



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

**OTIMIZAÇÃO DO REGULADOR DE VELOCIDADE DA UHE TUCURUÍ PARA AUMENTO DO INTERCÂMBIO  
ENTRE A REGIÕES NORTE E NORDESTE DO SIN**

**Venilton R. de Oliveira \***

**ONS**

**Alexandre Massaud**

**ONS**

**Carlos Alberto Aviz**

**ELETRONORTE**

**Jânio Lana**

**ELETRONORTE**

**RESUMO**

Este artigo tem como objetivo de mostrar as soluções propostas pelo relatório da análise da contingência do dia 04/04/2004, no qual foi determinado-se que o regulador de velocidade da UHE Tucuruí fosse otimizado, para evitar a perda de sincronismo entre os sistemas Norte e Nordeste do SIN. Portanto neste artigo será mostrado o levantamento do modelo para o regulador de velocidade, a otimização deste e a influência da otimização: No modo de oscilação Norte-Sul; Na recomposição e a na operação interligada.

**PALAVRAS-CHAVE**

Otimização de controladores, validação de modelos, regulador de velocidade e análise de contingência

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O Sistema Interligado Nacional (SIN) no dia 04/04/2003 encontrava-se operando no cenário Norte Exportador, com o fluxo na Interligação Norte/Nordeste de 1030MW e na Interligação Norte/Sudeste-Centro Oeste de 700MW. A geração e carga das regiões encontravam-se nos seguintes patamares: Geração do Norte de 3733MW, Demanda do Norte de 2202MW, Geração do Nordeste de 5417MW e Demanda do Nordeste de 6448MW [1].

Quando às 12h42min ocorreu o desligamento automático da LT 500 kV Serra da Mesa-Gurupi, devido à atuação acidental da proteção do reator "shunt" desta linha, no terminal de Serra da Mesa, com este defeito houve a atuação do Esquema de Controle de Emergência (ECE) da Interligação N/SE-CO, provocando o desligamento automático da LI 500 kV Gurupi-Miracema. Este desligamento caracterizou a abertura da Interligação Norte/Sudeste-Centro Oeste, provocando o aumento do fluxo na Interligação Norte/Nordeste, que passou de 1030 MW para 1760 MW, no sentido Norte para o Nordeste, provocando adicionalmente os seguintes eventos:

- Elevação da frequência nas regiões Norte e Nordeste, atingindo o valor máximo de 61,15 Hz;
- Abertura das LT 500 kV entre o Norte/Nordeste por atuação da Proteção de Perda de Sincronismo (PPS), separando os sistemas;
- Com a abertura da Interligação Norte-Nordeste, houve acentuada redução da frequência na região Nordeste, atingindo um valor mínimo de 57,16 Hz, com a atuação do ERAC e corte de 961MW de carga;
- Na região Norte o excedente de geração provocou sobrefrequência de 63,72 Hz;
- Desligamento de unidades na UHE Tucuruí (950 MW) e na UHE Lajeado (540 MW).

Para estas condições de operação não era esperada a perda de sincronismo entre as regiões Norte e Nordeste, após a abertura da interligação Norte/Sudeste-Centro Oeste. Simulações efetuadas buscando reproduzir a ocorrência indicaram que uma maior resposta das unidades geradoras da região Nordeste no sentido

de eliminar o excesso de potência de 700MW, em consequência desta abertura, e com uma participação reduzida das unidades geradoras da UHE Tucuruí e da UHE Lajeado, levando à perda de estabilidade entre as regiões Norte e Nordeste, dinamicamente entorno de 9 segundos.

A pesquisa efetuada no sentido de identificar a causa do problema indicou que a não atuação dos reguladores de velocidade das unidades geradoras da Usina de Lajeado e Tucuruí seria suficiente para instabilizar o sistema, provocando a separação dos sistemas elétricos das regiões Norte e Nordeste, com a consequente atuação do ERAC no Nordeste.

