



GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GPL

ANÁLISE DE DESEMPENHO DINÂMICO DAS ALTERNATIVAS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO PARA A INTEGRAÇÃO DAS USINAS JIRAU E SANTO ANTÔNIO DO AHE RIO MADEIRA

Grupo de Trabalho para análises de regime dinâmico da integração das usinas do Rio Madeira

Coordenação técnica de Márcio Goldenberg Sereno *
FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A

Coordenação geral de Paulo Cesar Vaz Esmeraldo
EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA

RESUMO

O artigo apresenta os resultados dos estudos de desempenho dinâmico que foram executados para as alternativas de concepção do sistema de transmissão para o escoamento dos elevados montantes de potência excedente produzida no aproveitamento hidrelétrico do rio Madeira (AHE Madeira), da ordem de 6300 MW, desde o estado de Rondônia até o centro de carga mais próximo com capacidade para absorvê-la, o sudeste brasileiro, distante cerca de 3000 km destas usinas. O desenvolvimento e os resultados desses estudos foram conduzidos pelo “Grupo de Trabalho para análises de regime dinâmico da integração das usinas do Rio Madeira”, com coordenação geral da Superintendência de Transmissão de Energia da EPE, e participação direta de diversas empresas do setor elétrico brasileiro; a saber: CEMIG, CEPEL, ELETROBRÁS, ELETROSUL e FURNAS, cujos participantes estão listados no presente artigo. O trabalho desenvolvido pelo Grupo de Trabalho está consolidado no documento da referência (1).

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de transmissão, alternativas de expansão, integração de usinas, Rio Madeira, UHE Jirau, UHE Santo Antônio, aproveitamento hidrelétrico (AHE).

1. INTRODUÇÃO

O AHE Madeira, que, inicialmente, consta de duas usinas, as UHEs Santo Antônio (3150 MW) e Jirau (3300 MW), situadas nas proximidades de Porto Velho, no estado de Rondônia, possui especificidades que constituem um desafio para o Setor Elétrico Nacional.

Objetivando o menor impacto sócio-ambiental, o projeto do AHE Madeira está sendo proposto com a menor taxa de ocupação de área alagada por MW instalado no Brasil. Este aspecto conduziu à especificação de barragens de pequena altura útil, com cerca de 17 metros, e a conseqüente seleção de turbinas do tipo “Kaplan-Bulbo”, porém em quantidade e potências inusitadas no Brasil e no mundo, num total de 44 unidades de 71,6 MW para a UHE Santo Antônio e 44 unidades de 75 MW para a UHE Jirau.

A necessidade de inserção regional desses novos empreendimentos hidroelétricos para suprir a reduzida demanda da região e as características do sistema de transmissão regional atualmente previsto, em 230 kV, de pequena capacidade de transporte, aliados à elevada diversidade hidrológica observada para o AHE Madeira, remetem ao Planejamento do Setor Elétrico à complexa questão de definição das características do sistema de transmissão capaz de incorporar estas novas usinas ao Sistema Interligado Nacional, com capacidade, portanto, de transporte de todo excedente previsto, cerca de 6300 MW, até os principais centros de carga do sudeste, com extensão de transmissão de até 3000 km, mantendo também o desempenho satisfatório e confiável para as estações do ano de baixa hidraulicidade com um despacho total da ordem de 1000 MW.

Estas especificidades do projeto do AHE Madeira se unem em complexidade quando se analisa o desempenho dinâmico para a definição do sistema de transmissão dessas usinas, finalidade desse trabalho, e sua incorporação ao Sistema Interligado Nacional, exigindo estudos técnicos detalhados que requerem uma modelagem cuidadosa destas unidades geradoras e de seus sistemas de controle, com suas limitações estáticas e dinâmicas bem representadas, de forma que as simulações apresentem resultados confiáveis para as grandezas de interesse quando submetidas aos distúrbios mais críticos impostos pelo sistema elétrico.

2. INFRA-ESTRUTURA DE DINÂMICA

A montagem da infra-estrutura de dinâmica para o “Caso Brasil”, um dos produtos do “Grupo de Dinâmica”, para ser utilizada com o programa ANATEM do CEPEL, teve como ponto e partida a infra-estrutura disponível para o sistema existente em operação e previsto até o ano de 2008. Para que fosse utilizada nos estudos de planejamento foi compatibilizada com a infra-estrutura de regime permanente utilizada no Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro e, posteriormente, foram incluídos os modelos de todas as novas usinas previstas no plano de geração, que perfazem um total de 54 unidades de interesse, com seus sistemas de controle devidamente testados e condicionados aos pontos de operação que deverão ser submetidos.

Além da seleção e preparação dos modelos de geradores, reguladores de tensão, reguladores de velocidade e sinais adicionais estabilizadores, para todas as 54 usinas mencionadas, foram executados todos os testes de validação e ajuste dos modelos, a saber:

- Teste em vazio para a validação e o ajuste dos Reguladores Automáticos de Tensão (RAT);
- Testes em carga com máquina isolada para a validação e o ajuste dos Reguladores Automáticos de Velocidade (RAV), constituindo de dois ensaios principais:
 - Degrau de carga;
 - Rejeição total de carga.
- Teste com máquina sincronizada para a validação e o ajuste dos Sinais Adicionais Estabilizadores (PSS), constituindo de dois ensaios principais:
 - Testes das Máquinas contra Barra Infinita;
 - Testes das Máquinas contra o sistema de Referência do AHE Madeira.

Parâmetros das Usinas do AHE Madeira

Inicialmente foram adotados os parâmetros para as máquinas “Bulbo” das usinas do rio Madeira informados pela Hitachi, referentes à usina de Tadami, no Japão, porém com reguladores e limitadores típicos estimados por FURNAS, apresentados na referência [5].

Posteriormente, foi viabilizado o contato com um dos consórcios de fabricantes que está projetando as máquinas para o AHE Madeira, constituído da VOITH-SIEMENS, VATECH e ALSTOM, que informaram parâmetros e modelos matemáticos para as unidades geradoras, respectivos sistemas de controle (RAT e RAV) e limitadores, os quais passaram a serem adotados como os mais realistas para o empreendimento em questão.

A Tabela 1 que se segue compara os parâmetros das máquinas acima mencionadas, incluindo também na comparação os parâmetros da UHE Igarapava, a atual usina brasileira com a maior turbina “Bulbo”, com cerca de 44 MW nominais.

