



**XXI SNPTEE
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

MODELO DE CONTROLE CONJUNTO DE POTÊNCIA DE USINAS HIDRELÉTRICAS PARA O PROGRAMA ANATEM

Guilherme D. Cerqueira*
Eletrobras Furnas

Nilo J. P. Macedo
Eletrobras Furnas

Pedro P. C. Mendes
UNIFEI

RESUMO

Este trabalho apresenta as formas de operação do controle de potência das unidades geradoras (UGs) de usinas hidrelétricas e a modelagem do Controle Conjunto de Potência (CCP) no programa ANATEM [1] através de controle definido pelo usuário (CDU). Através de simulações de emergências em UGs de uma usina são apresentadas as respostas dinâmicas das UGs considerando formas distintas de operação, tais como: todas as unidades operando em controle individual, todas as unidades em controle conjunto de potência e a operação mista, com algumas unidades em individual e outras em controle conjunto.

PALAVRAS-CHAVE

Usinas Hidrelétricas, Controle Conjunto de Potência, Estabilidade Eletromecânica.

1.0 - INTRODUÇÃO

O controle conjunto de potência (CCP) é uma malha de controle adicional concebida para fazer a “repartição de carga” entre as unidades geradoras (UGs) que operam em paralelo, visando suprir um determinado “despacho de carga” programado para a usina. Ele pode ser comparado a um maestro regendo uma orquestra. Dependendo de sua filosofia e característica da usina, busca obter uma melhor eficiência da geração de energia oferecendo maior agilidade e segurança aos operadores.

O regulador de velocidade (RV) de cada unidade geradora busca controlar, além da frequência, a potência ativa gerada, de acordo com uma potência de referência (Pref) originalmente ajustada pelo operador para cada máquina.

Utilizando o CCP o operador informa, no console do CCP ou pela sua interface remota no sistema digital de supervisão e controle SDSC, a potência total que deseja despachar para a usina toda e a lógica do CCP envia automaticamente para o RV de cada unidade geradora a nova Pref calculada. A Figura 1 mostra um esquema simplificado com quatro UGs operando em paralelo e a potência total da usina sendo despachada através do console do SDSC, passando pelas unidades de automação e controle (UAC) e chegando aos reguladores de velocidade de cada unidade.

Sob o aspecto de controle de potência, cada unidade geradora de uma usina de energia elétrica pode operar de duas formas distintas: em controle individual de potência (CIP) ou em controle conjunto de potência (CCP).

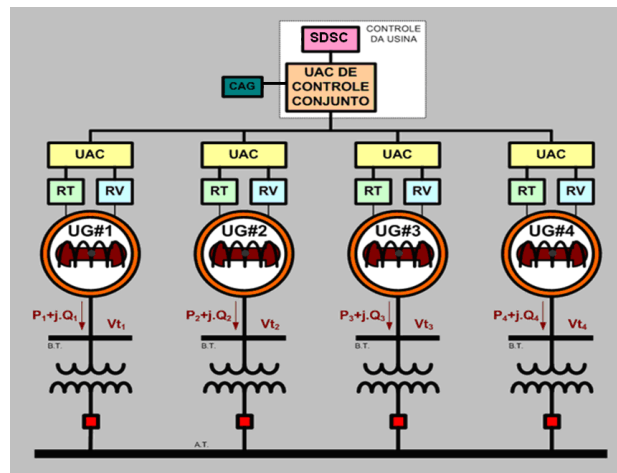


Figura 1 – Esquema simplificado de UGs operando em paralelo e seus controles.

2.0 - CONTROLE INDIVIDUAL DE POTÊNCIA (CIP)

Como o próprio nome diz, neste modo de operação precisa-se ajustar individualmente a referência de potência no regulador de velocidade de cada unidade, ou remotamente pelo SDSC. As unidades podem operar com potências ativas diferentes uma das outras e o ponto de operação de geração total da usina é o somatório das potências ativas de cada UG.

Para variar a geração da usina estando todas as unidades em controle individual, é necessária a alteração manual da referência de potência de cada uma dessas unidades, em um processo mais lento e não sincronizado. O controle de potência, sob o ponto de vista do despacho total da usina, é feito em malha aberta.

Para cada unidade geradora operando em CIP, além de sua rampa de carga previamente parametrizada (MW/s), é necessário fornecer a referência de potência desejada para a unidade (P_{ref} , em MW) e os limites da unidade (MW mínimo e MW máximo), normalmente utilizados em alarmes.

