



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

FI/GAT/15  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO-IV**

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

**OTIMIZAÇÃO DO CAG<sub>60</sub> E CAG<sub>50</sub> DE ITAIPU VIA ALGORITMO GENÉTICO INTEGRANDO MATLAB E ANATEM**

**(\*)Robson A. de Oliveira, Rui Jovita G. C. da Silva, Antonio Sertich, Alberto de A. Bastos, Paulo Neis e Rodrigo G. Pimenta**

**ITAIPU BINACIONAL**

**RESUMO**

Este trabalho visa apresentar os resultados das otimizações do Controle Automático de Geração (CAG) dos setores de 60 Hz e 50 Hz de Itaipu. Estas otimizações foram obtidas via algoritmo genético (AG) integrando Anatem e Matlab. A função objetivo utilizada na otimização do CAG<sub>60</sub> buscou minimizar o *overshoot* e o erro de regime permanente entre a geração e a referência de potência ativa, enquanto a utilizada na otimização do CAG<sub>50</sub> buscou minimizar o erro de regime permanente do desvio de frequência e a quantidade de pulsos de controle emitidos. Os resultados das otimizações foram comprovados em ensaio de campo e os ajustes foram implantados em caráter definitivo durante o ano de 2014, sendo demonstrada uma sensível melhoria de desempenho na operação de ambos CAG de Itaipu.

**PALAVRAS-CHAVE**

CAG, Otimização, Algoritmos Genéticos, Anatem, Matlab, SCADA/EMS.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é composta por 20 unidades geradoras com potência nominal de 700 MW cada uma, totalizando 14.000 MW. Em função da diferença de frequência entre Brasil e Paraguai, metade delas opera em 60 Hz e metade em 50 Hz. A UHE-Itaipu atualmente é responsável pelo atendimento de aproximadamente 14% da energia elétrica consumida no Brasil e 79% da energia consumida no Paraguai.

O controle automático de geração de cada setor de Itaipu é realizado pelos aplicativos CAG<sub>60</sub> e CAG<sub>50</sub> do sistema Scada/EMS. No setor de 60 Hz de Itaipu o CAG<sub>60</sub> trabalha como repartidor de carga (denominado REPA), e no setor de 50 Hz o CAG<sub>50</sub> opera como controlador da frequência do sistema no modo frequência constante (CF).

Assim sendo, este trabalho apresenta a otimização dos aplicativos de Controle Automático de Geração dos setores de 50 Hz e 60 Hz de Itaipu. Os modelos dos CAGs foram implementados no software Anatem e a otimização foi obtida via Matlab, com o uso de algoritmo genético.

**2.0 - CAG DO SISTEMA SCADA/EMS DE ITAIPU**

O Controle Automático de Geração de Itaipu é composto por dois sistemas de controle idênticos, que tem como função complementar a ação dos reguladores de velocidade dos setores de 50 Hz e 60 Hz da usina. Este controle, do tipo digital, é feito de forma automática, sobre as unidades selecionadas nos seus respectivos setores, por meio de pulsos que atuam no carga-frequência das unidades, permitindo assim regular a potência ativa [1].

(\*) Av. Tancredo Neves, 6731 – Edifício de Produção – OPSE.DT – CEP 85866-900 Foz do Iguaçu, PR – Brasil  
Tel: (45) 3520-2597 – Fax: (45) 3520-2706 – Email: [ralmir@itaipu.gov.br](mailto:ralmir@itaipu.gov.br)

No setor de 50 Hz, as máquinas de Itaipu operam interligadas com o sistema paraguaio e com o Elo CC de Furnas, formando uma área de controle controlada por Itaipu. Nesta área de controle o CAG<sub>50</sub> de Itaipu opera no modo Frequência Constante (CF), ou seja, o CAG<sub>50</sub> tem como objetivo principal ajustar a geração das unidades a fim de manter a frequência do sistema dentro de uma faixa estipulada [1].

O setor de 60 Hz de Itaipu, quanto ao controle automático de geração, é considerado parte da área de controle do COSR-SE. Assim sendo, apesar de denominado CAG, na maior parte do tempo este não realiza a ação de regulação secundária, pois opera como controle conjunto de potência, em malha aberta. Como controle conjunto, ou Repartidor de Carga, o CAG<sub>60</sub> possui 2 diferentes sub-modos: (a) Repartidor Local (*default*), (b) Repartidor Remoto; sendo a única diferença entre os 2 sub-modos o local onde a referência de geração do setor de 60 Hz é estabelecida, localmente em Itaipu ou remotamente pelo COSR-SE. Porém, durante alguns momentos o CAG<sub>60</sub> chega a operar em malha fechada, quando o despachante informa, ou quando recebe remotamente, uma nova referência de geração até que o valor seja atingido.

