



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

FI/GOP/13
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GOP

ANÁLISE DINÂMICA DAS NECESSIDADES DE MODELAGEM DOS CONTROLADORES DE UNIDADES GERADORAS PARA AS ÁREAS DE RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Emilly G. de Andrade Bizon (*)
UFRJ

Antônio P. Guarini Paulo
ONS

Eduardo M. Quintão
ONS

Robson Francisco da Silva Dias
UFRJ

RESUMO

A partir da necessidade de se estabelecer uma nova área de recomposição fluente por conta da necessidade de modernização (*"retrofit"*) das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica (UHE) Passo Fundo que era responsável pela recomposição desta área, iniciou-se os estudos a partir da UHE Foz do Chapecó, por esta já possuir capacidade de autorrestabelecimento (*"black-start"*).

O trabalho apresenta os conceitos básicos para análise, do ponto de vista de regime permanente, para definição do corredor de recomposição e as análises de transitórios eletromecânicos para avaliação, verificação e adequação dos parâmetros dos reguladores de velocidade (RV), dos reguladores automáticos de tensão (RAT) e dos sinais adicionais Estabilizadores de Sistema de Potência (ESP).

Efetivamente, os referidos estudos têm o intuito de garantir a fluência do corredor de recomposição para o atendimento das cargas prioritárias de uma região do Estado do Rio Grande de Sul de forma rápida e segura. Além disso, foram realizadas análises para verificação do instante de entrada de operação dos ESP pois, caso os mesmos sejam ligados no momento errado da recomposição, podem provocar a perda da estabilidade do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Recomposição Fluente; Recomposição Coordenada; Reguladores de Tensão e de Velocidade, Estabilizadores de Sistema de Potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

A recomposição inicia-se a partir da necessidade de se restabelecer o Sistema Interligado Nacional (SIN) após uma perturbação total (“*black-out*”) ou parcial. Os processos de recomposição de áreas da Rede Básica do SIN estão todos definidos hoje através de Instruções Operativas, nos Centros de Operações dos Agentes e dos Centros Regionais e Nacionais do ONS. Estes processos estão definidos em duas fases, denominadas de Recomposição Fluente e Coordenada (1).

A recomposição fluente permite a recomposição de áreas geoeletricas (áreas que contém uma ou mais usinas de autorrestabelecimento e uma configuração mínima de rede), visando atender as cargas prioritárias desta área de forma rápida e segura, com compatibilização de carga e geração.

A recomposição coordenada somente tem início após o término da fluente de áreas para liberação de cargas adicionais e, quando for o caso, o fechamento de paralelos ou anéis. A recomposição também é feita de forma coordenada quando da indisponibilidade de equipamentos de uma área de recomposição fluente.

Este artigo tem por objetivo analisar as necessidades específicas da modelagem de regulação de tensão, incluindo os Estabilizadores de Sistema de Potência ou do inglês (“*Power System Stabilizers – PSS*”) e dos reguladores de velocidade das unidades geradoras que participam de um corredor fluente, para a realização de estudos de estabilidade eletromecânica desses corredores.

Os reguladores de velocidade, em geral, operam em um modo denominado modo de controle de potência (ou modo sistema interligado), que é uma forma de operação conveniente para que seja definido um “*setpoint*” de potência ativa para as unidades geradoras determinados pelos centros de controle, além de proporcionar a possibilidade de participarem do Controle Automático de Geração (CAG). Esse modo de operação, apesar de possuir uma sensibilidade a variações de frequência, tende a ser menos sensível a essas variações. No caso de uma rede de recomposição, os reguladores de velocidade das unidades geradoras são comutados para um modo de operação denominado modo de controle de frequência (Rede Isolada), em que as unidades geradoras passam a ser mais sensíveis a variações de frequência. Nessas condições, essas unidades geradoras são responsáveis pelo controle de frequência (Rede Isolada) da área em recomposição fluente.

Os ESP, em geral, são ajustados para os modos local e/ou interárea (como a interligação Norte – Sul, por exemplo), que podem sofrer sensíveis modificações de frequência, ou até mesmo não existir, como no caso dos modos interárea nessa situação operativa. Essas modificações de frequência podem provocar a perda de sintonia dos ESP que serão sempre avaliadas nos estudos de estabilidade eletromecânica.

2.0 - ESTUDO DE ESTABILIDADE ELETROMECAÂNICA

2.1 Regulador Automático de Tensão

O Regulador Automático de Tensão (RAT) tem como objetivo principal o controle da tensão terminal da máquina a fim de garantir, que mesmo com a ocorrência de distúrbios no sistema, como tomada ou rejeição de carga possa trazer a tensão terminal ao seu valor de referência. O sistema de excitação da máquina vai fornecer a corrente necessária para obter a tensão de excitação desejada, conforme representado na Figura 1, que apresenta os principais componentes do sistema de excitação de uma máquina síncrona. A efetividade desse tipo de controle depende da habilidade do sistema de excitação da máquina em responder às variações de tensão rapidamente (2).

