



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

GAT  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO - IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SIN COM A APLICAÇÃO DE TRANSMISSÃO  
SEGMENTADA NAS INTERLIGAÇÕES INTER-REGIONAIS**

**Raphael Gárdos(\*)  
COPPE-UFRJ**

**Alquindar Pedroso  
COPPE-UFRJ**

**Ricardo Diniz Rangel  
CEPEL**

**RESUMO**

A proposta de prover segurança a sistemas de potência de grande porte se torna necessária a partir do momento em que são verificadas perturbações numa determinada área, se propagando através de todo o sistema interligado. Dentro do contexto atual de sistemas elétricos de grande porte, abrangendo grandes extensões geográficas, qualquer proposta de transmissão que tenha por objetivo minimizar, limitar, confinar ou bloquear distúrbios, merece uma atenção especial. Uma alternativa neste sentido, abordada neste informe técnico, é a transmissão em C.A. segmentada por dispositivos que utilizam conversores eletrônicos de potência do tipo VSC em configuração HVDC "back to back" – B2B-VSC.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transmissão Segmentada, Conversores "HVDC VSC – Back to Back", Sistemas Interligados

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As interligações em C.A. de redes elétricas de grande porte proporcionam uma série de benefícios, dentre os quais se destaca a transferência de grandes blocos de energia entre regiões, proporcionando a otimização do uso dos recursos disponíveis de geração hidráulica de baixo custo. Entretanto, um maior número de interconexões eleva a complexidade da operação bem como a interatividade dinâmica entre as diversas áreas que compõem o sistema. Assim, uma perturbação numa determinada área da rede pode originar um colapso no sistema interligado como um todo. De forma a proteger o sistema destas possíveis ocorrências, uma das medidas praticadas é a limitação da potência transmitida nas interligações entre áreas, reduzindo as transferências de energia entre submercados, desotimizando os recursos de geração conseqüentemente, elevando o custo de operação.

O B2B - VSC é um equipamento que utiliza o conceito FACTS, composto de conversores por fonte de tensão variável. No contexto deste desenvolvimento, esse equipamento funcionaria como uma interconexão entre linhas de transmissão, fazendo parte da transmissão em CA. A segmentação realizada com conversores HVDC VSC é imune a falhas de comutação e alcança um controle muito rápido de potência ativa e reativa entre as áreas interconectadas, com tempo de atuação na faixa dos milissegundos. Com essa característica torna-se possível criar qualquer ângulo de fase ou amplitude quase que instantaneamente, provendo maior margem de estabilidade ao sistema, minimizando o impacto de grandes perturbações e limitando a extensão dos distúrbios. Outra grande vantagem da segmentação utilizando conversores HVDC VSC é a não contribuição para o aumento do nível de curto-circuito nas instalações, que é uma preocupação que deve ser levada em consideração no momento da análise das alternativas de expansão do sistema de transmissão.

Hoje, com o desenvolvimento da tecnologia de eletrônica de potência, é possível a utilização de linhas de transmissão em C.A. segmentadas por conversores do tipo HVDC VSC configurados para operação em B2B, possibilitando o confinamento dos distúrbios, determinando áreas de operação independentes dentro do mesmo

sistema interligado. Possibilita-se assim a elevação das transferências de energia entre submercados, otimizando os recursos de geração de forma segura, ou seja, sem a preocupação com a possível propagação de distúrbios entre áreas e ainda reduzindo os custos de operação. Neste contexto através de um Estudo de Caso, o artigo analisa os benefícios que podem ser obtidos com a segmentação de interligações entre áreas envolvendo a aplicação de conversores eletrônicos de potência do tipo VSC.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO

A transmissão segmentada consiste de linhas de transmissão em C.A. seccionadas por conversores eletrônicos do tipo VSC configurados para operação em B2B. A aplicação destas ligações HVDC na interligação de sistemas elétricos já é conhecida e empregada com sucesso a bastante tempo, permitindo a interligação e ao mesmo tempo a independência da operação de diferentes países, ou mesmo de áreas operando com frequências diferentes. A Figura 1 ilustra uma transmissão segmentada por um equipamento configurado para operação em B2B-VSC, interligando duas áreas distintas.