## 2.1 CAG<sub>60</sub> no modo REPA Local

Quando o CAG<sub>60</sub> está operando no modo REPA local e uma nova referência de geração do setor de 60 Hz é estabelecida, o erro de controle definido como Erro de Controle de Usina (ECU) é momentaneamente calculado como o desvio entre a produção atual e a produção programada pelo despachante, conforme apresentado na equação (1). Este erro é dividido pelo tempo total da rampa, também estipulada pelo despachante, e pelo número de unidades conectadas ao CAG, até que a geração do setor alcance pela primeira vez o valor desejado [1].

$$ECU = P_a - P_s \quad (1)$$

Onde:

- ECU: Erro de Controle de Usina, [MW];
- P<sub>a</sub>: Produção Atual, [MW];
- P<sub>s</sub>: Produção Programada, [MW].

Quando o CAG<sub>60</sub> atinge pela primeira vez o valor desejado de geração para o setor de 60 Hz, o mesmo volta a operar em malha aberta, deixando as unidades geradoras apenas sob regulação primária, mas realizando ao mesmo tempo a repartição de carga entre as unidades.

## 2.2 CAG<sub>50</sub> no Modo CF

O CAG<sub>50</sub> opera no modo CF controlando a frequência do sistema de 50 Hz. Para isso utiliza o valor da característica natural da área controlada, também denominada *Bias*. Assim, neste modo de operação do CAG<sub>50</sub>, o erro de frequência bruto multiplicado pelo *Bias* é denominado TACE [1], conforme equação (2).

$$TACE = Bias \times \text{Erro de frequência} \quad (2)$$

Se o valor de TACE for superior à banda morta (MINACE), o CAG<sub>50</sub> realiza a filtragem do TACE através de dois tipos de filtros: Exponencial cuja saída XWMACE corresponde à filtragem por um filtro passa baixa de primeira ordem com constante de tempo de 80 s, e Média Móvel, cuja saída EWMACE corresponde à média das 30 últimas amostras [1]. A composição destes dois filtros gera o erro de controle de área filtrado (TMPACE), conforme equação (3), onde ACEGN1 está ajustado em 0,6 e ACEGN2 em 0,4.

$$TMPACE = ACEGN1 \cdot EWMACE + ACEGN2 \cdot XWMACE \quad (3)$$

O filtro média móvel apresenta bom desempenho na redução de ruído branco, ao mesmo tempo em que preserva a resposta ao degrau. A quantidade de ruído reduzida é igual à raiz quadrada do número de pontos no filtro.

### 2.2.1 Lógica de filtragem do erro de controle

O valor filtrado do erro de controle (FACE) utilizado para as ações de controle do CAG<sub>50</sub> não é simplesmente o valor de TMPACE, e segue uma lógica complexa que depende do erro bruto TACE, do erro filtrado TMPACE, do erro acumulado AA (*Accumulated Ace*) e de vários parâmetros de ajustes denominados FK<sub>i</sub>, de acordo com a Tabela 1. Essa lógica torna a ação do CAG<sub>50</sub> completamente não linear e influi decisivamente na dinâmica do controle do CAG<sub>50</sub> [1].

TABELA 1 – Condições de filtragem do CAG<sub>50</sub>

Teste	Valor do FACE
TMPACE x TACE < 0	0
TACE  ≥ FK5	TACE
FK2 ≤  TACE  < FK5	TMPACE
TACE  < FK2 e AA ≥ FK1	TMPACE
TACE  < FK2 e AA < FK1	0

Esta tabela nos mostra que, independente dos valores, o CAG<sub>50</sub> não executa nenhuma ação se os sentidos de correção são diferentes entre TACE e TMPACE, condição que também faz zerar o valor de AA. O filtro é utilizado somente quando o valor de TACE está entre FK2 e FK5. Quando TACE é superior a FK5 o filtro é totalmente desconsiderado. Quando TACE é inferior a FK2, o filtro é utilizado somente se AA for maior que FK1. Quando AA é menor que FK1 o CAG<sub>50</sub> considera que não há erro de controle.

Quando o valor de TACE está entre MINACE e FK2 o CAG<sub>50</sub> calcula o valor de AA, que tem por objetivo corrigir pequenos erros persistentes na frequência que poderiam permanecer em regime permanente. AA acumula o valor de TMPACE através do ganho FK3, de acordo com a equação (4).

$$AA(t) = AA(t-1) + FK3 \cdot TMPACE \cdot \frac{DELTA}{60} \quad (4)$$

Considerando que a eliminação da filtragem deve ser evitada, pois o CAG<sub>50</sub> é um controle secundário e não deve interferir na regulação primária, foi ajustado o valor de FK5 = *Bias* x 5 Hz. Ou seja, o filtro será mantido normal se a frequência estiver na faixa de 45 Hz a 55 Hz.

