo.

Os valores obtidos de potência adicional podem ser considerados baixos, mas os ganhos energéticos são evidentes. Se for considerado que a capacidade ociosa do ELO CC tende a aumentar na medida em que o intercâmbio de ITAIPU com o sistema paraguaio acompanhe o crescimento da carga nesse sistema, a possibilidade de uso do ELO CC para transmitir geração do setor 60 Hz cobra maior importância, especialmente quando da existência de forte competição pela transmissão com o subsistema Sul, como demonstrado na tabela 2.

7.0 - CONCLUSÕES

O crescimento da carga do Paraguai e conseqüentemente do intercâmbio de ITAIPU para o Paraguai já começou a criar uma capacidade ociosa para a transmissão de potência pelo ELO CC de Furnas associado a ITAIPU 50 Hz. Já no médio prazo, dependendo das taxas de crescimento do mercado paraguaio, o ELO CC deverá apresentar uma ociosidade de aproximadamente metade da sua capacidade nominal.

As alterações necessárias no ELO CC para adaptá-lo à frequência de 60 Hz não implicam em elevados custos quando comparados qualitativamente com uma alternativa de novas linhas de transmissão em corrente alternada, o que torna a proposta animadora para o SIN-BR.

Dependendo da política adotada para o despacho de Itaipu, a realocação da geração permite operar as unidades geradoras no ponto de maior produtividade, e prover ganho energético por acumulação da vazão turbinada economizada ou ganho na potência adicional instantânea.

Este trabalho mostrou que a utilização do ELO CC para transmitir energia do setor de 60 Hz de ITAIPU é possível e apresenta ganhos tanto no aspecto elétrico quanto no energético, embora necessite maiores investigações. Sintetizando, com a implantação da proposta pode se esperar os seguintes benefícios:

- aumento nos limites de transferência de potência de ITAIPU 60 Hz;
- minimiza os impactos das contingências no sistema de 765 kV;
- melhores condições para a realização de intervenções no sistema de 765 kV;
- atendimento do cronograma de manutenções preventivas das unidades geradoras de Itaipu 50 Hz e 60 Hz;
- diminuição de paradas e partidas das unidades geradoras de Itaipu 60 Hz;
- melhoria do aproveitamento da energia de ITAIPU com minimização das vazões vertidas turbináveis, principalmente quando de geração alta no Sul; e
- melhoria de utilização dos recursos de controle de tensão no sistema de 765 kV.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Multi Dimensional Issues in International Electric Power Grid Interconnections, United Nations, New York 2006
- [2]. PAULINDER, Jenny. Operation and control of ELO CC links embedded in AC systems. 2003. Tese de Doutorado. Chalmers tekniska högsk.
- [3]. KAUFERLE, J. Using dc links to enhance ac system performance. IEEE spectrum, v. 9, n. 6, p. 31-37, 1972.
- [4]. KUNDUR, Prabha. Power system stability and control. New York: McGraw-hill, 1994.
- [5]. ONS -, "Acompanhamento Diário da Operação," in *Cadastro de Dados para Relacionamento Externo - CDRE*, 2014.
- [6]. J. J. Vera M., R. S. Favoreto, Ricci Eric Oviedo Sanabria, R. E. Oviedo S., and R. J. de Andrade, "Modelos de la Operación Hidroenergética de ITAIPU," ITAIPU Binacional, Hernandarias, Nota Técnica 2015.
- [7]. Jaime Javier Vera Moreira, "Planeamiento de la Operación Hidroenergética de Corto Plazo de la Central ITAIPU Binacional: Un abordaje No Lineal Determinístico," in XI Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo - SESEP, Asunción, Agosto 2016.
- [8]. W. E. Hart, C. Laird, J. P. Watson, and D. L. Woodruff, *Pyomo - Optimization Modeling in Python*. New York: Springer, 2012, vol. 67.
- [9]. W. E. Hart, J. P. Watson, and D. L. Woodruff, "Pyomo: Modeling and Solving Mathematical Programs in Python," *Mathematical Programming Computation*, vol. 3, no. 3, pp. 219-260, 2011.
- [10]. A. Wächter and L. T. Biegler, "On the Implementation of a Primal-Dual Interior Point Filter Line Search Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming," *Mathematical Programming*, vol. 106, no. 1, pp. 25-57, 2006.
- [11] "Plan Maestro de Generación y Transmisión - período 2014 – 2023" disponível no site www.ande.gov.py, acessado em novembro de 2015.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Evonyr Bordin Filho: Natural de Londrina, PR. Graduado pela escola federal de engenharia de Itajubá (EFEI) em 1983, com pós-graduação pela UNIFEI em sistemas de potência em 2006. Trabalha na ITAIPU Binacional desde 1988, na divisão de estudos elétricos e normas, envolvendo-se principalmente com a elaboração de normas e instruções de operação, relatórios de análise de ocorrências e perturbações, e análises de pós-operação.

Robson Almir de Oliveira: Natural de Conceição das Pedras, MG. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1997 e conclui o mestrado em sistemas elétricos de potência em 2001, ambos pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Trabalha na ITAIPU Binacional desde 2000 na divisão de estudos elétricos e normas, envolvendo-se principalmente com a realização de estudos elétricos, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle (sistemas Scada/EMS, CAG, CAT, regulação primária de tensão e velocidade). Também é professor assistente da UNIOESTE desde 2002, ministrando aulas de Proteção, Operação e Estabilidade de sistema elétrico de potência.

Jaime Javier Vera Moreira: nasceu em Ciudad Pdte. Stroessner, Paraguai. Engenheiro Eletricista pela Facultad Politécnica - UNE em 2009, e Mestre em Energia Solar pela Universidad de Almería em 2011. Atualmente trabalha na superintendência de Operação de ITAIPU Binacional. Seus interesses de pesquisa são operação de reservatórios, otimização sob incertezas e energias renováveis.