



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

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO IV**

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

**MODELAGEM DE REGIME PERMANENTE DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA COM CONVERSORES COM CAPACITORES DE COMUTAÇÃO UTILIZANDO CONTROLE DE TENSÃO CA**

**Sergio Gomes Jr. (\*)**  
CEPEL, UFF

**Ricardo Mota Henriques**  
CEPEL

**Flávio Rodrigo M. Alves**  
CEPEL

**Leonardo Pinto de Almeida**  
CEPEL

**RESUMO**

No projeto de aproveitamento do Rio Madeira, a conexão com o sistema em 230 kV do Acre-Rondônia em Porto Velho será feita por um elo de corrente contínua com capacitores de comutação em configuração back-to-back utilizando um sistema de controle aprimorado. O artigo trata da nova modelagem do elo de corrente contínua de Porto Velho implementada no programa ANAREDE para ser utilizado nos estudos do aproveitamento do Rio Madeira e a apresentação dos resultados computacionais de casos exemplos utilizando dados reais do sistema de corrente contínua de Porto Velho.

**PALAVRAS-CHAVE**

Conversores com Capacitores de Comutação, CCC, Elo de Corrente Contínua, HVDC, Transmissão CC

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Elos de corrente contínua vêm sendo cada vez mais utilizados tanto no Brasil como no exterior por apresentarem uma série de vantagens em relação à interligação em corrente alternada:

- Não introduz problemas de estabilidade transitória ou oscilatória
- Viabiliza a interligação de sistemas assíncronos
- Operação e controle mais flexíveis
- Não apresenta problemas de ressonâncias e sobretensões associadas a linhas de transmissão longas com intensa compensação série e derivação
- Oferece vantagens econômicas na transmissão a longas distâncias

Uma das restrições ao uso da transmissão em corrente contínua convencional, baseada no uso de tiristores, é a necessidade de que o sistema de corrente alternada ao qual o sistema de corrente contínua está conectado possua potência de curto circuito no lado receptor da energia de pelo menos duas vezes o valor da potência transmitida (relação de curto circuito SCR superior a 2).

Uma solução que permite interligar sistemas com SCR baixo é a utilização de conversores com capacitores de comutação (CCC) onde capacitores série são incluídos entre os transformadores e as pontes conversoras. Esta tecnologia foi empregada no Brasil com sucesso para a interligação assíncrona com a Argentina em Garabi a partir de 1999.

No projeto de aproveitamento do Rio Madeira, a conexão com o sistema em 230 kV do Acre-Rondônia em Porto Velho será feita por um elo de corrente contínua em configuração back-to-back. Este sistema apresenta baixa

potência de curto-circuito e dificuldade de regulação de tensão. A proposta adotada foi a tecnologia CCC com o sistema de controle aprimorado onde, ao invés do controle da margem de comutação do inversor, onde o consumo de potência reativa é mínimo, adotou-se um controle da tensão alternada onde o consumo de potência reativa é variado conforme as necessidades do sistema, garantindo um bom desempenho. No entanto esta nova solução de controle trouxe algumas dificuldades de utilização do programa de fluxo de potência ANAREDE. O modelo original do programa, baseado na tecnologia de Garabi, tida como estado da arte da época, exigia que para o elo de Porto Velho, o usuário variasse a margem de comutação do inversor até que a tensão de corrente alternada atingisse o valor desejado de controle. Este processo de convergência em algumas situações de operação era muito sensível e por algumas vezes divergia, já que pequenas variações da margem de comutação podiam causar variações grandes no sistema de corrente alternada. Assim o processo de convergência por esta metodologia podia ser lento, impreciso e por vezes divergente.

A solução para o problema foi a implementação computacional do novo modelo de conversor no ANAREDE em que a tensão de corrente alternada é especificada e a margem de comutação é monitorada computacionalmente. Caso a margem fique menor que o valor mínimo, o controle é automaticamente chaveado para controle de margem de comutação mínima. Foi criada também lógica para volta ao controle da tensão alternada e para os controles dos taps dos transformadores, que, quando no limite, deixam de controlar o ângulo de disparo ou a tensão média contínua, respectivamente para o retificador e inversor.

As equações do CCC, ao contrário do conversor convencional, são não lineares e são resolvidas de forma simultânea por um processo iterativo de Newton. A implementação da solução destas equações para a nova estratégia de controle permite que o ANAREDE resolva automaticamente o sistema para a condição desejada e seja utilizado não só para análise de regime permanente como para estudos de contingências e fluxo de potência continuado envolvendo o elo de Porto Velho. Além disto, o ponto de operação pode ser utilizado diretamente pelo programa ANATEM para as simulações de estabilidade eletromecânica.

O objetivo do artigo é apresentar o novo modelo de controle e casos exemplos do elo de Porto Velho, utilizando a nova versão do programa ANAREDE, onde o desempenho deste elo em regime permanente é apresentado em diversas condições de operação.