### 2.3 Controle de Potência das Unidades Geradoras

O erro de controle de cada setor é dividido entre as unidades que operam no modo Auto do CAG, calculando, a cada intervalo de 4 segundos (ciclo de execução do CAG), o erro de controle da unidade (UCE). O UCE é dado pela diferença entre a potência desejada para a unidade (POD) e sua potência atual (PWGENX), conforme mostrado na equação (5).

$$UCE(k) = POD(k) - PWGENX(k) \quad (5)$$

Onde:

- UCE(k): Erro de Controle da unidade no instante k;
- POD(k): Potência Desejada para a unidade no instante k;
- PWGENX(k): Potência Atual da unidade no instante k.

Depois de calculado o valor do UCE, este passa por um compensador *lead/lag* (parâmetros T5 e T6), resultando no erro de controle modificado (MUCE), conforme apresentado na Figura 1. Este compensador tem como finalidade de compensar o efeito *lag/lead* do regulador com queda transitória característico da turbina hidráulica, permitindo obter uma resposta dinâmica mais rápida [1].

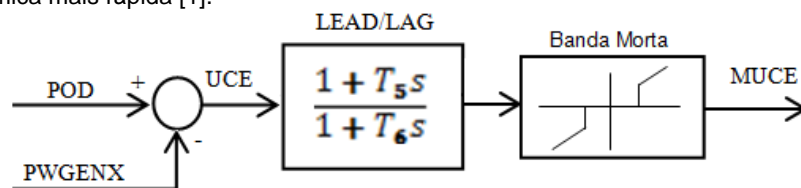


FIGURA 1 – Diagrama de blocos contendo o processo de cálculo do UCE.

Conforme mostrado na Figura 1, após o UCE ter passado pelo compensador *lead/lag*, este erro (MUCE) é comparado com o parâmetro Minuce (banda morta), evitando atuações excessivas e consequentemente desgaste dos reguladores de velocidade da unidade geradora (UG). O valor do MUCE definirá então o tamanho do pulso a ser enviado às unidades geradoras. Se o erro for maior que K9 se enviará um pulso longo (4 s), caso contrário se enviará um pulso curto (1 s). Determinado o pulso, o CAG envia o sinal às unidades terminais remotas (UTR) das unidades geradoras. As UTRs, por sua vez, são responsáveis por fazer a transformação do pulso emitido pelo CAG no sinal a ser aplicado no carga/frequência (C/F) da unidade. Cabe salientar que o CAG adota intervalos mínimos de espera entre pulsos longos consecutivos (PCLONG) e entre pulsos curtos consecutivos (PCSHRT), ambos definidos como múltiplos ajustáveis de ciclos de execução.

### 3.0 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos (AG) são procedimentos computacionais adaptativos largamente empregados em busca e otimização, cujo funcionamento é inspirado nos processos naturais de seleção e refinamento genético [2]. Na Figura 3 é ilustrado um modelo de funcionamento do AG típico, com as principais etapas do procedimento iterativo: inicialmente um conjunto ou “população” de soluções candidatas (“indivíduos”) é gerado, sendo as soluções avaliadas em relação à função objetivo, de forma a definir uma medida de aptidão ou “fitness” de cada indivíduo; a partir desta população executa-se um procedimento estocástico de seleção, cuja probabilidade é proporcional à aptidão de cada indivíduo e aplica-se um operador de recombinação ou “cruzamento” com uma probabilidade, geralmente elevada; na sequência aplica-se um operador de variação ou “mutação” com determinada probabilidade, geralmente baixa; completada esta sequência, obtém-se um novo conjunto de soluções candidatas, e o processo é repetido até que se atinja um critério de parada pré-estabelecido.

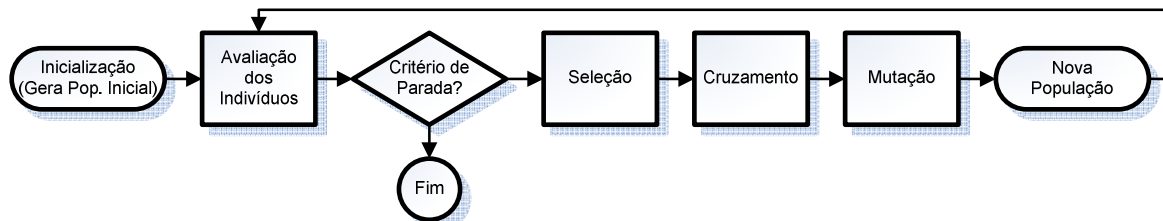


FIGURA 3 – Fluxograma ilustrativo do algoritmo genético básico.

