



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

**ENSAIOS EM CAMPO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS DE REGULADORES DE MÁQUINAS TÉRMICAS
COM CICLO COMBINADO**

Ricardo Marcelo Teixeira *	João F. Lima Filho	Máximo C. S. Castro	Nuno H. M. N. Brito
ELETRONORTE	POTÊNCIA ENGENHARIA	ELETRONORTE	ELETRONORTE

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar e analisar os resultados de alguns ensaios para validação dos modelos dos reguladores de tensão e velocidade de uma usina termelétrica que opera em ciclo combinado. São apresentadas as respostas de reguladores de tensão e velocidade a impactos consideráveis e as grandezas elétricas obtidas durante os ensaios, tais como tensão terminal, tensão de campo, potência elétrica e frequência do sistema são comparadas com valores simulados.

PALAVRAS-CHAVE

Reguladores de tensão e velocidade, Máquinas térmicas, Ciclo combinado, Validação de modelos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os modelos implementados de reguladores de tensão e velocidade das máquinas térmicas com ciclo combinado, em operação no Setor Elétrico Nacional, muitas vezes, não são validados em campo de forma integrada ao sistema.

Esse fato leva à dificuldade de implementação de modelos que retratem com fidelidade as respostas destas máquinas a perturbações nos seus sistemas elétricos, principalmente os modelos dos reguladores de velocidade das máquinas a vapor de ciclo combinado, pois dependem das respostas das turbinas a gás e das caldeiras de recuperação do vapor.

Nos sistemas isolados, principalmente nos sistemas radiais com unidades geradoras que individualmente representam cerca de 10 a 20% da demanda, a realização de ensaios em campo com desligamento de unidades geradoras devidamente despachadas levam a alterações significativas na tensão local e na frequência do sistema, permitindo a avaliação do desempenho dos reguladores e a validação dos seus modelos.

A Usina Termelétrica (UTE) II é um Produtor Independente de Energia (PIE) conectado ao Sistema Elétrico Acre-Rondônia, sistema este cuja operação está sob a responsabilidade da Eletronorte (1).

Essa usina é composta de três máquinas térmicas a gás (TGs) de 74 MW cada, operando em ciclo simples ou combinado, três caldeiras de recuperação de vapor (HRSG) sem queima complementar e uma máquina térmica a vapor (TV) de 120 MW que só opera em ciclo combinado com as TGs.

A maior parte dos modelos desses reguladores foi, originalmente, desenvolvida pela EFEI (Cláudio Ferreira).

Com o objetivo de validar os modelos dos reguladores desse ciclo combinado foram realizados ensaios em campo, tanto nos reguladores de tensão (RT) com impacto de Mvar como nos reguladores de velocidade (RV) com impacto de MW, além de aplicação de degraus em vazio e em carga no regulador de tensão da TV.

Os resultados desses ensaios foram utilizados para análise do desempenho sistêmico e adequação dos modelos, buscando refletir as respostas de campo.

Desta forma, o presente informe técnico se propõe apresentar e analisar alguns dos resultados dos ensaios realizados como subsídio para validar os modelos dos reguladores de velocidade e tensão das máquinas que compõem o ciclo combinado da UTE II, comparando-os com simulações utilizando o programa Anatem para

confirmação de que estes modelos retratam satisfatoriamente as respostas das máquinas após perturbações no sistema elétrico Acre-Rondônia e, também, após aplicação de degraus nas referências dos reguladores de tensão.

2.0 - DESCRIÇÃO GERAL DO CICLO COMBINADO DA UTE II

O ciclo combinado 111 é composto por uma TG, uma HRSG e pela TV. O ciclo 221 é composto por duas TGs, duas HRSGs e pela TV. O ciclo 331 é composto por três TGs, três HRSGs e pela TV, com fornecimento total de até 340 MW.

A potência máxima gerada pela TV é aproximadamente 56% da potência total gerada pelas TGs que estiverem operando no ciclo combinado.

