



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

BR/GAT/03  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - IV**

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

**COMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO ELO CCAT ASSOCIADO À ITAIPU 50Hz E MIGRAÇÃO PARA O ATPDRAW**

**Thiago Augusto Betiati**

**ITAIPU BINACIONAL**

**(\*)Robson Almir de Oliveira**

**RESUMO**

Este trabalho visa apresentar um modelo para simulação digital no formato *ATPDraw* do elo CCAT associado à Itaipu. O modelo implementado corresponde à representação monopolar do elo CCAT e seus elementos, com atenção especial ao seu sistema de controle, grande responsável pelo desempenho estático e dinâmico. As alterações necessárias para a representação do modulador foram baseadas no controlador existente em ANATEM. Embora o modelo esteja apresentado ainda na forma simplificada, é flexível de maneira que alterações e ampliações tanto na rede de potência como no sistema de controle são facilmente realizadas.

**PALAVRAS-CHAVE**

HVDC, Transitório Eletromagnético, ATP, ATPdraw.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A Usina Hidrelétrica de Itaipu atualmente é responsável pelo atendimento de aproximadamente 17 % da energia elétrica consumida no Brasil e 72% da energia consumida no Paraguai, e está conectada aos principais corredores de transmissão do Sistema Interligado Nacional brasileiro (SIN) e do sistema do Paraguai: o setor de 60 Hz conectado ao sistema de transmissão em 765 kV e o setor de 50 Hz conectado ao Elo de Corrente Contínua em  $\pm 600$  kV e a quatro linhas de 220 kV que alimentam o Paraguai. A usina atualmente possui 20 unidades geradoras com potência nominal de 700 MW cada uma, totalizando 14.000 MW.

A interconexão de Itaipu 50 Hz com o sistema brasileiro é feita por um elo CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão). A tecnologia *High Voltage DC Transmission* (HVDC) foi escolhida por duas razões: primeiramente devido ao assincronismo entre os sistemas brasileiro e paraguaio, adicionado ao fato de ser economicamente atrativa quando envolve longas distâncias e grandes montantes de energia. O elo é composto por duas linhas bipolares e duas subestações conversoras. A SE Foz do Iguaçu opera como retificadora e a de Ibiúna, distante em 800 km, opera como inversora (6).

Este sistema de Transmissão de Corrente Contínua é um dos maiores do mundo, e exerce forte influência sobre o setor 50 Hz de Itaipu, justificando a existência de um modelo computacional detalhado e funcional para realização de estudos elétricos em geral. Com o auxílio de ferramentas computacionais para modelar comportamentos físicos pode-se verificar a resposta do sistema à eventuais falhas antes mesmo que seja implementado de fato; avaliar o impacto de alterações no sistema; e dimensionar dispositivos de segurança.

Assim sendo, este trabalho apresenta a implementação, simulação, avaliação e validação do desempenho da representação monopolar do sistema de transmissão em corrente contínua associado ao setor 50 Hz de Itaipu no

(\*) Av. Tancredo Neves, 6731 – Edifício de Produção – OPSE.DT – CEP 85866-900 Foz do Iguaçu, PR – Brasil  
Tel: (45) 3520-2597 – Fax: (45) 3520-2706 – Email: ralmir@itaipu.gov.br

aplicativo de simulação de transitórios ATP usando a interface gráfica ATPDraw.

## 2.0 - SISTEMA DE TRANSMISSAO CCAT

Um sistema de transmissão em corrente contínua é basicamente uma interface entre dois sistemas CA, por isso recebe o nome de “elo”. O princípio básico que rege seu funcionamento é a conversão estática AC-DC. Existem duas tecnologias capazes de realizar este processo (1), (2) e (3): *Current Source Converter* (CSC) ou *Voltage Source Converter* (VSC).

A transmissão pelo processo CSC pode ser disposta em várias configurações, dentre as mais usuais destaca-se o *Back-to-Back*, Monopolar e Bipolar.