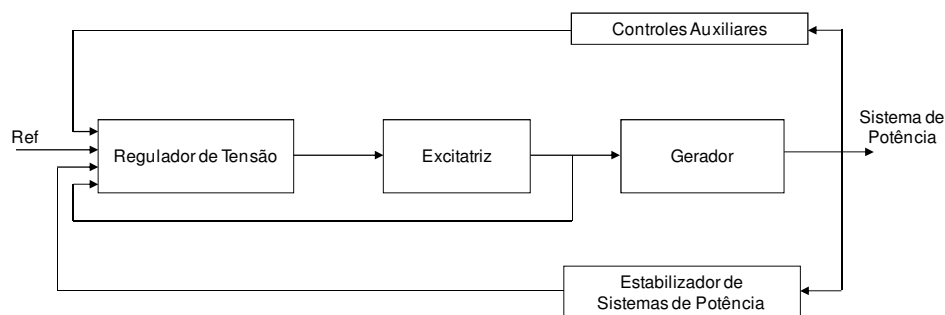


Figura 1 - Componentes do Sistema de Excitação de uma Máquina Síncrona

Com base na Figura 1, têm-se:

- **Regulador de Tensão:** verifica o valor de tensão no terminal da máquina e compara o mesmo com um valor de referência, fazendo correções caso haja alguma diferença entre a tensão de referência e a medição da tensão terminal da máquina (erro).

- **Excitatriz:** fornece uma corrente contínua para o campo do gerador (rotor) mantendo uma tensão de excitação de campo na máquina que irá implicar na tensão terminal da máquina.
- **Estabilizador de Sistemas de Potência:** fornece um sinal de entrada adicional para o regulador de tensão a fim de amortecer as oscilações eletromecânicas associadas ao sistema de potência. Os sinais de entrada mais comuns são: desvio de frequência, potência elétrica, integral da potência acelerante, etc.
- **Controles auxiliares:** compensação de corrente reativa, limitadores de sobre e subexcitação, limitador Volt/Hz, etc.

2.2 Estabilizador de Sistemas de Potência

O ESP funciona em conjunto com o RAT conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 1. O ESP é utilizado com o intuito de amortecer oscilações de baixa frequência. Seu sinal, em geral, é inserido no somador de entrada do RAT, produzindo uma parcela do torque elétrico (T_e), denominada torque de amortecimento (T_d), em fase com o desvio de velocidade do rotor, contribuindo então com o amortecimento (*"damping"*) das oscilações eletromecânicas (2). As faixas de frequência podem ser vistas na Figura 2.

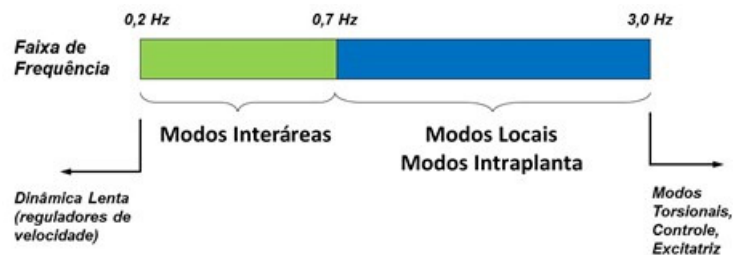


Figura 2 – Frequência Característica dos Modos de Oscilação

O RAT e o ESP atuam em conjunto para manter a máquina síncrona no ponto de operação ideal. O RAT vai atuar na componente do torque de sincronismo (T_s), enquanto o ESP vai atuar na componente de amortecimento (T_d).

2.3 Regulador de Velocidade

A máquina primária é a responsável pelo acionamento mecânico do gerador. As máquinas primárias podem ser: os motores a diesel, turbinas à gás e a vapor e turbinas hidráulicas. A máquina motriz vem associada a um regulador de velocidade (RV), cuja principal função é controlar a velocidade pelo ajuste do suprimento de potência mecânica, de acordo com a carga elétrica solicitada nos terminais do gerador e que acarretará no controle da frequência. Sua atuação será na estabilidade dinâmica ou angular, que é a capacidade das máquinas síncronas se manterem em sincronismo com o sistema, mesmo na ocorrência de distúrbios.

O controle de frequência (Rede Isolada) é feito através da variação de potência ativa do sistema, como por exemplo, na ocorrência de um desequilíbrio entre a carga e a geração. É necessário que o controle de velocidade, no caso das turbinas hidráulicas, atue na abertura ou fechamento dos distribuidores (mecanismo que controla a entrada de mais ou menos água na turbina, gerando mais ou menos potência mecânica, respectivamente). Por estarem envolvidas inércias elevadas, a regulação de velocidade é mais lenta que a regulação de tensão.

3.0 - ANÁLISE DINÂMICA DOS REGULADORES

3.1 Ajuste dos Parâmetros do Regulador de Velocidade – Modo Controle de Frequência (Rede Isolada)

Na Figura 3 é apresentada a Área Foz do Chapecó de recomposição fluente e na Tabela 1 estão representados os parâmetros das unidades geradoras de cada usina que faz parte deste corredor de recomposição.

