



**GRUPO VII
GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GPL)**

**INTERLIGAÇÃO NORTE/SUL – MEDIDAS ESPECIAIS DE CONTROLE/PROTEÇÃO DEFINIDAS
PARA O SISTEMA DE FURNAS, DE MODO A PERMITIR UMA OPERAÇÃO
INTERLIGADA ADEQUADA**

Sebastião Tarciso Ferreira* Elizabeth da Rosa Alves Rizzo Frederico Penna Pereira
Paulo Cesar Alves Fernandes Jurema Baptistella Ludwig Ricardo Gomes

Furnas Centrais Elétricas S. A.

RESUMO

O trabalho aqui apresentado discute as principais características do projeto da interligação em 500 kV entre os sistemas norte/nordeste e sul/sudeste/centro-oeste do Brasil, denominada interligação norte/sul, com ênfase nas medidas especiais de controle/proteção adotadas para o sistema de Furnas localizado na região de influência da interligação, compreendendo a rede elétrica entre Serra da Mesa e Itumbiara. Essas medidas estão baseadas no uso de controladores Lógicos Programáveis (CLP's), com o objetivo de garantir um grau adequado de confiabilidade e automatismo ao processo e, permitiram uma redução significativa de investimentos em equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE

Interligação norte/sul, controle, proteção, religamento, CLP's, desligamento de geradores, sistema de excitação

1.0 - INTRODUÇÃO

Estudos energéticos desenvolvidos no âmbito da Eletrobrás indicaram ser bastante atraente o projeto de interligação dos sub-sistemas norte/nordeste e sul/sudeste/centro-oeste do Brasil, visando o aproveitamento de sobras energéticas existentes sazonalmente numa e noutra região. A partir daí, extensos estudos foram efetuados para determinar a alternativa de transmissão mais adequada, envolvendo sistemas em CA e/ou CC. Esses estudos apontaram como mais atraente a alternativa de transmissão em corrente alternada, na tensão de 525 kV, que além de

apresentar um menor custo de investimentos, permite também o suprimento a cargas ao longo da rota percorrida pela interligação, bem como a integração de novos projetos de geração ali localizados. A Figura 1 apresenta um diagrama eletrogeográfico do sistema interligado em questão, realçando os principais parques geradores e as extensões de linhas envolvidas.

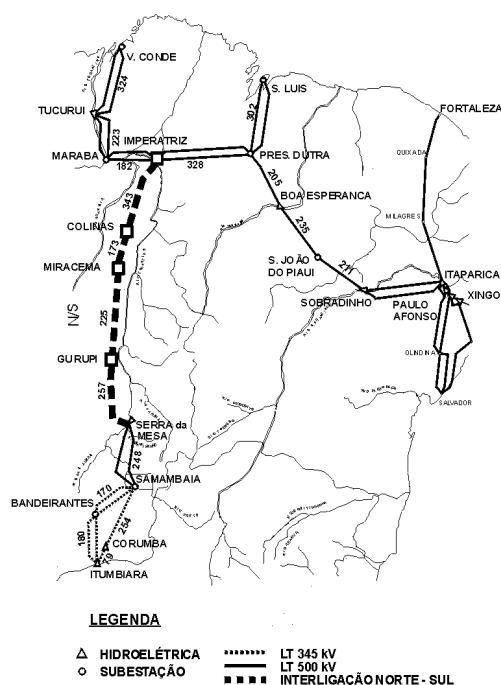


FIGURA 1 – Sistema interligado norte/sul

Em especial, a interligação norte/sul apresenta cerca de 1250 km de extensão, conectando a subestação de Imperatriz (Eletronorte) com Samambaia (Furnas), passando pelas estações intermediárias de Colinas, Miracema, Gurupí e Serra da Mesa. Em sua fase inicial de operação a norte/sul contará com apenas um circuito de 500 kV, e as previsões indicam que ela poderá ser submetida a fluxos de até 1000 MW, tanto no sentido N→S quanto no sentido S→N. Naturalmente, essa diversidade de fluxos associada às grandes extensões de linhas envolvidas, traz reflexos significativos para as condições operativas do sistema localizado na sua região de influência, e, conseqüentemente, para a operação da própria interligação.