Parâmetros e Modelos das Conversoras CCAT

Os estudos de regime permanente e dinâmico das alternativas que incluem elos de CCAT basearam-se nos recursos de controle e modelos do elo CCAT de Itaipu, nos quais procederam-se alguns ajustes de parâmetros no sentido de melhorar o desempenho para o caso do sistema associado ao AHE Madeira. Na quase totalidade do estudo foi utilizado o modelo de elo CCAT residente do programa ANATEM, mas já para o final do estudo foram executadas algumas análises de sensibilidade considerando o modelo mais detalhado do elo de Itaipu, representado através de “CDU” (Controle Definido pelo Usuário) no ANATEM, de forma que fossem avaliados alguns recursos adicionais de controle que estão disponíveis no elo de Itaipu.

Os montantes de compensação shunt capacitiva, correspondente aos filtros das estações conversoras, foram determinados tomando-se como referência o projeto de Itaipu e estão resumidos, para as diversas potências e configurações consideradas, na referência [5].

Cabe ressaltar que na situação de despacho reduzido nas usinas do AHE Madeira, cerca de 1000 MW, foi assumida a operação do paralelismo das linhas de transmissão CCAT para controle de tensão, operando desta forma com 1 bipolo, não sendo necessário considerar a operação com LTs desenergizadas, porém com um montante de filtros reduzido.

Contingências Analisadas

Foram analisadas a perda individual, como consequência da ocorrência de curto-circuito monofásico, dos diversos elementos do sistema de transmissão associados ao corredor principal de escoamento do excedente de potência do AHE Madeira para a região sudeste, assim como no sistema paralelo regional em 230 kV, além das principais contingências no sistema receptor do sudeste em 440kV, 500 kV e mais aquelas que refletem a interação com o sistemas CCAT e CAAT de transmissão de Itaipu, além da contingência da perda da maior máquina do sistema interligado nacional, a UNE Angra II.

3. FORMULAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Com a combinação de tecnologias CC e CA, níveis de tensão 500 e 765 kV, as diferentes configurações de linhas e as diversas combinações possíveis de rotas ocasionaram a formulação de um número elevado de alternativas de integração, chegando, num primeiro exercício, a de cerca de 100 possibilidades. Porém, a partir de algumas simplificações e eliminações das alternativas menos promissoras, para transmitir a potência plena dos empreendimentos (6300 MW), foi definido um conjunto final de 16 alternativas básicas, mostrado esquematicamente na Figura 1.

Tabela 1 - Comparação dos parâmetros de máquinas com turbinas “Bulbo”.

PARÂMETROS DAS MÁQUINAS BULBO				
Fabricante	HITACHI	VATECH	IGARAPAVA	Δ max
Xd(pu)	1,00	1,10	1,14	14%
Xq(pu)	0,70	0,70	0,73	4%
Xd'(pu)	0,45	0,40	0,39	17%
X'q(pu)	0,40	0,32	0,35	25%
Xl(pu)	0,28	0,20	0,21	40%
T'd0(s)	2,70	5,00	3,50	85%
T'q0(s)	0,04	0,05	0,02	178%
T'q0'(s)	0,08	0,09	0,04	143%
H(s)	1,70	1,40	1,20	42%
MVA	84,00	83,00	44,20	

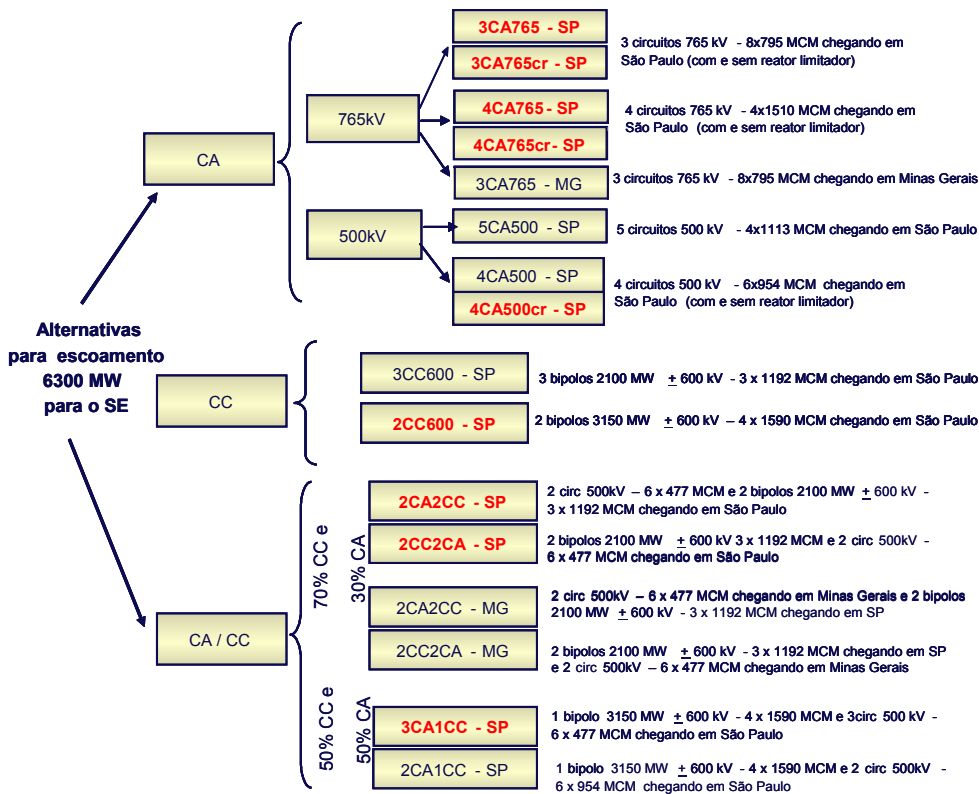


Figura 1 – Alternativas analisadas

Ressalta-se, porém, que o presente trabalho restringiu-se à apresentação do desempenho dinâmico das alternativas investigadas que se apresentaram com o melhor desempenho econômico e, ainda, aquelas que se apresentaram mais significativas sob o ponto de vista de desempenho dinâmico, as quais estão ressaltadas na Figura 1, anterior, em letras vermelhas. Destacamos também que uma importante variação da alternativa em CCAT, constituída pela segregação de algumas unidades geradoras da UHE Santo Antônio no sistema do Acre-Rondônia, foi analisada separadamente e apresentada no relatório da referência (6).

4. DESEMPENHO DINÂMICO

Para as alternativas de transmissão do AHE Madeira que são compostas com pelo menos um elo em CCAT, as contingências que resultaram nos impactos considerados como os mais significativos decorreram da aplicação de defeitos nas redes CA associadas aos terminais do elo de transmissão.