### 2.1 Principais componentes do HVDC

A Figura 1 apresenta detalhadamente um Elo CCAT na configuração bipolar, constituída de: conjunto de ponte de válvulas, transformador conversor, reator de alisamento, filtros de harmônicos, eletrodos de terra e disjuntores no lado CA do transformador conversor. Os componentes principais são basicamente os mesmos para outras configurações, conforme (1), (2) e (3).

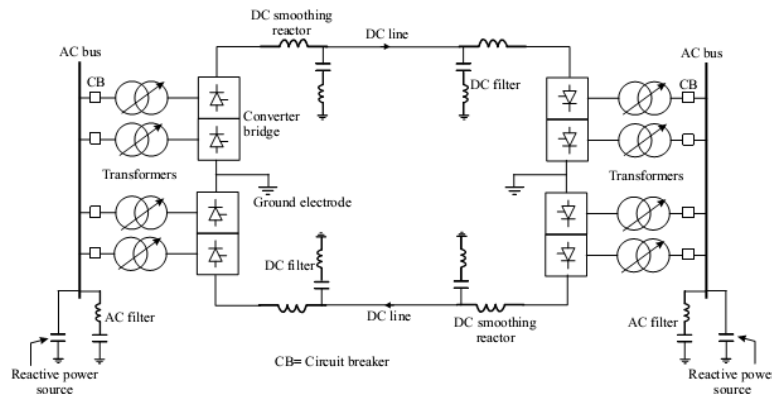


FIGURA 1 - Elementos da Transmissão Bipolar (3).

### 2.2 Equivalentes de Retificação e Inversão

Na retificação, as tensões internas são representadas pelo ângulo de disparo, e o efeito da comutação é representado por RCR.

A operação do inversor também pode ser representada em termos de  $\alpha$  e  $\mu$ , mas em valores entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ . Entretanto, é prática comum utilizar na representação os ângulos  $\beta$  ( $\beta = \pi - \alpha$ ) - ângulo de avanço de disparo e  $\gamma$  ( $\gamma = \beta - \mu$ ) - ângulo de extinção.

### 2.3 Objetivo dos Sistemas de Controle

Em um sistema típico DC conectado a dois sistemas AC, as funções primárias do sistema de controle são: controlar o fluxo de potência entre os terminais, proteger os equipamentos contra problemas causados por faltas e assegurar estabilidade aos sistemas AC conectados contra qualquer modo de operação do link DC.

### 2.4 Princípios Básicos do Controle de Elos

A tensão em qualquer ponto da linha, e a corrente (referente à potência) pode ser controlada por meio das tensões internas ( $V_r \cos \alpha$ ) e ( $V_i \cos \gamma$ ), conforme equação (1). Isso pode ser alcançado disparando o *gate* dos tiristores ou variando o *tap* dos transformadores conversores. Perante perturbações, o controle de *gate* é utilizado para ações rápidas, seguido pela mudança do *tap* a fim de restaurar os parâmetros dentro de seus valores nominais de operação.

$$I_d = \frac{V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma}{R + R_r - R_i} \quad (1)$$

O sistema de controle mais utilizado em HVDC é conhecido como “*Current Margin Method*”. O método consiste em uma zona definida de operação para o sistema CC, com funções definidas para cada terminal, fazendo com que as responsabilidades para regulação de tensão e corrente sejam separadas para os dois terminais. Também incorpora características de proteção ao elo quando submetido a condições anormais. Em condições normais, o retificador

opera em corrente constante, e o inversor opera com ângulo de extinção  $\gamma$  constante, na curva representada na Figura 2 (a).

A corrente no elo é controlada pelo retificador, através de um sistema de controle de corrente em malha fechada. Deste modo, a corrente medida na linha é comparada com uma referência (*current order*), e quando houver diferença é amplificada e agirá no ajuste do ângulo de disparo, fazendo com que a tensão da ponte retificadora atinja o valor necessário para transmitir a potência desejada.

O ponto de intersecção das duas curvas satisfaz as características do inversor e retificador, sendo o ponto de operação nominal do elo. A curva vertical do retificador pode ser deslocada de acordo com a quantidade de potência de transmissão solicitada "*current order*". Quando sujeito a perturbação, os modos de controle auxiliares são ativados, dependendo do ponto de operação do elo, a fim de restaurar o sistema ao seu ponto original.