## 2.0 - CONVERSORES COM CAPACITORES DE COMUTAÇÃO

A principal característica de elos de corrente contínua utilizando conversores com capacitores de comutação (CCC) é a possibilidade de operarem em sistemas de corrente alternada com baixa potência de curto-circuito (1). Isto é conseguido utilizando-se capacitores série conectados entre os transformadores e as pontes conversoras, conforme diagrama trifásico na Figura 1 (2),(3). A Figura 2 apresenta as tensões dos capacitores das válvulas 1 e 3 conectadas respectivamente nas fases a e b (2),(3), onde o tempo de início da comutação das válvulas está assinalado por um traço vertical. Durante o período de comutação o capacitor conectado na válvula que iniciará a condução contribui com uma tensão positiva enquanto que o capacitor da válvula que deixa de conduzir contribui com uma tensão negativa, havendo uma contribuição de tensão dos dois capacitores que favorecem a comutação, ou seja, a tensão na válvula a conduzir aumenta e a da que deixa de conduzir diminui. Esta característica permite a operação dos conversores com ângulo de disparo do retificador ou ângulo de extinção do inversor bem inferiores e, por vezes, negativos (1),(2),(3).

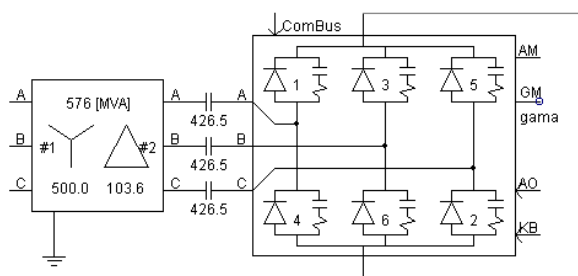


Figura 1 – Ponte conversora de 6 pulsos CCC

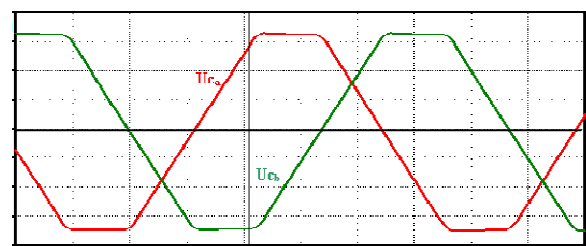


Figura 2 – Tensões dos capacitores

A Figura 3, reproduzida de (2),(3) apresenta a tensão terminal entre a fase b e a e a tensão da válvula 3 conectada na fase b. Verifica-se que o ângulo de disparo  $\alpha$  é definido como o ângulo entre a passagem por zero da tensão fase-fase terminal, antes da contribuição das tensões dos capacitores de comutação, e o momento do disparo, enquanto que o ângulo de margem de disparo ( $\alpha'$ ) é contado entre a tensão da válvula, que inclui a contribuição dos capacitores de comutação, e o momento do disparo. Assim, o ângulo de disparo pode ser negativo, uma vez que os capacitores aumentam a tensão na válvula, assegurando uma tensão positiva com conseqüente menor consumo de potência reativa podendo por vezes este consumo ser negativo, ou seja, transformar-se em geração. O mesmo ocorre na estação inversora, conforme Figura 4 também reproduzida de (2),(3). Neste caso o ângulo de extinção  $\gamma$  é contado do momento que houve a comutação até o instante em que há a inversão de sinal da tensão fase-fase entre as válvulas que estão comutando, antes da contribuição dos capacitores. O ângulo de margem de comutação, por outro lado, é medido entre o instante da comutação até o momento da passagem por zero da tensão da válvula que deixa de conduzir, já incluindo as tensões dos capacitores de comutação. Assim, o ângulo de

comutação pode ser razoavelmente reduzido, podendo também ter valores negativos, diminuindo o consumo de potência reativa com margem de segurança contra falhas de comutação. Outra vantagem é que a diminuição da tensão alternada terminal ou o aumento da corrente transmitida, ao contrário do inversor convencional, aumentam o ângulo de margem de comutação melhorando o desempenho em relação à falhas de comutação durante transitórios.

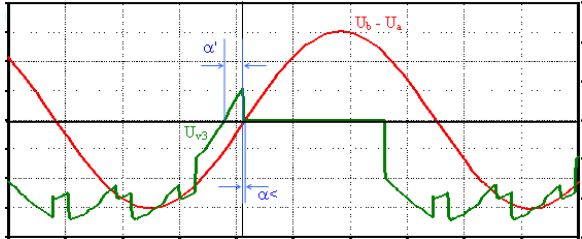


Figura 3 - Tensão terminal entre a fase b e a e a tensão da válvula 3 (fase b) do retificador

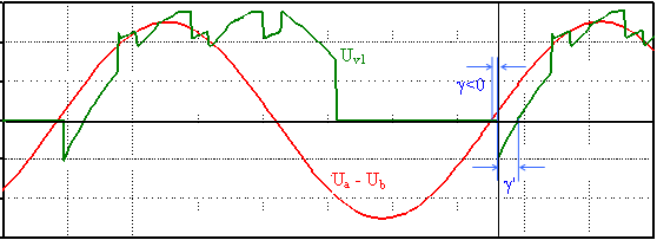


Figura 4 - Tensão terminal entre a fase a e b e a tensão da válvula 1 (fase a) do inversor

A modelagem do CCC nos programas ANAREDE, ANATEM e PacDyn foi realizada em 1997 (4) e utilizada com sucesso nos estudos de regime permanente e dinâmico de Garabi em suas duas fases. A formulação matemática e o sistema de controle implementados nos programas do Cepel são apresentados em (5). As brochuras técnicas nacional e internacional (2),(3) complementam os trabalhos de modelagem matemática, incluindo ainda a implementação de modelos em programas de transitórios eletromagnéticos (ATP e PSCAD), exploração de casos exemplos e proposta de sistema benchmark.

Uma das principais dificuldades de modelagem matemática de um CCC em programa de fluxo de potência é a complexidade das equações que formam um sistema não linear variável com o modo de controle do elo. No caso específico do elo de Porto Velho, devido às características da região, aprimorou-se o sistema de controle e, do ponto de vista matemático, criou-se um novo sistema de equações baseadas no novo modo de controle.