Por outro lado, nas alternativas em que o sistema de escoamento da energia do AHE Madeira até a região sudeste é constituído unicamente em CAAT, as contingências mais significativas são as faltas na rede de transmissão em 500 kV, que interliga as usinas e a subestação coletora e também no primeiro trecho que parte da coletora em direção ao sudeste. Em ambas as configurações/tecnologias os defeitos descritos resultam na interrupção momentânea, parcial ou total, da transmissão de potência, durante o intervalo de tempo de permanência da falta. Como decorrência destas contingências as máquinas das usinas do AHE Madeira, por serem de baixa inércia, sofrem elevadas acelerações a serem amortecidas pelos sistemas e controle disponíveis, que deverão cumprir a tarefa de manter as grandezas eletromecânicas, dos sistemas envolvidos, variando dentro de limites aceitáveis e seguros.

O fenômeno descrito caracteriza o problema de estabilidade transitória na sua expressão mais ampla (transitória de primeira oscilação e dinâmica de oscilações sustentadas) que é influenciado por um grande número de variáveis a serem consideradas na análise dinâmica do sistema de transmissão associado ao AHE Madeira. Perseguindo este objetivo, no presente estudo de análise dinâmica, para cada alternativa proposta, foram investigadas as condições mais desfavoráveis para a estabilidade, considerando todos os cenários, patamares de carga e configurações propostas.

É notório que os principais problemas e questões envolvidas na definição de uma transmissão com o porte do sistema associado ao AHE Madeira estão ligados ao desempenho dinâmico, cuja análise resultou em grande parte dos reforços adicionais às configurações básicas, concebidas na fase inicial com premissas típicas e padronizadas para a formação das alternativas. A partir da análise dinâmica foram estabelecidas alterações nos graus de compensação série e shunt, fixa e dinâmica, e até mesmo às reconfigurações de algumas alternativas, como é exemplo do caso da alternativa em CCAT, na qual foi incluída a conexão assíncrona do sistema Acre-Rondônia em 230 kV com a SE Coletora em 500 kV, através de um conversor AC-DC-AC ("Back-to-Back").

4.1 Alternativas em CAAT

Foi constatado que, para todas as alternativas em CAAT, o adequado desempenho dinâmico é dependente do ajuste do perfil de tensão nas subestações da área de interesse, devendo-se manter, para qualquer uma das configurações e cenários previstos, recursos de controle de tensão suficientes para operar o sistema de integração em 500 kV num patamar elevado de tensão. Para as alternativas em 765 kV esta condicionante se agrava pela limitação, em regime permanente, da tensão máxima operativa em 800 kV (1,046 pu), imposta pela tecnologia dos reatores de linha e que impõe operar em condição normal com tensões abaixo deste limite o suficiente para que em condições de emergência ainda se mantenha igual ou abaixo de 800 kV.

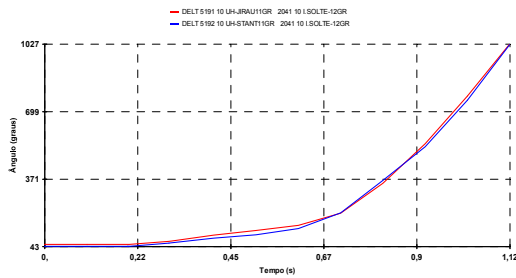
Foi verificado, também, que as contingências mais severas para estas alternativas são aquelas próximas à Coletora Porto Velho, como a perda da LT 500kV Coletora Porto Velho – Jirau e a perda de uma LT Santo Antônio – Ji-Paraná, considerando o despacho pleno das usinas do Rio Madeira (Cenário 1 – 6.450MW), nos patamares de carga pesada e leve. A primeira consequência desta constatação foi identificar a necessidade, por desempenho dinâmico, de acrescentar à concepção básica original de todas as alternativas, o terceiro circuito, em 500kV, de integração da UHE Jirau à SE Coletora Porto Velho.

Os estudos dinâmicos apontaram uma configuração mínima para cada alternativa em CAAT, complementando o conjunto de obras definido nos estudos de regime permanente, a saber:

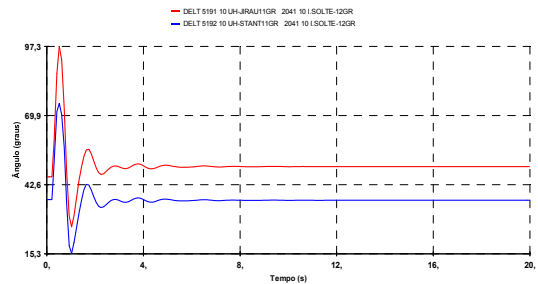
Alternativa 3 X 765 KV (3CA765 - SP)

- Compensação série de 65% no tronco de 765kV;
- Compensação estática no tronco de 765kV de 3 CEs (-250/250)Mvar em Cuiabá, 3 CEs (-250/250)Mvar em C. Oeste e 1 CEs (-250/250)Mvar em C. Alta;

Para exemplificar a necessidade dos equipamentos relacionados (configuração mínima), são apresentadas a seguir as Figuras 2 e 3 com o resultado de algumas simulações considerando alterações na configuração proposta.



Compensação série de 60%.



Compensação série de 65%.

Figura 2 - Abertura angular das UHEs Jirau e S. Antônio. Perda da LT 500kV Col. P.Velho – Jirau. Carga pesada. AHE Madeira Pleno.

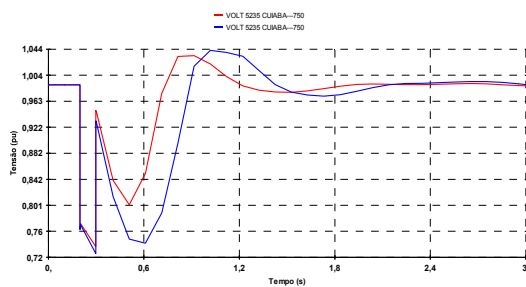


Figura 3 - Tensão na SE Cuiabá 765kV. Perda da LT 500kV Col. P.Velho – Jirau. Carga pesada. AHE Madeira Pleno.

- Configuração com 3 CEs em Cuiabá, 3 CEs em C.Oeste e 1 CE em C.Alta
- Configuração com 2 CE em Cuiabá, 3 CEs em C.Oeste e 1 CE em C.Alta

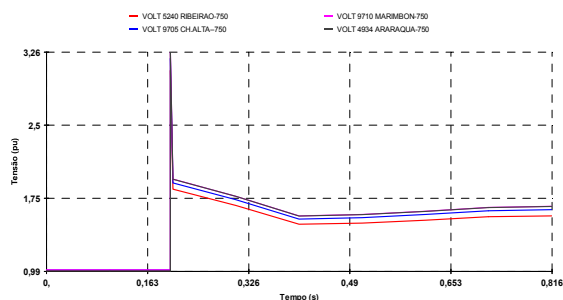
Alternativa 4 X 765 KV (4CA765 - SP)

Os estudos dinâmicos apontaram uma configuração mínima para a alternativa 4AC765-SP, complementando o conjunto de obras definido nos estudos de regime permanente:

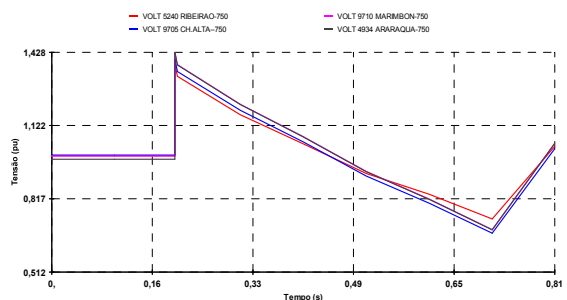
- Compensação série de 65% no tronco de 765kV;
- Compensação estática no tronco de 765kV de 4 CEs (-250/250)Mvar em Cuiabá, 3 CEs (-250/250)Mvar em C. Oeste e 1 CEs (-250/250)Mvar em C. Alta;

Sobretensões de manobra à 60Hz:

Uma preocupação a ser destacada nas alternativas em CAAT é a ocorrência de sobretensões elevadas, em situação de rejeição total de carga, principalmente no ponto de Araraquara 765kV. A solução adotada para este problema foi a inserção de abaixamentos ao longo do tronco de 765kV.



Caso sem abaixamento no tronco de 765kV .



Caso com abaixamento no tronco de 765kV.

Figura 4 - Tensões nas subestações da região. Rejeição total em Araraquara 765kV. Carga pesada. AHE Madeira Pleno.

4.1.1 Alternativas em CAAT com RLCC

Com a observação de que as contingências mais severas para as alternativas em CAAT são aquelas próximas à Coletora Porto Velho, ficou identificado que a origem desta característica é o elevado nível de curto-circuito nesta região associado à

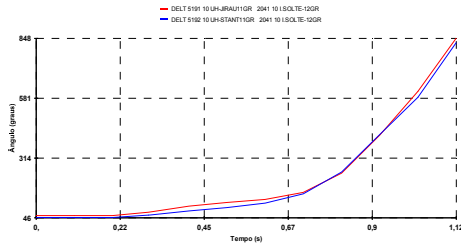
baixa inércia dos geradores do AHE Madeira. Uma proposição que surgiu a partir da experiência da ELETRONORTE na UHE Tucuruí, foi a inclusão de um reator limitador de curto-circuito (RLCC) no barramento da SE Coletora Porto Velho, o qual limita o afundamento de tensão para curtos próximos às usinas, reduzindo desta forma a aceleração das máquinas para estas contingências.

3 X 765 kV - RLCC (3CA765cr- SP)

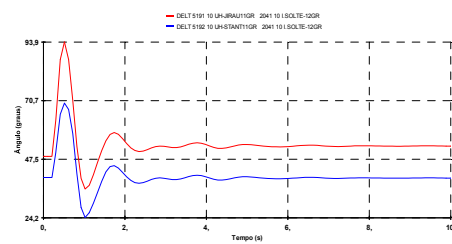
Nesta alternativa como benefício da instalação do RLCC na barra de 500 kV da SE Coletora Porto Velho foi possível retirar um circuito de 765 kV no do trecho entre Cachoeira Alta e Araraquara porém, foi necessário manter o mesmo percentual de compensação série (65%) e conseqüentemente, neste trecho de transmissão, com um montante de Mvar de compensação série substancialmente maior que na alternativa sem o RLCC.

- Reator limitador de curto-circuito no barramento de 500kV da SE Coletora P. Velho;
- Compensação série de 65% no tronco de 765kV;
- Compensação estática no tronco de 765kV de 3 CEs (-250/250)Mvar em Cuiabá, 3 CEs (-250/250)Mvar em C. Oeste e 1 CEs (-250/250)Mvar em C. Alta;

Para exemplificar a necessidade dos equipamentos relacionados (configuração mínima), são apresentadas a seguir algumas simulações considerando alterações na configuração proposta.



Compensação série de 60%.



Compensação série de 65%.

Figura 5 - Abertura angular das UHEs Jirau e S. Antônio. Perda da LT 500kV Col. P.Velho – Jirau. Carga pesada. AHE Madeira Pleno.

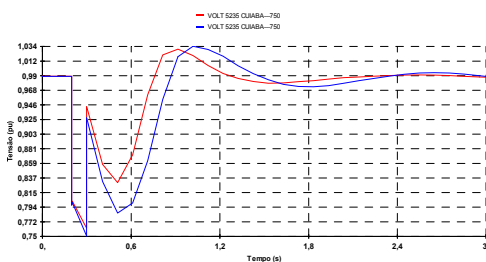
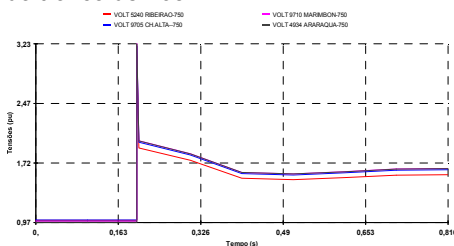


Figura 6 - Tensão na SE Cuiabá 765kV. Perda da LT 500kV Col. P.Velho – Jirau. Carga pesada. AHE Madeira Pleno.

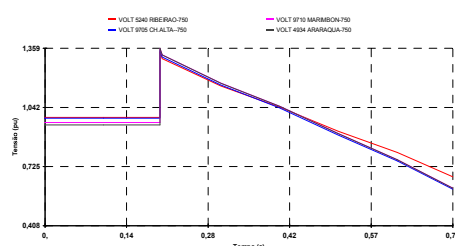
- Configuração com 2 CEs em Cuiabá, 2 CEs em C.Oeste e 1 CE em C.Alta
- Configuração com 1 CE em Cuiabá, 2 CEs em C.Oeste e 1 CE em C.Alta

Sobretensões de manobra à 60Hz:

A solução adotada para as sobretensões elevadas, em situação de rejeição total de carga foi a inserção de abaixamentos ao longo do tronco de 765kV.



Caso sem abaixamento no tronco de 765kV .



Caso com abaixamento no tronco de 765kV.

Figura 7 - Tensões nas subestações da região. Rejeição total em Araraquara 765kV. Carga pesada. AHE Madeira Pleno.