O fato da operação do regulador de velocidade das unidades geradoras da UHE Lajeado encontrar-se em Potência Constante causou a resposta inadequada dessa usina. Essa modalidade operativa deixada pelo fabricante prevê que estas unidades respondam na modalidade operativa de frequência apenas no caso da frequência variar em pelo menos 2% do valor da frequência nominal. Na ocorrência a frequência atingiu 61,15 HZ antes da abertura da interligação Norte/Nordeste, não tendo ocorrido à comutação da modalidade operativa do regulador, que só se daria em 61,2 Hz.

Para solução deste problema foi alterado o ajuste de 61,2 Hz para 60,3 Hz, valor este que garante bom desempenho do regulador quando da separação das regiões N/NE da S/SE/CO, situação na qual é imprescindível a atuação dos reguladores de velocidade na modalidade de controle de frequência.

Outro aspecto que merece destaque é que os PSS's da UHE Lajeado estavam desligados nesta perturbação, o que piora também a resposta dinâmica do sistema, sendo determinada à operação contínua deste estabilizador.

Com relação a UHE Tucuruí foi determinada uma reavaliação do modelo do regulador. Para isto foram realizados ensaios de campo em uma das unidades, com o objetivo de avaliar a resposta do regulador de velocidade e verificar o modelo existente. Com os resultados obtidos nos ensaios de campo foi elaborado um novo modelo, no qual reproduzia o desempenho do regulador para a condição interligada ao SIN.

Para deixar a resposta da UHE Tucuruí mais compatível com as unidades geradoras da região nordeste, isto é, uma resposta transitória mais rápida. Determinou-se um novo conjunto de ajustes para o estatismo transitório, sendo estes submetidos ao fabricante para evitar possíveis problemas advindo deste ajuste.

Com a modificação dos ajustes do estatismo transitório pode-se obter uma resposta mais rápida desta usina na abertura da interligação Norte/Sudeste – Centro Oeste, preservando assim a integridade do Subsistema Norte/Nordeste para a condição de elevado intercâmbio entre estes sistemas, sem a perda de sincronismo entre elas.

Neste artigo será apresentado o novo modelo para o regulador de velocidade da UHE Tucuruí, os novos ajustes implementados em campo para este regulador, a influência dos novos ajustes no modo de oscilação Norte-Sul, avaliação isolada do sistema e e verificação da otimização no SIN.

## 2.0 - MODELO DO REGULADOR DE VELOCIDADE

O regulador de velocidade da UHE Tucuruí é do tipo eletro-hidráulico com realimentação derivativa, de fabricação da NEYRPIIC, sendo este do tipo RAPID 68. A **FIGURA 1** apresenta o modelo do regulador de velocidade fornecido na documentação do fabricante, sendo este utilizado como base para a obtenção do novo modelo, para as simulações do ANATEM. Com relação à turbina foi utilizado o modelo não-linear com coluna de água inelástica.[2]

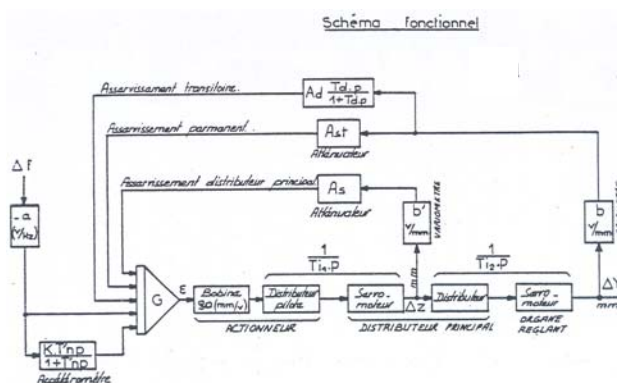


FIGURA 1 Modelo do regulador de velocidade fornecido pelo fabricante

## 3.0 - ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DOS AJUSTES

Para levantamento da função de transferência do regulador de velocidade foi utilizado o manual do fabricante, que informa a função de transferência do regulador de velocidade como apresentado na **FIGURA 1**. Após a verificação da função de transferência foram programados os seguintes testes [3]:

- Com a unidade geradora parada e sem passagem de água pela turbina foram aplicados degraus na entrada, isto é, no somador da malha, sem a realimentação do erro da frequência e sem o estatismo transitório;
- Idem ao anterior, incluindo a malha de atuação do estatismo transitório;
- Com a unidade ligada ao sistema, foi aplicado degrau na referência do regulador, monitorando potência e frequência do gerador.