2.0 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA INTERLIGAÇÃO

A construção da interligação norte/sul resulta num sistema interligado com características bastante singulares, com três centros geradores (Tucuruí, Sobradinho/Paulo Afonso/Xingó/Itaparica e o sistema interligado sul/sudeste/centro-oeste) conectados através de extensas linhas de transmissão, muitas delas em circuito simples, conforme mostrado na Figura 1. A seguir estão apresentadas algumas considerações que orientaram o projeto da norte/sul, assim como, as maiores dificuldades e características mais importantes do referido projeto.

2.1 Considerações básicas para o projeto da norte/sul

Diversos fatores tiveram participação expressiva na definição do projeto do sistema de transmissão da interligação dentre os quais destacam-se os seguintes:

- Na sua fase inicial o sistema deverá permitir trocas energéticas da ordem de 650 MW.ano.
- Ainda, em sua fase inicial de operação, o carregamento máximo esperado é da ordem de 1000 MW.
- O sistema deverá admitir a integração de novos aproveitamentos hidrelétricos, bem como, o atendimento a cargas em subestações intermediárias.

2.2 Maiores dificuldades para definição do projeto

As características peculiares dos sistemas a serem interligados impuseram expressivas dificuldades na definição do projeto em questão, cabendo destacar as seguintes:

- Transmissão a muito longa distância (± 1250 km);

- Sobretensões devidas a energização e rejeição de carga;
- Manutenção de sincronismo entre as áreas interligadas;
- Presença de oscilações entre áreas de baixa frequência e fraco amortecimento;
- Necessidade de aumentar a confiabilidade da ligação, mesmo em sua fase inicial de operação, em que pese a existência de longos trechos em circuito simples;
- Manutenção de um controle adequado de tensão;
- Necessidade de minimizar os investimentos em equipamentos de transmissão e compensação reativa exigidos para atender às condições de emergência.

2.3 Características principais do projeto da interligação

Extensos estudos foram desenvolvidos para análise da interligação e do sistema interligado, cobrindo, especialmente, os aspectos associados à operação em regime estabilizado, para condições normais e de emergência; sobretensões transitórias e desempenho dinâmico.

Como resultado desses estudos foram elaboradas as especificações dos equipamentos da interligação, em relação aos quais cabem destacar as seguintes características:

- Nível de tensão nominal de 525 kV;
- Emprego de torres compactas, do tipo raquete, com feixe de condutores de 4x954 MCM/fase;
- LT's com 100% de compensação indutiva em paralelo;
- LT's com compensação série fixa, totalizando 54% da reatância série da ligação Serra da Mesa-Imperatriz.
- Emprego de compensação série variada, controlada a tiristores (TCSC), dividida em dois módulos iguais, localizados em Imperatriz e Serra da Mesa, cada um dimensionado para permitir uma compensação de 15% da reatância da ligação Serra da Mesa-Imperatriz;
- Emprego de esquemas automáticos para abertura e religamento monopolar nas linhas da interligação;

Dentre essas características, convém destacar, pelo pioneirismo em aplicação no sistema elétrico brasileiro, o TCSC (Thyristor controlled series capacitor), que foi projetado para produzir um amortecimento adequado de oscilações de baixa frequência (da ordem de 0,2 Hz) detectadas nos estudos de desempenho dinâmico.

Foram projetados dois TCSC's, um localizado em Serra da Mesa (projeto da Siemens) e outro localizado

em Imperatriz (projeto da ABB). Cada equipamento deverá operar em repouso, com um nível de compensação série de 6% da reatância total da ligação Serra da Mesa-Imperatriz, podendo chegar temporariamente, a 15% de compensação série. Na figura 2 está apresentada a função de transferência do sistema de controle para amortecimento de oscilações considerado para o TCSC de Serra da Mesa.