4 X 765 kV - RLCC (4CA765cr-SP)

Nesta alternativa como benefício da instalação do RLCC na barra de 500 kV da SE Coletora Porto Velho também foi possível retirar um circuito de 765 kV no do trecho entre Cachoeira Alta e Araraquara porém, foi necessário manter o mesmo percentual de compensação série (65%) e conseqüentemente, neste trecho de transmissão, com um montante de Mvar de compensação série substancialmente maior que na alternativa sem o RLCC. Configuração mínima para esta alternativa:

- Reator limitador de curto-circuito no barramento de 500kV da SE Coletora P. Velho;
- Compensação série de 65% no tronco de 765kV;
- Compensação estática no tronco de 765kV de 4 CEs (-250/250)Mvar em Cuiabá, 4 CEs (-250/250)Mvar em C. Oeste e 1 CEs (-250/250)Mvar em C. Alta;

4 x 500 kV - RLCC (4CA500rc-SP)

Os estudos dinâmicos apontaram uma configuração mínima para a alternativa 4CA500rc-SP, complementando o conjunto de obras definido nos estudos de regime permanente:

- Reator limitador de curto-circuito no barramento de 500kV da SE Coletora P. Velho;
- Compensação série de 65% no tronco de 500kV;
- Compensação estática no tronco de 500kV de 4 CEs (-250/250) Mvar em Cuiabá e 3 CEs (-250/250) Mvar em Colorado do Oeste.

4.2 Alternativa em CCAT

Entre as alternativas postuladas em CCAT, somente a alternativa 2CC600 - SP, por ser a mais promissora, com 2 bipolos de 3150 MW cada um, em ± 600 KV, foi detalhada nos estudos de de desempenho dinâmico.

Defeitos nas redes CA receptoras

Defeitos na rede CA do retificador, ou na rede CA do terminal inversor, resultam na interrupção temporária da transmissão da potência pelo elo CCAT, podendo esta interrupção ser parcial ou total.

No caso do AHE Madeira, durante estas contingências, a tendência é que grande parte da potência elétrica remanescente tente fluir pela rede de 230 kV do sistema Acre-Rondônia que, em 2009, estará conectada ao Sistema Interligado. Por se tratar de uma conexão com capacidade limitada de transmissão, esta redistribuição de fluxos causa em todos os cenários estudados, acentuado afundamento de tensão e perda de sincronismo das máquinas do AHE Madeira e Sistema Acre-Rondônia com o Sistema Sudeste. A Figura 8 apresenta o perfil de tensão no sistema de 230 kV para a simulação de um defeito monofásico na LT 500 kV Araraquara-Campinas, sendo eliminado após 100 ms pela sua abertura. Algumas medidas foram estudadas para eliminar este problema, conforme será apresentado em seqüência.

✓ **Abertura automática do sistema de 230 kV Acre-Rondônia:** poderia ser implementado através da atuação de uma Proteção contra Perda de Sincronismo (PPS). No entanto, também no caso de defeitos remotos na rede CA do inversor, é possível a ocorrência de falha de comutação e sendo assim poderão existir inúmeras contingências que conduziram a muitas atuações desta proteção, resultando numa operação com baixa confiabilidade.

✓ **Operação aberta do sistema de 230 kV Acre-Rondônia, em regime normal:** Observam-se na Figura 9, para a mesma contingência anteriormente apresentada, elevadas variações de frequência no sistema conectado ao terminal retificador, ocasionadas principalmente pela baixa inércia das máquinas bulbo do AHE Madeira.

- **Utilização de um Estabilizador de Frequência pelo Controle do Elo CC por modulação da potência do elo CCAT:** Consideraram-se modulações de 120% e 150% da potência nominal do elo CC, o que levou a uma discreta redução da variação de frequência no Sistema Acre-Rondônia, como pode ser observado na Figura 10. Adicionalmente, observou-se que a utilização deste controle pode levar à ocorrência de subtensões no sistema receptor, principalmente ao se utilizar uma modulação de até 150%.
- **A ocorrência de Elevadas Potências Acelerantes:** Um outro fenômeno também observado diz respeito à incidência de variações expressivas da potência acelerante nas máquinas mais próximas do terminal retificador, quando de defeitos que resultem na interrupção da transmissão da potência CC. A Figura 11 mostra a variação da potência acelerante na UHE Samuel e nas UTEs Termonorte 2, para a mesma contingência anteriormente apresentada.

- **Efeito da redução do ângulo de disparo máximo (inicialmente, 163°) do elo CCAT:** A simulação anterior foi refeita considerando-se a modificação deste valor para 93°, e constatou-se que houve uma redução das magnitudes das potências acelerantes das máquinas, como sumarizado na Tabela 2 (Condições 1 e 2). Com a aplicação da limitação do ângulo máximo de disparo α máximo, ainda persistiram variações de potência acelerante da ordem de até 112% da potência aparente nominal dos geradores do AHE Madeira, similar às verificadas na UHE Itaipu 50 Hz, e de até 116% dos geradores das UTEs.

✓ **Substituição da transformação 500/230 kV de Porto Velho por um conversor Back-to-Back CA-CC-CA, mantendo a interligação em 230 kV Acre-Rondônia – SIN fechada:**

Na Figura 12 estão apresentadas as tensões no tronco de 230 kV para o mesmo defeito anteriormente estudado. Pode-se verificar a preservação da estabilidade do sistema, mesmo com o fechamento da conexão entre as usinas do sistema Acre-Rondônia e o Sistema Interligado.

Se por um lado mostrou-se que a questão associada à instabilidade do sistema fica resolvida com a introdução do Back-to-Back, os aspectos relacionados às potências acelerantes ainda demandavam investigação. Na Tabela 2 encontram-se os montantes calculados para diferentes condições de operação, e para fins de comparação, incluiu-se os esforços nas

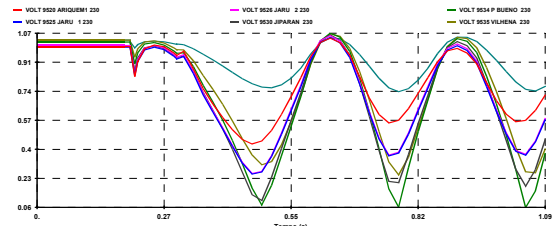


Figura 8 :Tensão no sistema de 230 kV Acre-Rondônia. Defeito monofásico na SE Araraquara 500 kV e abertura da LT 500 kV Araraquara-Campinas.

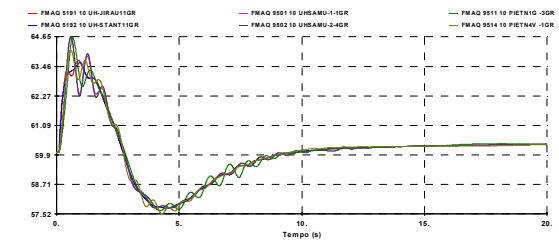


Figura 9 : Frequência das máquinas do AHE Madeira, da UHE Samuel e das UTEs Termonorte 2, considerando operação aberta do sistema.