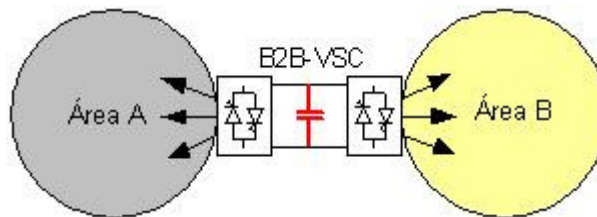


FIGURA 1 – Transmissão Segmentada por Equipamento B2B-VSC

A maioria das instalações em B2B existentes utiliza conversores eletrônicos do tipo “Line Commutated Converter”-LCC, operando com controle da potência de intercâmbio entre os terminais, e por consequência entre as áreas interconectadas. Na segmentação de linhas de transmissão em C.A., a aplicação de conversores do tipo VSC é a mais indicada, pois pode-se apontar algumas vantagens dos conversores VSC sobre os conversores convencionais do tipo LCC [3]:

- Não apresentam falhas de comutação, podendo operar em barras do sistema que apresentem valores bastante reduzidos de “Short Circuit Ratio” (SCR), relação entre a capacidade de curto-circuito na barra de comutação e potência transmitida no elo CC, podendo ainda energizar a rede em condições de um desligamento total ou parcial (“black start capability”);
- Adicionalmente ao controle de potência ativa de intercâmbio entre os terminais, os conversores tipo VSC operando em B2B podem controlar de maneira independente as tensões C.A. ou mesmo as potências reativas nos terminais;
- O controle por modulação de largura de pulso utiliza frequências de chaveamento mais altas, concorrendo para a redução das dimensões dos equipamentos e filtros.

A Figura 2 mostra a estrutura de controle de uma ligação B2B VSC. Pode-se notar que um dos conversores opera no controle de tensão no seu terminal C.A e da tensão C.C. no capacitor, enquanto que o terminal do outro conversor opera no controle da potência ativa e da tensão C.A.

A partir do desenvolvimento dos modelos de equipamentos FACTS, implementados nos programas do CEPEL, ANAREDE e ANATEM nas versões 9.2.1 e 10.01.00, respectivamente [4], foi introduzido um modelo teste permitindo a simulação de um dispositivo B2B VSC, utilizando STATCOMs e cargas dinâmicas [3]. Cabe enfatizar que está em desenvolvimento pelo CEPEL, a opção de inicialização do modelo dinâmico dos conversores a partir de barras do tipo PV do programa de fluxo de potência.

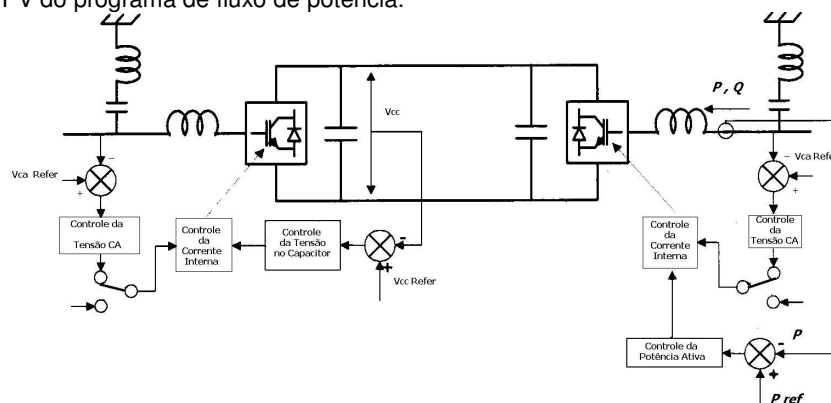


FIGURA 2 –B2B – VSC - Estrutura de Controle

## 3.0 - INTERLIGAÇÃO NORTE – SUL DO BRASIL

A interligação entre as regiões Norte e Nordeste do Brasil foi concebida inicialmente para escoar a geração excedente na UHE Tucuruí para a região Nordeste e atualmente, com a implantação da interligação entre as regiões Norte e Sudeste é possível a troca de energia também com a região Sudeste. A Figura 2 mostra a interligação entre as regiões Norte e Sudeste, denominada de interligação Norte-Sul, que é constituída atualmente por um sistema de transmissão composto por três circuitos em 500 kV entre a subestação de Imperatriz, no Estado do Maranhão, e a subestação de Serra da Mesa, no Estado de Goiás, passando pelas subestações de Colinas, Miracema e Gurupi, no Estado do Tocantins. Da subestação de Miracema deriva a subestação de Lajeado na qual se conecta a usina de mesmo nome, com capacidade instalada de 950 MW e da subestação de Gurupi deriva a subestação de Peixe na qual se conecta a usina Peixe Angical, com capacidade instalada de 450 MW. Em função dos requisitos de energia das regiões Sudeste e Nordeste é realizada maximização da geração da UHE Tucuruí em determinados períodos do ano. Neste período os fluxos na interligação Norte-Sul ficam bastante elevados, podendo, devido à grande interatividade entre áreas, ocorrer distúrbios na região Sudeste que envolvam desligamento de máquinas da usina de Itaipu. Isto poderá acarretar a abertura da interligação Norte-Sul, pela atuação da proteção de perda de sincronismo - PPS, situação que poderá ser indesejável para garantir a continuidade do atendimento às cargas da região ou até mesmo levar ao “black-out” do sistema como um todo. Ao considerar a ocorrência do distúrbio descrito acima, a solução hoje praticada para garantir a continuidade do atendimento é a limitação dos fluxos de potência na interligação entre os dois sistemas. Essa situação é um tanto indesejada, já que em determinado período do ano existe a disponibilidade da geração da UHE Tucuruí, a capacidade térmica para a transmissão desta potência e no entanto, estas não podem ser exploradas nas suas totalidades.