A Figura 1 mostra o diagrama em blocos do RV das TGs do ciclo combinado, indicando a informação da temperatura de exaustão (Tx) e o fluxo de ar (Wx) que são enviados à HRSG.

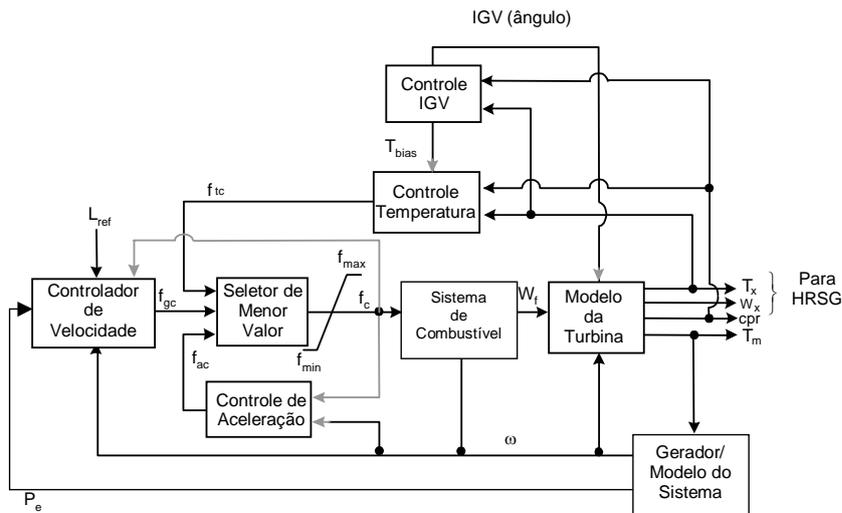


FIGURA 1 – Diagrama em blocos do RV das TGs

A Figura 2 apresenta a função de transferência, fornecida pelo Fabricante, para a HRSG mostrando o comportamento do fluxo do vapor (f) para a perda de uma TG nos ciclos 331 e 221

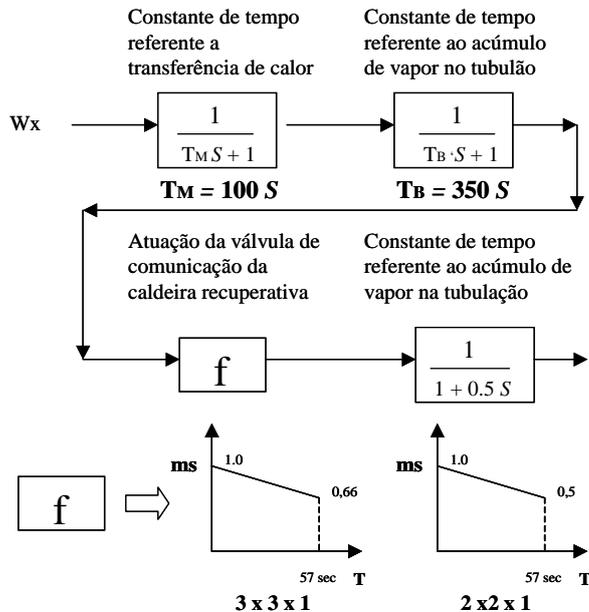


FIGURA 2 - Função de transferência fornecida da HRSG

A Figura 3 apresenta a função de transferência, fornecida pelo Fabricante, para modelar a TV, onde se observa que a potência de saída depende da posição da válvula de "bypass" (CV) e da pressão na válvula de vapor

principal (PT) por onde passa o vapor de alta pressão. Quando a potência de saída da TV for maior do que 0,54 pu, referida a 120 MW, esta dependerá somente de PT.