Uma das características mais relevantes do AG é o uso de um conjunto de soluções candidatas que são modificadas ao longo da execução do algoritmo no sentido de obter melhores valores para a função objetivo. Outro ponto importante é que o AG representa as variáveis de decisão do problema em uma forma codificada, metaforicamente chamada de “cromossomo”. O AG é particularmente interessante em problemas para os quais não é conhecido um algoritmo exato eficiente, e quando a aplicação de procedimentos de busca enumerativos torna-se inviável devido à explosão combinatória. Uma desvantagem em relação aos algoritmos exatos é que o AG não assegura convergência para o ótimo global do problema. Por outro lado, as suas maiores vantagens são a robustez e a flexibilidade, visto que o único requisito para aplicá-lo a um dado problema de otimização é que seja estabelecida uma função objetivo, ou que pelo menos seja possível comparar as soluções candidatas entre si.

O AG utilizado possui as seguintes características:

- Seleção por Torneio Binário: pares de indivíduos são tomados aleatoriamente da população. Aquele que possuir a maior aptidão será copiado para a matriz de acasalamentos, sendo este procedimento repetido até que a matriz esteja completa;
- Cruzamento: foi escolhido o cruzamento uniforme, onde cada bit nos cromossomos descendentes é criado copiando os bits de um dos cromossomos pais, segundo uma máscara de cruzamento gerada aleatoriamente. Nas posições onde houver bits 1 na máscara, o bit é copiado do cromossomo pai 1 e nas posições da máscara onde houver 0 o bit é copiado do cromossomo pai 2, conforme Figura 4a. O processo é repetido trocando-se a posição dos pais para a geração do segundo filho. Uma nova máscara é gerada aleatoriamente para cada par de cromossomos pais a ser cruzado [3];
- Mutaçao: a mutação é a alteração aleatória e ocasional do valor de qualquer posição da *string*, Figura 4b. Esta alteração ocorre de acordo com uma probabilidade prefixada [3].

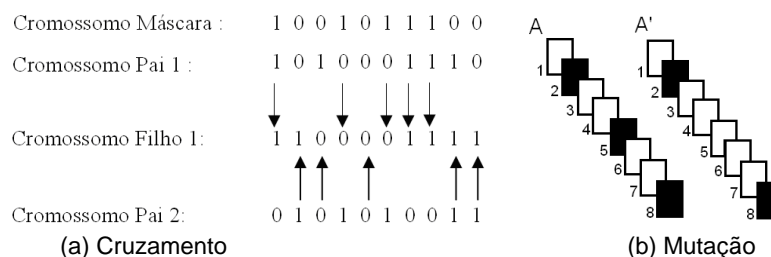


FIGURA 4 – Algoritmos genético: (a) processo de cruzamento uniforme; (b) processo de mutação

Para as otimizações realizadas, definiram-se as seguintes probabilidades:

$$P_{\text{cruzamento}} = 50\% \quad (\text{faixa recomendada de 50 a 80\%})$$

$$P_{\text{muta\c{c}ao}} = 1\% \quad (\text{faixa recomendada de 1 a 10\%})$$

O número de indivíduos da população também é muito importante na obtenção de bons resultados, pois possibilitam um maior espaço de busca para as soluções. O número de gerações também é importante para obter a convergência, porém, a partir de uma determinada geração em que há convergência dos resultados, a população não muda consideravelmente. Dessa forma, definiu-se a população como sendo de 100 indivíduos, com 50 gerações para o CAG<sub>50</sub> e 15 gerações para o CAG<sub>60</sub>. Outro fator fundamental para o êxito do AG é a definição de uma adequada Função de Aptidão, que medirá a qualidade da solução numérica da solução representada por um indivíduo da população.

#### 4.0 OTIMIZAÇÃO DOS CAGs

Os CAGs foram implementados no Anatem para não se perder a dinâmica do sistema [4], fundamental na otimização do controle secundário, possibilitando utilizar a base de dados do ONS nas simulações. Desta forma, integrou-se o aplicativo Anatem ao Matlab, de maneira a utilizar o Matlab para executar o AG, gerar os ajustes, executar o Anatem e calcular a função de aptidão e o Anatem para a simulação dinâmica, conforme Figura 5. Cabe ressaltar que devido ao elevado tempo de simulação utilizou um equivalente dinâmico para simplificar o sistema de 60 Hz brasileiro utilizado pelo Anatem [5].