## 4.0 - SIMULAÇÕES

Visando demonstrar a redução nas transferências de energia, acarretadas pelas limitações praticadas aos fluxos nas interligações entre os sistemas Norte/Sudeste e o fluxo no tronco de 765 kV, necessárias para garantir a continuidade do atendimento na condição de contingências de dois circuitos entre as subestações de Foz do Iguaçu e Ivaiporã 765 kV, foi simulada a situação limite na qual o sistema suporta suporta estas contingências sem colapso, porém com restrições nas transferências de potência entre os sistemas. Em seguida a situação em que é utilizado o B2B-VSC, na subestação de 500 kV de Gurupi, interligando os sistemas Norte e Sudeste, desacoplando os distúrbios entre as áreas. Nas duas simulações foram quantificados os valores das transferências de potência entre os sistemas, resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Redução/Elevação na Transferência de Potência

Caso	Descrição	FIPU (MW)	RSE (MW)	FNS (MW)	Evento
a	Sistema sem ilhamento por PPS e sem o B2B-VSC	6300	7700	2500	Curto monofásico em Foz do Iguaçu 765 kV, com abertura de dois circuitos entre Foz do Iguaçu e Ivaiporã e corte de 4 máquinas da usina de Itaipu 60Hz
b	Sistema com B2B-VSC	6300	7700	3500	