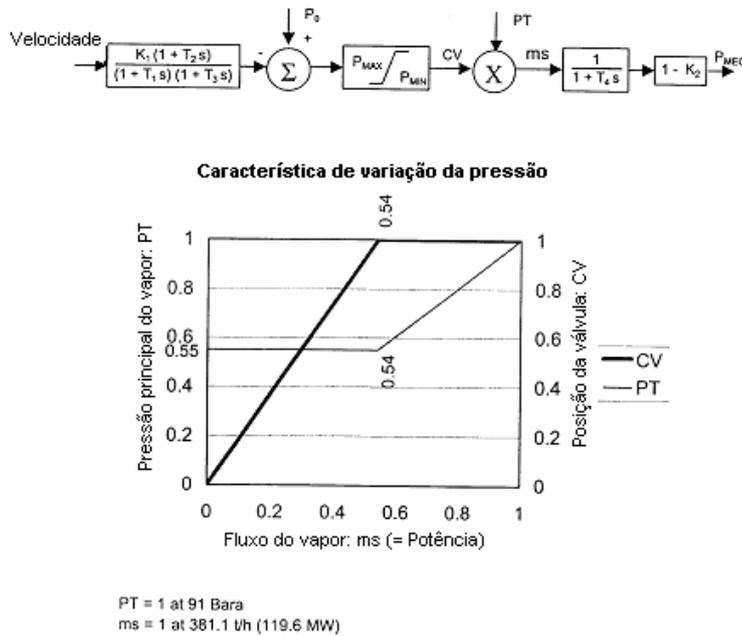


FIGURA 3 - Função de transferência fornecida do regulador de velocidade da TV

A Figura 4 apresenta o diagrama em blocos utilizado para modelar as HRSGs e a TV para simulações dinâmicas no programa Anatem.

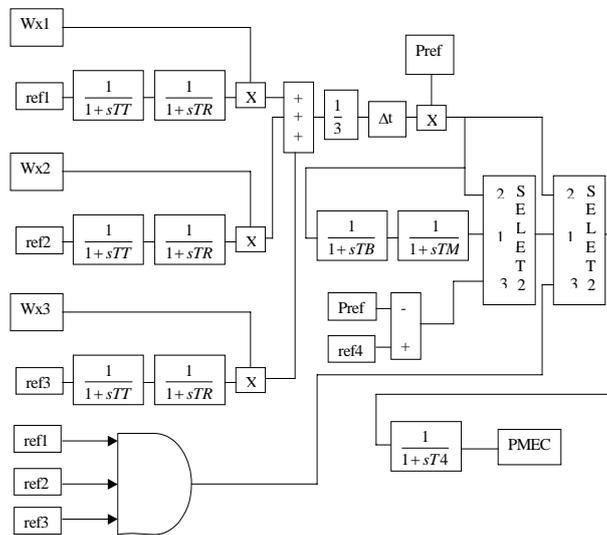


FIGURA 4 - Diagrama em blocos do conjunto HRSG e TV

3.0 - TESTES DOS REGULADORES DO CICLO COMBINADO DA UTE II

3.1 Aplicação de degraus em vazio de ±2% na referência do regulador de tensão da TV

As Figuras 5 e 6 apresentam, os valores medidos e simulados das tensões terminal e de campo da TV, durante a aplicação de um degrau de +2% na referência do seu regulador de tensão.

