



**GRUPO IV
ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)**

**MODELAGEM E AJUSTE DO CONTROLE CONJUNTO DE TENSÃO
DE ITAIPU 50 Hz E 60 Hz**

Rui Jovita G.C. da Silva * Fernando de Menezes Silva Hugo A. Laranjeira Duarte
Juan C. Rodriguez Chaparro Rodinei Justino

Itaipu Binacional

RESUMO

Este artigo apresenta o trabalho desenvolvido na modelagem e ajuste dos controles conjuntos de tensão (JVC) dos setores 50 Hz e 60 Hz da Usina de Itaipu. É apresentada uma descrição detalhada do funcionamento do controle conjunto de tensão, assim como todos os aspectos considerados na modelagem e o critério utilizado para o ajuste. São apresentadas simulações digitais e ensaios realizados para o desenvolvimento da modelagem e para os ajustes efetuados nos dois equipamentos, assim como registros reais do comportamento apresentado antes e depois do referido ajuste.

PALAVRAS-CHAVE

controle secundário- modelagem-- controle conjunto- controle de tensão

1.0. INTRODUÇÃO

Em grandes usinas é usual a presença de sistemas de controle conjuntos de potência e tensão que visam facilitar o trabalho em tempo real dos operadores quando da necessidade de alteração nas condições de operação da usina, assim como garantir que todas as unidades conectadas ao controle conjunto estejam operando em condições muito próximas umas das outras.

A Usina de Itaipu é composta de dois setores, cada um com 9 unidades geradoras de 700 MW, um em 50 Hz e outro em 60 Hz. As unidades têm tensão nominal de 18 kV e são paraleladas em 500 kV. O setor de 60 Hz é ligado ao sistema de transmissão em 765 kV na subestação de Foz do Iguaçu e o setor 50 Hz é ligado

ao Elo de Corrente Contínua, também na subestação de Foz do Iguaçu, e, através da subestação Margem Direita ao sistema elétrico da ANDE, no Paraguai.

Os setores operam independentes um do outro e cada um deles possui seus próprios controles conjuntos, que também são independentes, um de potência e um de tensão. O controle conjunto de tensão (JVC) tem por objetivo efetuar a mudança na tensão dos barramentos de 500 kV, fazendo com que através de um único equipamento seja alterada a tensão de operação de todas as unidades de um setor. O JVC de Itaipu tem como particularidade o fato de atuar como regulador automático de tensão dos barramentos de 500 kV, isto é, ele controla automaticamente a tensão de operação das unidades geradoras de forma a manter constante a tensão no 500 kV. Devido a esta característica torna-se importante para a operação do sistema, principalmente quanto ao aspecto de estabilidade e controle de tensão, que estes equipamentos estejam ajustados de modo a garantir um bom desempenho quando solicitado.

Este artigo tem por objetivo apresentar o trabalho realizado para o levantamento das características dinâmicas do JVC, desenvolvimento do modelo para simulações digitais em programas de estabilidade, e definição e implantação de novos ajustes nos mesmos visando um melhor desempenho sob o ponto de vista do Sistema Interligado.

**2.0. O CONTROLE CONJUNTO DE TENSÃO
DE ITAIPU [1]**

O JVC de Itaipu exerce duas funções:

- O controle automático da tensão no barramento de 500 kV;

- A divisão de forma igual, por todos os geradores operando em controle conjunto, da potência reativa solicitada pelo sistema.

O princípio de controle utilizado, cujo diagrama em blocos simplificado é mostrado na Figura 1, é de um laço de controle para a tensão da barra de 500 kV sobreposto ao laço de regulação da corrente reativa de cada gerador. O sinal de saída do primeiro laço representa a variação da referência de corrente reativa para os geradores. Como o laço de controle de corrente reativa é sobreposto ao laço de controle de tensão terminal, sua saída altera a tensão de referência do regulador de tensão.

A tensão de referência do JVC (V500 ref) é ajustada pelo operador através do console. Esta tensão de referência é comparada com o valor atual de tensão na barra de 500 kV (V500), sendo que nesta comparação também pode ser considerada uma compensação de queda de tensão de forma a controlar a tensão em um ponto mais interior ao sistema. O ajuste da impedância de compensação determina a distância entre a barra de 500 kV e o ponto que se deseja controlar a tensão. Após esta comparação é gerado um sinal de correção apropriado para acabar com o erro da tensão controlada, este sinal indica a variação na referência de corrente reativa (ΔIR ref) comum à todos os geradores que estão operando em controle conjunto, os que estão operando em controle individual não participam dessa repartição. Esta variação é somada com o sinal de referência de corrente reativa, individual para cada gerador (IR ref), obtida pelo valor médio das correntes reativas de todos os geradores que estão em controle conjunto.