As equações utilizadas na implementação do CCC no programa ANAREDE podem ser encontradas em (2),(3),(5) e, por este motivo não são aqui repetidas. Estas equações foram combinadas considerando os diversos modos de controle onde algumas variáveis são fixadas no valor especificado, enquanto que as demais variáveis são calculadas. No item seguinte será feita uma descrição destes modos, incluindo os novos modos de controle do elo de Porto Velho.

Na implementação realizada, dividiu-se o processo iterativo em duas etapas: solução da rede de corrente alternada e solução do elo de corrente contínua. Na solução da rede, considerou-se a barra de conexão como do tipo PV (potência ativa e tensão especificada), utilizando a potência injetada pelo elo e a tensão controlada pelo inversor no novo modo de controle. Calcula-se então a potência reativa solicitada pelo sistema de corrente alternada e utiliza-se este valor para determinar o ângulo de margem de comutação correspondente a este consumo ou produção de potência reativa. As demais variáveis do elo são calculadas utilizando as equações originais do CCC. Quando o erro de potência da barra de conexão for inferior à tolerância de convergência do programa, o processo iterativo é concluído.

### 3.0 - MODOS DE CONTROLE DO CCC EM REGIME PERMANENTE

Em operação normal, o elo opera no lado do retificador com o tap do transformador controlando o ângulo de disparo e com o ângulo de disparo controlando a corrente ou potência do elo. No lado do inversor o tap do transformador controla a tensão média da linha de corrente contínua e o ângulo de disparo mantém o ângulo da margem de comutação ( $\gamma'$ ) em um valor mínimo para que o seu consumo de reativo seja mínimo, mas que seja de valor suficiente para que haja baixo risco de falha de comutação durante a operação normal (1).

No caso do tap do retificador atingir um dos limites, este é mantido constante e o ângulo de disparo deixa de ser controlado, passando a variar. No caso do ângulo de disparo do retificador atingir o limite mínimo, este ângulo é mantido constante e o retificador deixa de controlar a corrente ou potência. Quando a corrente atinge o valor nominal menos a margem de corrente, o elo passa a operar no denominado modo de controle de tensão reduzida, em que o ângulo da margem de comutação do inversor ( $\gamma'$ ) é aumentado para manter a corrente no valor nominal menos a margem de corrente.

Para o inversor, quando o tap atinge um dos limites, este é mantido constante e a tensão média contínua passa a variar.

Para simular o elo CCC, foram implementados os seguintes modos de controle na época (4):

- 1- Normal – O ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ), ângulo de margem de comutação do inversor ( $\gamma$ ), tensão média contínua em uma das barras do sistema ( $U_d$ ) e corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados.
- 2- Tap fixo no retificador – Este modo ocorre quando o tap calculado atinge um limite. Neste caso o tap do retificador ( $Tap_r$ ) é fixado no limite e o seu ângulo de disparo ( $\alpha$ ) passa a ser calculado. Da mesma forma que o modo normal, o ângulo de margem de comutação do inversor ( $\gamma$ ), tensão média contínua em uma das barras do sistema ( $U_d$ ) e corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados.
- 3- Tap fixo no inversor – Da mesma forma que no modo normal, o ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ), ângulo de margem de comutação do inversor ( $\gamma$ ), corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados, porém o tap do inversor ( $Tap_i$ ) é fixado no limite e a tensão média contínua ( $U_d$ ) passa a ser calculada.
- 4- Tap fixo no retificador e inversor – Este modo é uma combinação dos modos 2 e 3. Neste caso o tap do retificador ( $Tap_r$ ) e o tap do inversor ( $Tap_i$ ) são fixados no limite e o ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ) e a tensão média contínua ( $U_d$ ) passam a ser calculadas. O ângulo de margem de comutação do inversor ( $\gamma$ ), e a corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados.
- 5- Operação em tensão reduzida – Quando o ângulo de disparo do retificador atinge o limite mínimo ( $\alpha_{min}$ ), o ângulo de margem de comutação do inversor ( $\gamma$ ) passa a variar. O tap do retificador ( $Tap_r$ ) e um valor menor de corrente contínua (valor nominal menos a margem de corrente) são especificados e, como mencionado, o ângulo de disparo do retificador é fixado em seu limite mínimo. A princípio a tensão média contínua ( $U_d$ ) é especificada e o tap do inversor ( $Tap_i$ ) é calculado, no entanto, caso este tap atinja o limite, o mesmo é fixado no limite e a tensão média contínua passa a ser calculada.