Os valores definidos pelo operador são enviados para a referência do regulador de velocidade de cada unidade. A geração efetiva depende do erro da frequência do sistema elétrico e a potência máxima e mínima que a unidade pode gerar depende do nível do reservatório, das limitações mecânicas do distribuidor e da turbina ou de limitações no gerador.

As UGs operando rebaixadas como compensadores síncronos necessariamente precisam estar em controle de potência individual.

3.0 - CONTROLE CONJUNTO DE POTÊNCIA (CCP)

Neste modo de operação a referência de potência que chega a cada UG é resultante do seguinte cálculo, realizado pela lógica do equipamento de CCP: “A referência de potência para cada UG em CCP é igual a potência ativa desejada para a usina subtraída do somatório das potências geradas pelas unidades em CIP, dividido pelo número de unidades em CCP”.

A figura 2 apresenta o diagrama de blocos simplificado deste CCP típico utilizado em usinas do sistema elétrico brasileiro [2,3,4]. A referência de potência do CCP é efetivamente a potência ativa total que se pretende despachar na usina.

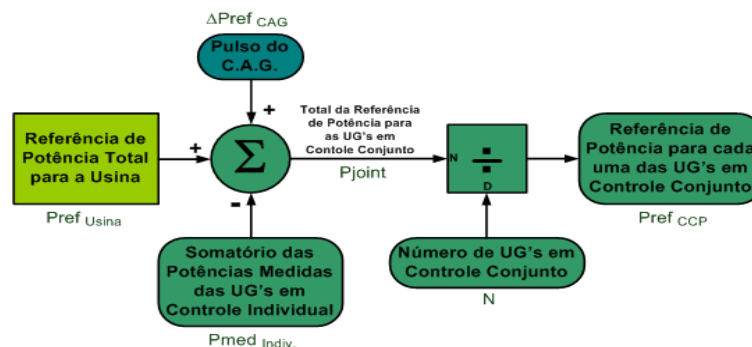


Figura 2 – Diagrama simplificado do CCP.

Neste modo de operação basta ao operador definir a potência de referência para a usina que, automaticamente, os RVs das unidades em CCP receberão igualmente suas referências de potência, conforme cálculo descrito na figura 2. As mudanças nos pontos de operação de todas as unidades serão realizadas em conjunto, de forma sincronizada, caso as rampas de carga de cada RV tenham ajustes iguais. O controle de potência, sob o ponto de vista do despacho total da usina, é feito em malha fechada.

Caso a usina participe do controle automático de geração (CAG) do SIN, e dependendo da filosofia adotada, a referência de potência total da usina poderá receber comandos de pequenos incrementos ou decrementos de referência de potência.

As usinas podem e devem operar com todas as UGs em CCP, salvo quando houver restrições de natureza mecânica ou elétrica que impossibilitem a participação de alguma UG no CCP, ficando esta em CIP.

Quando todas as unidades estão operando em CCP, a referência de potência da usina é dividida pelo número de unidades em operação e o valor resultante é enviado automaticamente para as referências de potência dos reguladores de velocidade de cada unidade.

Quando se pretende passar uma UG de CIP para CCP, sugere-se sempre colocá-la antes com carga mais próxima possível do valor que terá após entrar em CCP, evitando subidas e descidas de potência desnecessárias.

A saída de unidades do CCP pode ocorrer por decisão do operador da usina, retirada automática da unidade do CCP em função de algum tipo de defeito que impeça a unidade responder de forma adequada aos comandos ou perda da unidade geradora por atuação de alguma proteção. Neste caso, ao passar a UG de CCP para CIP, não deve haver variação na programação da usina, caso a potência ativa desta UG não varie durante a manobra.

Se ocorrer uma perda de unidade geradora da usina (abertura do disjuntor principal), o CCP irá comandar o aumento da geração das outras unidades em controle conjunto para compensar a potência perdida.