O regulador de corrente reativa, existente para cada gerador individualmente, faz a comparação entre a corrente reativa de referência (IR ref) e o valor atual de corrente reativa do gerador (IR), somando-se a esta comparação o sinal de variação na referência de corrente reativa (ΔIR ref). O erro proveniente da soma destes três sinais é amplificado (ΔU) e enviado para o módulo gerador de pulsos. Estes pulsos controlam, no sentido de aumentar ou abaixar, o potenciômetro motorizado que determina a tensão de referência do regulador de tensão da unidade geradora (VT ref), acionando a partir daí o laço de regulação de tensão dos geradores.

Para ser incluído no controle conjunto de tensão é obrigatório que o gerador esteja conectado ao controle conjunto de potência, além disso, é necessário esperar 5,0 segundos após um gerador ter sido conectado para poder conectar um novo gerador. Um gerador é incluído ou retirado de controle conjunto pela liberação ou bloqueio dos pulsos, sendo que existem lógicas automáticas para bloqueio dos pulsos e para transferência dos geradores de controle conjunto para

controle individual. Uma destas lógicas monitora a diferença entre a referência e o valor atual de corrente reativa, comutando o gerador para controle individual se esta diferença torna-se superior a 0,1 pu durante 30 s. Dessa forma, as seguintes condições transferem o controle do gerador para individual:

- Relé de erro de corrente reativa atuado;
- Falha de alimentação;
- Gerador não sincronizado na barra;
- Desconexão normal;
- Gerador não está em controle conjunto de potência.

Os pulsos emitidos no sentido de aumentar a tensão de referência de um gerador são bloqueados quando:

- O gerador está em controle individual;
- O potenciômetro motorizado que determina sua referência de tensão está na posição máxima;
- O limitador de máxima corrente de excitação está atuado.

Já os pulsos emitidos no sentido de abaixar a tensão de referência de um gerador são bloqueados quando:

- O gerador está em controle individual;
- O potenciômetro motorizado que determina sua referência de tensão está na posição mínima;
- O limitador de mínima corrente de excitação está atuado.
- O limitador de subexcitação está atuado.
- O limitador de ângulo de carga está atuado.

Além disso, quando a tensão na barra de 500 kV for inferior a 0,8 pu por 150 ms em pelo menos uma das fases o JVC é desligado, passando todas as unidades para controle individual, sendo necessária a ação humana para retornar as unidades para controle conjunto.

O desempenho do JVC é determinado principalmente pelo comportamento do módulo gerador de pulsos, cujo princípio de funcionamento é descrito a seguir. O sinal de erro recebido do regulador de corrente reativa (ΔU) é comparado com a banda-morta (ϵ) na entrada do gerador de pulsos e, caso seja maior, vai haver comando para emissão dos pulsos. Os pulsos são emitidos com intervalo $T1$ e duração $T2$, e para possibilitar uma regulação mais rápida na ocorrência de grandes desvios, o intervalo entre os pulsos pode ser reduzido através do ajuste do fator de influência do erro de controle (α). O efeito desse fator é que seu aumento torna a seqüência de pulsos mais densa para grandes valores de erro e menos densa para pequenos valores de erro, em casos extremos um comando de pulsos contínuo é possível. O intervalo entre pulsos Ti resultante da influência de α é dado pela equação:

$$Ti = T1 \cdot (1 - \alpha \cdot \Delta U) \quad (1)$$

Onde o valor de ΔU é o erro considerado em porcentagem. Por exemplo, com o ajuste $\alpha = 0,2 \%$ o

gerador de pulsos emitirá comando contínuo quando o sinal de erro for maior ou igual a 5 %.

A duração máxima dos pulsos (T2) que torna impossível uma resposta sub-amortecida do regulador depende do valor ajustado da banda-morta (ϵ) e da relação K entre a duração do pulso e a alteração resultante na variável controlada [2], sendo assim, T2 deve obedecer a relação:

$$T2 < \frac{2 \cdot \epsilon}{K} \quad (2)$$

Onde o valor de K é dado em %/s.