A tabela seguinte sumariza os modos de controle:

Tabela 1 – Modos de Controle Convencional

Modo de Controle	$Tap_r$	$Tap_i$	$\alpha$	$\gamma$	$U_d$	$I_d$ , $P_d$
1 – Normal	C	C	E	E	E	E
2- Tap fixo no retificador	F	C	C	E	E	E
3- Tap fixo no inversor	C	F	E	E	C	E
4- Tap fixo no retificador e inversor	F	F	C	E	C	E
5- Operação em tensão reduzida	F	C	F	C	E	E

onde:

C - indica uma variável calculada

E – indica uma variável especificada

F – indica uma variável fixa em um dos seus limites

O novo sistema de controle do elo de Porto Velho possui diferenças em relação ao sistema de controle original. Devido à baixa potência de curto circuito do sistema de 230 kV, o inversor possui um controle da tensão alternada terminal, onde o ângulo da margem de comutação e a potência reativa é variada, conforme as necessidades do sistema. Neste caso, têm-se os seguintes modos:

- 6- Normal Novo – O ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ), tensão alternada do lado do inversor ( $V_{cai}$ ), tensão média contínua em uma das barras do sistema ( $U_d$ ) e corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados. Caso o ângulo de margem de comutação ( $\gamma$ ) atinja o limite mínimo, o controle passa a trabalhar no modo original 1.
- 7- Tap fixo no retificador – Este modo ocorre quando o tap calculado atinge um limite. Neste caso o tap do retificador ( $Tap_r$ ) é fixado e o ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ) é calculado. A tensão alternada do lado do inversor ( $V_{cai}$ ), tensão média contínua em uma das barras do sistema ( $U_d$ ) e corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados. Caso o ângulo de margem de comutação ( $\gamma$ ) atinja o limite mínimo, o controle passa a trabalhar no modo original 2.
- 8- Tap fixo no inversor – O tap do inversor ( $Tap_i$ ) é fixado no limite e a tensão média contínua ( $U_d$ ) é calculada. O ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ), tensão alternada do lado do inversor ( $V_{cai}$ ), e corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificados. Caso o ângulo de margem de comutação ( $\gamma$ ) atinja o limite mínimo, o controle passa a trabalhar no modo original 3.
- 9- Tap fixo no retificador e inversor – O tap do retificador ( $Tap_r$ ) e o tap do inversor ( $Tap_i$ ) são fixados em seus limites e o ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ) e a tensão média contínua ( $U_d$ ) são calculados. A tensão alternada do lado do inversor ( $V_{cai}$ ) e a corrente contínua ou potência ( $I_d$ ,  $P_d$ ) são especificadas. Caso o ângulo de margem de comutação ( $\gamma$ ) atinja o limite mínimo, o controle passa a trabalhar no modo original 4.

O modo de tensão reduzida não foi modificado em função do novo modo de controle.

A tabela a seguir resume estes novos modos:

Tabela 2 – Novos Modos de Controle							
Modo de Controle	Tap <sub>r</sub>	Tap <sub>i</sub>	$\alpha$	$\gamma'$	$V_{cai}$	$U_d$	$I_d, P_d$
6 – Normal	C	C	E	C	E	E	E
7- Tap fixo no retificador	F	C	C	C	E	E	E
8- Tap fixo no inversor	C	F	E	C	E	C	E
9- Tap fixo no retificador e inversor	F	F	C	C	E	C	E

Quando no controle da tensão  $V_{cai}$ ,  $\gamma'$  atinge o limite mínimo,  $\gamma'$  é fixado neste valor e a tensão  $V_{cai}$  deixa de ser controlada.

Convém ressaltar que o ângulo de comutação ( $\mu$ ) e a potência reativa ( $Q_d$ ) tanto do retificador como do inversor são sempre calculados em todos os modos de controle.

#### 4.0 - SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Foi utilizado o Sistema Interligado Nacional, cenário 2020, carga pesada, incluindo o elo back-to-back CCC de Porto Velho com os dados utilizados correntemente nos estudos de planejamento, relativos ao Plano Decenal de Energia - PDE 2020. O caso base escolhido foi obtido da EPE no link "<http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/STAB-PDE2020.zip>". A única modificação realizada no fluxo de potência foi o de substituir uma pequena parte do sistema do Acre por uma carga elétrica equivalente em Rio Branco. Esta modificação foi necessária pois havia problemas de conflitos de controle no sistema do Acre, que levavam a dificuldades de convergência e que só ficaram evidentes nos testes quando havia grandes variações de tensão ou reativo no elo de Porto Velho. Convém ressaltar que estes problemas não indicavam inviabilidade ou interação adversa na operação entre o sistema do Acre e o elo de Porto Velho. Abaixo é apresentado um diagrama do ANAREDE mostrando o elo CCC:

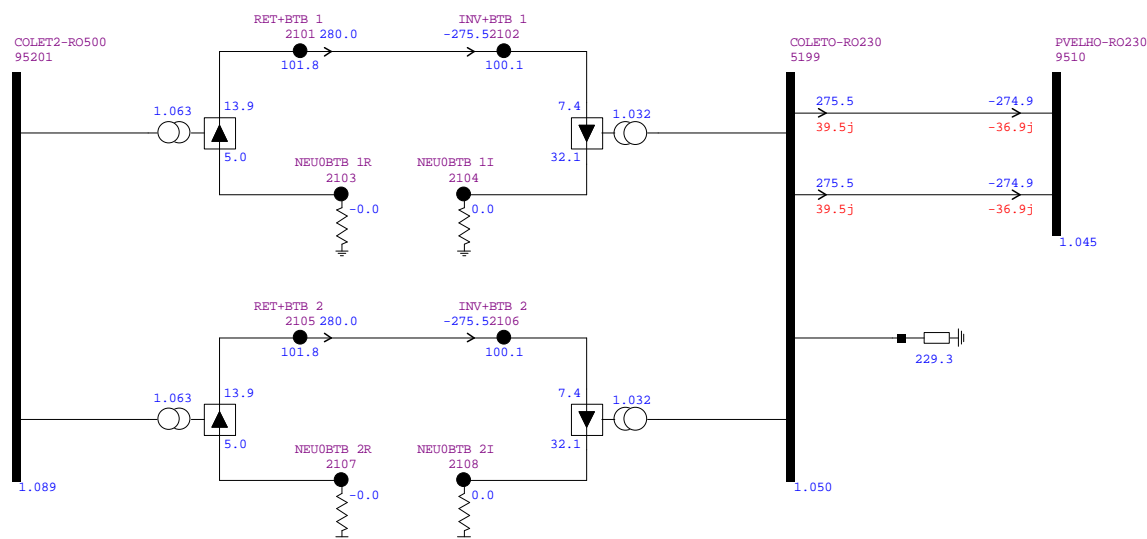


Figura 5 – Diagrama unifilar no ANAREDE do elo back-to-back de Porto Velho

O elo back-to-back de Porto Velho possui 2 bipolos de 12 pulsos (6 pulsos por pólo) cada com tensão nominal de 101,8 kV (pólos de  $\pm 50,9$  kV) e potência nominal de 400 MW. O reator de alisamento possui resistência de 0,6  $\Omega$  e indutância de 80 mH. Os transformadores dos lados do retificador e inversor possuem potência nominal de 70 MVA por fase e tensão do secundário de 37,8 kV, com reatância de 14,1%. Os taps dos transformadores do retificador variam de 0,8625 a 1,1375 e do inversor de 0,8875 a 1,1375. Os capacitores de comutação do lado do retificador são de 1394  $\mu F$  por fase e do lado do inversor são de 558  $\mu F$  por fase.

Conforme mostrado na Figura 5, para o caso base escolhido, o elo opera no retificador com ângulo de disparo de  $5^\circ$ , tensão CC de 1 pu (101,8 kV), potência transmitida de 280 MW e no lado do inversor opera com tensão CA controlada em 1,05 pu, com correspondente margem de comutação  $\gamma'$  de  $32,14^\circ$ . Para este ponto de operação os ângulos de comutação  $\mu$  são de  $13,9^\circ$  e  $7,4^\circ$  e os taps são de 1,063 pu e 1,032 pu respectivamente, para o lado do retificador e inversor. O consumo de reativo de cada bipolo do retificador é de 62,7 Mvar e do inversor de 75,2 Mvar.

## 5.0 - RESULTADOS

Conforme dito anteriormente, o ANAREDE originalmente utilizava apenas o controle da margem de comutação no inversor. Assim sendo, para alterar o valor especificado da tensão CA controlada para, por exemplo, 1 pu, torna-se necessário fazer diversas simulações alterando o valor de  $\gamma'$  até que se atinja o valor desejado de tensão. A Tabela 3 exemplifica este processo manual de convergência.

Tabela 3 – Controle manual da tensão do inversor para 1 pu, utilizando a versão original do ANAREDE

Iteração	0	1	2	3	4
$\gamma'$	32,14	34,00	37,95	36,86	36,95
Tensão CA	1,050	1,034	0,987	1,001	1,000

Neste cálculo manual inicialmente utilizou-se o valor de 33° como primeira estimativa e, a partir daí, utilizou-se a sensibilidade da tensão com  $\gamma'$  para estimar-se os valores seguintes de  $\gamma'$ . O processo convergiu em 4 iterações, exigindo um esforço de cálculo manual por parte do usuário que, em uma análise de muitos pontos de operação, demandaria um tempo grande e no caso de análise de contingências, seria inviável a automatização do processo.

Em algumas situações onde o sistema estivesse próximo a limites de operação, poderia ainda haver casos de não convergência que dificultaria ainda mais o procedimento de cálculo manual. Neste próximo exemplo, foram desligadas duas linhas de Porto Velho a Samuel (barras 9510 e 9506), representadas em vermelho e a potência transmitida foi aumentada de 280 para 350 MW, conforme Figura 6.

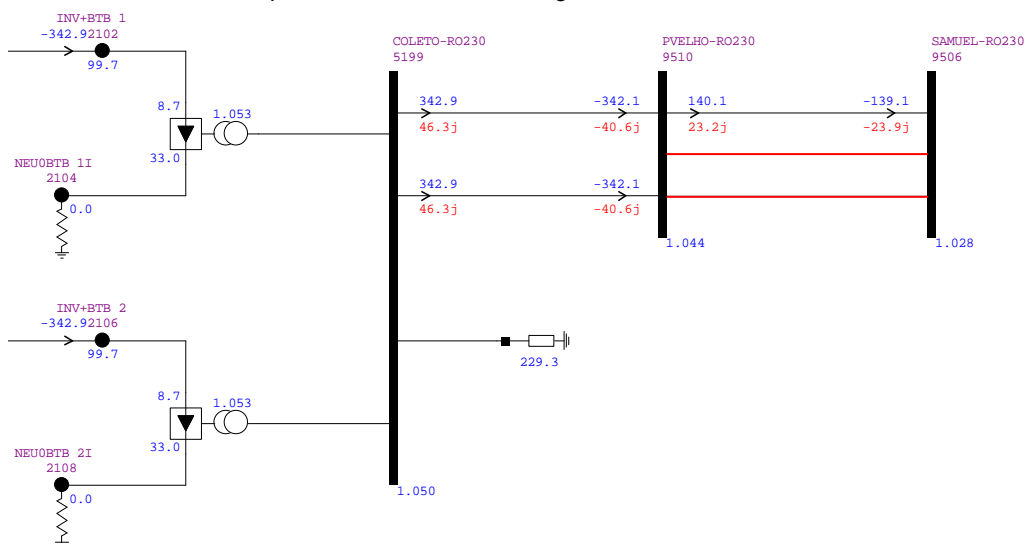


Figura 6 – Diagrama unifilar no ANAREDE do elo back-to-back de Porto Velho com perda de dois circuitos entre Porto Velho e Samuel (barras 9510 e 9506)