4.0 - REPRESENTAÇÃO DO CCP NO PROGRAMA ANATEM

Para a análise do desempenho do controle conjunto de potência de uma usina no programa de estabilidade ANATEM, são necessários os seguintes procedimentos:

- No programa de fluxo de potência é preciso substituir o gerador equivalente, que geralmente representa as unidades em operação, por uma representação individualizada de cada unidade geradora. O uso do gerador equivalente até poderia ser considerado para representar uma usina que utiliza CCP, desde que todas as UGs estejam em controle conjunto e não ocorra nenhuma perda das mesmas, ou seja, para simulações de eventos externos;
- Caso se deseje iniciar as simulações dinâmicas com as UGs em CCP, as gerações de potência ativa de todas as unidades deverão ter o mesmo valor, caso contrário deve-se esperar um tempo de simulação necessário para as unidades estabilizarem-se no mesmo valor de geração antes de inserir qualquer distúrbio;
- O modelo do controle conjunto de potência deverá ser introduzido no arquivo de simulação dinâmica (*.stb) através do comando para controladores não específicos (DCNE).

Utilizando-se da flexibilidade do Controlador Definido pelo Usuário (CDU) que o software ANATEM proporciona, foi feita a modelagem do Controle Conjunto de Potência para uma usina com quatro UGs (sistema teste simplificado - Brazilian Birds – UNIFEI – UHE Gavião). A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos do CCP e das interligações com os CDUs dos reguladores de velocidade de cada unidade geradora.

Os dados necessários para inicializar esse modelo são os seguintes:

- Potências ativas das UGs, PELE -> importadas diretamente do fluxo de potência convergido (caso base);
- DESPACH (potência total desejada para a usina) -> referência do CCP que é considerada quando uma ou mais unidades estiverem nesse modo de operação;
- PREF1 a PREF4 -> referências das unidades em Controle Individual de Potência (CIP), inicializadas pelo comando DEFVAL com os valores importados das potências ativas das UGs, PELE;
- C1 a C4 -> sinais lógicos para indicar se as UGs estão em CIP (=0) ou em CCP (=1).