Anteriormente a UHE Passo Fundo era a responsável pelo restabelecimento das cargas desta área. Como critério, cada corredor de recomposição fluente considera $(n-1)$ unidades geradoras em cada usina. Com o *"retrofit"* de uma unidade geradora da UHE Passo Fundo, essa usina passou a ter somente uma única unidade geradora disponível, deixando de atender esse critério. Isto motivou as análises de regime permanente e dinâmica para a criação de um novo procedimento de recomposição para o corredor com somente com a UHE Foz do Chapecó.

Vale salientar que as Usinas de Monte Claro, Castro Alves e 14 de Julho foram inseridas no processo de recomposição desta área, cada uma com uma unidade geradora sincronizada, com o intuito de agilizar a entrada dessas usinas no corredor. Entretanto a ausência de cada uma delas ou de todas não compromete a recomposição desta área.

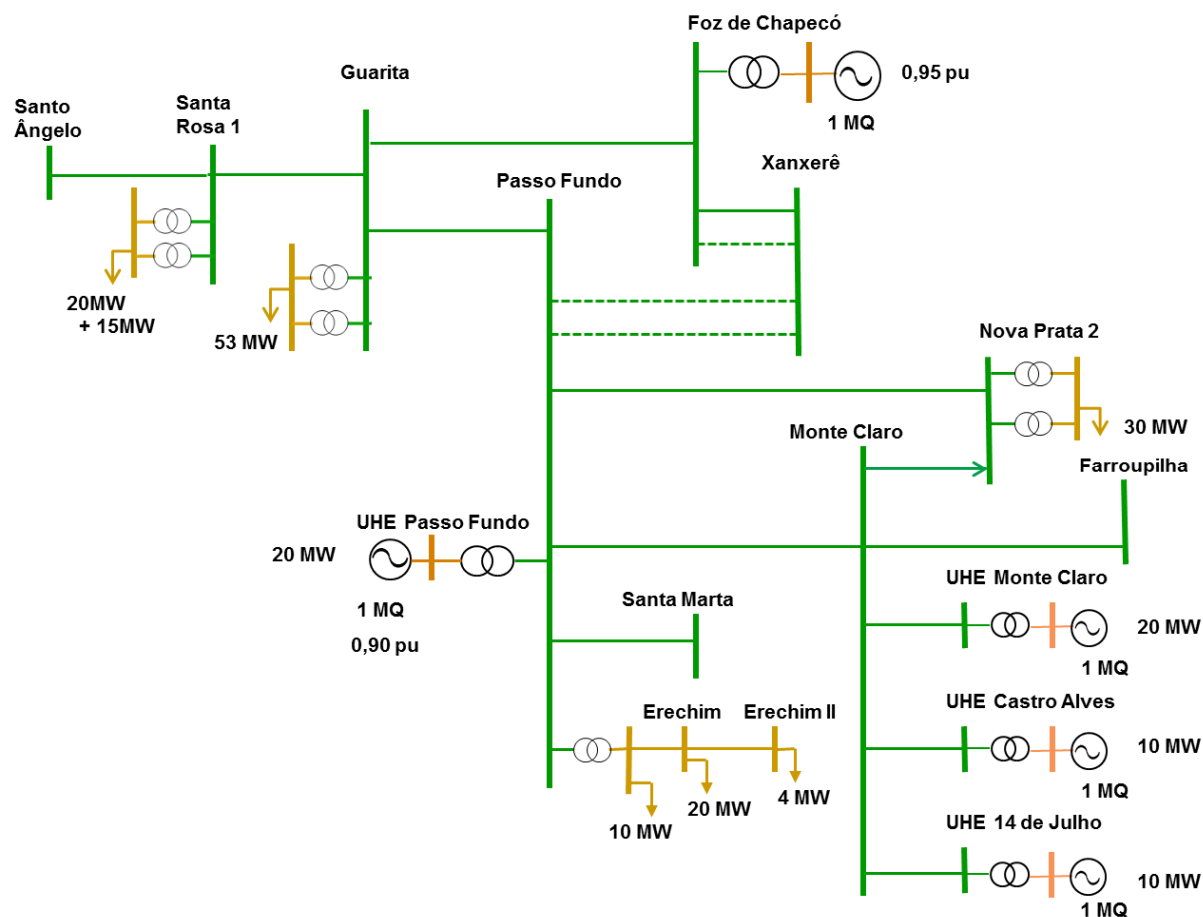


Figura 3 - Área Foz do Chapecó de Recomposição Fluente

Tabela 1 – Potência das Usinas da Área Foz do Chapecó

UHE	UG	Potência/UG [MW]	Total [MW]
Foz do Chapecó	4	213	852
Passo Fundo	2	113	226
Monte Claro	2	65	130
Castro Alves	3	43,3	129,9
14 de Julho	2	50	100

Normalmente, os parâmetros do modo de controle de potência dos reguladores de velocidade dos geradores estão ajustados para operação interligada ao SIN. Quando há necessidade da usina participar de um corredor de recomposição é que os parâmetros para operação no controle de frequência (Rede Isolada) são ajustados/otimizados pelo ONS.