O desligamento das linhas tornou a sensibilidade entre tensão e corrente muito variável, dificultando o cálculo manual. A Tabela 4 mostra o procedimento manual. Verifica-se que durante o processo houve problemas de convergência representados na tabela por "---", sendo necessário utilizar uma limitação de variação do ângulo para atingir o ponto de operação desejado. A partir da iteração 7 utilizou-se a sensibilidade da tensão para obtenção das novas estimativas de  $\gamma'$ . Ao todo foram necessárias 9 iterações para a convergência. Nos casos com problema de convergência, foi necessário retornar a condição anterior para continuar o procedimento.

Tabela 4 – Controle manual da tensão do inversor para 1 pu, na perda de dois circuitos entre Porto Velho e Samuel

Iteração	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma'$	33,02	34,0	33,5	34,0	34,5	35,0	34,75	35,0	35,04	35,02
$V_{ca}$	1,05	---	1,039	1,027	1,014	---	1,007	1,001	0,999	1,000

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das simulações de fluxo de potência utilizando a implementação realizada do novo controle de tensão CA do lado do inversor. Nestas simulações o usuário simplesmente especifica o valor da tensão controlada e o programa automaticamente faz o cálculo da condição desejada, incluindo o valor correto da margem de comutação. Na tabela, os valores especificados estão indicados em azul negrito e os limites atingidos em vermelho negrito. Em verde estão indicadas as variáveis que foram originalmente especificados e passaram a ser calculadas em função de algum limite atingido.

O primeiro caso é o fluxo de potência original com o novo sistema de controle, que neste caso é o mesmo ponto de operação, uma vez que foi especificado o valor de tensão CA de 1,05 pu igual ao valor convergido original. Os casos 2 e 3 correspondem às duas simulações anteriores (Tabelas 3 e 4) que foram realizadas manualmente com



a versão original do programa, aqui realizadas de forma automática pela nova versão do programa. Note que há uma pequena diferença na segunda decimal do ângulo de extinção, pois com a nova versão a convergência é mais precisa para o valor especificado.

No caso 4 especificou-se um valor mais elevado de tensão (1,10 pu), havendo a convergência sem maiores problemas. Neste caso o  $\gamma'$ , como era esperado, reduziu de 32,14° para 27,82°, diminuindo também o consumo de potência reativa no inversor de 75,2 para 49,1 Mvar.

O caso 5 corresponde a uma redução mais significativa, em relação ao caso 2, no valor especificado da tensão CA para 0,9 pu. Mesmo neste caso há uma operação adequada do sistema, sendo que o limite de tap mínimo do inversor de 0,887 pu foi atingido com conseqüente variação da tensão CC média Udc para 0,962 pu. O tap do lado do retificador variou para manter o valor de  $\alpha$  no valor especificado. O sistema opera com  $\gamma'$  igual a 38,32°.

O caso 6 apresenta um aumento no valor da potência transmitida. Neste caso a margem de comutação aumenta e a potência reativa diminui, devido à presença dos capacitores de comutação (quando aumenta a corrente aumenta a contribuição de tensão dos capacitores nas válvulas), ao contrário do que ocorre no conversor convencional.

O caso 7 corresponde a uma perda de circuito entre a barra coletora e Porto Velho (barras 5199 e 9510). Neste caso há uma pequena redução de  $\gamma'$ , havendo a manutenção do controle da tensão CA em 1,05 pu.

Na configuração analisada do sistema, há uma boa margem de operação não sendo possível testar os modos de controle especiais onde há a possibilidade de  $\gamma'$  atingir limite mínimo. Para fazer esta simulação e validar as implementações computacionais realizadas foi então chaveado um reator shunt fictício de 200 Mvar na barra de Porto Velho (9510), emulando possíveis variações de potência reativa em alguma situação futura do sistema de 230 kV de Rondônia ou Acre. Esta simulação corresponde ao caso 8 e nesta situação o sistema atinge o limite mínimo de 22° em  $\gamma'$  e automaticamente calcula o fluxo de potência para esta condição de operação. O consumo de potência reativa é mínimo (17,6 Mvar) e a tensão alternada deixa de ser controlada, indo para o valor de 0,997 pu.

O caso 9, simétrico ao caso 8, corresponde a um chaveamento de capacitor de 200 Mvar na barra coletora. Neste caso o tap aproxima-se do limite ficando em 0,900 pu, há um aumento da potência reativa (177 Mvar) e  $\gamma'$  aumenta para 45,48°.

Com o objetivo de forçar o tap no limite, simulou-se o caso 10 no qual foi aumentado ainda mais o valor do capacitor para 250 Mvar. Neste caso o limite é atingido (0,887 pu), havendo um aumento da potência reativa consumida pelo elo (203,2 Mvar) e o valor de  $\gamma'$  aumenta para 48,84°.

Os casos 11 e 12 correspondem a variações na tensão alternada do lado do retificador. Para fazer estas variações, foram alteradas as tensões controladas das usinas de Santo Antônio e Jirau (barras 5191 e 5192) que eram originalmente 1 pu. O diagrama unifilar abaixo ilustra a configuração desta parte do sistema. Note que a barra 95201 é eletricamente igual à barra coletora de Porto Velho 5201 no lado do retificador. Esta barra permite uma melhor visualização da potência transmitida total do elo back-to-back.