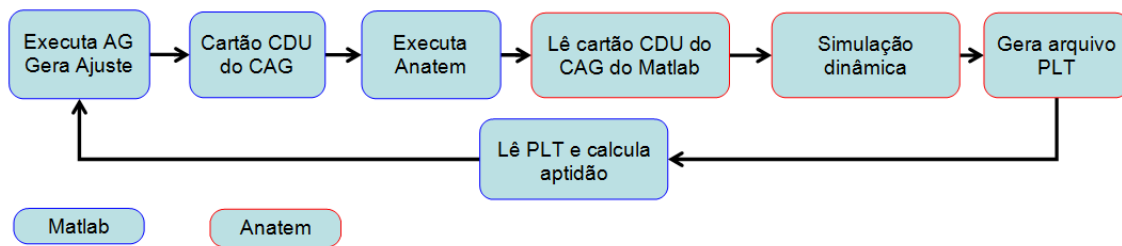


FIGURA 5 – Fluxograma da execução da otimização

#### 4.1 Faixa de ajustes do parâmetros

Deve-se ter muito cuidado na aplicação do AG, principalmente na definição das faixas de variação dos parâmetros a serem ajustados, bem como na definição da função de aptidão (função objetivo) que definirá os melhores indivíduos (melhores ajustes). Assim sendo, definiram-se os parâmetros conforme a Tabela 2 a seguir.

TABELA 2 – Parâmetros e suas faixas de ajuste

Parâmetro	CAG <sub>50</sub>				CAG <sub>60</sub>			
	Faixa		Passo	Resolução	Faixa		Passo	Resolução
	Mínimo	Máximo			Mínimo	Máximo		
FK1	100	1.000	100	10	-	-	-	-
FK2	100	1.000	100	10	-	-	-	-
T5	50	200	10	16	50	200	10	16
T6	10	49	3	14	10	48	2	20
K9	10	50	5	9	10	50	5	9
PCSHRT	1	5	1	5	1	5	1	5
Minuce	4	8	1	5	4	6	1	1

Definiu-se o tempo de simulação com sendo de 1.200 s, pois as variações são normalmente realizadas em 600 s e espera-se mais 10 minutos para acomodar a resposta da máquina. Considerou-se a potência inicial da UG em 550 MW.

#### 4.2 Função objetivo ou função de aptidão

A função de aptidão é utilizada para se fazer a seleção dos indivíduos mais aptos, os quais terão maiores chances de cruzamento e, por conseguinte, terão maiores chances de se perpetuarem na seguinte geração. A definição dessa função é de suma importância em AG e devem ser escolhidas cuidadosamente [3].

##### 4.2.1 Função objetivo para o CAG<sub>50</sub>

O mais importante para o setor de 50 Hz é que se tenha o menor erro de frequência em regime permanente. Outro ponto importante é que não se tenha o trabalho desnecessário da cadeia de controle da máquina e, desta forma, se optou por ter o menor número possível de pulsos no sentido contrário à variação. No evento específico de rampa de carga no Elo CC não se quer variações transitórias de frequências superiores a 0,1 Hz. Assim sendo, esses

parâmetros foram definidos como os mais importantes na função objetivo. A equação (6) a seguir ilustra a função de aptidão definida para o CAG<sub>50</sub> em CF.

$$\text{Aptidão} = 100\% - 60\% \times E\_RP - 20\% \times E\_Trans - 20\% \times E\_pulso\_cont \quad (6)$$

Sendo:

- F: frequência do sistema;
- F<sub>Final</sub>: frequência ao final da simulação;
- E<sub>Trans</sub>: erro de frequência transitório;
- E<sub>RP</sub>: erro de regime permanente da frequência;
- E<sub>pulso\_cont</sub>: erro de pulsos contrários à variação.

#### 4.2.2 Função objetivo para o CAG<sub>60</sub>

O CAG<sub>60</sub> opera normalmente no modo repartidor de carga local, em malha aberta, porém, quando novos patamares de cargas são solicitadas pelo ONS, este atua em malha fechada momentaneamente. Assim sendo, como no setor de 60 Hz não se deseja erro de regime, de forma a evitar intervenções sucessivas do despachante, e nem se desejam ultrapassagens (*overshoot*), esse dois parâmetros foram definidos como os mais importantes na função objetivo.

Nas mudanças de referência de geração no setor de 60 Hz sempre é definido um tempo de rampa. Dessa forma, definiu-se o erro em relação ao tempo de rampa estabelecido como o outro parâmetro a ser utilizado para distinguir os melhores indivíduos.

Um método de avaliar rampas em controle é através do erro estacionário [6], assim sendo definiu-se um erro de 5% como o ideal para a diferença entre o POD (Potência Desejada) e potência ativa da unidade geradora.

Outro parâmetro utilizado na aptidão foi o número de pulsos, pois com a malha fechada o CAG tende a enviar um excessivo número de pulsos, de forma a garantir o menor erro de regime e *overshoot*. Assim sendo, definiu que o ideal é que a rampa tenha somente pulsos curtos de 5 MW com uma margem de +10%. A equação (7) a seguir ilustra a função de aptidão definida para o CAG<sub>60</sub> em REPA Local.

$$\text{Aptidão} = 100\% - 60\% \times E\_RP - 23\% \times \text{Overshoot} - 10\% \times E\_tsub - 5\% \times E\_est - 2\% \times E\_pulso \quad (7)$$

Onde:

- E<sub>RP</sub>: erro de regime permanente;
- E<sub>est</sub>: erro estacionário em resposta a rampa;
- E<sub>pulso</sub>: erro do número de pulso em relação à rampa somente com pulso curto;
- E<sub>tsub</sub>: erro em relação ao tempo de subida.