O modo de operação do retificador é definido por quatro características: corrente constante, limite de alfa mínimo, VDCOL (*Voltage Dependent Current Order Limit*) e corrente mínima. A curva de operação do inversor também é limitada basicamente por quatro características: ângulo de extinção  $\gamma$  constante, limite  $\gamma$ -min, corrente constante e VDCOL, com a mesma função do retificador e que garante operação estável após perturbações no terminal inversor (2). A Figura 2 (b) compreende a zona de operação dos terminais de um elo de corrente contínua, contendo todas as características citadas anteriormente.

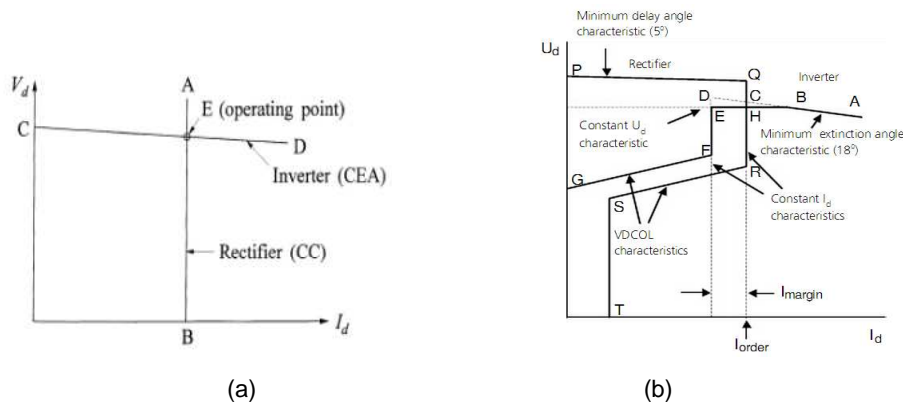


FIGURA 2 - Curva de operação de HVDC (3).

### 3.0 - MODELO DO HVDC DE ITAIPU 50Hz IMPLEMENTADO NO ATP

O HVDC de Itaipu consiste em quatro subsistemas ou pólos, e é capaz de transmitir em condição nominal 6300MW. Os quatro monopólos são conectados em pares formando bipólos, na tensão  $\pm 600\text{kV}$  com ponto neutro conectado ao terra através de eletrodos. Em condições normais de operação, os polos são independentes.

#### 3.1 Descrição do modelo disponível para simulação digital

O modelo básico corresponde à representação monopolar (Figura 3) de todo Sistema CCAT de Furnas, (4) e (5). No entanto, devido à sua flexibilidade pode ser facilmente ampliado, tanto no que se refere ao controle como à rede elétrica. Dentre as características deste modelo, destacam-se:

- Representação LCC (comutado pela linha) monopolar de todo o Sistema de Transmissão em CCAT (dois bipólos). A representação monopolar consiste em duas pontes trifásicas controladas de doze pulsos, uma responsável pela retificação do sinal de potência e outra pela inversão;
- O sistema de controle e disparo de tiristores é constituído pelos controladores clássicos de elos de corrente contínua, além de alguns específicos do elo de Furnas;
- A curva de saturação dos transformadores conversores é representada;
- Em condição nominal de operação, o sistema transmite 6300 MW ( $+600\text{kV}$  e  $10.45\text{kA}$ ).

