



**GRUPO IX
OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – (GOP)**

ESTUDOS PRÉ-OPERACIONAIS DE CONTROLE CARGA-FREQÜÊNCIA PARA A INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL

Luiz Edmundo dos Santos Ferreira*

Mario Fernando Ellis

FURNAS Centrais Elétricas S. A.

RESUMO

A decisão de interligar os sistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste trouxe a necessidade de se identificar problemas que poderiam advir desta interconexão. Após estudos de viabilidade e planejamento, mostrou-se fundamental a execução de análises pré-operacionais sob diversos aspectos, incluindo o de controle carga-freqüência. Sob este ângulo, foram simulados, através do programa SAGA III, os eventos considerados mais relevantes para caracterizar o desempenho do sistema. Os resultados levaram à conclusão de que, para se ter uma operação segura e eficiente sob esse aspecto, deveriam ser tomadas algumas medidas, tais como a disponibilização do modo de operação Tie-Line-Bias (TLB) em todos os equipamentos de Controle Automático de Geração.

PALAVRAS-CHAVE

Interligação Norte-Sul, Controle Carga-Freqüência, CAG

1.0 - INTRODUÇÃO

O advento da Interligação Norte-Sul, unindo os sistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste acrescentou novos horizontes aos panoramas não apenas do setor elétrico brasileiro como do próprio país. Do ponto de vista elétrico, a interligação dos dois sistemas regionais através de uma linha de transmissão dotada de equipamentos com tecnologia de última geração, caso dos Capacitores Série Controlados a Tiristores (TCSC), adicionou às características particulares resultantes da interconexão de dois sistemas bastante distintos, aquelas próprias de equipamentos novos.

A importância desse empreendimento e seu grau de sofisticação técnica fizeram-no merecedor de especial atenção por parte dos órgãos ligados à coordenação da operação do sistema elétrico, visando análises, antes da sua entrada em operação, determinantes de ações que possibilitassem o desempenho seguro desse “novo” Sistema Interligado.

Os diversos aspectos relevantes existentes neste cenário motivaram a criação de grupos que identificassem as ações necessárias à entrada em operação da Interligação Norte-Sul. Sob o ponto de vista do Controle Carga-Freqüência foi criada a Força-Tarefa para Estudos Pré-Operacionais de Controle Carga-Freqüência para a Interligação Norte-Sul.

Os estudos apresentados neste artigo foram realizados no âmbito desta Força-Tarefa, buscando determinar medidas a serem tomadas para contemplar o controle carga-freqüência, de forma que o sistema formado após a entrada em operação da Interligação Norte-Sul tivesse desempenho seguro e confiável.

2.0 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O controle carga-freqüência de um sistema elétrico é normalmente efetuado em duas etapas. A primeira, denominada controle primário, é realizada automaticamente pelos reguladores de velocidade desbloqueados de todas as unidades geradoras sincronizadas ao sistema. A regulação secundária, por sua vez, fica a cargo das empresas controladoras de área, que enviam sinais de comando a determinadas usinas pertencentes à sua área.

No Brasil, todas as empresas controladoras de área realizam a regulação secundária automaticamente,

através de equipamentos de Controle Automático de Geração (CAG), aos quais também é atribuída, dependendo do modo de controle adotado, a tarefa de controlar os intercâmbios de energia entre sua área e as demais. Na Tabela 2.1 são apresentadas as empresas controladoras de área dos dois subsistemas brasileiros. A CHESF e a ELETRONORTE são responsáveis pelo controle secundário do subsistema Norte/Nordeste. As demais empresas atuam no subsistema Sul/Sudeste/Centro-Oeste. Nesta tabela também são indicadas as usinas de cada área que estão sob atuação dos equipamentos de CAG.

TABELA 2.1 – EMPRESAS CONTROLADORAS DE ÁREA E USINAS SOB CAG.