Definiu-se o tempo de rampa como sendo 600 s, pois este é o tempo padrão de rampa de potência atualmente praticado no setor de 60 Hz de Itaipu, e o degrau de potência como sendo 50 MW/UG, estando a UG inicialmente em torno de 550 MW. Isto dará uma rampa de 450 MW em 10 min para 9 unidades em Auto no CAG<sub>60</sub>.

#### 4.3 Resultado do AG para CAG<sub>50</sub> em CF

A partir das definições anteriores chegou-se ao ajuste ótimo da Tabela 3 para os parâmetros do CAG<sub>50</sub>.

TABELA 3 – Resultado do AG para o CAG<sub>50</sub> em CF

Parâmetro	Melhor indivíduo (ajuste novo)	Ajuste Atual (ajuste antigo)	Faixa do AG	
			Mínimo	Máximo
T5	50	80	50	200
T6	49	40	10	49
K9	35	20	10	50
PCSHRT	4	3	1	5
Minuce	6	7	4	8
FK1	100	300	100	1.000
FK2	700	300	100	1.000
Aptidão	100	88	-	-

]

#### 4.3.1 Teste de campo

Escolheu-se, entre os diversos testes realizados, a rampa de  $\pm 500$  MW no Elo CC de Furnas para exemplificar a otimização do CAG<sub>50</sub>. Percebe-se que as rampas somente geraram pulsos curtos, Figura 6. A frequência foi bem controlada e manteve-se dentro da faixa de 0,1 Hz, Figura 7.

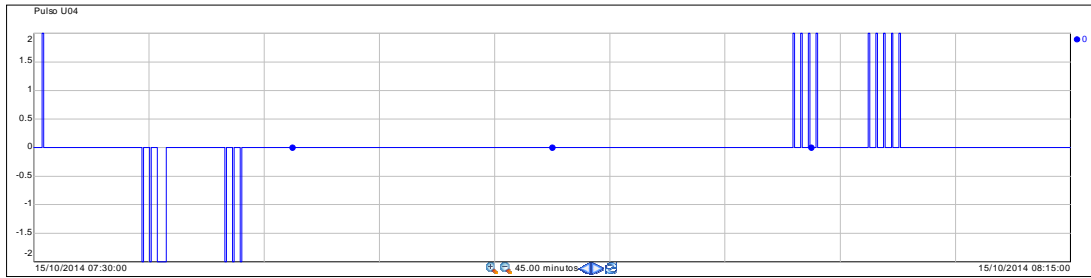


FIGURA 6 – Rampa de  $\pm 500$  MW – Pulsos para a UG U05 – Ajuste novo

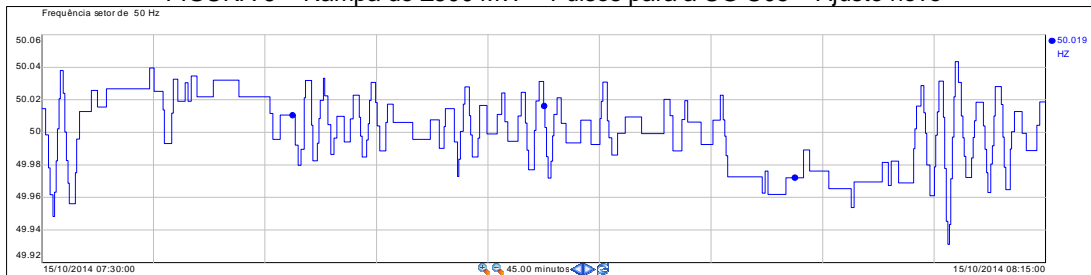


FIGURA 7 – Frequência do setor de 50 Hz de Itaipu – Ajuste novo

Se compararmos o desempenho do CAG<sub>50</sub> antes do reajuste percebe-se que durante a rampa há a emissão de muitos pulsos e também de pulsos contrários a variação, Figura 8. Em relação à frequência não se percebe diferença no comportamento, Figura 9.