### 3.1 Degrau no Regulador de Velocidade sem Estatismo Transitório

Este teste foi realizado para verificação das constantes de tempo da válvula distribuidora, verificação da velocidade de fechamento e abertura do distribuidor e os ganhos associados. A **FIGURA 2** apresenta a comparação do ensaio com a simulação para um degrau de +30%, sendo (a) Válvula do Distribuidor e (b) Abertura do Servomotor. A **FIGURA 3** apresenta a mesma comparação para um degrau de -30%.

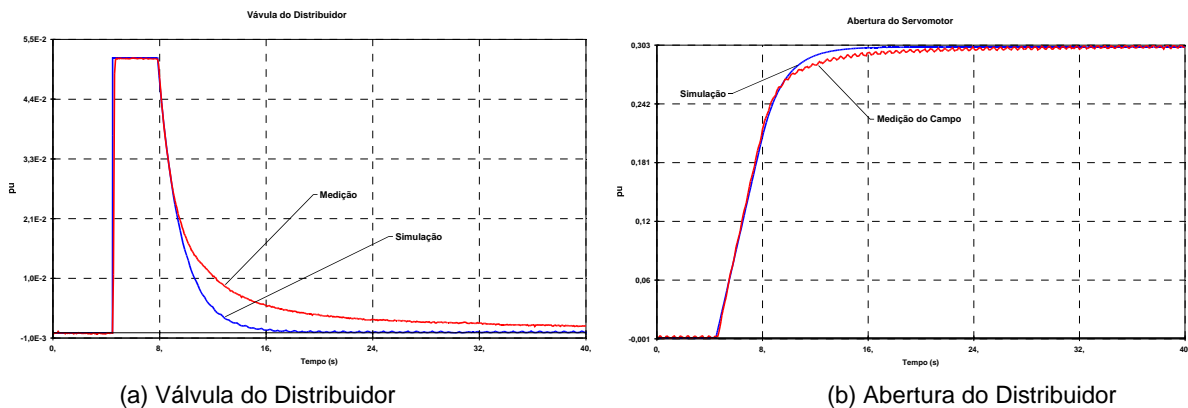


FIGURA 2 Degrau de +30% na abertura do distribuidor

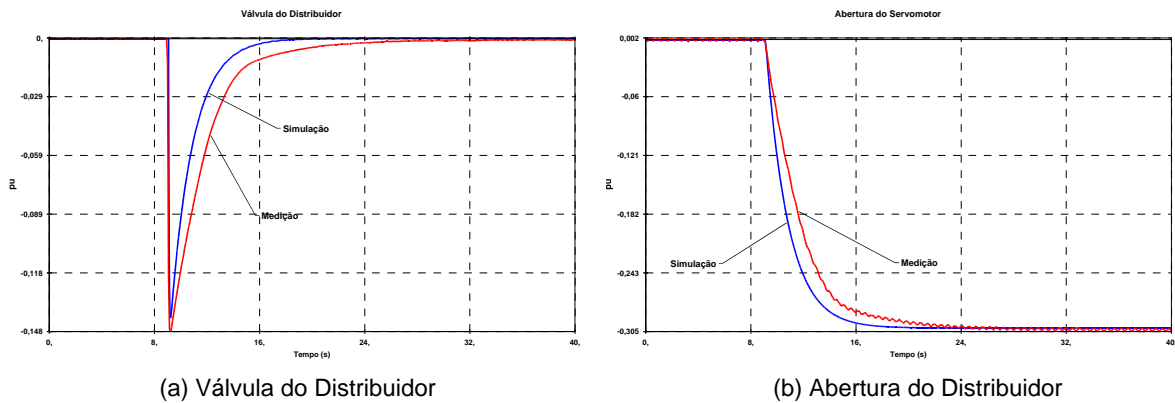