Empresa Controladora de Área	Usinas sob CAG
FURNAS	Itumbiara, Marimondo, Furnas, L. C. Barreto e Itaipu-60 Hz
LIGHT	CAG desligado
CEMIG	Emborcação e São Simão
CESP	Ilha Solteira, Água Vermelha e Capivara
ELETROPAULO	CAG desligado
COPEL	G. B. Munhoz, G. Parigot e Segredo
ELETROSUL	S. Santiago, S. Osório e Passo Fundo
CEEE	Itaúba, Jacuí e Passo Real
CHESF	Paulo Afonso IV e Itaparica
ELETRONORTE	Tucuruí

Deve-se observar que, por conveniência operativa e/ou energética, algumas empresas como a LIGHT e a ELETROPAULO estão com seus CAG desligados e, portanto, normalmente não participam do controle secundário. Suas áreas são anexadas a FURNAS e CESP, respectivamente. Outras áreas, como CEMIG e CEEE, usualmente desligam seus CAG durante o horário de ponta, sendo suas responsabilidades no controle secundário assumidas por FURNAS e ELETROSUL, respectivamente.

A análise do desempenho de sistemas elétricos tais como o Norte/Nordeste ou o Sul/Sudeste/Centro-Oeste, individualmente, reveste-se de dimensões bastante extensas. Ao interligá-los, a complexidade aumenta substancialmente e a dinâmica resultante deve ser analisada com cuidado. Por exemplo, estratégias que para cada um dos dois sistemas individualmente funcionam a contento, para o sistema unificado podem acarretar respostas inadequadas.

A premissa básica adotada nestes estudos foi a de que o desempenho do novo sistema elétrico resultante da entrada em operação da Interligação Norte-Sul não deveria mostrar-se pior que o desempenho individual de cada um dos dois sistemas que o formam, antes da implantação da mesma.

O estudo de carga-freqüência para o novo sistema revestiu-se inicialmente da coleta de informações a respeito dos sistemas de regulação de freqüência e do levantamento das estratégias atuais de operação. A partir daí buscou-se verificar as características particulares dos dois sistemas que se mostrassem incompatíveis ou que pudessem representar situações indesejáveis após a interligação.

Os parâmetros dos sistemas de controle associados ao controle de freqüência que têm padronização foram objeto de atenção. Um exemplo foi o estatismo permanente dos reguladores de velocidade, já que algumas usinas não apresentavam o valor padronizado (5%).

O software escolhido para as análises digitais foi o Programa SAGA III, adotado pelo GCOI para estudos envolvendo controle carga-freqüência. Este programa representa de forma bastante precisa os controles primário e secundário de freqüência, além de toda a dinâmica a ela relacionada, fornecendo resultados seguros com respeito ao laço potência ativa-freqüência.

A configuração do sistema elétrico sob o aspecto do Controle Automático de Geração considerada para os estudos foi a mesma que a atual, ou seja, oito áreas de controle no Sul/Sudeste/Centro-Oeste e duas no Norte/Nordeste, como exposto acima. O modo de controle adotado nos estudos foi aquele considerado mais adequado para o novo sistema, ou seja, Tie-Line-Bias. Este modo tornou-se disponível em todas as áreas em novembro de 1998, já que a CHESF, que antes operava apenas em Flat-Frequency, envidou esforços no sentido de antecipar a entrada em operação do modo Tie-Line-Bias em seu CAG.

Parâmetros específicos de cada área de controle, tais como “bias” e banda-morta do CAG, foram utilizados nos modelos padrões de regulador de velocidade e controle secundário existentes no Programa SAGA III, realizando-se durante uma fase inicial diversas simulações para ajustá-los a um desempenho compatível com aquele normalmente observado no sistema elétrico real.

O amortecimento da carga do sistema com relação à freqüência foi representado utilizando-se o valor 2,0 p.u.MW/p.u.Hz em todos os casos simulados e também para o cálculo do “bias”. Este é um valor considerado

como típico e já usado em outros estudos realizados no âmbito do GCOI.

A escolha dos casos analisados recaiu sobre aquelas situações cuja simulação se mostraria mais representativa do desempenho do sistema com respeito ao controle carga-freqüência.