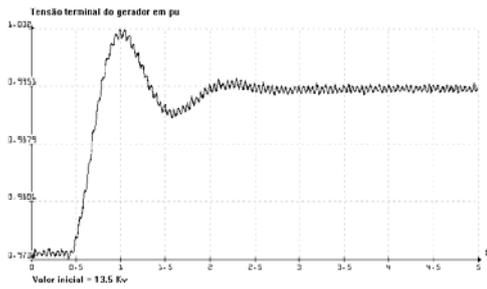


FIGURA 5 - (a) Tensão terminal medida da TV

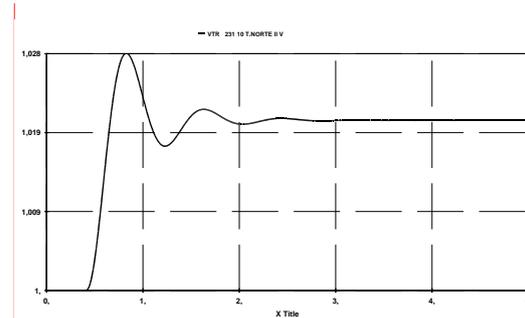


FIGURA 5 - (b) Tensão terminal simulada da TV

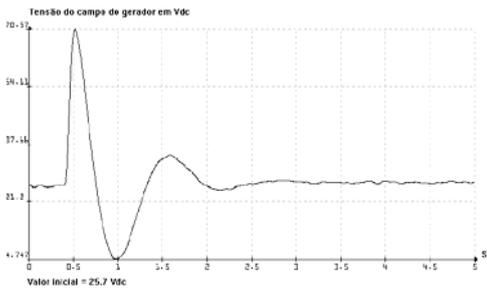


FIGURA 6 - (a) Tensão de campo medida da TV

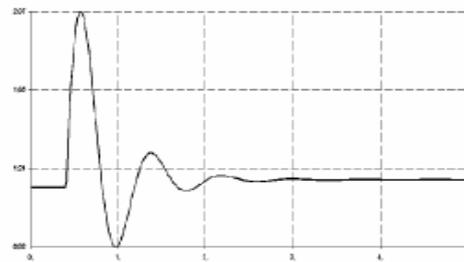


FIGURA 6 - (b) Tensão de campo simulada da TV

A TABELA 1 mostra, para a tensão terminal, os valores das ultrapassagens máximas (U_M), tempos de pico máximos (t_p), tempos de estabilização (t_e) (2) e desvios de tensão (ΔV), relacionados à TV do ciclo combinado, para aplicação de degraus em vazio de $\pm 2\%$, medidos e simulados, na referência de seu regulador de tensão.

TABELA 1 - DEGRAUS EM VAZIO

Valor	Degrau (%)	U_M (%)	t_p (s)	t_e (s)	ΔV (%)
MEDIDO	+2	0,73	0,58	1,50	1,97
SIMULADO	+2	0,79	0,42	1,31	2,10
MEDIDO	-2	-0,86	0,56	1,50	-1,99
SIMULADO	-2	-0,80	0,42	1,32	-2,10

Comparando-se os valores medidos e simulados, o modelo do regulador de tensão da TV retrata com fidelidade as respostas obtidas nos ensaios.

3.2 Aplicação de degraus em carga de $\pm 2\%$ na Referência do Regulador de Tensão da TV

A Figura 7 apresenta os valores medidos e simulados da tensão terminal da TV, durante a aplicação de um degrau de -2% na referência do seu regulador de tensão.

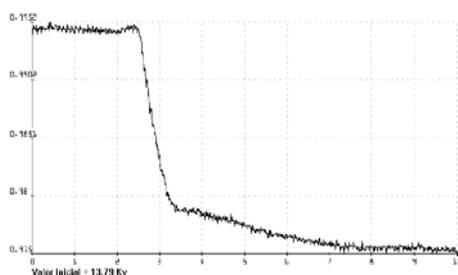


FIGURA 7 - (a) Tensão terminal medida da TV

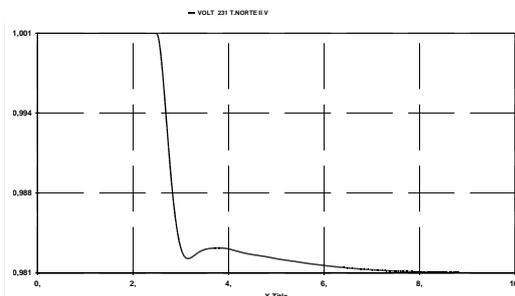


FIGURA 7 - (b) Tensão terminal simulada da TV

A TABELA 2 mostra, para a tensão terminal, os valores dos tempos de estabilização com seus correspondentes desvios de tensão, relacionados à TV do ciclo combinado, para aplicação de degraus em carga de $\pm 2\%$, medidos e simulados, na referência de seu regulador de tensão.