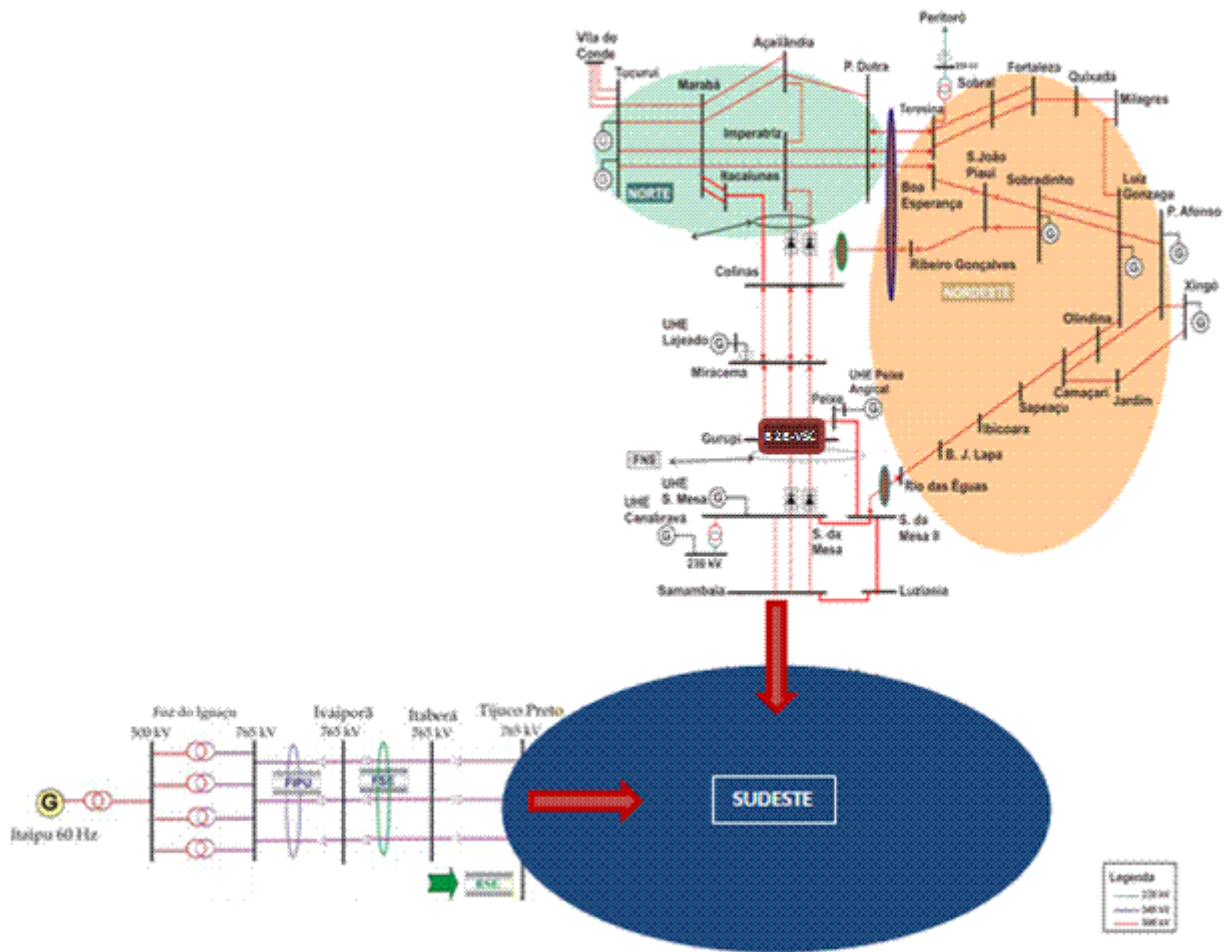


FIGURA 3 – Nomenclatura Utilizada Para os Somatórios de Fluxos na Interligação Norte-Sul

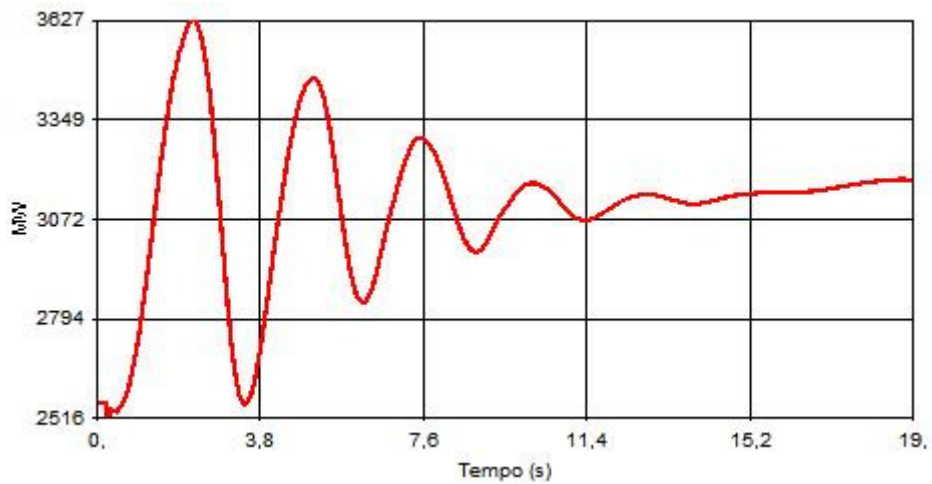


FIGURA 4 – Caso a) Potência Ativa na Interligação Norte-Sul (FNS) Sem o B2B-VSC

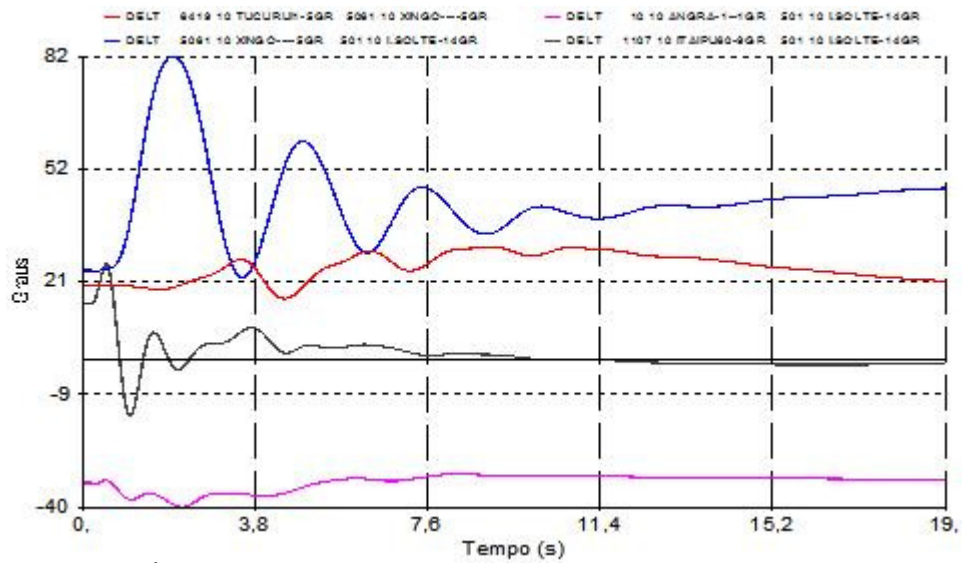


FIGURA 5 – Caso a) Ângulos das Máquinas dos Subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste Sem o B2B-VSC