3.0 - ANÁLISE DOS CASOS

3.1 - Aspectos Gerais

Foram adotados nestes estudos os mesmos casos-base utilizados pela Força-Tarefa para Estudos de Regime Permanente e Dinâmico, tendo sido considerados os cenários de carga média e carga pesada, com fluxos na Interligação sempre no sentido Norte-Sul.

Os sistemas dos casos-base foram reduzidos utilizando-se o programa ANAREDE, mantendo-se os fluxos nas interligações entre as áreas de controle idênticos àqueles do sistema original. Ou seja, preservou-se a identidade das áreas de controle, através da manutenção das cargas e das gerações iniciais de cada área e também dos fluxos entre áreas. A geração de cada área foi dividida entre duas máquinas, uma representando as participantes do Controle Automático de Geração, enquanto a outra representava aquelas não comandadas pelo CAG. Neste processo de redução dos sistemas originais, foram feitas ainda diversas adaptações para viabilizar a montagem dos arquivos de dados para o programa SAGA III.

Os sistemas assim reduzidos passaram a ser representados basicamente por oito áreas de controle, cada uma com sua carga e sua geração próprias, além de se considerar os intercâmbios entre elas.

Para a representação dos reguladores de velocidade e dos CAG das áreas de controle, foram adotados os modelos típicos disponíveis no SAGA III. Quanto aos parâmetros associados a esses modelos, alguns puderam ser diretamente definidos a partir das informações fornecidas pelas empresas, enquanto que outros tiveram que ser ajustados através de simulações iniciais.

Um parâmetro dos CAG que merece ser destacado é o “bias”. Várias empresas utilizam o conceito de “bias dinâmico” e, assim, procedem automaticamente sua contínua atualização. Em outras empresas, este parâmetro é manualmente recalculado em certos intervalos de tempo. De qualquer forma, seja através

do cálculo automático ou do cálculo manual, a expressão normalmente utilizada para determinar o “bias” é a seguinte:

$$\beta = GS/30 + CP/300 \quad (\text{em MW/0,1Hz}),$$

onde GS é a geração sincronizada da área e CP é a sua carga própria.

Tendo sido preparados os casos básicos para o SAGA III, partiu-se para a etapa das simulações. Foram simuladas perdas da maior máquina de cada área de controle e outros eventos relevantes para o comportamento do sistema sob o aspecto do controle de freqüência. O tempo de simulação utilizado foi geralmente de duzentos segundos, que normalmente pode ser considerado suficiente para este tipo de análise. Entretanto, quando se mostrou necessário, foram simulados intervalos maiores.

3.2 - Comparação: Sistemas N/NE e S/SE/CO Isolados x Interligados

Inicialmente, foram simulados os dois sistemas separadamente, com o objetivo de analisar o seu comportamento antes da interligação, para posteriormente verificar se seria atendida a premissa básica de não haver degradação do desempenho dos sistemas após a entrada da Norte-Sul.

Foram aplicados diversos impactos em cada um dos dois sistemas isolados, tendo-se analisado o comportamento da freqüência em cada caso. Os intercâmbios mais significativos também foram observados, não sendo porém muito relevantes para a realização de comparações, já que seus valores iniciais são bem diferentes em função da presença ou não da Norte-Sul. Como exemplo, são mostrados a seguir os resultados obtidos para a freqüência, considerando os a perda de uma máquina em Paulo Afonso IV, em situação de carga pesada.

Conforme pode ser observado na Figura 3.1, no caso da perda de uma máquina de Paulo Afonso IV com os sistemas isolados, a freqüência do sistema Norte/Nordeste atingiu 59,636 Hz, retornando a 60,0 Hz após cerca de 120 segundos.

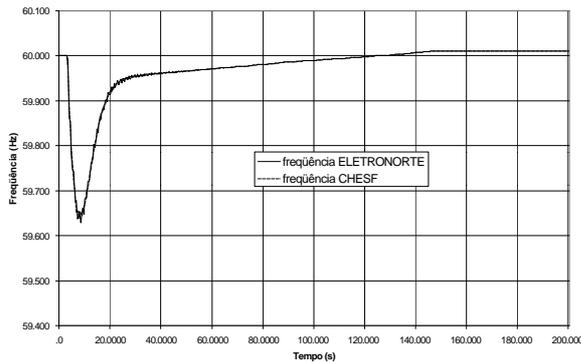


FIGURA 3.1 – GRÁFICO F X T PARA PERDA DE UMA MÁQUINA DE PAULO AFONSO IV COM O SISTEMA N/NE ISOLADO.