TABELA 2 - DEGRAUS EM CARGA

Valor	Degrau (%)	te (s)	ΔV (%)
MEDIDO	+2	4,42	1,90
SIMULADO	+2	5,00	1,90
MEDIDO	-2	3,90	-1,80
SIMULADO	-2	3,63	-1,90

Comparando-se os valores medidos e simulados, o modelo do regulador de tensão da TV retrata com fidelidade as respostas obtidas nos ensaios.

3.3 Teste de rejeição fora do ciclo combinado 221

Neste teste rejeitaram-se as unidades 3 e 4 da UTE I com um total de 32,9+J7,9 MVA. A geração inicial total do sistema era 287,8+J25,1 MVA. A geração inicial do ciclo combinado 221 era de (2x44,0+51,0) MW, estabilizando-se em (2x49,2+54,7) MW, 162 segundos após a rejeição.

As Figuras 8 a 10 apresentam os valores medidos e simulados das potências ativas da TG2 e da TV do ciclo combinado 221 e da frequência do sistema durante este ensaio.

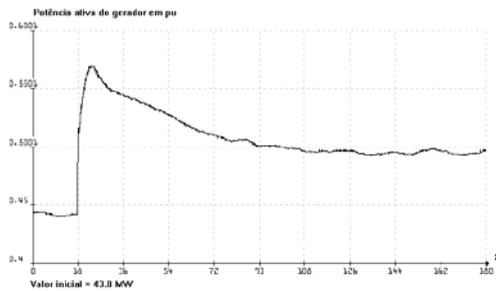


FIGURA 8 – (a) Potência ativa medida da TG2

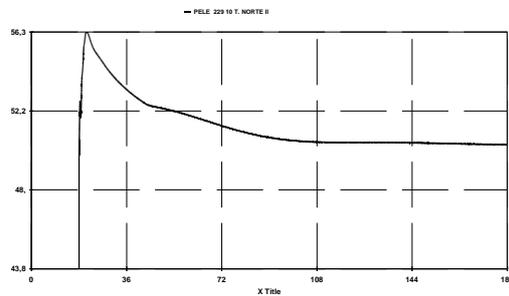


FIGURA 8 – (b) Potência ativa simulada da TG2

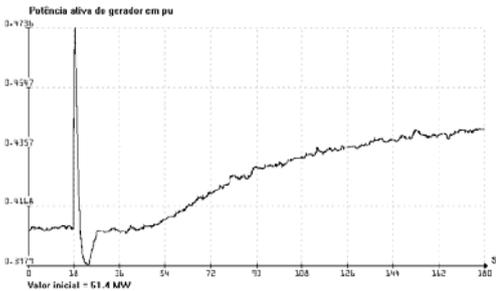


FIGURA 9 – (a) Potência ativa medida da TV

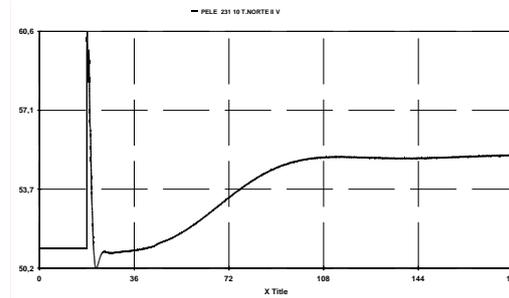


FIGURA 9 – (b) Potência ativa simulada da TV

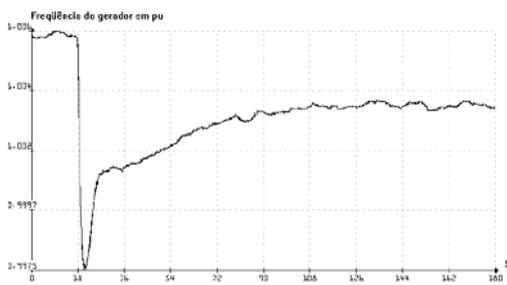


FIGURA 10 – (a) Frequência medida do sistema

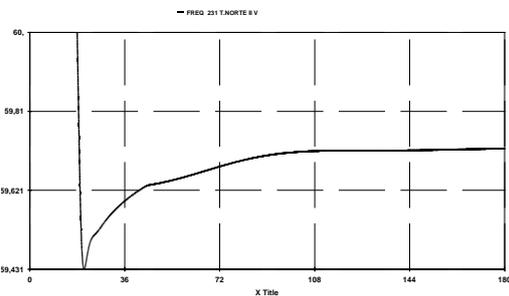


FIGURA 10 – (b) Frequência simulada do sistema

A tabela 3 mostra, para a potência ativa, os valores medidos e simulados de E_p , U_M , t_p e t_e relacionados às TG2 e TV, após a rejeição.

TABELA 3 - PARÂMETROS ASSOCIADOS À POTÊNCIA ATIVA

Unidade		Ep (%)	U _M (%)	tp (s)	te (s)
TG2	MEDIDO	4,40	14,63	5,54	90,00