3.0. DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM

O modelo para simulação foi constituído a partir do levantamento da função de transferência de cada módulo do JVC de forma individual através de ensaios em bancada, fazendo-se posteriormente a agregação dos modelos de cada módulo. O diagrama em blocos do JVC é mostrado na Figura 2, sendo válido tanto para o 50 Hz quanto para o 60 Hz, havendo apenas diferença de ajuste entre os dois setores.

Na Figura 2 os parâmetros apresentados significam:

Kvj – ganho do transdutor da tensão do 500 kV [V/pu]

Kv – ganho do transdutor da tensão terminal [V/pu]

Voj – ganho do JVC [V/V]

Vpj – ganho do JVC [V/V]

Taj – constante de tempo do JVC [s]

Kir – ganho do transdutor de potência reativa [V/pu]

α - fator de influência do erro de controle [%]

ϵ - largura da banda-morta [V]

Tpm – constante de tempo do potenciômetro motorizado do regulador de tensão [s]

T1 – tempo básico de espaçamento entre pulsos [s]

T2 – duração dos pulsos [s]

Inicialmente foi desenvolvido o modelo para o programa MICRODIN, que objetiva a análise de estabilidade dinâmica. Neste desenvolvimento encontrou-se um grande problema que foi representar o gerador de pulsos, porque este exigia uma constante de tempo de integração de 1 ms. Com uma constante de tempo tão baixa torna-se impossível a simulação de um tempo suficientemente grande para avaliar o desempenho do JVC, visto que a maior influência do JVC é sentida na dinâmica de médio e longo prazo. Sendo assim, o modelo foi simplificado substituindo o gerador de pulsos por um ganho equivalente que proporciona a mesma movimentação no potenciômetro motorizado ao longo do período do pulso, por exemplo, para o caso do 60 Hz um pulso de duração T2 e intervalo T1 altera a tensão de referência em 0,062 %, o ganho equivalente proporciona a mesma alteração no tempo T1 + T2, que é o período de geração dos pulsos.

Na modelagem realizada para o programa ANATEM manteve-se a mesma representação simplificada para os gerador de pulsos. A Tabela 1 mostra os valores encontrados nos parâmetros para os modelos de 60 Hz e 50 Hz, deixados pelo fabricante quando do comissionamento dos equipamentos.

TABELA 1 – PARÂMETROS DOS MODELOS

| Parâmetro | 60 Hz | 50 Hz |
|------------|-----------|-----------|
| Kvj | 6,6 V/pu | 6,8 V/V |
| Voj | 7,86 V/V | 10,0 V/V |
| Vpj | 2,31 V/V | 3,0 V/V |
| Taj | 1,06 s | 0,99 s |
| Kir | 9,08 V/pu | 9,43 V/pu |
| α | 0,0 % | 0,0 % |
| ϵ | 0,01 V | 0,075 V |
| Tpm | 56 s | 56 s |
| T1 | 4,44 s | 6,26 s |
| T2 | 0,23 s | 0,23 s |

4.0. CRITÉRIO DE AJUSTE

Quando de otimizações em reguladores de tensão de máquinas síncronas normalmente utiliza-se a representação do sistema a vazio, visto que a resposta ótima a vazio é muito próxima da resposta ótima no sistema. Dessa forma para a otimização do ajuste do JVC também foi utilizado sistema a vazio. Esta consideração também foi feita em função da dificuldade de obter referências sobre este tipo de equipamento, embora se encontre com facilidade publicações [3,4,5] sobre controle secundário de tensão em sistemas interligados.

Com o sistema a vazio foram estabelecidas duas condições para desempenho do JVC:

- O tempo para que as tensões no 500 kV estejam ajustadas para proceder a recomposição do sistema, quando de uma perda total em cada setor, deve ser o menor possível;
- A resposta do JVC ao degrau deve ser superamortecida, ditada pela condição (2) acima. Isto significa que a variação provocada por um único pulso não pode inverter o sinal de erro para o gerador de pulsos de tal forma que ultrapasse a duas vezes a banda-morta.