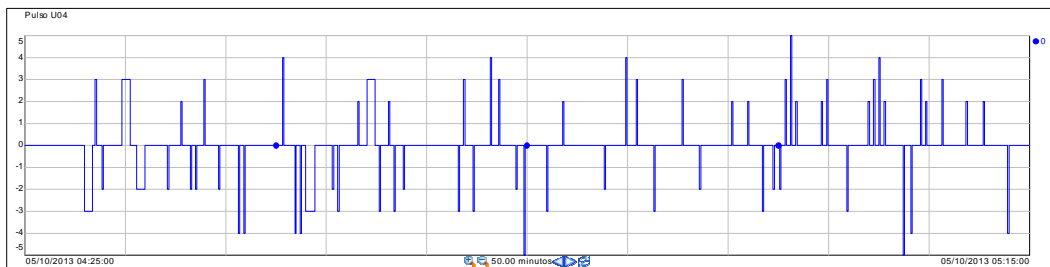


FIGURA 8 – Rampa de  $\pm 500$  MW – Pulsos para a UG U05 – Ajuste antigo

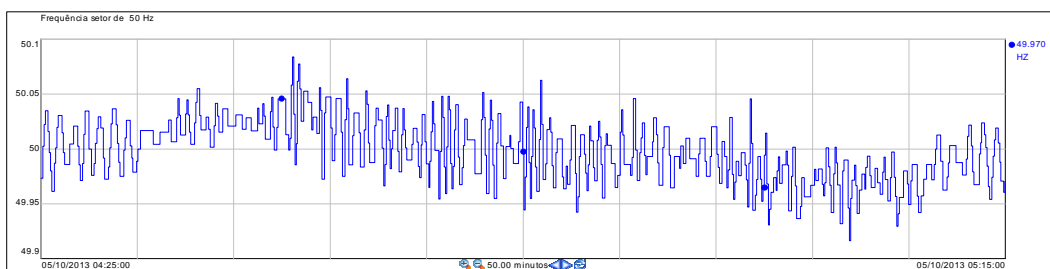


FIGURA 9 – Frequência do setor de 50 Hz de Itaipu – Ajuste antigo

Os testes anteriores mostraram que os novos ajustes geraram um desempenho mais homogêneo da emissão de pulsos, com uma significativa redução na quantidade de pulsos emitidos, sem que se comprometesse o controle da frequência. Neste sentido foi realizada uma média da quantidade de pulsos emitida pelo CAG<sub>50</sub> com o ajuste antigo e o ótimo (novo), mostrado na Tabela 4 a seguir. Observa-se nesta tabela que houve uma redução de cerca de 1.700% no total de pulsos emitidos pelo CAG<sub>50</sub> com o novo ajuste proposto, reduzindo de uma média de 19.000 pulsos/dia para cerca de 1.100 pulsos/dia. Em relação aos pulsos longos, houve uma redução no total de pulsos emitidos da ordem 3.800%, reduzindo para menos de 2 comandos por dia contra cerca de 65 do ajuste antigo.

TABELA 4 – Pulsos emitidos pelo CAG50 em um período de 2 meses

Ajuste	Total de Pulsos			Pulsos Longos			
	Total em 2 meses	Pulsos/dia	Redução	Total em 2 meses	Longo/dia	Longo/total	Redução
Ajuste Antigo	1.161.326	19.355	-	3.902	65	0,34%	-
Ajuste Novo	68.262	1.138	1.701%	102	1,7	0,15%	3.823%

#### 4.4 Resultado do AG para CAG<sub>60</sub> em REPA Local

A partir das definições do AG chegou-se ao ajuste ótimo da Tabela 5 para os parâmetros do CAG<sub>60</sub>.

TABELA 5 – Resultado do AG para o CAG<sub>60</sub> em REPA Local

Parâmetro	Ajuste Ótimo	Ajuste Antigo	Faixa do AG	
			Mínimo	Máximo
T5	70	75	50	200
T6	32	30	10	48
K9	15	20	10	50
PCSHRT	5	4	1	5
Minuce	6	5	4	6
Aptidão	98,32	85,83	-	-

#### 4.4.1 Teste de rampa de carga em REPA Local

A Figura 10a a seguir ilustra o resultado do teste real para o ajuste ótimo e a Figura 10b o resultado para o ajuste antigo. Pode-se perceber que o erro estacionário é menor e mais estável no ajuste ótimo, bem como o *overshoot* é bem controlado, o que gerou erro de regime nulo com os parâmetros otimizados.