De acordo com a Tabela 1 cada unidade geradora da UHE Foz do Chapecó tem potência de 213 MW. Pelos critérios definidos para estudos de recomposição nos Procedimentos de Rede do ONS (3), somente devem ser utilizados 80% do valor dessa potência para o restabelecimento das cargas ou seja, 170,4 MW.

Na Tabela 2 estão representados os níveis de oscilações de frequência e de tensão mínima e máxima admitidos, para as análises de estabilidade eletromecânica em estudos de recomposição.

Tabela 2 – Valores Mínimo e Máximo de Frequência e Tensão Admitidos

Grandeza Elétrica	Valores	
	Mínimo	Máximo
Frequência (Hz)	56	66
Tensão Dinâmica (% Vnom)	85	125

Na Tabela 3, apresenta-se os parâmetros do RV para o modo controle de frequência e modo controle de potência, além dos dois ajustes que foram analisados para o modo de operação de controle de frequência.

Tabela 3 - Parâmetros do Regulador de Velocidade da UHE Foz do Chapecó

RV	Modo Controle de Frequência			Modo Controle de Potência
	Ajustes de Comissionamento	Ajuste 1	Ajuste 2	Parâmetros Base de Dados
Kp	1,5	4,5	2,5	2
Td	0,2	0,4	1,2	0,55
Ti	4,0	4,0	5,0	5,5
Bp	0,025	0,025	0,025	0,05

A Figura 4 apresenta o comportamento da frequência na UHE Foz do Chapecó quando da tomada e rejeição de carga de 53 MW na SE Guarita.

Pela análise do comportamento da frequência na UHE Foz do Chapecó para operação no modo controle de frequência (Rede Isolada) utilizando os Ajustes de Comissionamento (curva vermelha), com as frequências mínima e máxima delimitadas em azul, percebe-se que a frequência superou, quando da tomada de carga, o limite mínimo permitido para análise dinâmica. A frequência máxima, quando da rejeição de carga, não foi superada. O fato do limite mínimo ter sido superado determina que essa tomada de carga não pode ser realizada.

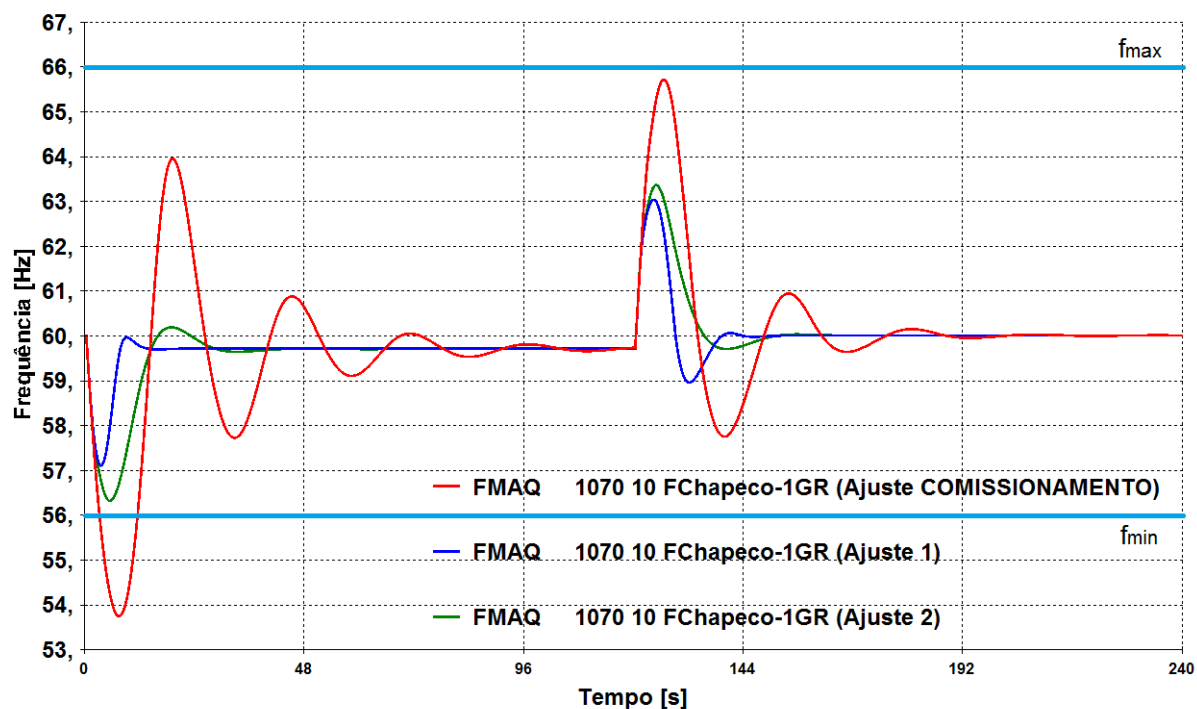


Figura 4 - Variação de Frequência da UHE Foz Chapecó

Como o valor da frequência não estava dentro do limite pré-estabelecido de frequência mínima, alguma medida precisava ser aplicada para viabilizar a tomada desse montante de carga. Duas medidas poderiam ser utilizadas, como a divisão do montante de carga, em dois patamares, por exemplo, ou ajustar os parâmetros do regulador de velocidade a fim de que a tomada de carga possa ser realizada em apenas um único patamar de carga, agilizando o processo de recomposição desta área. Nesse caso a segunda opção foi adotada implicando na alteração dos seguintes ajustes de parâmetros:

- A alteração no ganho **Kp (ganho proporcional)** foi realizada a fim de se obter uma resposta mais rápida do sistema, fazendo com que o mesmo atinja mais rápido o ponto de referência.