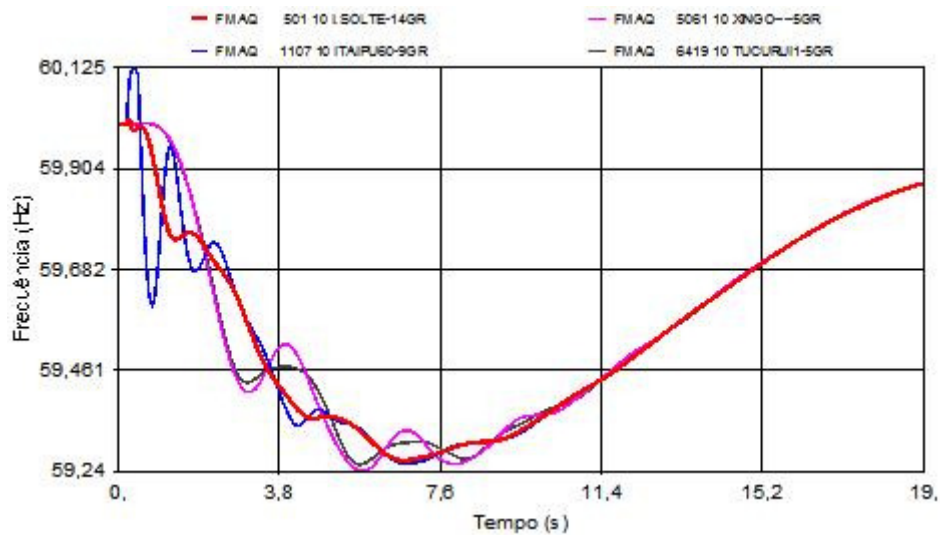


FIGURA 6 – Caso a) Frequência de Máquinas dos Subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste Sem o B2B-VSC

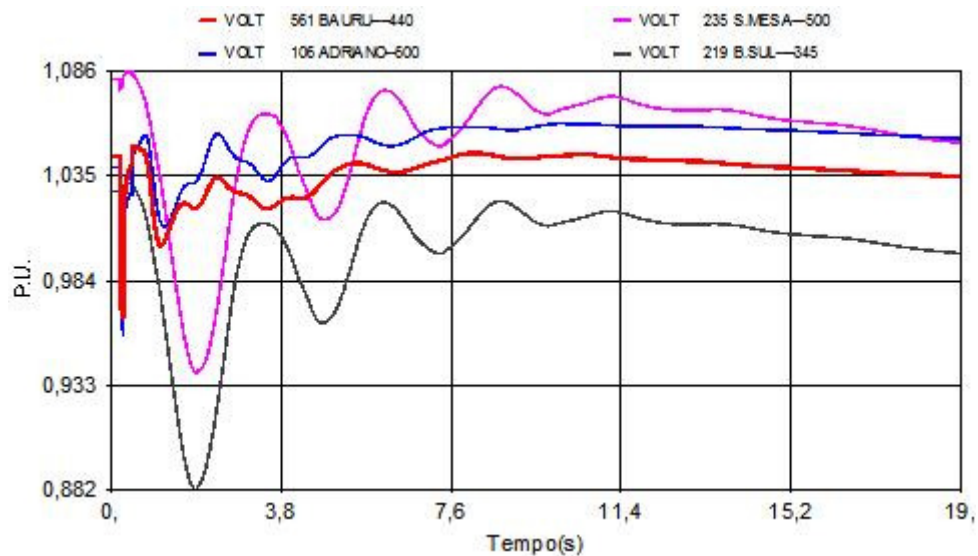


FIGURA 7 – Caso a) Tensões em Subestações dos Subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste Sem o B2B-VSC