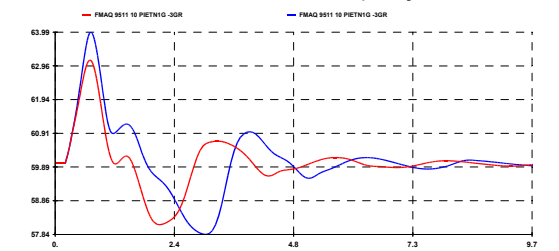


Figura 10 : Frequência na UTE Termonorte 2. Com a presença de um Estabilizador de Frequência

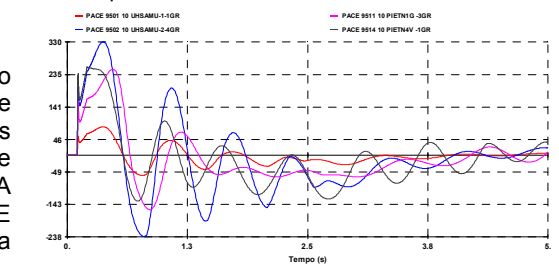


Figura 11 : Potência Acelerante da UHE Samuel e das UTEs Termonorte 2.

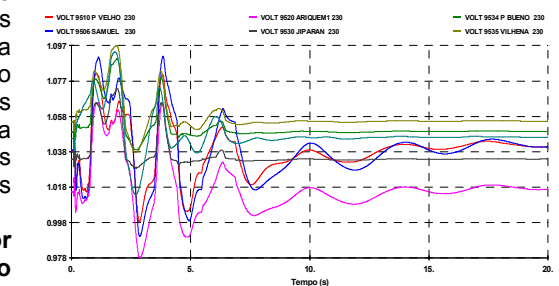


Figura 12 :Tensão no sistema de 230 kV Acre-Rondônia com a presença do Back-to-Back.

máquinas da UHE Itaipu 50 Hz. Observa-se na Condição 5, valores bastante razoáveis para as unidades do sistema Acre-Rondônia, mostrando que a inclusão do Back-to-Back, associada a ajustes adequados dos sistemas de controle, são medidas efetivas para mitigar os esforços sobre estas máquinas. Portanto, a inclusão do Back-to-Back, além da solução do problema da instabilidade do sistema de 230 kV, conduz a um benefício adicional no tocante à questão dos torques transitórios.

Tabela 2 :Variação da Potência Acelerante

Geradores	Condições Operativas Analisadas *				
	1	2	3	4	5
UHE Jirau	124,1 %	87,3 %	135,1 %	94,5 %	94,5 %
UHE Santo Antônio	171,7 %	112,2 %	182,3 %	119,3 %	119,3 %
UHE Samuel 1	125,5 %	76,5 %	45,1 %	58,8 %	27,5 %
UHE Samuel 2	121,6 %	76,0 %	44,1 %	57,8 %	27,5 %
UTE PIE 1 (gás)	155,7 %	93,9 %	60,9 %	78,3 %	40,0 %
UTE PIE 4 (vapor)	195,7 %	116,4 %	74,3 %	95,7 %	47,9 %
UHE ITAIPU	117,0 %	115,9 %	110,5 %	116,2 %	116,1 %

Condição 1: Sistema de 230kV Acre-Rondônia aberto e ângulo máximo de disparo de 163°

Condição 2: Sistema de 230kV Acre-Rondônia aberto e ângulo máximo de disparo de 93°

Condição 3: Sistema de 230kV Acre-Rondônia fechado, ângulo máximo de disparo de 163° e inclusão do Back-to-Back

Condição 4: Sistema de 230kV Acre-Rondônia fechado, ângulo máximo de disparo de 93° e inclusão do Back-to-Back

Condição 5: Idem Condição 4, mas com alteração no ganho do controle do Back-to-Back

Para a operação de um Back-to-Back convencional, sem a presença das unidades térmicas em Porto Velho, e principalmente nos períodos de baixa hidraulicidade, torna-se mandatório aumentar o nível de curto-circuito na rede em questão ($SCR < 1,0$), sendo necessária a inclusão de três compensadores síncronos (-70/100 Mvar) em Porto Velho 230 kV. Alternativamente, poderiam ser empregados outros tipos de conversores, por exemplo baseados na utilização de capacitores de comutação ou conversores de tensão (VSC), que fossem capazes de suprir a deficiência apontada, o que não foi adotado no presente trabalho pois se objetivou uma solução universal.

Análise de Desempenho do Sistema 230 kV Acre-Rondônia com Back-to-Back

Verificou-se que este sistema necessitaria de reforços para transportar os montantes de potência disponibilizados pelo AHE Madeira, nos diversos cenários e patamares de carga considerados. Passou-se então à análise do reforço mínimo necessário para este sistema, mantendo-se o elo CCAT com dois bipolos de 3150 MW. Foram estudadas as duas combinações mais críticas de cenários de geração e patamares de carga em relação ao transporte de potência pelo sistema Acre-Rondônia, explorando-se as situações extremas. Como se pode observar na Tabela 3, o valor mínimo da potência CC pelo Back-to-Back é de 250 MW, e evidentemente, o excedente de geração seria transmitido pelos bipolos CC. No cenário de baixa hidraulicidade, durante a condição de carga pesada, o Back-to-Back pode transmitir até 650 MW.

Tabela 3- Fluxos máximos admissíveis pelo Back-to-Back para suportar contingências na rede de 230 kV

Cenários Hidrológicos	Patamares de Carga	Fluxo Máximo (MW)	Fator Limitante	Reforço
Cenário 1 (AHE Madeira pleno e despacho elevado na UHE Samuel)	Pesada	250	Carregamento da LT Samuel – Ariquemes – Jiparaná durante contingência em regime permanente	-
	Leve ⁽¹⁾	250		
Cenário 4 (AHE Madeira com 1000 MW e despacho reduzido na UHE Samuel)	Pesada ⁽¹⁾	650	Carregamento da LT Samuel – Ariquemes – Jiparaná durante contingência em regime permanente	3 compensadores síncronos em Porto Velho, 230kV, de 100 Mvar cada um;
	Leve ⁽¹⁾	450	Defeito no 230 kV do Acre-Rondônia acarreta falha de comutação de até 150 ms, provocando afundamento de tensão ao longo da interligação e perda de sincronismo	3º circuito em 230 kV, entre as subestações JiParaná – Pimenta Bueno – Vilhena – Jauru, com condutores em feixe expandido e capacidade de 486 MVA;

⁽¹⁾ Sem despacho das térmicas Termonorte II

A Figura 13 ilustra o comportamento do sistema para a aplicação de um defeito monofásico por 150 ms na rede CA do terminal inversor do Back-to-Back, seguido da abertura da linha de transmissão 230 kV Coletora -Porto Velho, considerando as usinas do rio Madeira com despacho reduzido (Cenário 4).

Outras Alternativas Estudadas

Considerou-se também outras alternativas para lidar com as dificuldades encontradas durante os estudos. A principal delas, e que merece maior destaque, compreende a segregação de máquinas da UHE Santo Antônio para suprimento exclusivo ao sistema Acre-Rondônia.