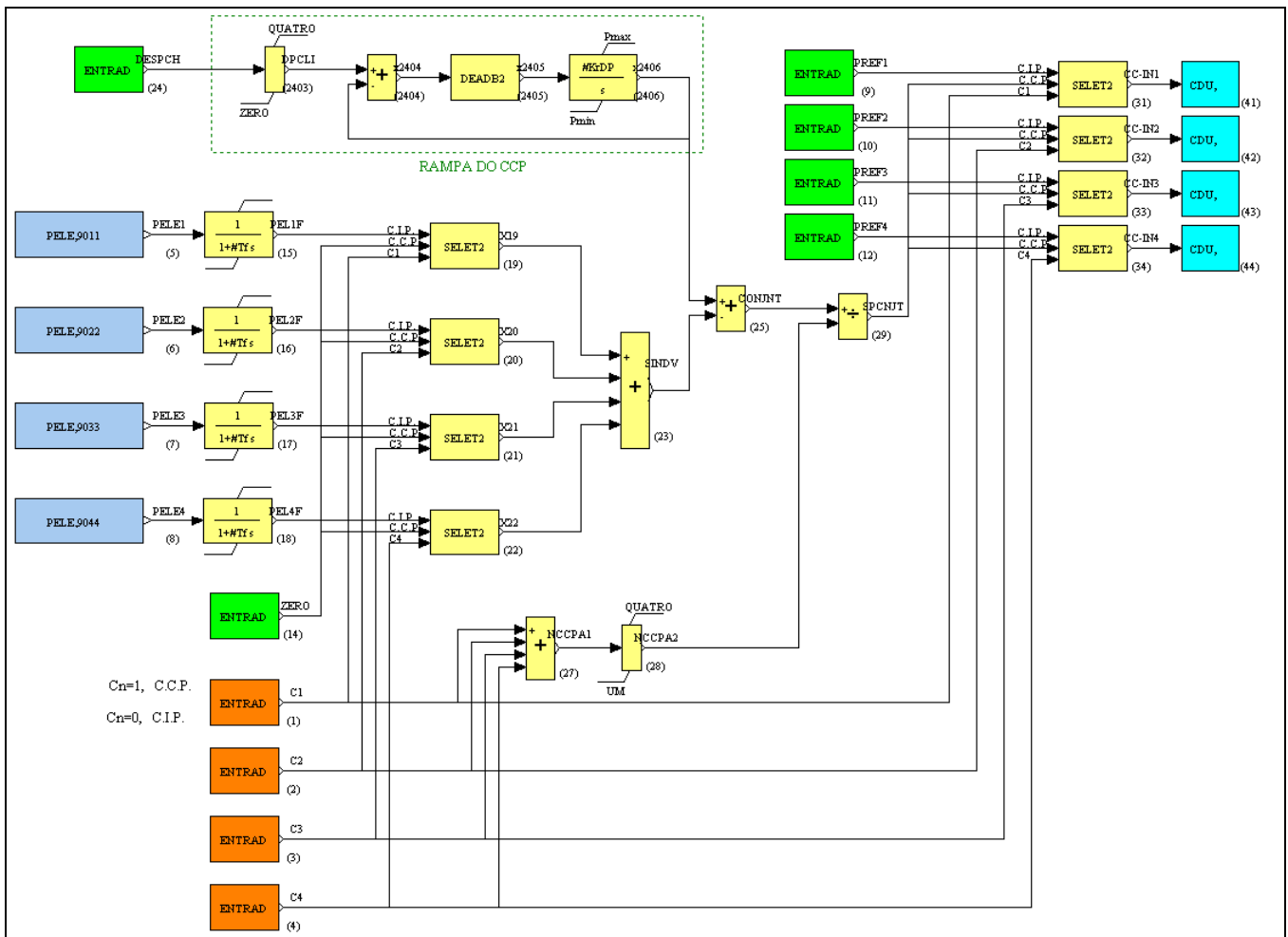


Figura 3 – Diagrama da lógica do CCP desenhado através do programa CDUEdit.

Os dados exportados, através do comando “DLOC”, são as referências de potência para os reguladores de velocidade de cada unidade geradora.

A rampa de carga do CCP foi modelada de forma a reproduzir a filosofia existente nos projetos reais e a Figura 3 mostra a sua representação, após a entrada da referência de potência total da usina (DESPCH).

Foi modelado em CDU, no programa Anatem, o RV de cada unidade geradora da UHE Gavião para criar as condições de receber, através do comando DLOC, os valores de referência de potência calculados pelo CCP, para as UGs em CCP, ou as referências de potência definidas individualmente para as UGs em CIP.

As rampas de carga dos reguladores de velocidade das unidades geralmente não são consideradas nos modelos convencionais de RV e poderiam ser representadas, por simplicidade, nas saídas do modelo do CCP. Como já havíamos modelado cada regulador de velocidade em um CDU próprio, optamos por colocar na entrada de cada um destes a rampa de carga. No equipamento real, a rampa normalmente é implementada no próprio RV.

As rampas de carga consideradas nesse trabalho possuem a característica inclinação constante, do tipo MW/s ou pu/s constantes, conforme encontrada nas usinas do SIN. Por exemplo, considerando-se uma rampa de 1 pu/ 60 s, na aplicação de uma variação de 0,5 pu na referência do controle de potência, a saída da rampa deverá levar 30 segundos para a referência atingir o valor final.

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos completo do regulador de velocidade. Esse modelo considera as unidades da usina operando em controle de potência, com um estatismo de 5%, e realimentações de potência e frequência. Esse modo de controle corresponde à forma mais usual das usinas hidrelétricas operarem sincronizadas a um sistema elétrico interligado.

Apesar de não ter sido implementado neste trabalho, indicamos no diagrama da Figura 2 a existência do bloco de pulsos do CAG entrando no somatório da referência de despacho da usina, existente nas usinas que participam do controle de carga-frequência do SIN e utilizam os comandos via CCP.