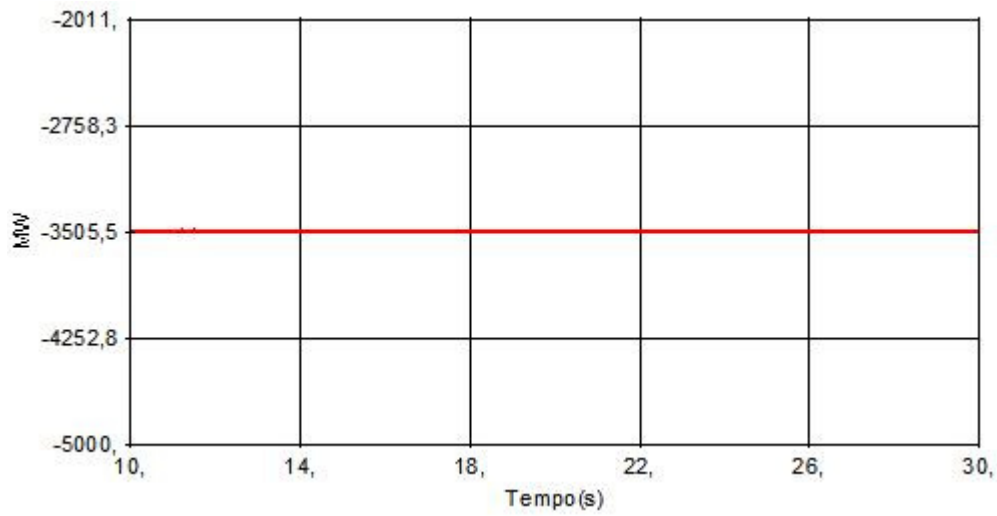


FIGURA 8 – Caso b) Potência ativa na Interligação Norte-Sul Com o B2B-VSC

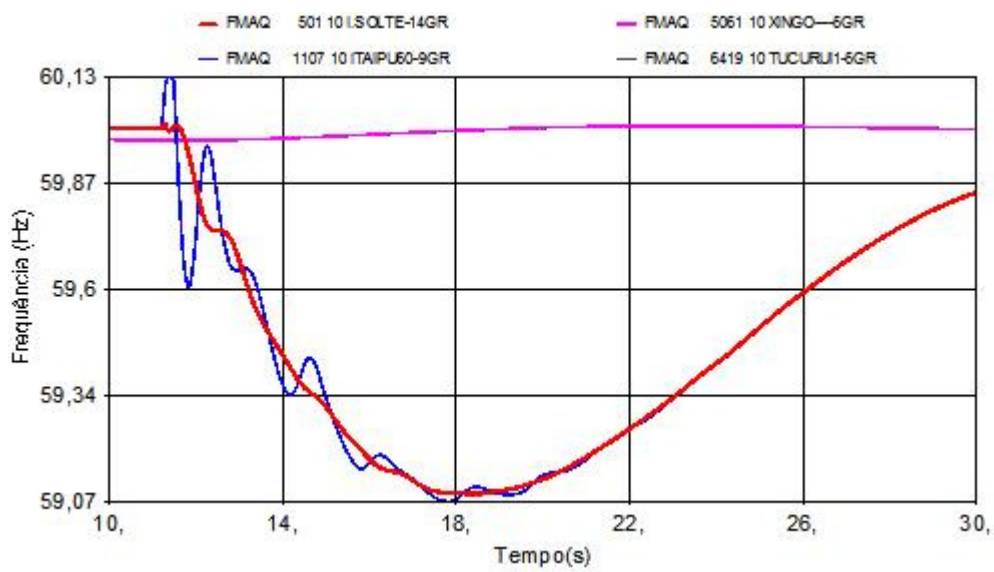


FIGURA 9 – Caso b) Frequência de Máquinas dos Subistemas Norte, Nordeste e Sudeste Com o B2B-VSC