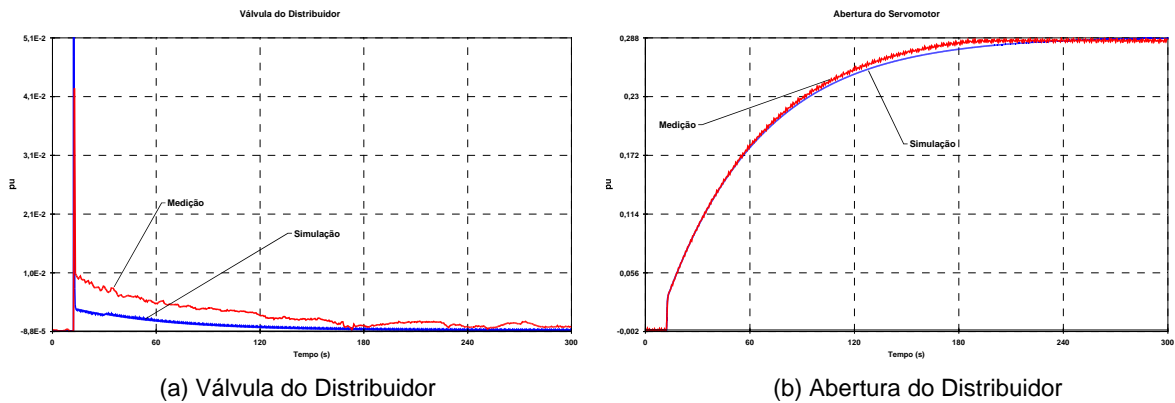


FIGURA 3 Degrau de -30% na abertura do distribuidor

### 3.2 Degrau no Regulador de Velocidade com Estatismo Transitório

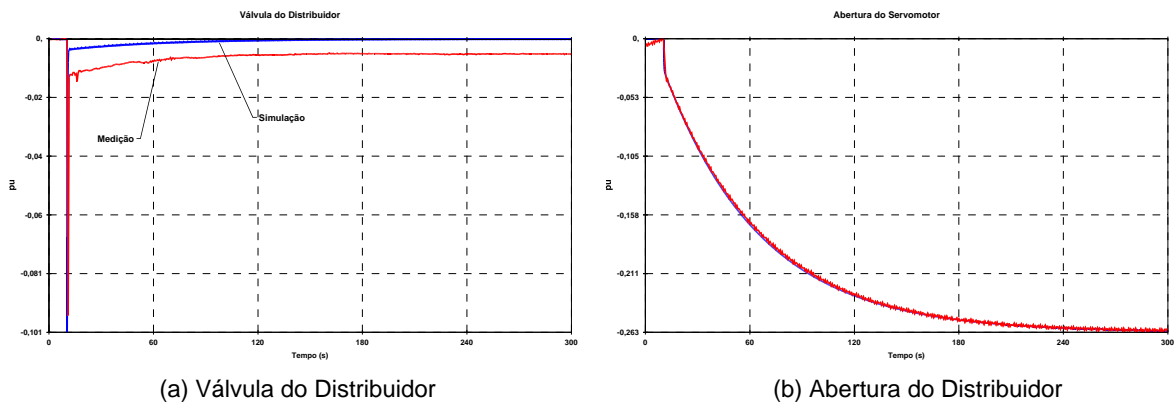
Este teste foi realizado para verificação das constantes de tempo da válvula distribuidora, verificação da velocidade de fechamento e abertura do distribuidor e os ganhos associados, considerando a malha de estatismo transitório. Cabe ressaltar que este teste foi realizado com a unidade parada sem a passagem de água pela turbina. A **FIGURA 4** apresenta o degrau de +30% e a **FIGURA 5** o degrau de -30% na abertura do distribuidor.