Pode-se verificar pela Figura 2 que o ajuste no JVC pode ser feito tanto através dos parâmetros do regulador de tensão, com características de avanço-atraso, como através dos parâmetros do gerador de pulsos, sendo que qualquer ajuste realizado no regulador de tensão para torná-lo mais rápido não será eficiente se o gerador de pulsos não emitir pulsos com frequência maior. Desta forma, qualquer ajuste que vise melhorar o desempenho do JVC passa pelo reajuste do gerador de pulsos, que inclusive possui um

parâmetro apropriado para esta função, o fator de influência do erro de controle (α), portanto, foi através do ajuste deste parâmetro que se buscou melhorar o desempenho dinâmico do JVC

Foi verificado através de simulações que cada pulso produz uma variação de 0,066 % na tensão do 500 kV, tanto no 50 Hz quanto no 60 Hz, com taxa de variação de 0,1 %/s. Com esses valores o item (b) do critério acima é satisfeito quando a banda-morta é superior a 0,033 % de tensão do 500 kV, ou seja, maior que 0,017 V. O tempo de duração dos pulsos deve ser então inferior a 0,66 s.

Para o atendimento do item (a) do critério sabe-se que toda vez que houver perda total de um dos setores, ele deve ser recomposto com tensão terminal mínima nas unidades geradoras [6,7], que com os tap's atuais dos transformadores elevadores implica em tensão no 500 kV da ordem de 460 kV, ou seja, 92 %. Como a referência mínima para o controle conjunto é 90 %, basta ajustar α para que produza pulsos contínuos quando o erro de tensão for superior a 2 %, que de acordo com a equação (1) implicaria em $\alpha=0,5$ %.

Outro ponto importante precisa ser considerado no ajuste da banda-morta, é que ele define a máxima diferença aceitável entre as correntes reativas das máquinas que estão em controle conjunto. Como o valor de referência é o valor médio de corrente reativa, a máxima diferença é dada pelo dobro do valor ajustado da banda-morta. Assim como para o laço de tensão, deve ser verificado se um pulso não provoca variação de corrente reativa suficiente para inverter o sinal de erro, o que provocaria uma permanente troca de reativo entre máquinas.

5.0. SIMULAÇÕES REALIZADAS

5.1. Comportamento a vazio

A representação a vazio permite analisar apenas o desempenho quanto a tensão. No 60 Hz foi analisado o desempenho com 3 unidades a vazio, considerando-se $\alpha=0$ %, ajuste deixado pelo fabricante, e $\alpha=0,5$ %. A Figura 3 mostra a comparação do desempenho em cada situação. A mesma situação foi feita para o 50 Hz, só que com $\alpha=0,25$ %. Não foi considerado $\alpha=0,5$ % para o 50 Hz porque quando da implantação deste ajuste no setor 60 Hz, verificou-se que a equação (1) na verdade é na forma

$$T_i = T_1 \cdot [1 - \alpha \cdot (\Delta U - \varepsilon)] \quad (3)$$

Onde a base para cálculo de ΔU e ε em % é 10,7 V. Assim, a emissão de pulsos contínuos no 60 Hz é feita quando o erro de tensão no 500 kV é 0,004 pu superior a banda-morta, e no 50 Hz quando é 0,006 pu superior a banda morta.

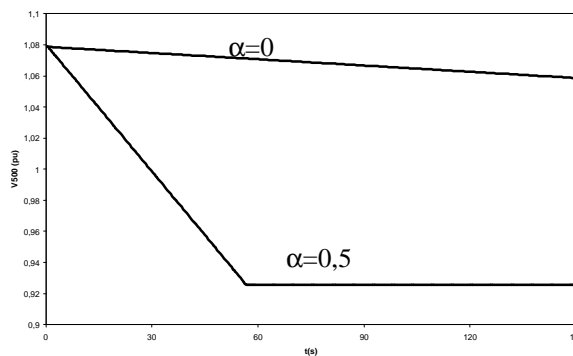


FIGURA 3

5.2. Comportamento no Sistema

O estudo do desempenho do JVC no sistema permite analisar tanto o comportamento da tensão quanto da corrente reativa, observando-se que o tempo de estabilização deve atender as expectativas do pessoal de operação em tempo real

Na colocação de uma unidade em controle conjunto com tensão terminal de 100 %, enquanto que as outras unidades estejam com tensão terminal de 103 %, no 60 Hz, com $\alpha = 0$, observa-se que cada pulso provoca uma variação de 0,8 % na corrente reativa, isto é, valor superior a banda-morta ajustada pelo fabricante. Desta forma, dependendo do ponto de operação, as máquinas podem entrar em processo de eterna troca de reativos. Existem três alternativas para solucionar o problema.