Na Figura 3.2 é apresentado o comportamento da frequência para este mesmo impacto, agora com os dois sistemas interligados pela Norte-Sul.

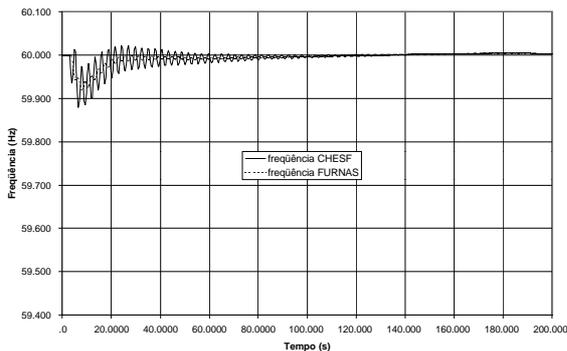


FIGURA 3.2 – GRÁFICO F X T PARA PERDA DE UMA MÁQUINA DE P. AFONSO IV COM SISTEMAS N/NE E S/SE/CO INTERLIGADOS.

Nessa figura observa-se que a frequência atinge o valor mínimo de 59,879 Hz, retornando a 60,0 Hz após cerca de 120 segundos.

Os resultados apresentados acima mostram que a interligação dos sistemas S/SE/CO e N/NE oferece a vantagem de serem menores as variações na frequência na ocorrência de um impacto. Isto pode ser explicado pelo fato de o novo sistema formado com a interligação possuir uma maior inércia. Como desvantagem, a presença da Interligação Norte-Sul passa a impor um caráter oscilatório na frequência do sistema durante parte de sua fase de recuperação. Essas oscilações, entretanto, não chegam a causar prejuízos ao sistema, visto que suas amplitudes são relativamente baixas e elas são amortecidas em um intervalo de tempo não muito longo. Quanto ao tempo de retorno da frequência

ao seu valor nominal, obteve-se nas duas situações o mesmo resultado, não havendo portanto degradação da velocidade de recuperação do sistema.

3.3 - Desempenho do "Novo" Sistema Interligado

Após as simulações iniciais que permitiram fazer comparações entre os casos em que os sistemas N/NE e S/SE/CO estavam isolados e aqueles em que a interligação estava presente, partiu-se para análises mais detalhadas sobre o comportamento do novo sistema a ser formado a partir da entrada em operação da Interligação Norte-Sul. Foram considerados, então, os cenários de carga pesada e de carga média.

As simulações realizadas possibilitaram avaliar como se dá a recuperação da frequência do sistema e como se restabelecem os intercâmbios originais, após a aplicação dos impactos considerados.

Inicialmente, simulou-se a abertura das interligações Norte/Sul e Norte/Nordeste. Essas duas interligações mereceram especial atenção pois, como já dito, apresentam a particularidade de serem efetuadas através de uma única linha de transmissão.

Foi possível observar nos resultados obtidos para esses casos que, após o impacto, a frequência do subsistema no qual está localizada a outra interligação passa por uma fase de comportamento oscilatório. Essas oscilações são amortecidas e acabam por ser extintas em cerca de 1 minuto.

Outro ponto que deve ser ressaltado para os casos de abertura das referidas interligações é a não recuperação da frequência e dos intercâmbios aos seus valores originais após o impacto. Este fato se deve justamente à peculiaridade dessas interligações que, ao serem abertas, anulam completamente o intercâmbio entre as duas áreas envolvidas. Dessa forma, o intercâmbio total real de cada área passa a não considerar mais este intercâmbio que foi perdido, enquanto que o intercâmbio programado ainda permanece com o valor original, que considera a presença da interligação em questão. Essa diferença entre os intercâmbios real e programado se compõe com a parcela de erro referente à frequência, resultando em um Erro de Controle de Área (ECA) incorreto devido à nova configuração do sistema. Na prática, a forma de se contornar este problema é através da reprogramação imediata dos intercâmbios das áreas envolvidas.