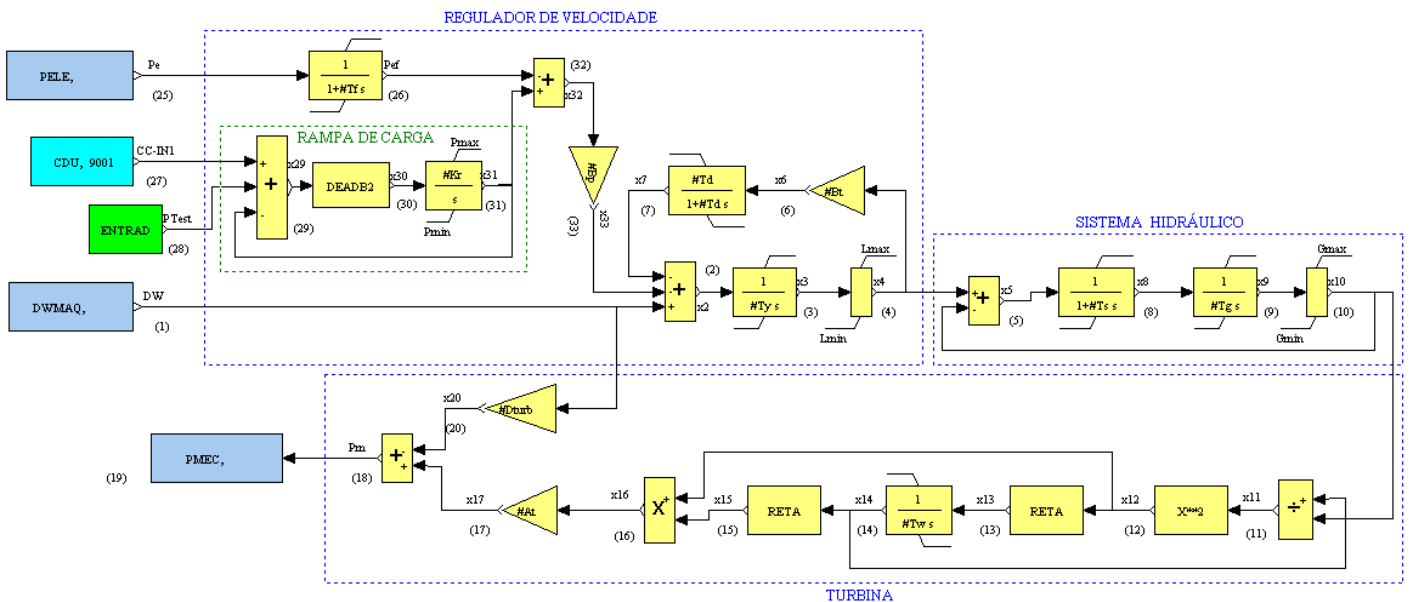


Figura 4 – Diagrama de blocos do modelo CDU do regulador de velocidade utilizado na UHE Gavião.

5.0 - SIMULAÇÕES

Para verificar o desempenho dinâmico do CCP foram realizadas diversas simulações de manobras e de emergências em UGs da UHE Gavião. O objetivo das simulações foi verificar a resposta total da usina e de suas UGs em condições operativas distintas. Foram consideradas situações com todas as unidades operando em CCP, situações com todas as unidades operando em CIP e situações com a metade da usina operando em CCP e a outra metade em CIP. A Tabela 1 apresenta o resumo de algumas situações consideradas nas análises dinâmicas.

Tabela 1 – Resumo dos casos simulados.

Caso	Evento	Figuras
1	Passagem de CIP para CCP	5 e 6
2	Degrau na referência do CCP - Todas as UGs em CCP	7 e 8
3	Perda da UG01 - Todas as UGs em CIP	9 e 10
4	Perda da UG01 - Todas as UGs em CCP	11 e 12
5	Perda da UG04 - UGs 01 e 02 em CCP; UGs 03 e 04 em CIP	13 e 14

5.1 Caso 1 - Passagem de CIP para CCP

As Figuras 5 e 6 mostram a variação da geração total da usina e da potência elétrica de cada unidade geradora considerando uma situação prévia em que as UGs possuíam gerações de potência ativa diferenciadas antes de ligadas ao CCP. Ao se passar as unidades de CIP para CCP (UG01 e UG02 em $t=1s$, UG03 em $t=100s$ e UG04 em $t=200s$) não se verifica uma variação significativa da potência total da usina, podendo ser observada a equalização da potência ativa nas UGs, comandadas pelo CCP.

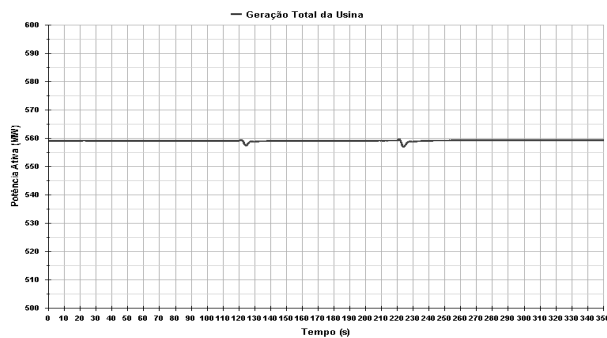


Figura 5 – Geração total da usina.

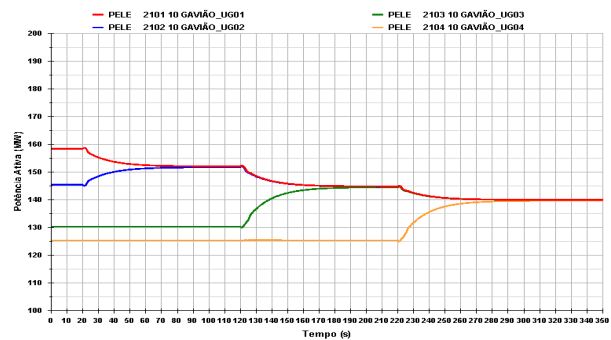


Figura 6 – Geração de cada unidade geradora.