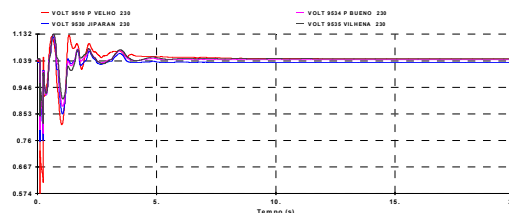


Figura 13: Tensão em Samuel, Ariquemes e Ji-Paraná (230kV)

Defeitos Internos ao Elo CCAT e a Concepção de uma Função Adicional para o Controle CC

Defeitos internos ao elo CCAT (defeito pólo-terra e bloqueio de pólo), tem conseqüências menos severas que defeitos CA, na medida em que apenas ¼ da potência total CC é interrompida durante o distúrbio.

A exploração da capacidade temporária de sobrecarga dos elos CCAT durante estes distúrbios, é uma característica com potencial para permitir a preservação da integridade do Sistema Interligado. Concebeu-se um aperfeiçoamento do Controle Mestre, incluindo uma malha capaz de redistribuir pelos pólos são o montante de potência elétrica interrompido durante tais eventos, podendo o mesmo estar associado ao corte de unidades geradoras no caso extremo da perda de bipolo. Esta medida mostrou-se bastante eficiente.

A adoção de uma capacidade de sobrecarga de 33% por 5 seg., no caso de 4 pólos, é suficiente para atender as necessidades de redistribuição de potência CC durante o período de extinção de defeitos pólo-terra (com sucesso), tanto no que se refere ao montante como o tempo necessário para tal. Durante defeitos permanentes, que impliquem no

desligamento do pólo, este controlador contribui para amenizar o impacto da perda de $\frac{1}{4}$ da potência total CC sobre os sistemas CA, uma vez que, ao invés de um corte abrupto da potência, seu decaimento poderá ocorrer de forma gradual durante o período admissível de sobrecarga.

Interações com o elo CCAT de Itaipu

No tocante às possíveis interações entre os elos CCAT do AHE Madeira e de Itaipu, deve-se mencionar que distúrbios nas redes CA receptoras, de um modo geral podem provocar falhas de comutação simultâneas nos dois elos, em função da proximidade elétrica entre seus terminais inversores. Pelo critério adotado, estas falhas de comutação estão limitadas a 100 ms de duração para defeitos locais, que corresponde ao seu tempo de eliminação, e 1 ciclo para defeitos remotos. Em função da rápida recuperação da potência CC após o período em falha de comutação este fenômeno não se mostrou crítico para o Sistema Interligado.

No entanto, foi elaborada uma análise de robustez da estabilidade do sistema, mantendo-se a falha de comutação simultânea em ambas as estações inversoras por todo o período em falta, ou seja, 100 ms. Conforme se pode observar na Figura 14, mesmo nesta condição mais severa, o sistema se manteve dinamicamente estável.

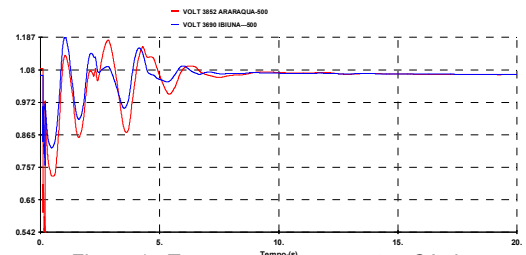


Figura 14: Tensão nos barramentos CA das estações inversoras (Araraquara e Ibiúna)

4.3 Alternativas híbridas CCAT/CAAT

Com as alternativas híbridas se objetivou associar os benefícios das alternativas em CAAT e CCAT, procurando configurar circuitos nas duas tecnologias que pudessem minorar os problemas encontrados naquelas alternativas.

Alternativa 2 BIPOLOS de 2100MW e 2CA-500 kV, VIA SP (2CC2CA-SP e 2CA2CC-SP)

A partir do comportamento da potência reativa na configuração com 1xCE (-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 2xCE (-120/250 Mvar) em Cuiabá, é possível verificar que estes CEs tiveram seus limites totalmente explorados nos primeiros ciclos de oscilação que ocorrem quando da contingência mais severa para este cenário e patamar de carga pesada. Sendo assim a configuração proposta para os compensadores estáticos do tronco CA 500 kV foi de 3 x (-120/250 Mvar) em Cuiabá e 2 x (-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste.

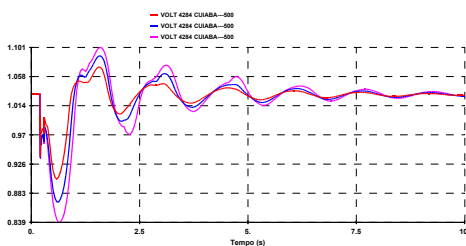


Figura 15 : Tensão em Cuiabá 500 kV Para a perda da LT 500 kV Araraquara-Campinas em carga pesada. AHE Madeira Pleno.

- 2x CE(-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 3x CE(-120/250 Mvar) em Cuiabá.
- 2x CE(-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 2XCE (-120/250 Mvar) em Cuiabá.
- 1xCE (-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 2XCE(-120/250 Mvar) em Cuiabá.

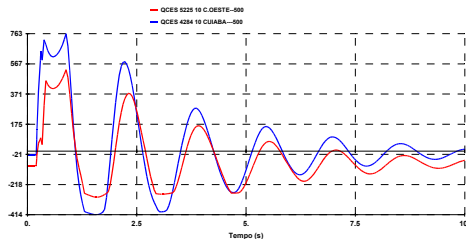
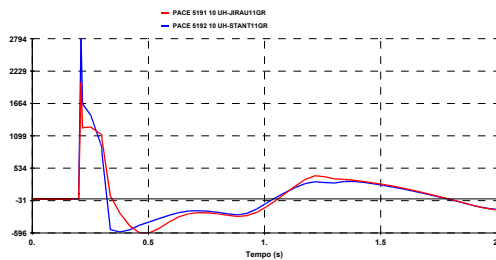
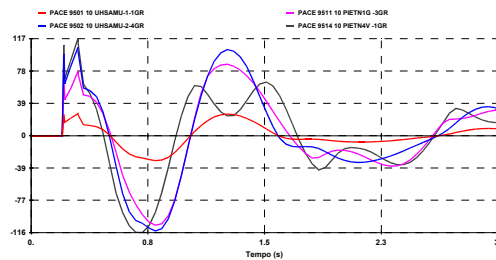


Figura 16 : Potência reativa dos CEs de Cuiabá 3 x (-120/250 Mvar) e Colorado do Oeste 2 x (-120/250 Mvar) para a perda da LT 500 kV Araraquara-Campinas em carga pesada. AHE Madeira Pleno.