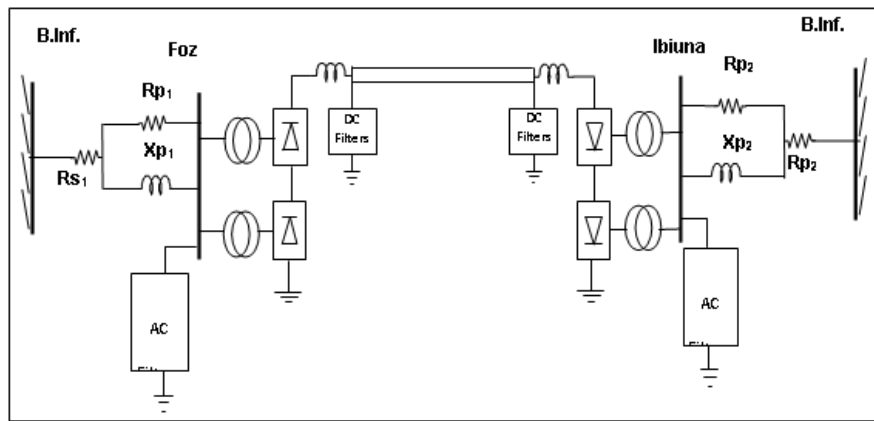


FIGURA 3 - Representação do modelo em cartão (4).

A estrutura modularizada do cartão (são fornecidos apenas os parâmetros importantes no cartão principal) permite facilmente a inclusão de estratégias específicas do elo a ser modelado. A adaptação do controle e inclusão de outro polo é também facilmente obtida, tanto na modificação dos parâmetros básicos como na própria programação de controle.

A rede elétrica, cujos elementos foram modularizados, é executada através do comando \$INCLUDE. O sistema de controle e disparo de tiristores foi implementado na linguagem MODELS e executado no cartão principal através do comando USE. Uma análise macro das interligações dos módulos é apresentada na Figura 4 (a).

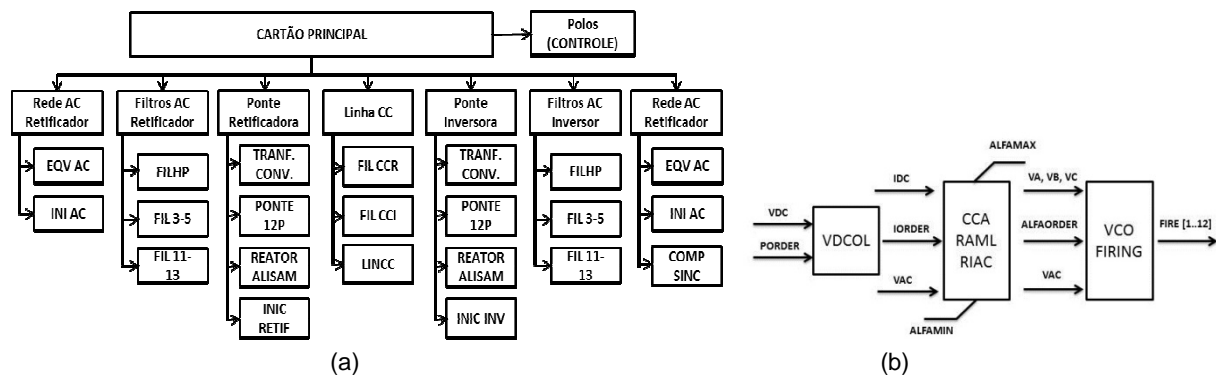


FIGURA 4 - Estrutura básica do cartão equivalente ao modelo.

Um modelo básico representa o controlador manual de potência, o controlador de ordem de corrente (CCA), o limitador de ordem de corrente controlado por tensão (VDCOL), o oscilador controlado por tensão (VCO realimentado com característica proporcional), o limitador de disparo em função da tensão mínima de polarização para válvula (retificador), o controlador de área mínima ou ângulo mínimo de extinção (inversor) e a margem de corrente para inversor. Um segundo modelo, mais complexo, visa à representação do Elo CCAT de Itaipu. Além dos elementos anteriores, inclui os limitadores especiais para ângulo mínimo de disparo do retificador na ocorrência de faltas no sistema CA: RAML ("rectifier alpha minimum limiter") e RIAC ("rectifier integrator alpha clamp"), Figura 4 (b).

### 3.2 Sistema Completo no ATPdraw

A etapa de reprodução e implementação do modelo na interface ATPDraw é um processo trabalhoso e extremamente detalhado de migração de linhas de código em elementos do ATPDraw, respeitando as regras estabelecidas pelo Rule Book (6). Devido ao alto nível de detalhamento, não será apresentado o modo de implementação, mas sim uma visão macro dos cartões implementados, Figura 5.