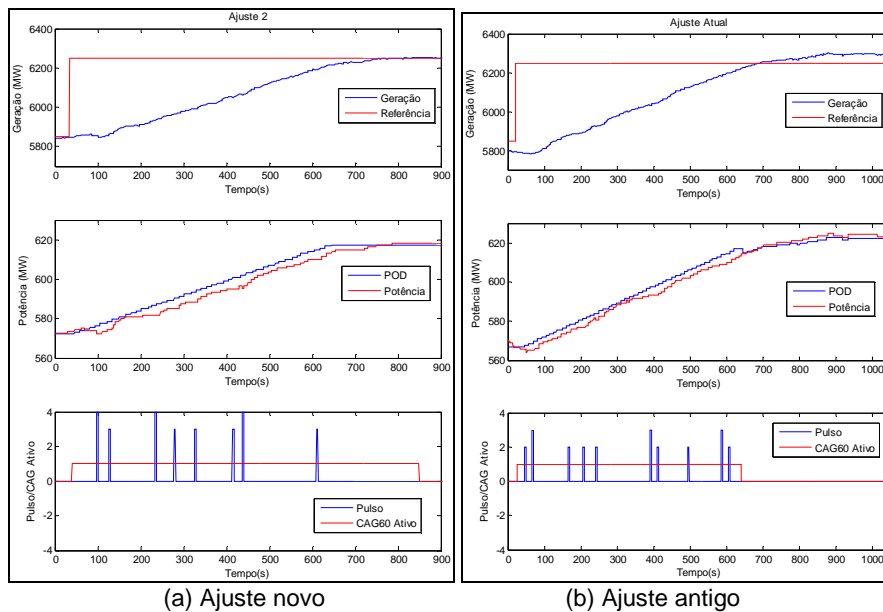


FIGURA 10 – Ensaio de campo para rampa de 50 MW/UG: (a) ajuste ótimo; (b) ajuste antigo

## 6.0 CONCLUSÕES

Apesar das diversas alterações realizadas nos CAGs de Itaipu objetivando melhorar seus desempenhos, desde que iniciaram a operação, havia a constatação que as atuações dos CAGs estavam causando um esforço de controle excessivo no sistema de regulação de velocidade. Para reduzir este esforço de controle no sistema de regulação de velocidade e para garantir um desempenho com erro de controle zero, foi realizada a otimização dos principais parâmetros dos CAGs. Esta redução do esforço de controle nas máquinas de Itaipu é considerada de extrema importância, tendo em vista que a atuação excessiva do CAG tem influência na vida útil das máquinas [7].

A otimização foi realizada integrando as simulações do Anatem com o Matlab, onde o Anatem foi utilizado para a simulação dinâmica do sistema e o Matlab para executar o algoritmo genético, efetuando a cada iteração o cálculo



dos parâmetros de controle que se desejavam otimizar para realimentar o Anatem. O tempo médio de simulação de cada otimização foi de 30 horas, num desktop com CPU Intel Core i5 de 3,30 GHz.

Os ensaios de campo e a experiência operativa desde a implantação dos ajustes comprovaram o melhor desempenho dos CAGs com os ajustes definidos neste trabalho, eliminando os pulsos no sentido contrário à variação apresentando e reduzindo o tempo para alcançar o valor desejado. Esses novos ajustes já foram implantados em definitivo nos CAG dos dois setores de Itaipu. Vale ressaltar que a redução no total de pulsos emitidos, observada desde então, no setor de 50 Hz está em torno de 1.700,0%, bem como a redução do número de pulsos longos está em cerca de 3.800%, sendo que o controle da frequência e do intercâmbio permanecem adequados.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ITAIPU BINACIONAL. Descrição Técnica do Controle Automático de Geração. Itaipu Binacional. OP.DT/GSS - CAG 001/2001, Foz do Iguaçu, PR. 2004.
- [2] Goldberg, D.E. - Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, 1989.
- [3] Sertich Koehler, A. R. - Projeto de estabilizadores robustos de sistemas de potência via algoritmos genéticos em ambiente computacional de alto desempenho. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Junho de 2000.
- [4] Oliveira, R. A. e Montemezzo, J. F. - Implementação no Anatem do Controle Automático de Geração do Setor 60Hz de Itaipu no Modo REPA Local, XII SEPOPE, Foz do Iguaçu (PR), 2014.
- [5] DIAS, F. A. - Equivalente Dinâmico do Sistema Interligado Nacional Brasileiro: Agregação dos Reguladores de Tensão e de Velocidade. Monografia (Graduação) - UNIOESTE, Foz do Iguaçu, PR. 2011.
- [6] Ogata, K. - Engenharia de Controle Moderno, 4ª edição, São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- [7] D'Agostini Neto, A. e outros – Method for Evaluation of the Impact of CAG Operating Mode in the Lifetime of a Francis Hydro Generating Unit Components, HydroVision Brasil, São Paulo, SP. 2014.

## 8.0 DADOS BIOGRÁFICOS



Robson Almir de Oliveira: Natural de Conceição das Pedras, MG. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1997 e conclui o mestrado em sistemas elétricos de potência em 2001, ambos pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Trabalha na Itaipu Binacional desde 2000 na divisão de estudos elétricos e normas, envolvendo-se principalmente com a realização de estudos elétricos, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle (sistemas Scada/EMS, CAG, CAT, regulação primária de tensão e velocidade). Também é professor assistente da UNIOESTE desde 2002, ministrando aulas de Proteção, Operação e Estabilidade de sistema elétrico de potência.