- Aumentar a banda-morta;
- Diminuir a duração dos pulsos;
- Diminuir o ganho do regulador de corrente reativa.

A melhor alternativa é a de diminuir o ganho do regulador de corrente reativa já que as outras duas afetariam também o laço de controle de tensão do 500 kV. Optou-se por alterar o valor do ganho do transdutor de 9,08 V/pu para cerca de 5 V/pu. Este problema não foi verificado no 50 Hz porque a banda-morta ajustada no comissionamento é de 0,8 % e cada pulso proporciona uma variação de 0,5 % na corrente reativa.

Quanto ao desempenho da tensão foi constatado por simulação que a emissão de pulsos contínuos não provoca oscilações que prejudiquem a operação do sistema, além disso, para pequenos desvios de tensão, no 60 Hz, com $\alpha=0,5$ % o tempo de estabilização da tensão é reduzido em 25 % em relação a condição de $\alpha=0$ %. No 50 Hz também foi verificado o mesmo comportamento, e o reajuste do α para 0,25 % reduziu o tempo de estabilização em torno de 15 % para pequenos desvios de tensão..

Foram implantados os ajustes mostrados na Tabela 2. Com estes ajustes, para a emissão do pulso contínuo

no 60 Hz é necessário um erro na tensão do 500 kV de 0,53 % para ocorrer a emissão contínua de pulsos. Em relação a corrente reativa a emissão contínua de pulsos ocorre para um erro de 5,6 % e a diferença de corrente reativa entre máquinas é de 0,025 pu ou 583,8 A, que pode proporcionar diferença de até 18,2 Mvar entre máquinas. No 50 Hz a emissão contínua de pulsos ocorre para um erro na tensão do 500 kV de 0,74 % e para um erro de 5,3 % de corrente reativa, desta forma a diferença de corrente reativa entre máquinas é de 0,016 pu ou 13 Mvar.

TABELA 2 – PARÂMETROS REAJUSTADOS.

| Parâmetro | 60 Hz | 50 Hz |
|-----------|-----------|-----------|
| α | 0,5 /% | 0,25 /% |
| t_2 | 0,23 | 0,2 s |
| t_1 | 4,51 | 6,0 s |
| ξ | 61 mV | 75 mV |
| KIR | 4,84 V/pu | 9,83 V/pu |

Apesar do novo valor de α no 60 Hz ter proporcionado uma resposta mais rápida do que a imaginada inicialmente não pretende-se efetuar nenhum outro ajuste no JVC já que não foram relatados problemas pelo pessoal da execução da operação, e que mesmo durante perturbações no sistema o JVC atua de forma positiva, como pode ser visto no próximo item.

6.0. DESEMPENHO REAL

Para mostrar a melhoria de desempenho obtida com o reajuste do JVC são apresentados registros obtidos através do Registrador Digital de Perturbações – Período Dinâmico [8] existente na Usina de Itaipu. Para o setor 50 Hz é mostrado o comportamento da tensão no 500 kV nas perturbações de 25/04/97 (Figura 4) e 11/03/99 (Figura 5), quando houve perda total neste setor. Em ambas as ocorrências a tensão estabilizaria em torno dos 510 kV após a perda total, com o JVC passando a ser efetivo a partir dessa estabilização. Em 25/04/97 a ação do JVC reduziu a tensão em 5 kV em 100 segundos. Em 11/03/99 a ação do JVC reduziu a tensão em 10 kV em 18 segundos.