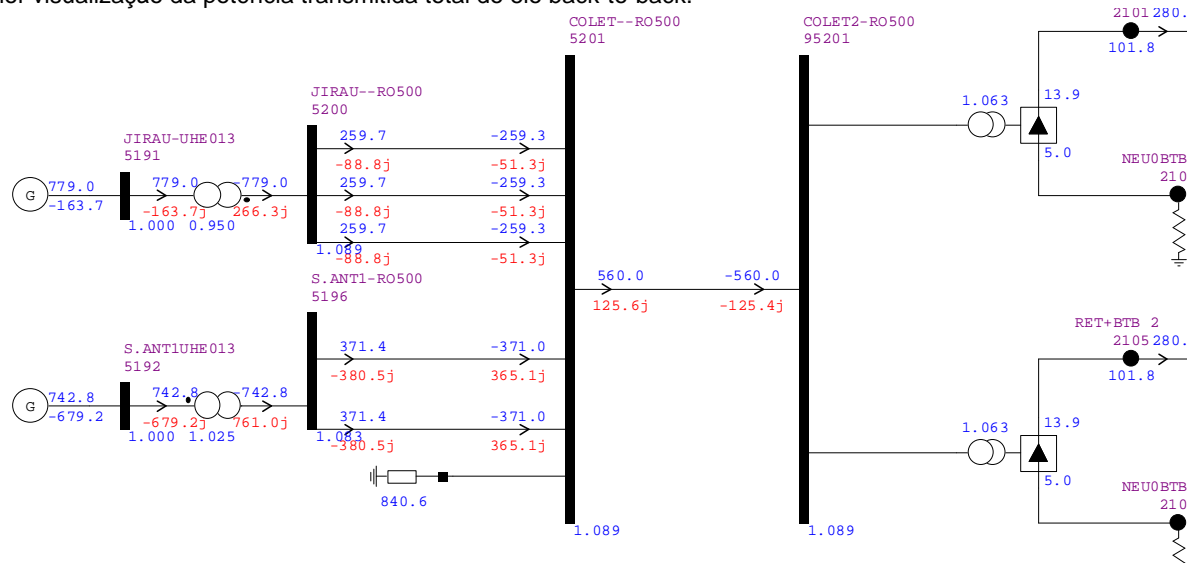


Figura 7 – Diagrama unifilar no ANAREDE detalhando as usinas de Jirau e Santo Antônio

No caso 11 as tensões das usinas foram alteradas para 0,95 pu, fazendo com que a tensão alternada na barra coletora do retificador (5201) fosse para 1,031 pu e para o caso 12 as tensões das usinas foram para 1,05 pu,

fazendo com que a barra coletora fosse para 1,142 pu. Em ambos os casos os limites de tap não foram atingidos. Note que as grandezas tanto do lado do retificador como do lado do inversor não foram alteradas com as variações realizadas na tensão alternada, uma vez que o tap compensa tais variações, mantendo os valores especificados de ângulo de disparo e potência transmitida.

Em todos os 12 casos o programa convergiu de forma eficiente e não foram encontrados problemas de convergência. Nota-se que limites só foram atingidos em situações extremas (casos 5, 8 e 10).

Tabela 5 – Casos simulados com o novo controle de tensão CA do ANAREDE

Caso	Conversor	$V_{ca}$ (pu)	$P_d$ (MW)	$Q_d$ (Mvar)	Tap (pu)	$\alpha / \gamma'$ (graus)	$U_d$ (pu)	$\mu$ (graus)	$I_d$ (pu)
1	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	62,7	1,063	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,050</b>	-275,5	75,2	1,032	32,14	0,984	7,37	0,7
2	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	62,7	1,063	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,000</b>	-275,5	107,8	0,949	36,97	0,984	6,38	0,7
3	Retificador	1,086	<b>350,0</b>	82,5	1,057	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	15,10	0,875
	Inversor	<b>1,000</b>	-342,9	84,7	0,993	35,02	0,980	8,17	0,875
4	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	62,7	1,063	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,100</b>	-275,5	49,1	1,103	27,82	0,984	8,41	0,7
5	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	63,9	1,104	<b>5,00</b>	<b>0,962</b>	14,29	0,728
	Inversor	<b>0,900</b>	-275,1	109,0	<b>0,887</b>	38,32	0,945	6,57	0,728
6	Retificador	1,086	<b>350,0</b>	82,5	1,057	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	15,10	0,875
	Inversor	<b>1,050</b>	-342,9	69,2	1,053	33,13	0,980	8,62	0,875
7	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	62,7	1,063	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,050</b>	-275,5	73,1	1,034	31,81	0,984	7,44	0,7
8	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	62,7	1,063	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>0,997</b>	-275,5	17,6	1,013	<b>22,00</b>	0,984	10,17	0,7
9	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	62,7	1,063	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,050</b>	-275,5	177,0	0,900	45,48	0,984	4,98	0,7
10	Retificador	1,089	<b>280,0</b>	63,6	1,094	<b>5,00</b>	<b>0,971</b>	14,18	0,721
	Inversor	<b>1,050</b>	-275,2	203,2	<b>0,887</b>	48,84	0,954	4,76	0,721
11	Retificador	1,031	<b>280,0</b>	62,7	1,007	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,050</b>	-275,5	75,2	1,032	32,14	0,984	7,37	0,7
12	Retificador	1,142	<b>280,0</b>	62,7	1,115	<b>5,00</b>	<b>1,000</b>	13,85	0,7
	Inversor	<b>1,050</b>	-275,5	75,2	1,032	32,14	0,984	7,37	0,7