Destacasse também para esta alternativa a mitigação do fenômenos de torques transitórios nas unidades geradoras existentes em Rondônia assim como no AHE Madeira. Porém, considerando que este fenômeno é provável de ocorrer várias vezes ao ano, conclui-se que, até mesmo para esta alternativa híbrida, será necessário um aprofundamento desta questão de torques transitórios junto aos fabricantes das UHEs Jirau e Santo Antônio, por se tratar de usinas com turbinas do “tipo Bulbo”, e da UTE Termonorte II, que são mais sensíveis ao fenômeno em questão.



UHes Jirau e Santo Antônio



UHE Samuel e UTEs Porto Velho.

Figura 17 : Potência Acelerante das unidades geradoras de interesse.

Alternativa 3CA em 500kV e CC 1x3150MW, ±600kV, VIA SP (3CA1CC-SP)

Nesta alternativa ocorre também que na configuração com 1xCE (-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 2xCE (-120/250 Mvar) em Cuiabá os CEs tiveram seus limites totalmente explorados nos primeiros ciclos de oscilação que ocorrem quando da contingência mais severa para este cenário e patamar de carga pesada. Sendo assim a configuração proposta para os compensadores estáticos do tronco CA 500 kV foi de 3 x (-120/250 Mvar) em Cuiabá e 2 x (-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste.

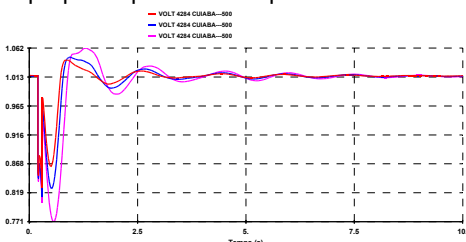


Figura 18 : Tensão em Cuiabá 500 kV Para a perda da LT 500 kV Araraquara-Campinas em carga pesada. AHE Madeira Pleno.

- 2x CE(-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 3x CE(-120/250 Mvar) em Cuiabá.
- 2x CE(-120/250 Mvar) em Colorado do Oeste e 2XCE (-120/250 Mvar) em Cuiabá.

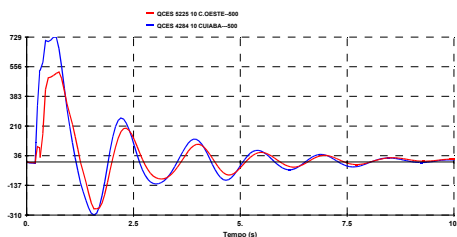
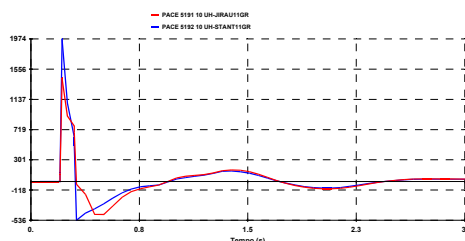
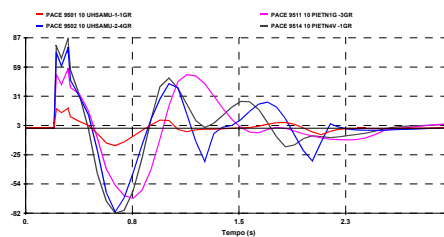


Figura 19 :Potência reativa dos CEs de Cuiabá 3 x (-120/250 Mvar) e Colorado do Oeste 2 x (-120/250 Mvar) para a perda da LT 500 kV Araraquara-Campinas em carga pesada. AHE Madeira Pleno.

Mais uma vez verificasse que as alternativas híbridas possuem a capacidade de mitigar o fenômeno de torques transitórios nas unidades geradoras existentes em Rondônia assim como no AHE Madeira. Porém, devido a elevada probabilidade de ocorrer várias vezes ao ano, conclui-se também que será necessário um aprofundamento desta questão de torques transitórios junto aos fabricantes das UHes Jirau e Santo Antônio, por se tratar de usinas com turbinas do “tipo Bulbo”, e da UTE Termonorte II, que são mais sensíveis ao fenômeno em questão.



UHes Jirau e Santo Antônio



UHE Samuel e UTEs Porto Velho.

Figura 20 : Potência Acelerante das unidades geradoras de interesse.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Análise do sistema de integração dos aproveitamentos hidrelétricos do rio Madeira e reforços no SIN Parte 4 - EPE-DEE-RE -148/2006-r1 – (abr/2007).
- (2) Análise do sistema de integração dos aproveitamentos hidrelétricos do rio Madeira – Parte 2 – Escolha da SE Coletora EPE-DEE-RE-xxx/2006-r0 (xxx/ 2006).
- (3) Estudos relativos aos grandes aproveitamentos hidrelétricos na região Amazônica - ,Avaliação socioambiental dos Sistemas de Transmissão – Parte 1. EPE-DEE-RE-067/2006-r0 (ago/2006).
- (4) Análise do Sistema de Integração dos Aproveitamentos Hidrelétricos do Rio Madeira e Reforços no SIN – Desempenho Dinâmico - Parte 4/2006-r1 – (abr/2007).
- (5) Sistema de Transmissão Associado aos Aproveitamentos Hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio - Nota Técnica DPT.T.016.2004 -dezembro/2004 – FURNAS.
- (6) Análise do Sistema de Integração dos Aproveitamentos Hidrelétricos do Rio Madeira e Reforços no SIN – Parte 3 - Segregação de Máquinas da usina de Santo Antônio para atendimento ao Acre – Rondônia - N° EPE-DEE-RE-147/2006-r0 - novembro/2006.

6. PARTICIPANTES

As análises de desempenho dinâmico do sistema de integração das usinas do Rio Madeira, cujos aspectos mais relevantes estão resumidos neste artigo, foi resultado do trabalho conjunto de diversas empresas no Grupo de Desempenho Dinâmico, com coordenação geral da EPE, através da destacada participação e contribuição dos técnicos relacionados abaixo, representado suas respectivas empresas:

- Antônio Ricardo C. D. Carvalho – CEPEL
- Ariene Prado Pavan – ELETROSUL
- Carlos Eduardo Vieira de Mendonça Lopes - ELETROBRAS
- Daniela Souza - EPE-STE
- Denilton Palhares Ferreira - FURNAS
- Leonardo Pinto de Almeida – CEPEL
- Jorge Luiz Teixeira – CEMIG
- Márcio Goldenberg Sereno - FURNAS
- Maria Alzira Noli Silveira - EPE-STE
- Maria Cristina de Lima Verginio - FURNAS
- Nilo José Pereira de Macedo - FURNAS
- Paulo Max Portugal – ELETROBRAS
- Waldir de Melo Mota Jr - FURNAS