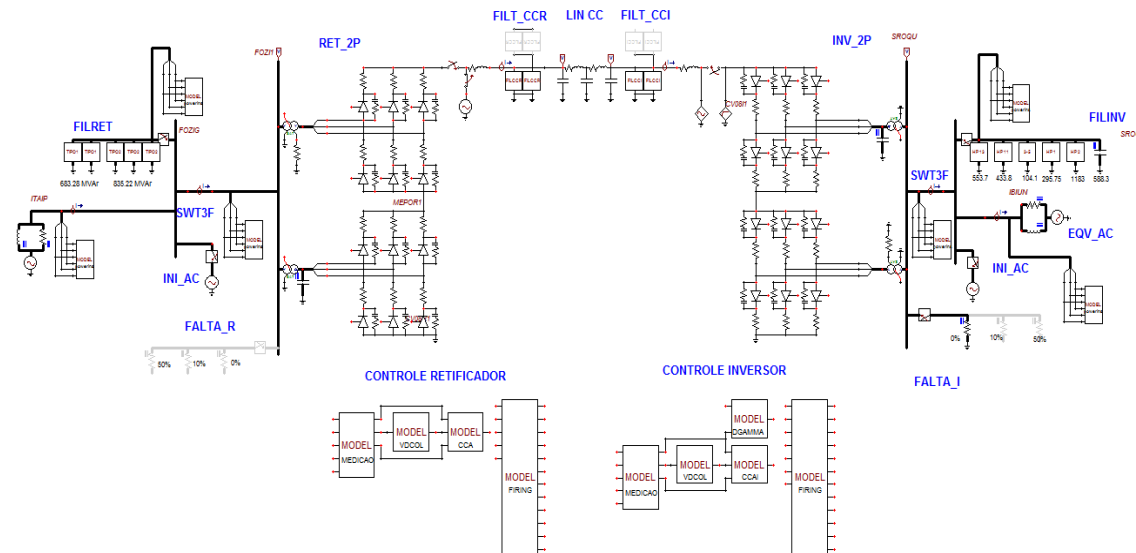


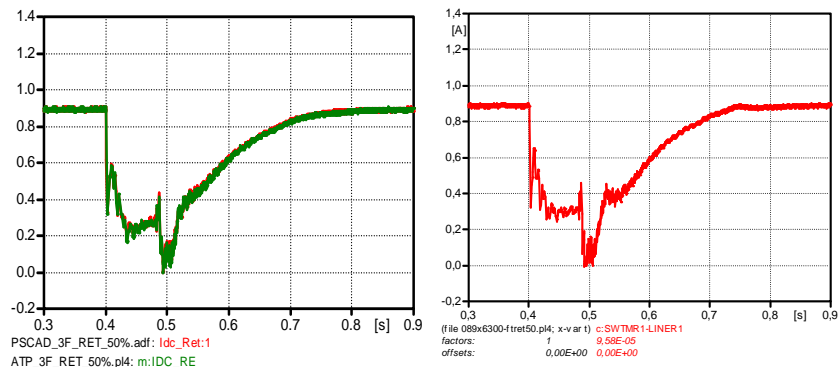
FIGURA 5 – Sistema modularizado e compatibilizado para validação.

#### 4.0 - VALIDAÇÃO DO MODELO

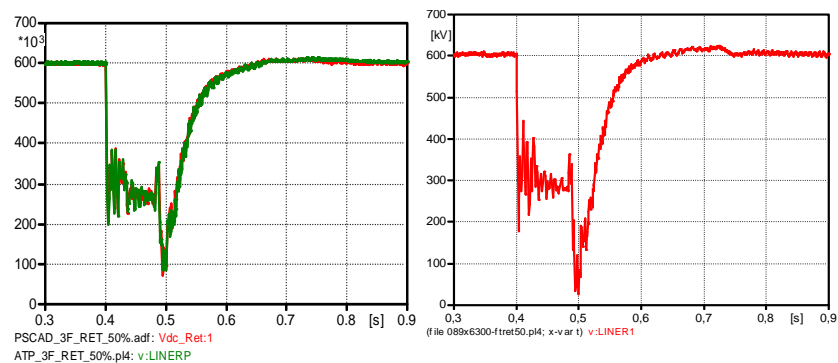
O modelo implementado foi validado a partir de comparações com um modelo já consolidado (9) e um registro de perturbação real. São monitoradas as principais grandezas do HVDC, tais como ângulo alfa, corrente e tensão do lado DC e ângulo gama.