	SIMULADO	6,03	11,45	2,68	90,27
TV	MEDIDO	8,03[1]	7,34	0,34	162,0
	SIMULADO	14,22[1]	10,02	0,14	90,27

NOTA [1] – A resposta da TV depende das respostas das TGs do ciclo combinado.

3.4 Teste de rejeição da TG3 dentro do ciclo combinado 331 com a TV gerando acima de 0,54 pu

Neste teste rejeitou-se a TG3 do ciclo 331 com 47,0+J9,1 MVA. A geração total do sistema era 305,4MW. A geração inicial do ciclo 331 era de (3x47+87,8) MW, estabilizando-se a geração remanescente em (2x55,7+84,3) MW, 159,5 segundos após a rejeição.

A Figura 11 apresenta os valores medido e simulado da potência ativa da TV durante este ensaio.

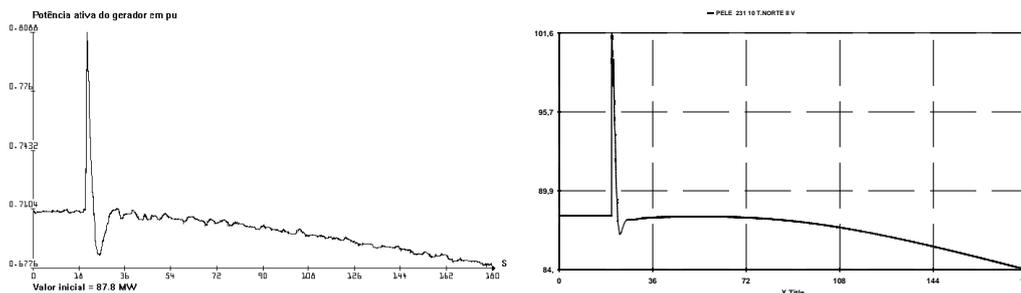


FIGURA 11 – (a) Potência ativa medida da TV FIGURA 11 – (b) Potência ativa simulada da TV

A tabela 4 mostra, para a potência ativa, os valores medidos e simulados de Ep, U_M, tp e te relacionados às TG2 e TV, após a rejeição.

TABELA 4 - PARÂMETROS ASSOCIADOS À POTÊNCIA ATIVA

Unidade		Ep (%)	U _M (%)	tp (s)	te (s)
TG2	MEDIDO	4,97	15,15	5,88	69,43
	SIMULADO	5,46	11,25	2,55	69,45
TV	MEDIDO	[2]	[2]	0,585	[2]
	SIMULADO	[2]	[2]	0,122	[2]

NOTA [2] – Como a potência ativa da TV não estabilizou em até 180 segundos, os valores de Ep, U_M e te não puderam ser determinados.

3.5 Teste de rejeição da TG2 dentro do ciclo combinado 331 com a TV gerando próximo de 0,54 pu

Neste teste rejeitou-se a TG2 com 39,5 MW. A geração total do sistema era 257,8 MW. A geração inicial do ciclo 331 era de (3x39,5+66,5) MW, estabilizando-se a geração remanescente em (2x50,0+46,6) MW, 157,8 segundos após a rejeição.