(a) Válvula do Distribuidor

(b) Abertura do Distribuidor

FIGURA 4 Degrau de +30% na abertura do distribuidor



(a) Válvula do Distribuidor

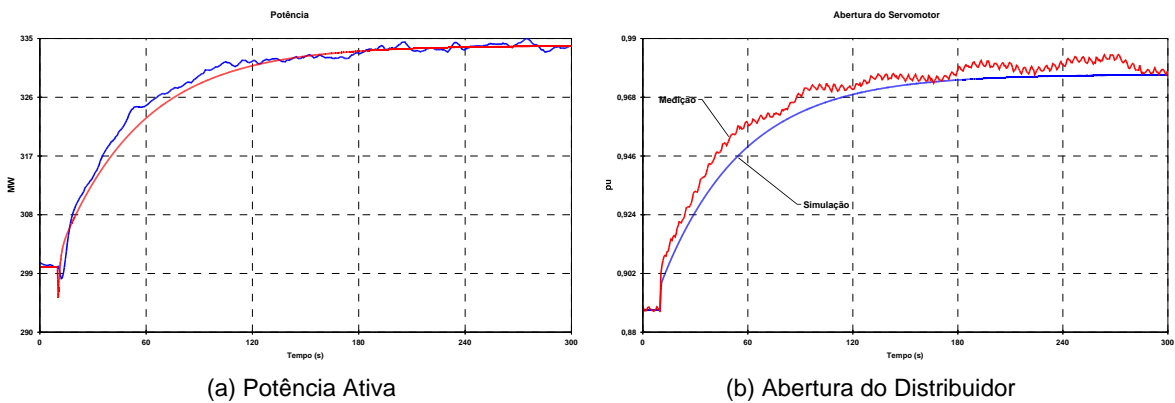
(b) Abertura do Distribuidor

FIGURA 5 Degrau de -30% na abertura do distribuidor

### 3.3 Degrau de +30MW na Potência

Este teste foi realizado com a unidade sincronizada ao sistema elétrico com potência de 300MW e aplicado um degrau de +30MW, monitorando a potência do gerador, a abertura do distribuidor, a válvula do distribuidor e a frequência do sistema.

Como a frequência do sistema permaneceu constante esta medição não foi utilizada para a comparação dos testes com a simulação, portanto foi utilizado para a comparação a potência do gerador e a abertura do distribuidor como mostrado nas figuras abaixo.



(a) Potência Ativa

(b) Abertura do Distribuidor

FIGURA 6 Degrau de +30MW

#### 4.0 - OTIMIZAÇÃO DO REGULADOR DE VELOCIDADE

Após a obtenção do novo modelo para o regulador de velocidade, verificou-se que os parâmetros possíveis de reajuste são o estatismo permanente e o estatismo transitório [4]. Sendo o estatismo permanente o mesmo para todo o SIN no valor de 5%. Com relação ao estatismo transitório dois parâmetros podem ser modificados: O ganho e a constante de tempo. A **TABELA 1** mostra os valores possíveis de ajuste para estas grandezas. Nas unidades geradoras da UHE Tucuruí foram verificados os seguintes ajustes:

- Ganho do estatismo transitório (Bt), 0,40pu/pu, isto é, posição 6;
- Constante de tempo do estatismo transitório(Td), 6 segundos, posição 9.

TABELA 1 Estatismo Transitório

Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Bt	0	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,85	1
Td	0	0,50	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10

Para a otimização do regulador de velocidade foi utilizada a fórmula de cálculo do estatismo transitório, como descrito na Literatura [5], que depende da constante de tempo da água, que no caso de Tucuruí é de 1,2 segundos e da inércia do gerador que neste caso é 4,66 segundos.

A Equação 1 mostra a formula utilizada pra o cálculo do ganho do estatismo transitório e a Equação 2 o cálculo da constante de tempo do estatismo transitório.