##### 4.1 Comparação da Implementação com a Referência (4)

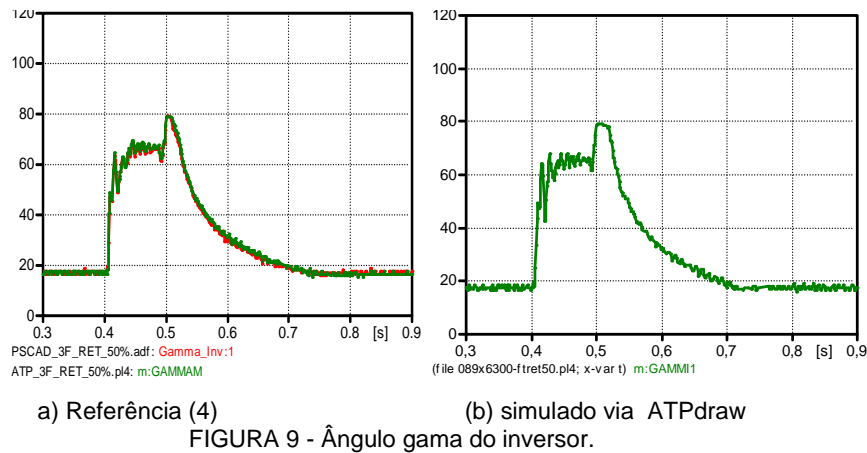
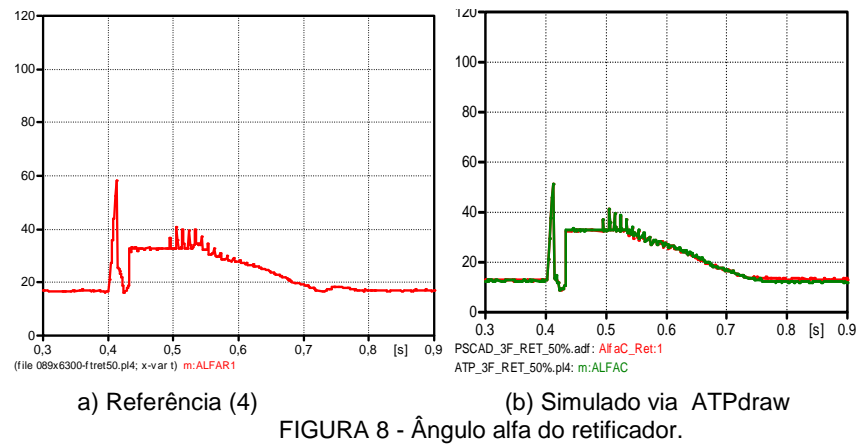
Neste caso foi simulada uma falta trifásica de modo que a tensão atingisse 50% do valor inicial durante o curto-circuito. Os resultados são apresentados nas Figuras de 6 a 9 a seguir. Foram feitos outros níveis de curto-circuito, porém com resultados idênticos aos mostrados aqui.



(a) Referência (4) (b) simulado via ATPdraw  
FIGURA 6 - Corrente CC do pólo retificador.

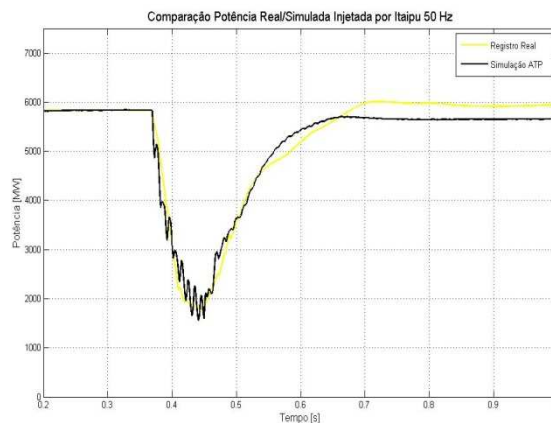


(a) Referência (4) (b) simulado via ATPdraw  
FIGURA 7 – Tensões CC do pólo retificador.