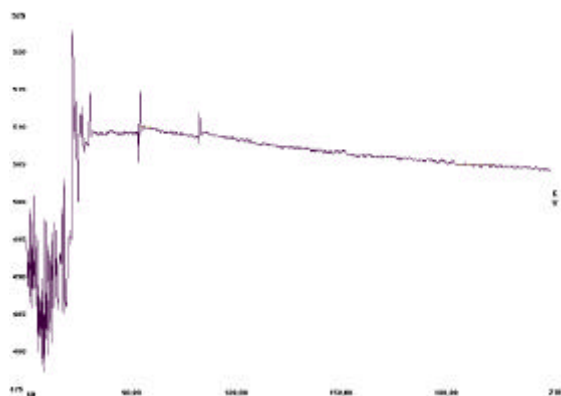


FIGURA 4 – TENSÃO NO 50 HZ EM 25/04/97

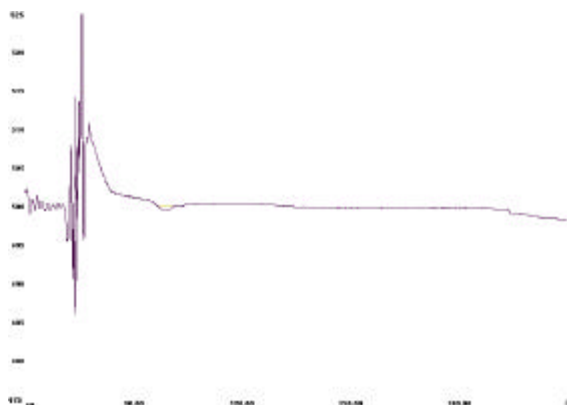


FIGURA 5 – TENSÃO NO 50 HZ EM 11/03/99

Para o setor 60 Hz o JVC é desligado toda vez que ocorre atuação de Esquemas de Emergência [9], portanto para mostrar sua influência é necessário que o mesmo não tenha sido desligado. Dessa forma a comparação é feita para o desempenho da tensão do 500 kV durante desligamentos de uma LT Foz do Iguaçu-Ivaiporã 765 kV, em 28/01/96 (Figura 7) e 05/01/97 (Figura 8). Enquanto em 28/01/96 a ação do JVC não foi sensível em 30 segundos, em 05/01/97 a ação do JVC elevou a tensão em 10 kV em 10 segundos.

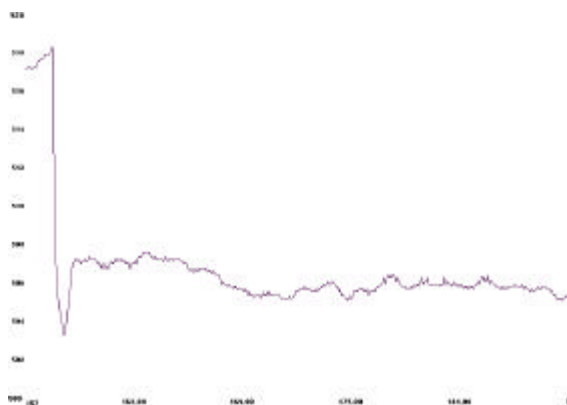


FIGURA 6 – TENSÃO NO 60 HZ EM 28/01/96.

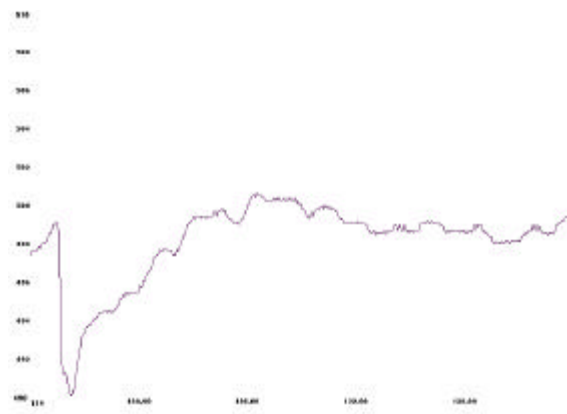


FIGURA 7 – TENSÃO NO 60 HZ EM 05/01/97.

7.0. CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido para o controle conjunto de tensão da usina de Itaipu foi baseado em ensaios que avaliam o comportamento de cada módulo de forma separada, garantindo que o desempenho apresentado esteja próximo da realidade, o que foi comprovado através de registros de sua operação real.

O ajuste dos parâmetros visou acelerar o processo de restabelecimento de cada setor da usina quando de seu desligamento total, mostrando-se também satisfatório para o comportamento no sistema, fato comprovado através de registros de ocorrências no sistema.

O desempenho do JVC foi melhorado alterando-se basicamente o fator de influência do erro de controle nos geradores de pulso, de 0 /% para 0,5 /% no 60 Hz e de 0 /% para 0,25 /% no 50 Hz. Com este novo ajuste o influência do JVC pode ser percebida ainda no período dinâmico.