##### Equação 1 Cálculo do ganho do Estatismo Transitório

$$Bt = [2,3 - (T_w - 1,0)0,15] \frac{T_w}{2H}$$

##### Equação 2 Cálculo da Constante de Tempo do Estatismo Transitório

$$Td = [5,0 - (T_w - 1,0)0,5]T_w$$

Utilizando as equações acima teremos os seguintes valores:

- Bt = 0,29 pu/pu
- Td = 5,88s

Para melhorar o desempenho no sistema interligado foi diminuído o ajuste de Td para 4 segundos com intuito de aumentar a velocidade de resposta sem prejuízo para a operação isolada. Portanto os ajustes finais para o regulador de velocidade são:

- Bt = 0,3 pu/pu, posição 5;
- Td = 4,0s, posição 7

#### 5.0 - INFLUÊNCIA NO MODO DE OSCILAÇÃO NORTE – SUL

Para avaliação da influência, da otimização do regulador de velocidade, no modo de oscilação Norte – Sul foi utilizado o caso de dezembro de 2003, com diversos intercâmbios entre os subsistemas. A **TABELA 2** apresenta os diversos cenários analisados.

Na **FIGURA 7** pode-se observar o modo de oscilação Norte – Sul, para os casos da **TABELA 2**, com o ajuste antigo (vermelho) e o ajuste novo (preto), pode-se concluir que a influência da otimização do regulador neste modo de oscilação é pouco significativa no amortecimento e na frequência de oscilação.

TABELA 2 Intercâmbios Simulados no PacDyn em MW

Caso	Carga	RNE	FNE	FSENE	FNS
A	PESADA	2120	1290	830	-2160
B	MÉDIA	2110	1340	770	-1790
C	LEVE	2110	1370	740	-1610
D	MÍNIMA	2110	1380	730	-1500
E	PESADA	2100	1520	580	980
F	MÉDIA	2100	1570	530	1020
G	LEVE	2100	1550	550	540
H	MÍNIMA	2100	1570	530	910
I	PESADA	0000	-050	050	1700
J	MÉDIA	0000	0000	000	1500
K	LEVE	0000	-040	040	1310
L	MÍNIMA	0000	-060	060	860

RNE → Recebimento Nordeste

FNE → Fluxo Norte – Nordeste

FSENE → Fluxo Sudeste - Nordeste

FNE → Fluxo Norte – Sul

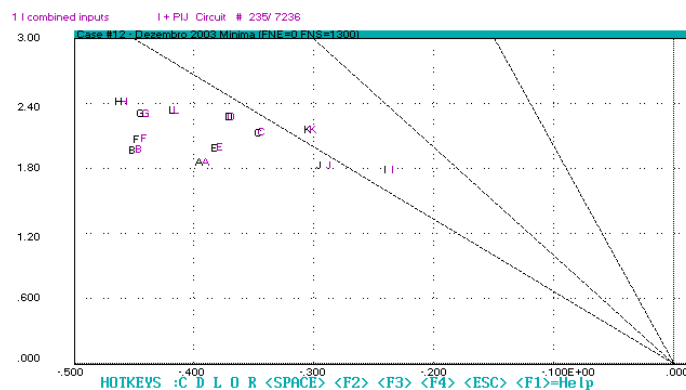


FIGURA 7 Modo de Oscilação Norte – Sul

## 6.0 - AVALIAÇÃO DO SISTEMA ISOLADO

Essa condição de operação é utilizada para avaliar se o sistema poderá ou não se tornar instável com os novos ajustes. Para essa análise foi utilizado, uma configuração típica de recomposição, com duas unidades alimentando uma carga na subestação de Vila do Conde 230KV, através da linha Tucuruí – Vila do Conde 500KV, como apresentado na **FIGURA 8**.

Nesta situação foram feitas cinco tomadas de carga de 60MW, verificando-se o comportamento da frequência do sistema. A **FIGURA 9** apresenta a frequência do sistema para as diversas tomadas de carga. Pode-se verificar que o sistema tem um comportamento estável, sem problemas nessa condição de operação. Com esta análise conclui-se que com os novos ajustes o sistema permanece estável para a recomposição do sistema.