Nas Figuras 3.3 a 3.5 são apresentados os gráficos da frequência e dos intercâmbios mais relevantes para o caso da abertura da Interligação N-NE, em carga pesada.

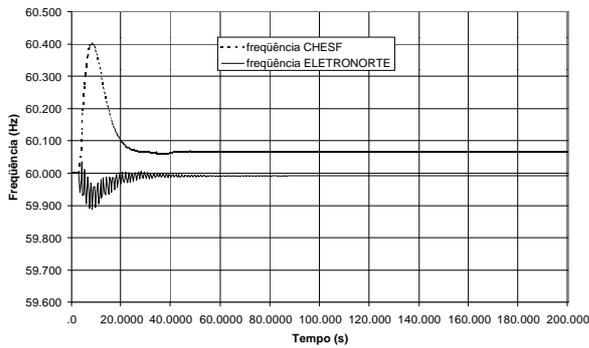


FIGURA 3.3 – FREQUÊNCIA DE CHESF E ELETRONORTE PARA ABERTURA DA NORTE-NORDESTE (CARGA PESADA).

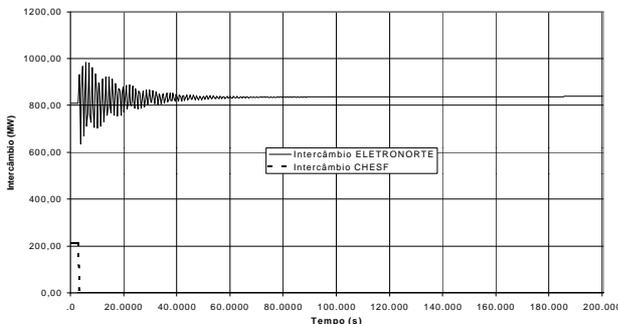


FIGURA 3.4 – INTERCÂMBIO DE CHESF E ELETRONORTE PARA ABERTURA DA NORTE-NORDESTE (CARGA PESADA).

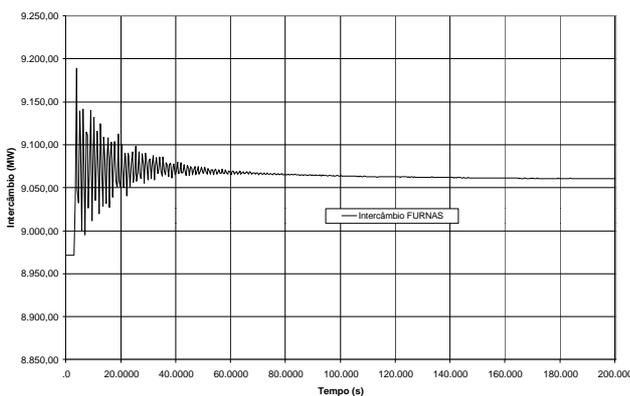


FIGURA 3.5 – INTERCÂMBIO DE FURNAS PARA ABERTURA DA NORTE-NORDESTE (CARGA PESADA).

Nota-se através da Figura 3.3 uma elevada sobrefrequência no Nordeste (60,4 Hz). Como a

ELETRONORTE permanece conectada ao S/SE/CO através da Norte-Sul e passa a existir uma discrepância entre seus intercâmbios real e programado, a frequência desse novo sistema se aproxima de 60 Hz, porém não é totalmente restabelecida. Quanto aos intercâmbios, deve-se chamar atenção ao da ELETRONORTE, para o qual as oscilações atingem amplitude considerável. Deve-se lembrar que, após a perda da N/NE, este intercâmbio representa o fluxo através da Norte-Sul.

Além de simular a abertura das interligações Norte-Sul e Norte-Nordeste, foram também analisados os impactos de perda da maior máquina de cada área de controle. Foi possível observar nestes casos que, após a ocorrência dos impactos e transcorrido um pequeno período transitório, o fluxo de potência através da Interligação Norte-Sul oscilava de forma amortecida, com uma frequência de aproximadamente 0,35 Hz.