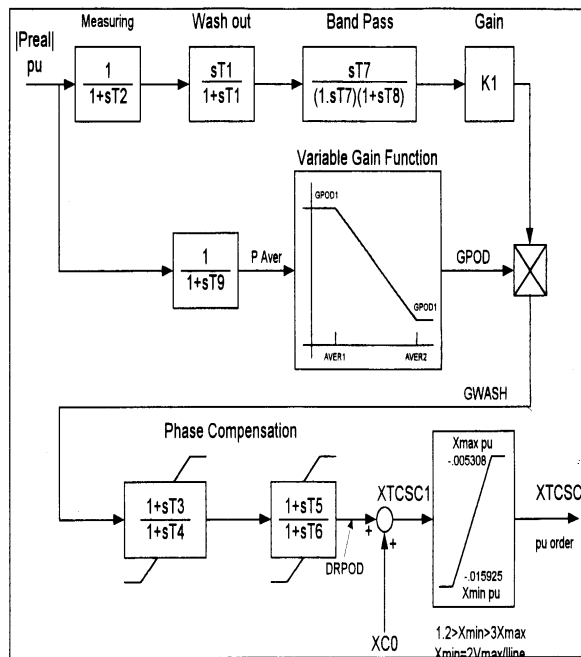


FIGURA 2 – Função de transferência do TCSC - Siemens

Por outro lado, a LT compacta, juntamente com a compensação série, conferem à interligação uma elevada capacidade de transporte de energia, em que pese a longa extensão de linhas envolvidas.

Já, o elevado grau de compensação indutiva paralela foi adotado no sentido de reduzir o risco de exposição dos equipamentos à sobretensões elevadas, em especial, aquelas provocadas por rejeição de carga. Naturalmente, essa compensação indutiva vem atuar no sentido inverso ao da compensação série, ou seja, reduzindo a capacidade de transporte face às dificuldades associadas ao controle de tensão.

Cabe mencionar ainda, que a adoção de dispositivos automáticos para permitir a abertura/religamento monopolar nas linhas de 500 kV, deverá permitir uma redução significativa nas taxas de saída das linhas da interligação, com sensíveis benefícios para a qualidade da operação de todo o sistema interligado. Para isso, foram especificados reatores de neutro para os reatores das linhas, no sentido de permitir a extinção rápida de

correntes de arco secundário, viabilizando, conseqüentemente o sucesso do religamento num intervalo de tempo hábil para manter o sistema em sincronismo.

3.0 – SOLICITAÇÕES IMPOSTAS AO SISTEMA DE FURNAS NA FASE INICIAL DE OPERAÇÃO DA INTERLIGAÇÃO

Em sua fase inicial de operação a interligação será constituída de apenas um circuito de 500 kV. A topologia da rede elétrica a ela associada, caracterizada essencialmente por uma ligação ponto a ponto, permite uma fácil interpretação das solicitações a ela impostas, em decorrência das diversas possibilidades operativas. No caso específico da rede de Furnas, localizada entre as subestações de Serra da Mesa e Itumbiara, seu comportamento depende principalmente dos seguintes aspectos:

- Patamar de carga do sistema (por exemplo: carga pesada, média ou leve);
- Despacho das usinas localizadas na região (Serra da Mesa e Corumbá I);
- Fluxo na interligação;
- Atendimento às cargas do norte de Goiás e estado do Tocantins, através do abaixamento para 230 kV em Serra da Mesa.