8.0. REFERÊNCIAS

[1] Silva, Rui Jovita G.C. at al. "Ajuste do Controle Conjunto de Tensão do Setor 60 Hz de Itaipu" : VII ERLAC, 1997, Puerto Iguazu-Argentina.

[2] CIEM "Joint Control Operation and Maintenance – Instruction Manual": HIER 92646E

[3] Sancha, J.L. at al. "Secondary Voltage Control: Analysis, Solutions and Simulation Results for the Spanish Transmission System": IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, nº 2, Maio/1996.

[4] Ilic'-Spong, M.; Christensen, J.; Eichorn, K.L. "Secondary Voltage Control Using Pilot Point Information": IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, nº 2, Maio/1988.

[5] Gubina, F. at al. "Models of Decentralized Secondary Voltage Control Realised Via Fuzzy Sets Artificial Neural Networks": Session 1996 CIGRE

[6] GE-05/CMO "Restabelecimento da Interligação Itaipu/Ande/Furnas 50 Hz": IOI 26, Novembro/1998

[7] GE-05/CMO "Restabelecimento da Interligação Itaipu/Furnas 60 Hz": IOI 62, Novembro/1998

[8] Silva, Rui Jovita G.C. at al. "Registrador Digital de Perturbações-Período Dinâmico": XIV SNTPEE, 1997, Belém-PA.

[9] Oliveira, Ivone M. at al "Emergency Control Scheme of the 750 kV Transmission System Using Programmable Logic Controllers": V SEPOPE, 1996, Recife-PE.

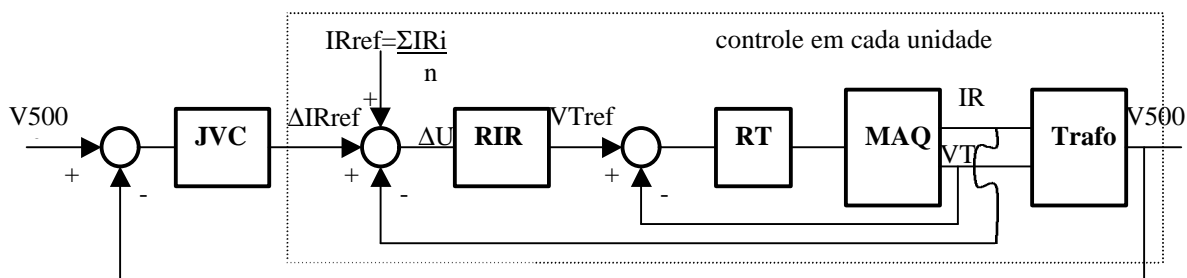


FIGURA 1

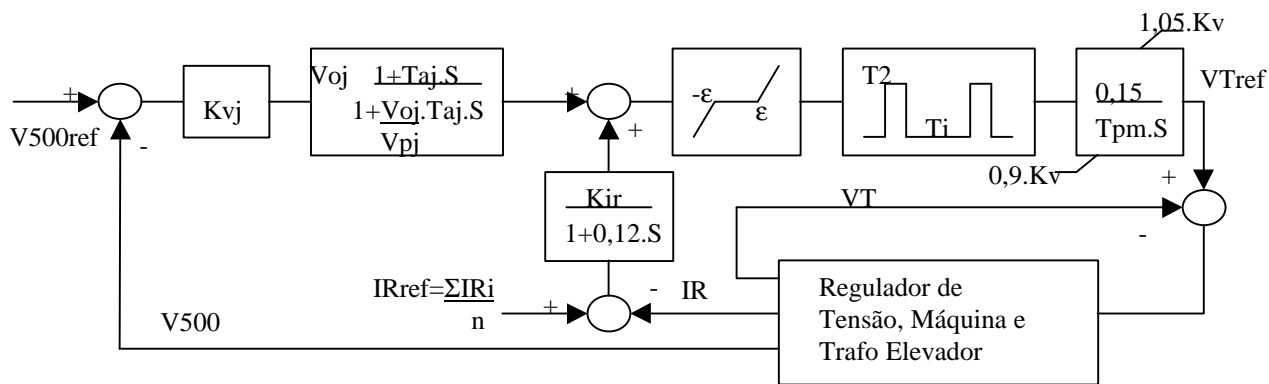


FIGURA 2