- O parâmetro **Td (parcela derivativa)** foi alterado a fim de obter uma atuação mais rápida do RV para variação transitória de frequência. Esses valores foram estimados através da análise do comportamento das curvas ao variar os valores dos parâmetros.
- O parâmetro **Ti (parcela integral)** atua no regime permanente para trazer a máquina para a frequência nominal.
- O **estatismo (Bp)** é definido com o valor reduzido (2,5%), se comparado ao ajuste de sistema interligado (5%) pois, como o corredor está operando isolado, as unidades geradoras da UHE Foz do Chapecó são responsáveis pelo controle de frequência (Rede Isolada) da área.

Em seguida foi analisada novamente a tomada dos 53 MW de carga, com os parâmetros ajustados conforme o Ajuste 1 da Tabela 3. Esse resultado, apresentado na Figura 4 (curva azul), mostra que o limite mínimo de frequência não foi extrapolado, indicando que esse ajuste pode ser utilizado para a recomposição deste montante de carga.

Os parâmetros do Ajuste 1 para as primeiras tomadas de carga de 53 MW (SE Guarita) e 10 MW (SE Passo Fundo) estavam observando os critérios, até que ao restabelecer um montante de carga de 30 MW na SE Nova Prata (Figura 5-I) a máquina perdeu o sincronismo (curva em vermelho). Nesse caso caracterizou-se que novamente o ajuste não estava adequado.

Alternativamente, dividiu-se a carga em dois patamares de 10 MW e 20 MW (Figura 5-II). Entretanto, mesmo com essa divisão de carga em 10+20 MW ou 20+10 MW, ainda com o Ajuste 1, as oscilações não foram amortecidas, configurando então a necessidade de melhorias nos ajustes dos parâmetros.

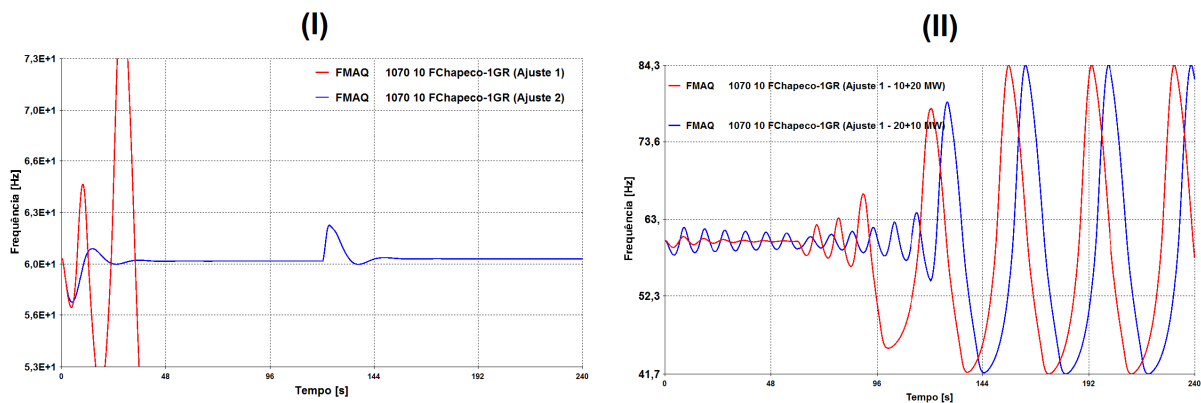


Figura 5 - Variação de frequência da UHE Foz Chapecó

Nos novos ajustes, apresentados no Ajuste 2 da Tabela 3, foram modificados os parâmetros do RV a fim de se restabelecer o montante de carga total desta área, o ganho proporcional (K_p) foi reduzido porque poderia estar causando a instabilidade da turbina devido a seu valor elevado. Quanto mais rápido se fizer o sistema retornar ao valor determinado, maior é o impacto na máquina. O parâmetro Td foi aumentado a fim de se obter uma resposta mais rápida no período transitório. O parâmetro Ti foi aumentado para não interferir no período transitório. O comportamento da frequência do primeiro montante de carga de 53 MW na SE Guarita está representado na Figura 4 curva verde.

A partir do novo ajuste o montante de carga de 30 MW na SE Nova Prata, tanto do ponto de vista de tomada de carga, quanto de rejeição de carga, pode ser restabelecido de forma integral e estável como mostrado na Figura 5-I (curva azul).