É interessante notar, ainda, que as oscilações nas Interligações Norte-Sul e Norte-Nordeste apresentaram maiores amplitudes quando o impacto se dava na CHESF e na ELETRONORTE. Assim, deve-se ter em mente a importância dos distúrbios nas áreas dessas empresas para possíveis esquemas de abertura dessas duas interligações devido a oscilações de potência.

Para finalizar a análise, foram simulados alguns casos de perda de grandes blocos de carga que permitiram avaliar o comportamento de todo o sistema interligado para situações de sobrefrequência. Pôde-se observar nesses casos que as sobrefrequências verificadas não foram suficientes para provocar o desligamento automático dos CAG, ajustado em 60,5 Hz, e que a frequência do sistema e os intercâmbios foram sempre restabelecidos. Nota-se, ainda, que a amplitude das oscilações no fluxo da Norte-Sul atingiu valores bastante significativos para o caso de perda de carga na ELETRONORTE.

4.0 - CONCLUSÕES

O novo sistema elétrico formado após a entrada em operação da interligação Norte-Sul deverá apresentar desempenho satisfatório sob o aspecto do controle carga-frequência. As excursões de frequência mostram boa recuperação após distúrbios, o mesmo acontecendo com os intercâmbios. Os casos simulados mostram que, apesar de serem observadas oscilações de frequência e intercâmbios após os impactos, mesmo distúrbios de razoável monta são bem absorvidos e o sistema mantém-se estável. Essas oscilações podem ser atribuídas às linhas Presidente Dutra-Boa Esperança (Interligação Norte/Nordeste) e Imperatriz-Serra da Mesa (Interligação Norte-Sul), que são ligações fracas entre áreas. Impactos no subsistema Norte-Nordeste,

mais próximos eletricamente dessas duas linhas, resultaram em oscilações de maior amplitude.

O modo de controle Tie-Line-Bias mostrou-se adequado para todas as áreas, no novo sistema interligado, englobando o Sul/Sudeste/Centro-Oeste e o Norte/Nordeste, e deverá ser adotado durante a operação normal.

Neste modo de operação, um parâmetro que merece atenção é o “bias” de cada área de controle, que deve ser preferencialmente calculado de maneira automática pelos equipamentos de Controle Automático de Geração. As empresas controladoras de área que não têm possibilidade de efetuar o cálculo automático do “bias”, devem atualizar este valor sempre que em suas áreas houver retirada ou inclusão de máquinas. Com relação à influência da carga no valor do “bias” destas áreas, o cálculo deste parâmetro deve ser feito a cada hora, no sentido de minimizar-se as discrepâncias entre o seu valor exato e o efetivamente praticado.

As estratégias de controle utilizadas antes da entrada em operação da interligação poderão continuar a ser usadas posteriormente. As otimizações eletroenergéticas atualmente praticadas, como a anexação de algumas áreas de controle por outras, deverão continuar adequadas à operação do sistema após a interligação.

A existência no sistema de interligações radiais entre áreas, quais sejam, as interligações Norte-Sul e Norte-Nordeste, fará com que a abertura de qualquer destas linhas provoque uma discrepância no cálculo dos erros de intercâmbio nos Controles Automáticos de Geração das áreas envolvidas. Como consequência, as frequências dos sistemas resultantes não retornarão ao valor programado. Uma forma de contornar o problema seria a atualização automática do intercâmbio programado nos equipamentos de CAG das áreas envolvidas que permanecessem interligadas a outras. Por outro lado, naquelas que ficassem isoladas, o CAG poderia ser desligado.

Durante a realização dos estudos foi identificada a necessidade de uniformização entre as diversas empresas envolvidas de procedimentos operativos e de ajustes de alguns parâmetros. Um exemplo é a necessidade de alteração do estatismo permanente nas máquinas onde este se mostrar diferente de 5%.

5.0 - BIBLIOGRAFIA

(1) Força-Tarefa para Estudos Pré-Operacionais de Controle Carga-Frequência para a Interligação Norte-Sul. Relatório dos Estudos (Novembro/1998).