5.2 Caso 2 – Degrau na referência do CCP – Todas as UGs em CCP

As Figuras 7 e 8 mostram a variação da geração total da usina e da potência elétrica de cada unidade geradora da usina para um degrau de 8,48% (47,4 MW) na referência do CCP, em 10 segundos de simulação, na situação em que todas as UGs estão em CCP. Neste caso, considerou-se uma rampa de carga na referência de potência do CCP com ganho típico da ordem de $K_r=1\text{pu}/80\text{s}$ e uma rampa de carga na referência do RV com ganho típico de $K_r=1\text{pu}/60\text{s}$.

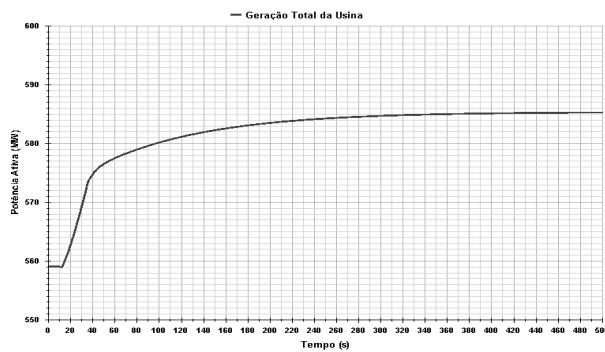


Figura 7 – Geração total da usina.

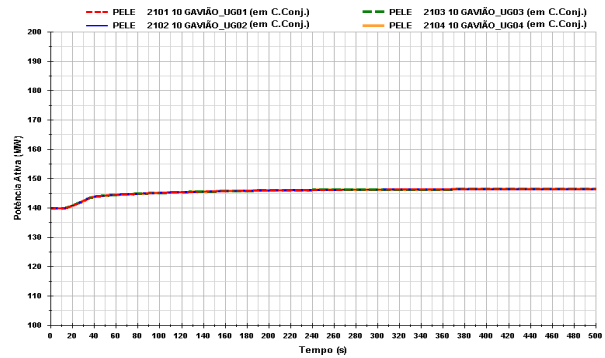


Figura 8 – Geração de cada unidade geradora.

5.3 Caso 3 - Perda da UG01 - Todas as UGs em CIP

As Figuras 9 e 10 mostram a variação da geração total da usina e da potência elétrica de cada unidade geradora na situação em que todas as UGs operam em CIP e ocorre a perda da UG01. Pode-se observar que sem a ação do CCP a potência total da usina só é corrigida pela ação da regulação primária dos reguladores de velocidade permanecendo com um erro de despacho da usina, sendo necessária uma ação manual do operador para retornar para o valor de despacho original.

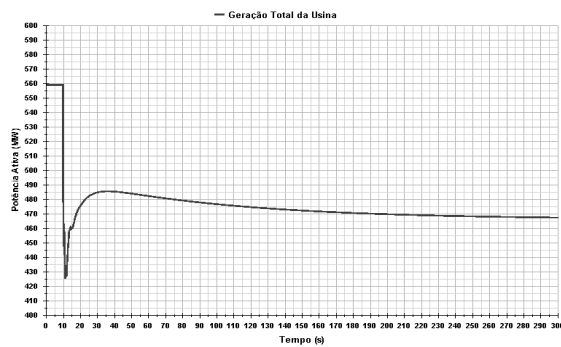


Figura 9 – Geração total da usina.

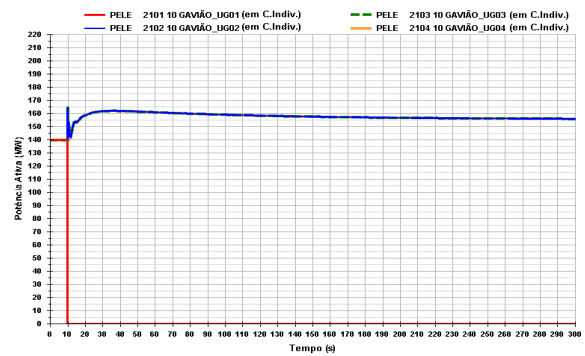


Figura 10 – Geração de cada unidade geradora.