Convém mencionar ainda, que Furnas dispõe na região dos seguintes equipamentos com dispositivos para controle automático de tensão: UHE Serra da Mesa – 3X425 MW F.P.=0,9; UHE Corumbá I – 3X125 MW F.P.=0,9; C.S. B. Sul – 60 MVA; C.S. B. Geral – 40 MVA; C.E. Bandeirantes +200/-100 Mvar (+90,5 Mvar de banco de capacitores manobráveis automaticamente); C.E. B. Alto +30/-15 Mvar (+1x27,5 Mvar de bancos de capacitores manobráveis automaticamente).

A seguir estão relacionados os pontos críticos desse sistema, discutindo o seu comportamento em função das condições operativas do mesmo.

3.1 Ligação em 500 kV Serra da Mesa-Samambaia

A ligação Serra da Mesa –Samambaia é feita através de dois circuitos de 500 kV. Um desses circuitos é convencional, igual ao de outras LT's de 500 kV de Furnas, e seu projeto foi definido para atender aos requisitos de planejamento onde não se considerava a hipótese de construção da norte/sul. O outro circuito é compacto, e seu projeto foi definido especificamente para atender aos requisitos da interligação.

O carregamento dessa ligação depende, especialmente, do despacho de Serra da Mesa e do intercâmbio na interligação. O patamar de carga tem pouca influência,

visto que, o mercado atendido a partir do transformador 525 kV/230 kV de Serra da Mesa apresenta pouca variação dentro da curva diária de carga. Portanto, a condição crítica corresponde à superposição de despacho elevado na usina e intercâmbio elevado na direção N→S. Nesse caso, para condições normais de operação os dois circuitos existentes nesse trecho atendem aos critérios de bom desempenho do sistema. Porém, o desligamento de um deles resulta em elevados requisitos de equipamentos de compensação reativa para manter um controle adequado das tensões. Convém destacar que para intercâmbios no sentido S→N o carregamento dos circuitos Serra da Mesa-Samambaia é reduzido, e o desligamento de um deles deixa de ser uma emergência severa.

3.2 Auto-transformadores 525kV/345kV de Samambaia

Existem dois auto-transformadores de 1050 MVA na subestação de Samambaia. Considerando que o carregamento da transformação 525 kV/230 kV de Serra da Mesa, para atendimento à região norte de Goiás e estado do Tocantins é de cerca de 300 MW, a capacidade de transformação instalada em Samambaia é suficiente para atender às condições normais de operação, inclusive, para a situação mais crítica, correspondente a despacho máximo em Serra da Mesa e máximo intercâmbio na direção Norte→Sul, (respectivamente a 1275 MW e 1000 MW). Entretanto, o desligamento de um desses auto-transformadores deixará o remanescente com um sobrecarga inaceitável, exigindo medidas corretivas.

3.3 Rede de 345 kV entre Samambaia/Brasília Sul e Itumbiara

De acordo com o diagrama apresentado na Figura 1, existem três circuitos de 345 kV em paralelo nesse trecho. Dois desses circuitos são seccionados na subestação de Bandeirantes, para atendimento ao mercado da região de Goiânia, e, o terceiro é seccionado em Corumbá, para integração da usina hidráulica ali existente.

O desempenho dessa rede de transmissão também é dependente das condições despacho em Serra da Mesa/intercâmbio norte-sul/carga do sistema. A operação em condição normal apresenta-se perfeitamente adequada, quer no que diz respeito aos carregamentos dos equipamentos, quer em relação aos níveis de tensão do sistema. Entretanto, algumas emergências podem ser bastante exigentes em relação ao controle de tensão., cabendo destacar as seguintes:

3.3.1 Desligamento da LT Itumbiara-Corumbá

Essa emergência é severa apenas na condição de despacho máximo em Serra da Mesa e intercâmbio máximo na interligação, na direção N→S. Nessa situação o fluxo energético na rede de 345 kV é na direção Samambaia→Itumbiara, e, a referida emergência faz com que a geração de Corumbá I seja adicionada ao carregamento das LT's Samambaia-Bandeirantes-Itumbiara, provocando acentuadas quedas de tensão.