## 6.0 - CONCLUSÃO

Foram apresentados resultados do desempenho do elo back-to-back de Porto Velho utilizando o novo sistema de controle onde a tensão alternada do lado do inversor é controlado. Nas simulações foi utilizado o programa ANAREDE com a implementação do cálculo automático do fluxo de potência utilizando a nova filosofia de controle. O sistema back-to-back de Porto Velho apresentou comportamento adequado, havendo uma ampla faixa de operação onde os limites de tap ou  $\gamma'$  não são atingidos. Não foram identificados problemas na implementação computacional ou no processo de solução iterativa.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) JONSSON, T., BJORKLUND, P.-E., "Capacitor Commutated Converters for HVDC", IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, Suécia, 1995.
- (2) BARROS, J.G.C. ; AZEVEDO, R.M. ; CARVALHO, A.R.C.D. ; SANTO, S.E. ; GOMES JUNIOR, S. ; LIRIO, F.L. ; MACEDO, N.J.P. ; MENZIES, D. ; PEIXOTO, C.A.O. ; PING, W.W. ; LUZ, G.S., Interligações HVDC por Conversores com Capacitores de Comutação (CCC). Rio de Janeiro: Cigré Brasil, 2009 (Brochura Técnica Nacional).
- (3) BARROS, J.G.C. ; AZEVEDO, R.M. ; CARVALHO, A.R.C.D. ; BRANDT, D. ; SANTO, S.E. ; GOMES JR., S. ; KUISTI, H. ; LIRIO, F.L. ; MACEDO, N.J.P. ; MENZIES, D. ; PAHALAWATHTHA, N. ; PEIXOTO, C.A.O. ; PING, W.W. ; LUZ, G.S., Capacitor Commutated Converters (CCC) HVDC Interconnections - Digital Modeling and Benchmark circuit. Paris: Cigré, 2008 (Brochura Técnica Internacional).
- (4) GOMES JR., S. ; PINTO, H.J.C.P. ; MARTINS, N. ; RANGEL, R.D. ; CARVALHO, A.R.C.D. ; LJUNGQVIST, R. ; JONSSON, T., "Modeling ABB's HVDC/CCC into the CEPEL Simulation Package", VI SEPOPE, 1998.
- (5) GOMES JR., S., MARTINS, N., JONSSON, T., MENZIES, D.; LJUNGQVIST, R., "Modeling Capacitor Commutated Converters in Power system Stability Studies", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 17, No. 2, 2002.



## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Sergio Gomes Jr. graduou-se em Engenharia Elétrica em 1992 pela Universidade Federal Fluminense, concluiu Mestrado e Doutorado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1995 e 2002 e em 2004 fez um pós-doutorado na Northeastern University em Boston, Estados Unidos. Desde 1994 é pesquisador do Cepel trabalhando na pesquisa e desenvolvimento de programas computacionais para a análise de sistemas de potência e desde 2000 é gerente do projeto PacDyn no Cepel. Desde 2010 também é professor adjunto da Universidade Federal Fluminense. Suas principais áreas de interesse são: dinâmica e controle de sistemas de potência, eletrônica de potência, harmônicos e transitórios eletromagnéticos. É Senior Member do IEEE e membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.



Ricardo Mota Henriques nasceu em Juiz de Fora, Minas Gerais, em 16 de setembro de 1971. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1996, concluiu o mestrado e o doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2002 e 2009 respectivamente. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1997, atuando no desenvolvimento de modelos e aplicações computacionais para análise de redes elétricas, em especial no programa ANAREDE. Seus interesses incluem, ainda, avaliação de segurança de tensão e análise de autovalores e autovetores aplicados ao controle de tensão. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C2 do Comitê Nacional Brasileiro da CIGRÉ.



Flávio Rodrigo de Miranda Alves nasceu no Rio de Janeiro em 15 de Março de 1963. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1986 e em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1987, concluiu o mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação na Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 1992 e o doutorado em Engenharia Elétrica, na mesma instituição, em 2007. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – desde 1987, atuando no desenvolvimento de aplicações computacionais para análise de redes. Seus interesses incluem, ainda, ambientes integrados de interface gráfica e banco de dados para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência, metaheurísticas e recomposição de sistemas elétricos de potência. É membro do IEEE e do Comitê de Estudos C2 do Comitê Nacional Brasileiro da CIGRÉ.



Leonardo Pinto de Almeida graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 2000, obteve o título de Mestre na área de Sistemas de Potência na COPPE/UFRJ. Desde 1998 trabalha no CEPEL. Atualmente, encontra-se no Departamento de Redes Elétricas e tem se dedicado à realização de estudos elétricos de sistemas de potência solicitados por diferentes agentes do Setor. Participa dos estudos do Projeto de Transmissão em CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira, e mais recentemente, da usina de Belo Monte. É membro do Comitê de Estudos B4 (CCAT e Eletrônica de Potência) do Cigré-Brasil. Suas principais áreas de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado à Sistemas de Potência e Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos.

## 9.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento à ABB pelas informações fornecidas e em particular ao Eng. Paulo Fischer de Toledo que propôs o controle de tensão CA do lado do inversor a ser implementado no back-to-back de Porto Velho que alimentará o sistema Acre-Rondônia.