3.2 Entrada do Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP) em operação

O momento em que o ESP é posto em operação durante o processo de recomposição deve ser avaliado caso a caso, pois quando é ligado no momento errado, pode trazer prejuízos ao processo de recomposição por conta da perda da estabilidade da máquina, fazendo com que o processo retorne ao estágio inicial. Geralmente o ESP está desligado quando a área estiver operando isolada e geralmente é ligado quando há interligação entre áreas. Quando há interligação entre usinas deve ser verificado se a entrada do ESP vai trazer benefícios ao processo, caso contrário o ESP deve permanecer desligado.

Para verificar o comportamento do ESP serão feitos os comparativos com o ESP ligado e desligado, na SE Guarita, no início do processo e na SE Santa Rosa, por ser a última tomada de carga no modo Controle Frequência. Nessa análise, serão usados os ajustes propostos no Ajuste 2 e a análise será feita como corredor sendo recomposto apenas com a UHE Foz do Chapecó com o ESP ligado e desligado.

A título de ilustração a Figura 6 mostra o comportamento da tomada de carga de 53 MW na SE Guarita com o ESP ligado e desligado. No comportamento da frequência percebe-se que não houve uma variação muito significativa. No entanto, o comportamento da tensão, com o ESP ligado fez com que o limite mínimo de tensão fosse superado, chegando ao valor de 0,845 pu.

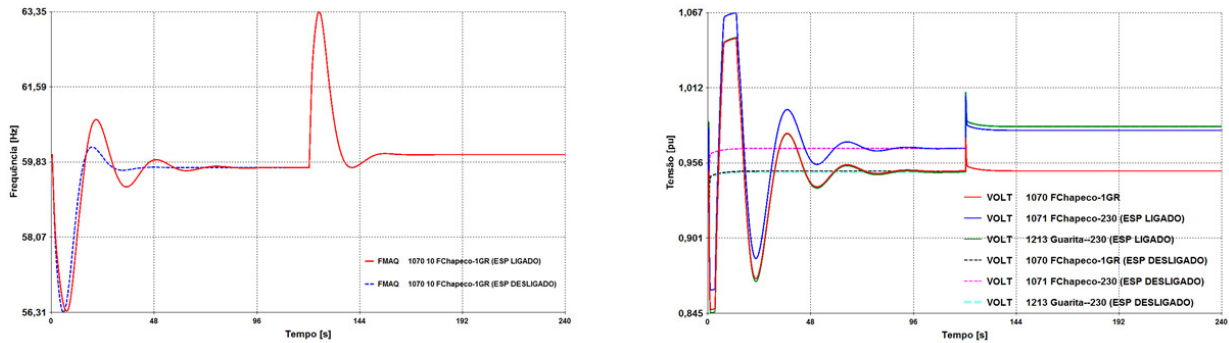


Figura 6 - Variações de Frequência na UHE Foz do Chapecó e Tensões nas Barras - Carga na SE Guarita

Da mesma forma, a Figura 7 mostra o comportamento da tomada de carga de 35 MW, em dois patamares de 20 MW e 15 MW, na SE Santa Rosa com o ESP ligado e desligado. Essa figura comprova a real necessidade de que o ESP deve permanecer desligado durante toda a fase de recomposição fluente quando operando no modo Controle de Frequência (Rede Isolada).

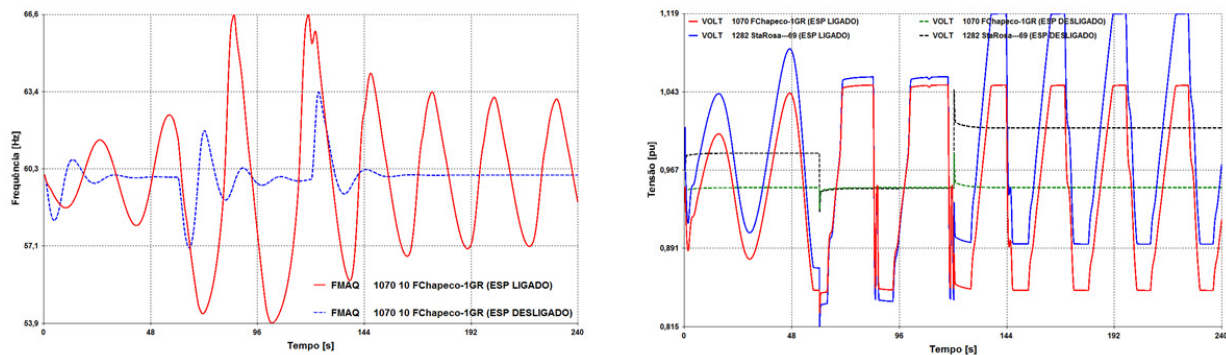


Figura 7 - Variações de Frequência na UHE Foz do Chapecó e Tensões nas Barras - Carga na SE Nova Prata

3.3 Ajuste do Regulador de Velocidade – Modo Interligado

Este processo se inicia a partir da interligação entre uma ou mais usinas, nesse caso na interligação entre a UHE Foz do Chapecó e a UHE Passo Fundo. A partir do instante da interligação entre as usinas, o modo de operação do regulador de velocidade deve ser alterado para o modo interligado (controle de potência) e deve ser avaliado se o ESP irá contribuir com o amortecimento das oscilações. Geralmente, no caso de interligação entre usinas o ESP estará ligado. Os parâmetros ajustados para a operação no modo interligado estão definidos na Tabela 3.