5.4 Caso 4 – Perda da UG01 – Todas as UGs em CCP

As Figuras 11 e 12 mostram a variação da geração total da usina e da potência elétrica de cada unidade geradora na situação em que todas as UGs operam em CCP e ocorre a perda da UG01. Pode-se observar a ação da regulação primária do regulador de velocidade de cada unidade, aumentando a geração em função do desvio de frequência, e a ação mais lenta do CCP no sentido de recuperar a potência total da usina, resultando em um erro de despacho bem menor que o observado na situação anterior, em que todas as unidades operavam em CIP. Este erro só não zerou porque as unidades em CCP bateram em seu limite individual superior de geração.

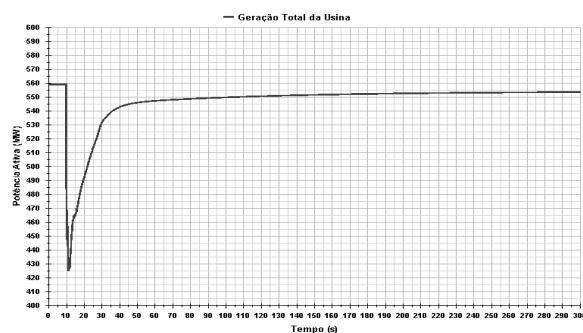


Figura 11 – Geração total da usina.

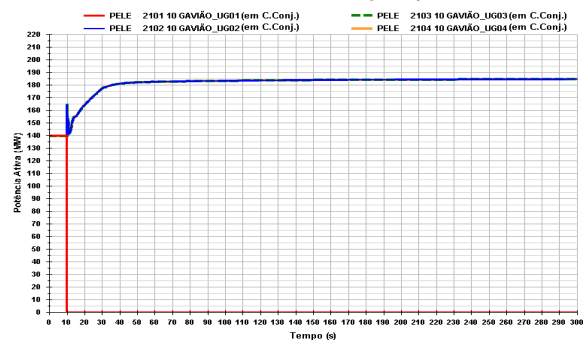


Figura 12 – Geração de cada unidade geradora.

5.5 Caso 5 - Perda da UG04 - UGs 01 e 02 em CCP; UGs 03 e 04 em CIP

As Figuras 13 e 14 mostram a variação da geração total da usina e da potência elétrica de cada unidade geradora na situação em que metade das UGs opera em CCP e a outra metade em CIP, quando ocorre a perda da UG04. Observa-se a ação da regulação primária do regulador de velocidade de cada unidade, aumentando a geração em função do desvio de frequência e a ação mais lenta do CCP, pois somente as UGs 01 e 02 ficaram sob controle conjunto de potência após o distúrbio.

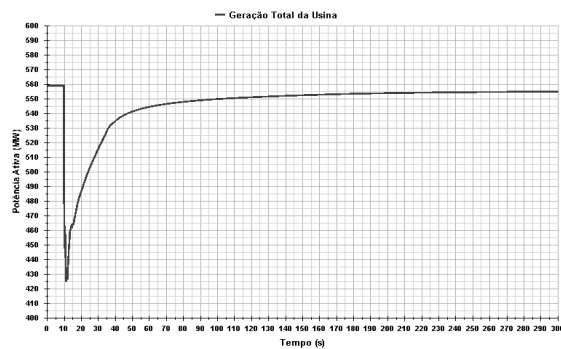


Figura 13 – Geração total da usina.

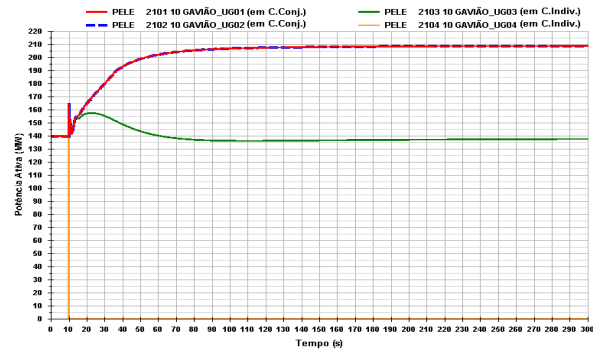


Figura 14 – Geração de cada unidade geradora.

6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma descrição geral do sistema de controle conjunto de potência utilizado em usinas hidrelétricas, com destaque nos modos de operação e na representação das rampas de carga do regulador de velocidade (RV) e do controle conjunto de potência (CCP).