#### 4.2 Comparação curto-circuito real

Foram reproduzidas no ATP as mesmas condições de um evento real que consistiu num curto-circuito monofásico na LT IPU-MD 1, a 1.48km da SE-IPU 50Hz. A Figura 10 mostra a comparação da perturbação com a simulação. Foi considerada apenas a soma da potência transmitida pelas três linhas restantes, o equivalente à potência injetada por Itaipu 50Hz. Percebe-se nesta figura uma semelhança muito grande da transferência de potência simulada com a registrada, o que confirma a correta resposta do modelo implementado.



#### 4.3 Avaliação do modelo Implementado em ATPdraw

Levando em consideração que os modelos que serviram como base para comparação já são consolidados, a validação do modelo implementado pode ser considerada um sucesso. O desempenho estático e dinâmico mostrou-se semelhante ao modelo base para todos os eventos simulados, salvo algumas diferenças previamente identificadas.

## 5.0 - CONCLUSÕES

O elo CCAT de Furnas exerce forte influência sobre o setor 50 Hz de Itaipu e o Sistema Interligado Nacional, fazendo necessária a existência de um modelo computacional detalhado e funcional para utilização em diversos estudos elétricos.

Os resultados desse trabalho confirmam o novo modelo apresentado como um produto extremamente confiável para reprodução dos principais fenômenos proveniente do HVDC de Itaipu. Quando comparado com os modelos já validados e consolidados em outros aplicativos, o desempenho se mostrou altamente satisfatório, salvo algumas diferenças, possivelmente influenciadas pela inicialização do sistema, equivalente de linha CC não compatibilizado e principalmente instante da aplicação do curto-circuito e resistência de falta.

A validação do modelo a partir da comparação com registro real confirmou a resposta coerente do modelo. Embora esteja apresentado de maneira simplificada, e mesmo sem o STAB50, o modelo mostrou-se ideal para utilização em estudos de desempenho das principais estratégias de controle do elo e estudos de curtos-circuitos em geral, classificados na categoria de transitórios rápidos. Entretanto, é flexível de maneira que alterações e ampliações tanto na rede de potência como no sistema de controle são facilmente obtidas.

Para estudos de transitórios mais lentos, especialmente os de estabilidade transitória, faz-se necessária a implementação do STAB50 e os equivalentes dinâmicos conectados nos terminais conversores. A ampliação da rede de potência possibilita a aplicação de faltas na linha CC para verificar lógicas de bloqueio de pólos e bipólos.

O modelo implementado também pode ser facilmente adequado para representação confiante de outros elos CCAT na mesma tecnologia do de Itaipu. Só no Brasil, este pode servir de base para estudos em outros dois projetos, como nos bipolos das usinas do Rio Madeira e de Belo Monte.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ARRILAGA, J. **Flexible Power Transmission – The HVDC Options**. 1. ed. England: John Wiley & Sons, 2007.
- (2) SOOD, Vijay K. **HVDC and FACTS Controllers – Application of Static Converters in Power Systems**. 1.ed. EUA: TLFBOOK, 2004.
- (3) KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**. 1. ed. EUA: McGraw-Hill, 1994.
- (4) LUZ, G. S. et al. **Itaipu HVDC Transmission System – PSCAD/EMTDC Model, XII SEPOPE**, Rio de Janeiro, 2012.
- (5) LUZ, G. S. et al. **Um novo modelo digital de elo de transmissão em CCAT no programa EMTP/ATP**, XIII SNPTEE, Florianópolis, 1995.
- (6) ATP – Alternative Transients Program. **EMTP Rule Book**, 2. Ed., EUA, 2000.