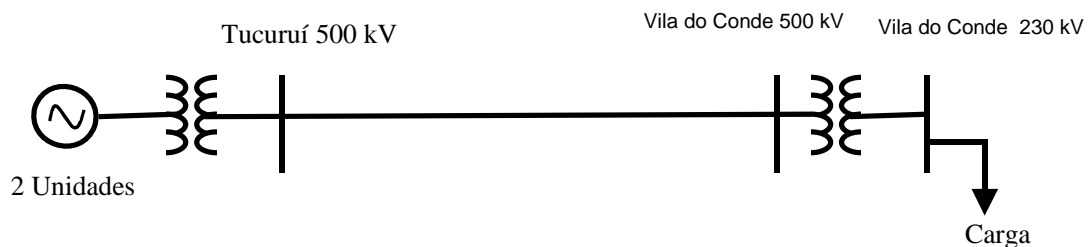


FIGURA 8 Sistema Simulado

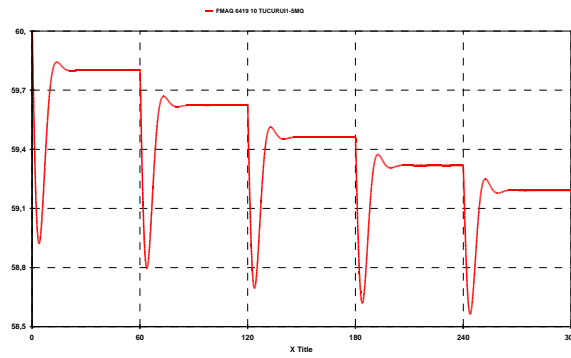


FIGURA 9 Frequência de Tucuruí

### 7.0 - AVALIAÇÃO NO SISTEMA INTERLIGADO

Para a avaliação da otimização do regulador de velocidade no sistema interligado foi utilizado o caso de outubro de 2003 para a condição de carga leve com os intercâmbios entre as regiões do SIN definidos na **TABELA 3**. Nessa condição foi aplicado um curto circuito com abertura da interligação Norte – Sudeste/Centro Oeste e da interligação Sudeste – Nordeste, portanto isolando o sistema Norte – Nordeste.

TABELA 3 Intercâmbios entre os Subistemas em MW

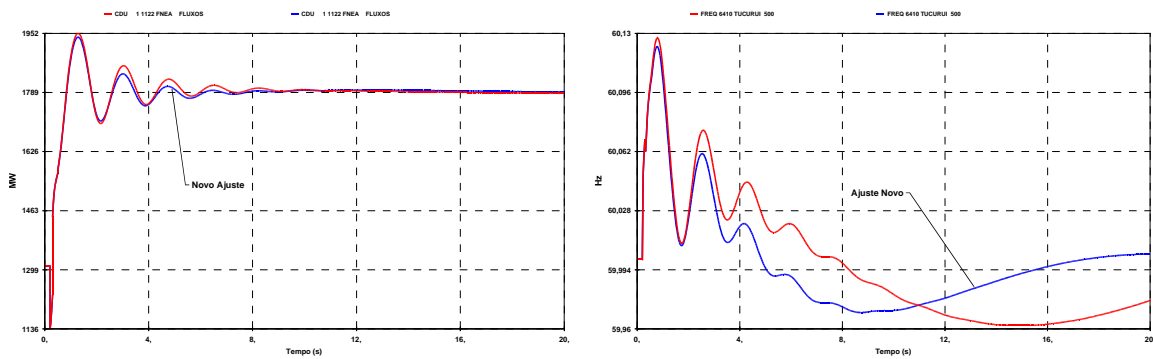
Caso	FNS	FNE	FMCCO	FSENE	RNE
1	1250	1300	400	500	1800
2	1550	1300	700	300	1600