Os resultados a seguir representam o comportamento da frequência quando da tomada e rejeição de 10 MW de carga na SE Passo Fundo.

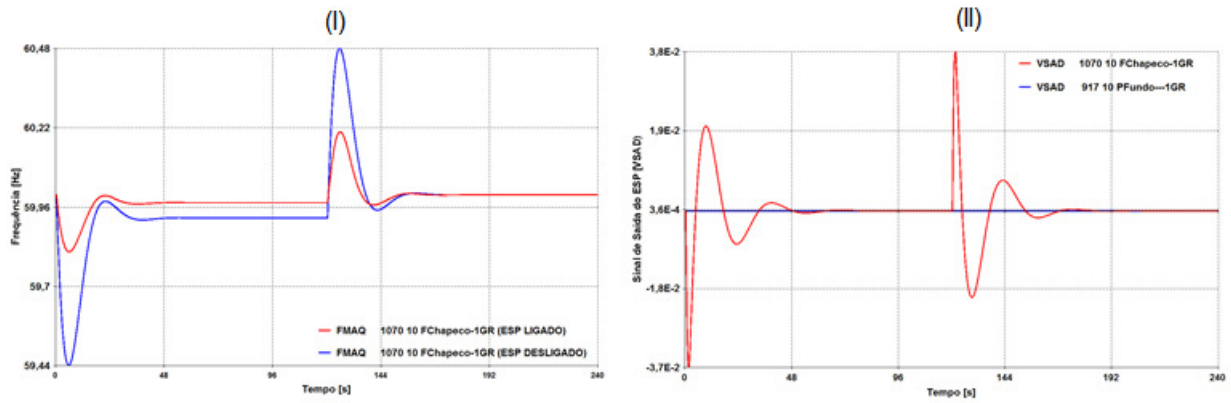


Figura 8 - Variação de Frequência da UHE Foz Chapecó (I) e Sinal de Saída do ESP (II)

Na Figura 8-I apresenta-se a comparação da frequência com o ESP ligado (curva vermelha) e com o ESP desligado (curva azul) com intuito de ilustrar o benefício do ESP ligado e no momento correto, quando as usinas estiverem operando no modo interligado. O sistema está estável na tomada e rejeição desse bloco de carga.

Na Figura 8-II está representado o comportamento do sinal de saída do ESP para as unidades geradoras das UHE Foz do Chapecó e UHE Passo Fundo. Comparando-se as curvas, observa-se que o ESP da UHE Passo Fundo está desligado (valor nulo). Esse fato ocorre pois existe uma estratégia para ligar o ESP a partir de uma determinada potência ativa do gerador, nesse caso esse valor de potência mínima está ajustado em 55% da potência base da máquina em MVA (110 MVA). No caso da UHE Passo Fundo, a unidade geradora deve estar gerando pelo menos 60,5 MW de potência ativa para o ESP ser habilitado. Na simulação realizada a unidade geradora está gerando apenas 20 MW de potência ativa ficando, dessa forma, o ESP desligado. O ESP da UHE Foz do Chapecó é ligado, quando operando no modo interligado, ao atingir 15% da potência base da máquina em MVA.

As oscilações inseridas no perfil de tensão verificado na Figura 9-I quando o ESP está ligado são devidas a inserção do sinal de frequência do rotor (variável de entrada do ESP), que após passar pelo ESP tem seu sinal de saída um valor de tensão (Vpss) que será inserido na referência do RAT, causando o perfil oscilatório.

Na Figura 9-II fazendo-se uma comparação entre as potências elétricas quando o ESP está ligado e desligado observa-se que o efeito do ESP tende amortecer as oscilações da potência elétrica mais rapidamente se comparada a curva com o ESP desligado.

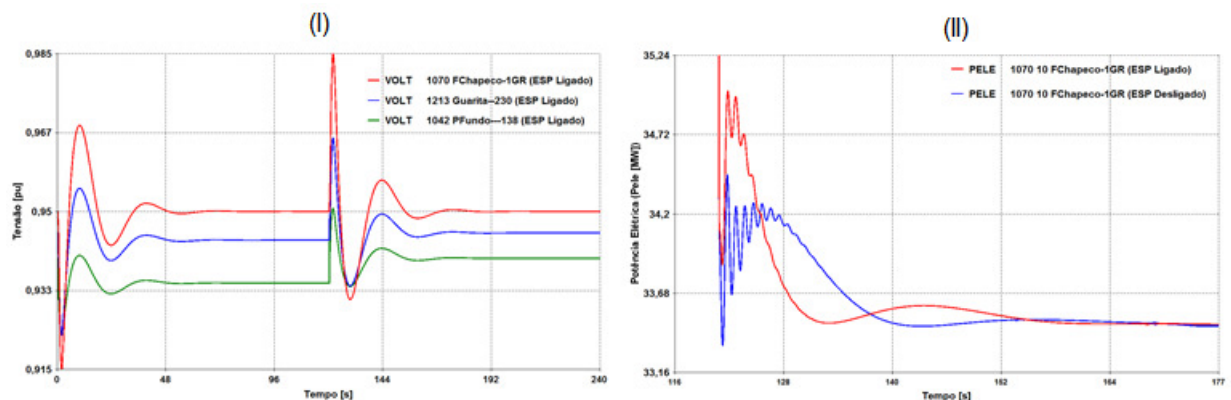


Figura 9 - Perfil de Tensão em pu nos Barramentos da Área Foz do Chapecó com ESP (I) Ligado e Potência Elétrica com ESP Ligado e Desligado (II)