3.3.2 Desligamento da LT Corumbá-Brasília Sul.

Essa emergência é severa apenas na condição de intercâmbio elevado na direção S→N, despachos reduzidos em Serra da Mesa e carga pesada no sistema. Com isso, o fluxo na rede de 345 kV é no sentido Itumbiara-Samambaia e a referida emergência faz com que esse fluxo seja direcionado essencialmente para os dois circuitos Itumbiara-Bandeirantes-Samambaia provocando também quedas de tensão acentuadas.

3.4 Outras emergências severas externas à interligação

Considerando as elevadas distâncias envolvidas nas interligações entre os sub-sistemas norte, nordeste e sul/sudeste/centro-oeste, é possível antever que distúrbios de grande magnitude venham provocar fortes oscilações entre as três áreas envolvidas. O emprego dos TCSC's demonstrou ser efetivo para permitir um amortecimento adequado de oscilações provocadas pela aplicação de curto-circuito em pontos críticos do sistema, eliminado pela abertura de linhas de transmissão. Entretanto, defeitos que resultem em desbalanço carga/geração (rejeição de carga ou desligamento de geradores) podem também representar um impacto expressivo para a interligação, em especial, no que diz respeito ao controle de tensão. Vários fatores interferem no comportamento do sistema, destacando-se os apresentados a seguir:

- Condição de operação do sistema (carga pesada, média ou leve);
- Intercâmbio na interligação e despacho da UHE de Serra da Mesa;
- Tipo, intensidade e localização do desbalanço

Assim, para uma condição de intercâmbio de N→S, desbalanços severos podem ser provocados por desligamento de geradores no sistema sul/sudeste/centro-oeste, ou rejeição de carga no sistema norte/nordeste. O problema está associado ao elevado $\Delta Q/\Delta P$ inerente às distâncias envolvidas na interligação entre as três áreas, que facilita o desenvolvimento do processo de colapso de tensão frente aos distúrbios citados anteriormente, com destaque para a ligação nordeste-sul/sudeste. Esse

aspecto ainda está sendo avaliado na busca da solução mais adequada.

4.0 MEDIDAS AUTOMÁTICAS DE CONTROLE E PROTEÇÃO ADOTADAS

O desempenho do sistema frente às situações de emergências apontadas no item 3 é considerado inadequado exigindo medidas corretivas. A solução com base em equipamentos adicionais levaria a investimentos superiores a US100x10⁶. Entretanto, as condições em que ocorrem podem ser consideradas de baixa probabilidade e fácil detecção, adequando-se naturalmente ao emprego de solução à base de esquemas especiais de controle/proteção, ao invés de reforços em equipamentos de transmissão, transformação ou compensação reativa. Assim, foram definidas as seguintes medidas automáticas de controle e proteção conforme as condições de intercâmbio e despacho de Serra da Mesa:

4.1 Condição de intercâmbio: 1000 MW N→S.

De acordo com o exposto no item 3, essa condição operativa quando combinada com despachos elevados em Serra da Mesa apresenta algumas emergências que exigem medidas corretivas

4.1.1 1 gerador em Serra da Mesa

- Abertura da Interligação - nesta condição deverá ser acionada a abertura de um dos circuitos Serra da Mesa-Samambaia.
- Rejeição de carga em Samambaia - o esquema de controle deverá desligar os dois circuitos Serra da Mesa- Samambaia, a Interligação e o transformador 500 kV/230 kV de Serra da Mesa. Neste caso será desligado o gerador da usina. Existe ainda a hipótese de se manter em sincronismo o gerador. Nesse caso o seu despacho não deverá ser superior a 330 MW.
- Perda do gerador de Serra da Mesa - deverá ser acionada a abertura da Interligação.