FNS → Fluxo Norte – Sul

FMCCO → Fluxo Miracema – Colinas

FNE → Fluxo Norte – Nordeste

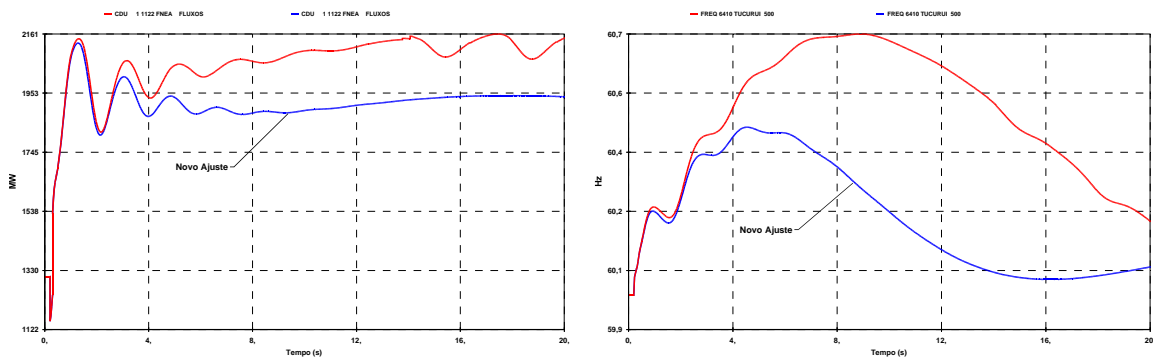
FSENE → Fluxo Sudeste - Nordeste



(a) Fluxo Norte – Nordeste

(b) Frequência da UHE Tucuruí

FIGURA 10 Comparação do Caso 1



(a) Fluxo Norte – Nordeste

(b) Frequência da UHE Tucuruí

FIGURA 11 Comparação do Caso 2

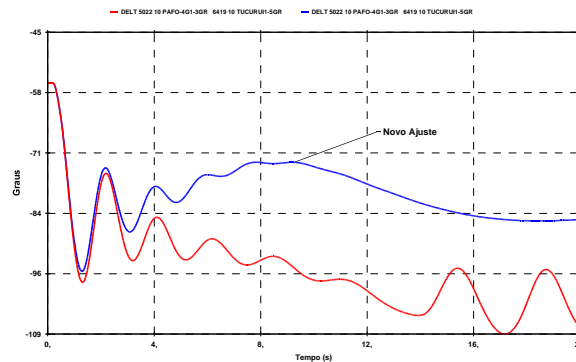


FIGURA 12 Ângulo de Paulo Afonso 4 em Relação a Tucuruí – Caso 2

Pode se observar que em ambos os casos o comportamento do sistema elétrico apresentou um melhora considerável para essa contingência.

Cabe ressaltar que essas simulações serviram como exemplo do potencial de ganho para o sistema elétrico destes novos ajustes, devendo ser realizadas diversas simulações para a determinação dos novos limites entre os subsistemas.

## 8.0 - CONCLUSÃO

Os ajustes do estatismo transitório, constante de tempo e ganho, foram implantados com sucesso não trazendo prejuízo, tanto na operação interligada quanto para a operação isolada da UHE Tucuruí.

Os novos ajustes do estatismo transitório não tiveram influência na frequência e no amortecimento do modo de oscilação Norte – Sul

A análise de recomposição, isto é, com o sistema isolado, mostrou que com os novos ajustes do estatismo transitório o sistema permaneceu estável nesta condição.

Com base nos resultados apresentados podemos concluir que trabalho realizado trouxe grande benefício para a operação do SIN.

Para a operação interligada pode-se aumentar o intercâmbio entre os subsistemas Norte – Nordeste sem prejuízo do sistema interligado. Uma avaliação preliminar verificou que este limite pode ser aumentado em um valor da ordem de 300MW.

## 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ONS RE-3/113/2003 – Análise da Perturbação do dia 04/04/2003 às 12H42min envolvendo as interligações N/NE e N/SE-CO
- [2] IEEE Committee Report – Dynamic models for steam and Hydro Turbines im Power System Studies – IEEE Trans., Vol. PAS-89, pp 106-112, January 1970.
- [3] ONS RE 03/219/2003 – Novo Modelo do Regulador de Velocidade da UHE Tucuruí
- [4] ONS RE 03/220/2003 – Otimização do Regulador de Velocidade da UHE Tucuruí
- [5] Kundur, Pharba – Power System Stability Control