4.0 - CONCLUSÃO

O autorrestabelecimento na atualidade tem sido de grande importância para minimizar o tempo de restabelecimento das cargas dos centros urbanos.

Inicialmente as usinas estão definidas para operar no modo interligado com o sistema e não de forma radial (isolado) como ocorre no processo de recomposição.

É importante enfatizar que para as usinas de autorrestabelecimento que participam de um corredor de recomposição fluente que seus reguladores devem ser comutados do modo de controle de potência (ou modo de sistema interligado) para o modo de controle de frequência (Rede Isolada).

Este artigo mostra o quanto é importante fazer o ajuste otimizado e de forma correta dos valores dos parâmetros dos reguladores a fim de que o sistema permaneça estável e possa restabelecer a maior quantidade de carga na área de interesse durante a fase de recomposição fluente desta área.

O artigo mostra também que o estabilizador de sistemas de potência (ESP) da usina de autorrestabelecimento deve permanecer desligado durante toda a recomposição fluente de sua respectiva área. Mostrou ainda que o estabilizador deve ser ligado a partir do fechamento de áreas de recomposição fluentes de modo a facilitar o restabelecimento de cargas adicionais na fase coordenada de recomposição.

Por fim, deve-se levar em consideração, em trabalhos futuros, as análises linearizadas utilizando o software PacDyn, a fim de se obter o ajuste otimizado para a definição dos valores dos parâmetros dos reguladores.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Projeto de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, "Ajustes dos Parâmetros dos Controladores de Unidades Geradoras Recomposição Fluente do SIN em Estudos de Estabilidade Eletromecânica", BIZON E. G. A., UFRJ, Janeiro de 2015.
- (2) KUNDUR, P., **Power System Stability and Control**, McGraw-Hill, EPRI, Power System Engineering Series New
- (3) Procedimentos de Rede – Módulo 23 – Submódulo 23.3 – Critérios para Estudos Elétricos.
- (4) UHE Foz do Chapecó Energia S. A., Relatório de Ensaio de Comissionamento da UG#2 da UHE Foz do Chapecó, 28/02/2010
- (5) ONS RE-3-138/2013, Estudo para Avaliação dos Procedimentos de Recomposição Fluente da Área Foz do Chapecó, Rio de Janeiro, 2013.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Emilly Gonçalves de Andrade Bizon, nascida no Rio de Janeiro em novembro de 1990. Engenheira eletrônica formada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em março de 2015. Estagiária na Gerência de Estudos Especiais, Proteção e Controle – GPE desde abril de 2013 e em abril de 2015 irá ingressar no Programa de Trainee do ONS.

Antônio de Pádua Guarini, engenheiro eletrônica formado pela Escola Federal de Itajubá (EFEI) em março de 1974 pós-graduado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em agosto de 1981 e em Capacitação em Aspectos Institucionais do Setor Elétrico (CAISE) pela PUC-RJ em 2009. Trabalhou no CEPEL no período de maio de 1974 a novembro de 1996. Trabalha no ONS desde agosto de 1999 principalmente nas áreas de recomposição do SIN, esquemas de controle de emergência e segurança e nos sistemas de CCAT de Itaipu, Madeira e Belo Monte.

Paulo Eduardo Martins Quintão, engenheiro eletrônica formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em 1993, pós-graduado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Trabalhou no CEPEL no período de março de 1994 a junho de 2008. Trabalha no ONS desde julho de 2008 na Área de Estudos Especiais, Proteção e Controle - GPE. Participa em projetos de estabilização de sistemas através de reajustes nos controladores de unidades geradoras, além de estudos pré-operacionais de novos empreendimentos que integrarão o SIN. Atualmente sua principal atividade é o projeto do HVDC do Rio Madeira.

Robson F. S. Dias, graduou-se como Engenheiro Eletrônica pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em 2002. No mesmo ano iniciou o curso de Mestrado em Eletrônica de Potência na COPPE/UFRJ e, em 2003 iniciou o seu Doutorado, que defendeu em 2008. No período de 2009 a 2010, fez parte do Centre for Applied Power Electronics na Universidade de Toronto, Canadá, como pesquisador pós-doutor. Atualmente, é professor da UFRJ. Suas áreas de interesse são aplicação de dispositivos FACTS, Transmissão e Distribuição de Energia, Energias Renováveis e Transitórios Eletromagnéticos.