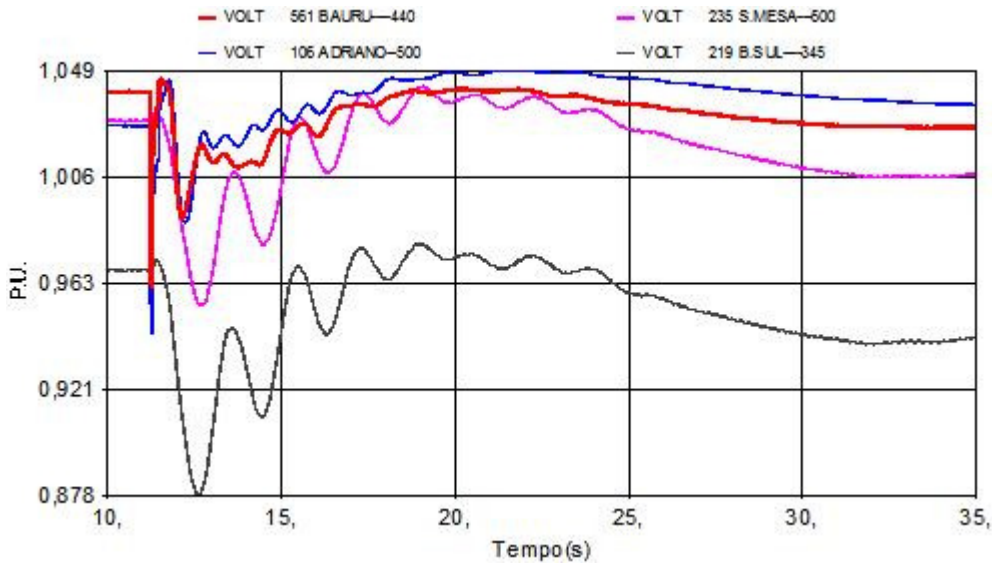


FIGURA 10 – Caso b) Tensões em Subestações dos Subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste Com o B2B-VSC

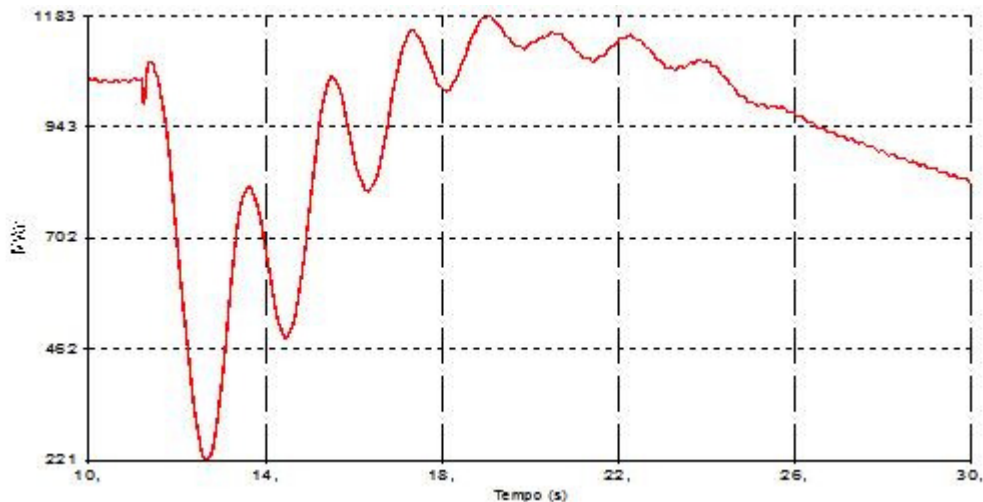


FIGURA 11 – Caso b) Potência Reativa Entregue pelo B2B-VSC no terminal inversor

## 5.0 - ANÁLISES

Pode-se comprovar pelas Figuras 4, 5, 6 e 7 que, pela interatividade entre áreas, quando o sistema Sudeste sofre um déficit de geração, todas as máquinas do sistema respondem com uma elevação de geração (excursão dos ângulos), buscando um novo ponto de equilíbrio. Assim, quando as máquinas do sistema Norte respondem ao déficit de geração do sistema Sudeste, ocasionado pelo corte de máquinas de Itaipu 60 Hz, ocorre elevação do fluxo na interligação Norte-Sul, induzindo a um processo de instabilidade no sistema que resultaria em colapso caso ocorresse a abertura da referida interligação através da proteção para perda de sincronismo – PPS. Para evitar tal situação, o intercâmbio de potência na interligação Norte – Sul é previamente limitado.

Ao observar as Figuras 8, 9, 10 e 11 pode-se constatar que há redução do acoplamento dinâmico entre os sistemas com a utilização do B2B-VSC na subestação de Gurupi 500 kV, o que permite ampliar as transferências de potência entre as regiões Norte e Sudeste. A Figura 8 mostra o valor constante na interligação dos subsistemas Norte e Sudeste, pois neste caso o B2B-VSC opera de forma a manter constante o fluxo de potência ativa na interligação. A Figura 9 mostra o desacoplamento entre os subsistemas Norte/Nordeste e Sudeste, pois neste caso o B2B-VSC funciona de forma a separar os dois subsistemas em ilhas assíncronas. A Figura 10 mostra o momento em que as subestações atingem valores limites de colapso e a Figura 11 o instante em que o B2B-VSC funciona de forma a entregar a potência reativa necessária, livrando o sistema do colapso de tensão. O ganho do limite de transmissão foi calculado entre os casos a e b e atingiu o valor de 1.000 MW ao se utilizar o B2B-VSC.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Ao se planejar as alternativas de transmissão a longa distância existentes, uma diversidade de fatores deve ser levada em conta. A análise de custos versus benefícios, até se chegar a uma conclusão final, combina uma série de fatores técnicos, econômicos, sociais, ambientais e peculiaridades de cada rede de transmissão que algumas vezes são difíceis de serem claramente quantificados, acabando às vezes por serem descartados e esquecidos, em detrimento de soluções convencionais já de uso corrente. A aplicação de transmissão em CA segmentada está vinculada à transmissão de grandes blocos de potência ( $\geq 2000$  MW) a longas distâncias ( $\geq 1000$  km). Este tipo de transmissão possibilita a inserção regional ao longo do trajeto, favorecendo a vascularização efetiva da rede e a integração de futuras ampliações do sistema de transmissão. Outra característica da transmissão em CA segmentada é a de possibilitar a interconexão de um número arbitrário de linhas em C.A, em cada extremidade do dispositivo interconector (B2B-VSC). Pode-se assim contornar o problema de criar pontos de recebimento “fortes” na rede. Estes pontos são caracterizados por “fatores de proximidade” altos, favoráveis ao desenvolvimento de processos em cascata.