Análises da variação da geração nas usinas do sistema interligado não são consideradas nos estudos normalmente realizados. Sob o ponto de vista de impacto no sistema elétrico, as variações lentas das potências não implicam em perda de estabilidade ou problemas de controle de tensão na malha principal do sistema. Entretanto, nas análises de “longo termo”, que envolvam rampas de carga e de geração, a representação correta da malha de controle conjunto de potência é fundamental para uma avaliação precisa do desempenho dinâmico do sistema.

Quando todas as unidades operam em CCP ou em CIP, a representação usual de um gerador equivalente para representar toda a usina pode ser utilizada para estudos de distúrbios no sistema, externos à usina. O uso de um gerador equivalente em análises de perda de UGs da usina só é válido nos casos em que todas as suas unidades estão operando em CIP.

Nas análises dinâmicas, quando parte das UGs opera em CIP e outra parte em CCP, é necessária, então, a representação das unidades individualizadas com a modelagem detalhada do CCP.

No caso de todas as unidades estarem operando em CCP, além da representação da rampa de carga do RV, também deve ser considerada a representação da rampa de carga do CCP. Uma opção para simplificar o modelo é considerar apenas a representação de uma rampa de carga e corrigir o seu ganho para considerar o efeito das duas rampas em série. No caso de todas as unidades operarem com CIP, basta representar a rampa do RV.

O tempo de resposta total da usina depende não apenas das rampas de carga, mas também de toda a dinâmica do RV, da turbina e do erro de frequência do sistema. Se o erro de frequência for zero, o valor final corresponde ao valor da referência. Se ocorrer uma variação da frequência do sistema no instante da variação da referência de potência, o valor final poderá ser menor, caso a frequência suba, ou maior, caso a frequência caia. O motivo dessa diferença entre a referência de potência e a potência final deve-se ao fato dos reguladores de velocidade também possuírem uma realimentação do erro de frequência do sistema.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CERQUEIRA, GUILHERME DOMINGUES DE; “Análise do Controle Conjunto de Potência Ativa de Usinas Hidrelétricas”, Monografia do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos de Potência, CESE/UNIFEI, setembro de 2009.
- (2) UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho - Modernização - Sistema Digital de Supervisão e Controle - Unidade de Aquisição e Controle Conjunto - UACCJ, Diagrama Lógico, ALSTOM, 21/05/2008.
- (3) UHE Mascarenhas de Moraes - Modernização das Unidades 05 a 08 - Controle Conjunto da Usina - Concepção do Controle Conjunto, Especificação Funcional, ALSTOM, 08/02/2002.
- (4) UHE Corumbá - Sistema de Controle Conjunto de Potência Ativa da Usina Hidroelétrica de Corumbá, Especificação Funcional, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 22/05/1996.
- (6) GUIMARÃES, CARLOS HENRIQUE COSTA; “Simulação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Fenômenos de Longa Duração”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, dezembro de 2003.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Guilherme Domingues de Cerqueira

Nascido em Santos/SP em 29 de julho de 1977.

Graduado (2002) em Engenharia Elétrica: UFJF, Juiz de Fora/MG; Pós-graduado (2005) em MBA - Gestão Empresarial: FGV, Juiz de Fora/MG; Pós-graduado (2009) em Sistemas Elétricos de Potência: CESE-UNIFEI, Itajubá/MG ;

Empresa: ELETROBRAS FURNAS, desde 2004.

Engenheiro da Divisão de Estudos Especiais da Operação, do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação.

Nilo José Pereira de Macedo

Nascido em Macaé/RJ em 01 de outubro de 1954.

Graduado (1979) em Engenharia Elétrica: PUC, Rio de Janeiro/RJ; Mestrado (1992): COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro/RJ

Empresa: ELETROBRAS FURNAS, desde 1980.

Engenheiro da Divisão de Estudos Especiais da Operação, do Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação.

Pedro Paulo de Carvalho Mendes

Nascido em Itajubá/MG em 02 de julho de 1956.

Graduado (1977) em Engenharia Elétrica: EFEI, Itajubá/MG; Mestrado (1989): EFEI, Itajubá/MG; Doutorado (1999): COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.

Engenheiro da Balteau Produtos Elétricos Ltda, atual Alstom (1978-1980) e da Eletrobrás (1980-1989).

Professor do Instituto de Sistemas Elétricos e Energia da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI (desde 1989).