A Figuras 12 apresenta os valores medido e simulado da potência ativa da TV durante este ensaio.

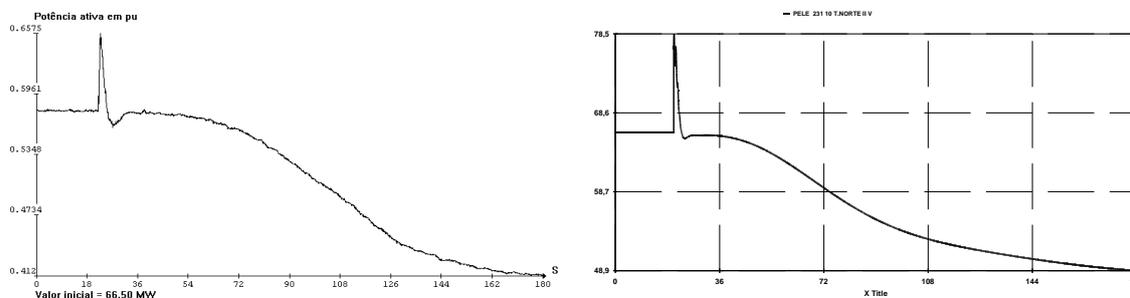


FIGURA 12 – (a) Potência ativa medida da TV FIGURA 12 – (b) Potência ativa simulada da TV

A tabela 5 mostra, para a potência ativa, os valores medidos e simulados de E_p, U_M, tp e te relacionados às TG3 e TV, após a rejeição.

TABELA 5 - PARÂMETROS ASSOCIADOS À POTÊNCIA ATIVA

Unidade		Ep (%)	U _M (%)	tp (s)	te (s)
TG3	MEDIDO	4,81	9,58	8,87	144,4
	SIMULADO	6,71	4,71	3,05	147,3
TV	MEDIDO	-3,12[3]	59,59	0,67	144,4
	SIMULADO	-6,24[3]	60,64	0,12	159,9

NOTA [3] – O valor negativo de Ep está sendo utilizado para indicar que a potência ativa estabilizou em um valor abaixo do inicial.

4.0 - CONCLUSÃO

A análise visual das respostas aos degraus aplicados na referência do regulador de tensão da TV do ciclo combinado e a comparação entre seus valores medidos e simulados leva à conclusão que o modelo deste regulador retrata com fidelidade as respostas obtidas nos ensaios.

A análise visual das respostas das máquinas monitoradas às rejeições efetuadas mostra que o desempenho dinâmico destas máquinas se apresentou fisicamente consistente, com as simulações reproduzindo satisfatoriamente os resultados dos ensaios.

A análise comparativa entre os parâmetros dos valores medidos e simulados leva à conclusão que a fiel reprodução dos valores medidos das potências ativas das máquinas monitoradas e a frequência do sistema ficou prejudicada pela ação conjunta de todos reguladores do sistema. Como só foram monitoradas e registradas as grandezas nas saídas de uma TG e da TV do ciclo combinado, os modelos dos reguladores das demais máquinas do sistema Acre-Rondônia estão refletindo, nas simulações, as respostas destas máquinas sem limitações operativas e com os últimos ajustes deixados nos seus reguladores.

A validação da modelagem dos reguladores de velocidade de usinas térmicas que operam com ciclo combinado contribui significativamente para a elaboração de estudos e análise de ocorrências dos Sistemas Elétricos de Potência, principalmente nos sistemas isolados.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brito, N. H. M. N. et al, "Experiência da Eletronorte na operação de sistemas elétricos com a presença de Produtores Independentes de Energia", anais do X ERLAC, Puerto Iguazú, Argentina, maio 2003.
- (2) D'Azzo, John J. e Houppis, Constantine H., "Análise e projeto de sistemas de controle lineares", 2.^a ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1984.