Uma forma simples de se avaliar a atratividade do ponto de vista econômico da implantação do B2B-VSC, consiste em comparar os custos dos conversores B2B-VSC (7 x 500 MW) – R\$ 1.512.000.000, mais os custos da adaptação da subestação de Gurupi 500 kV – R\$ 50.000.000,00, que aproximadamente somam um total de 1,56 bilhões de reais, com o custo evitado com geração térmica. Para tal ao considerar a repetição de situação similar a recentemente observada no 1º trimestre de 2008, quando ocorreu atraso no início do período úmido tendo sido necessário o despacho na base de um montante significativo de geração térmica na região SE/CO. Destaca-se que o tronco de transmissão de interligação entre as regiões Norte e SE/CO estava sendo explorado em seu limite máximo, 2500 MW. Ao levar em conta que o custo médio de operação das usinas térmicas a óleo é da ordem de R\$ 500,00/MWh e a operação na base, de cerca de 1.000 MW, representam dispêndio com combustível da ordem de R\$ 0,36 bilhão/mês e ainda que com a aplicação do B2B-VSC são ampliados os limites de transmissão (de 1.000 MW), seria possível com a instalação do dispositivo B2B-VSC, efetivar a transferência dos 1.000 MW em todos os períodos de carga e evitar os dispêndios com a geração térmica. Portanto, os custos de instalação do B2B-VSC seriam plenamente ressarcidos em cerca de 4,5 meses considerando somente o custo de operação evitado com as usinas térmicas, o que permite-se concluir pela grande atratividade dessa solução.

Destaca-se ainda que pelas características hidrológicas da região Norte, a efetivação de maiores transferências pela elevação da capacidade de transmissão de energia para a região Sudeste devido a utilização do B2B-VSC, contribui para a redução dos custos marginais de operação – CMO da região SE e para uma operação mais econômica do SIN.

Neste artigo, procurou-se salientar a vantagem da transmissão a longa distância segmentada por um B2B-VSC nas interligações de sistemas de grande porte mostrando os ganhos nas transferências de potência e os ganhos energéticos entre regiões mantendo a segurança do SIN.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M. BAHRMAN, A.A., EDRIS, R. HALEY, “Asynchronous B2B Link with VSC”, Minnesota Power Conference, Estados Unidos.
- (2) CIGRE WG B 4.37-2001; “VSC Transmission”, Revista Electra. Brasil.
- (3) GÁRDOS, RAPHAEL, “Transmissão de Energia a Longa Distância com Linhas CA Segmentadas por Conversores VSC B2B”, tese de Mestrado, UFRJ/COPPE, Brasil.
- (4) RANGEL, R. D., “Modelagem de Equipamentos FACTS em Inversores de Tensão para Análise de Fluxo de Potência e Fenômenos Eletromecânicos”, Tese de Doutorado, UFRJ/COPPE, Brasil.
- (5) R R. D. DUNLOP, R. GUTMAN, R. P. MARCHENKO, “Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines”, IEEE Trans, Vol PAS-98, Brasil.
- (6) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <http://www.ons.org.br> , Brasil
- (7) ASPLUND, G, ERIKSSON, K, JIANG, H., LINDBERG, J, PÅLSSON, R, SVENSSON, K. “DC Transmission based on Voltage Source Converters”; CIGRÉ Conferência em Paris, França.
- (8) EPRI – INTERCONNECT, INC, “Technical Assessment of the Grid Shock Absorber Concept”, 9th FACTS User’s Group and Task Force Meeting, Montreal, Canadá.