4.1.2 Mais de 1 gerador em Serra da Mesa.

- Rejeição em Samambaia - a seqüência de eventos é a mesma para a condição com um gerador, exceto na manutenção do sincronismo pela rede de 230 kV em que deverão ser desligados (n-1) geradores em Serra da Mesa.
- Perda de um transformador, 500 kV/345 kV, de Samambaia - nessa emergência o fator condicionante da ação do esquema de controle é o carregamento da unidade remanescente. Se superior a 140% a Interligação deverá ser desligada.

- Perda de um circuito Serra da Mesa-Samambaia - a condição limite de carregamento quando da perda de um circuito implica no estabelecimento dos seguintes níveis máximos de despacho em Serra da Mesa e de intercâmbio na Interligação de modo a atender aos limites de potência reativa das máquinas.

Despacho em S. da Mesa (MW)	Intercâmbio Máximo (MW)
1275 (3 ger.)	650
850 (2 ger.)	850
870 (3 ger.)	1000

A operação acima desses limites implica na necessidade da abertura da Interligação de modo a evitar colapso de tensão na região de Samambaia. Convém observar, porém, que os dois circuitos dispõem de dispositivo automático para efetuar abertura/religamento monopolar, o que reduz, sensivelmente, a frequência de desligamento a eles associada.

Para as demais condições, com intercâmbio nulo ou 1000 MW no sentido S→N, aplicam-se os mesmos esquemas automáticos indicados sem as limitações do quadro acima.

Com relação aos distúrbios provocados por desbalanço de carga/geração os resultados disponíveis atualmente apontam para o emprego de proteção de perda de sincronismo (PPS), buscando-se, através de um ajuste adequado, forçar a abertura da interligação antes da atuação de outras proteções instaladas no sistema. Entretanto, considerando a natureza complexa dos diversos fatores intervenientes, o assunto continua sendo analisado com vista à otimização das ações propostas.

Em todas as contingências que resultem na abertura da Interligação deverá ser acionada a retirada do banco de capacitores localizado em Samambaia no sentido de reduzir a exposição de equipamentos a sobretensões elevadas.

5.0 CONCLUSÕES

A implantação da interligação norte/sul exigiu um esforço apreciável das equipes de engenharia das empresas envolvidas. Com sua natureza tipicamente energética, transferindo de uma região para outra as sobras de energia sazonalmente existentes, a interligação provoca importantes solicitações aos sistemas existentes. As grandes distâncias envolvidas incorporam novos problemas operativos ao sistema interligado e inibem a utilização de reforços em

equipamentos como solução para os referidos problemas. A adoção de esquemas especiais de controle/proteção no sistema de Furnas permitiu manter condições operativas adequadas com um mínimo de investimento em equipamentos.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) FERREIRA, S. TARCISO, RIZZO, ELIZABETH e outros. Concepção do estágio inicial do sistema de integração da UHE de Serra da Mesa: flexibilização de critérios e adequação às restrições orçamentárias. VII ERLAC – 1997. Brasil.
- (2) ESMERALDO, P. C., RIZZO, ELIZABETH, FERREIRA, S. TARCISO, Alternativas de utilização de linhas de transmissão não convencionais no sistema de 500 kV do Alto Tocantins – Parte I & II. XII SNPTEE-1995. Brasil

- (3) FIGUEIREDO, E. F.; FERREIRA, S.TARCISO, RIZZO, ELIZABETH da R. A., Critérios e procedimentos para especificação dos geradores e sistemas de controle da usina de Serra da Mesa. IX SNPTEE – 1989. Brasil

7.0 DADOS BIOGRÁFICOS

- Sebastião Tarciso Ferreira;
- Brasil, 1950;
- UFRJ, 1973;
- Engenheiro eletricista, ex-professor da cadeira de Análise de Sistemas II da UGF, trabalhou em diversas empresas de consultoria (PTEL, PROMON, ANDRADE GUTIERREZ). Realizou estudos na área de planejamento de sistemas para diversas empresas no Brasil e no exterior.