



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GAT.04
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO – IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA CA E CC - GAT

**SISTEMA DIGITAL EMBARCADO PARA APLICAÇÃO DE SINAIS DE TESTE, AQUISIÇÃO DE DADOS E
MODELAGEM DE SISTEMAS DE CONTROLE**

Marcus C. M. Gomes (*)
ITEC - UFPA

Walter Barra Jr.
ITEC - UFPA

Carlos T. da Costa Jr. Fabrício G. Nogueira
ITEC - UFPA

Paulo S. Nascimento F.
ITEC - UFPA

Anderson R. B. de Moraes
ITEC - UFPA

Janio J. de Lana
ELETRONORTE

Jefferson F. Barbosa
ELETRONORTE

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado que tem como objetivo principal auxiliar a realização de ensaios em campo, permitindo a injeção de sinais de excitação e a coleta e armazenamento de dados. Neste artigo, serão apresentados os procedimentos de projeto dos circuitos eletrônicos, além de resultados de testes em campo na Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí. O desenvolvimento deste sistema se justifica pelo seu baixo custo, portabilidade e eficiência em diversos tipos de testes em campo e em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas Embarcados, Microcontroladores, Aquisição de dados, Identificação de Sistemas

1.0 - INTRODUÇÃO

A análise da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência é geralmente realizada através de simulações em programas computacionais devido à facilidade de realização de diferentes cenários e aplicação de contingências. Porém, em alguns casos é necessária a intervenção no sistema real, muitas vezes de modo a validar os resultados das próprias simulações. Para isto, são necessários diversos tipos de instrumentos, os quais representam diferentes custos e pouca portabilidade, tais como sistemas de aquisição de dados, sensores, geradores de sinais e interfaces de comunicação.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema digital embarcado que tem como objetivo principal auxiliar a realização de ensaios em campo, permitindo a injeção de sinais de excitação e a coleta de dados. Estes dados uma vez processados em ambiente computacional são úteis em metodologias de modelagem de sistemas através de técnicas de identificação, e ainda também na análise de modos de oscilação eletromecânica em sistemas interligados. Os ensaios em campo que foram realizados na malha do regulador de velocidade (RV) [1] da unidade geradora hidráulica (UGH) 08 da Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema digital embarcado desenvolvido foi projetado de modo que além de realizar a aquisição dos dados, também injete sinais de excitação, especificamente os sinais degrau e sequência binária pseudo-aleatória (SBPA) [2], [3], [4] e [5]. Nesta seção será apresentada uma descrição detalhada do projeto e funcionamento do sistema desenvolvido.

2.1- Circuito de Condicionamento do Sinal

O sistema de condicionamento do sinal de entrada é ilustrado através do diagrama em blocos da Figura 1 e do circuito eletrônico da Figura 2. O primeiro bloco é um buffer cuja função básica é realizar a adequação de impedâncias entre os dois circuitos [6]. Em seguida, este sinal é aplicado à um limitador (bloco 2), que tem a função de proteger o circuito. O bloco seguinte é um filtro passa-baixas ativo (bloco 3), que tem a função de filtrar os ruídos do sinal medido e evitar efeito *Aliasing*. Na saída do filtro passa-baixas há a entrada de um ganho, bloco 4, que tem a função de ajustar os valores de tensão ao somador no estágio seguinte. Até neste estágio há simetria no sinal, podendo ser positivo ou negativo. Como a entrada do DSPIC demanda sinais positivos em níveis de 0 a 5 Volts, a saída do ganho de ajuste é então somada à um sinal de tensão constante de 1,25V, proveniente de um gerador de tensão de referência de 2,5 V (bloco 6), o qual é dividida por um divisor resistivo (bloco 7) e aplicada no somador através de um buffer (bloco 8). O sinal resultante entre 0 e 2,5 v é aplicado à entrada do DSPIC.

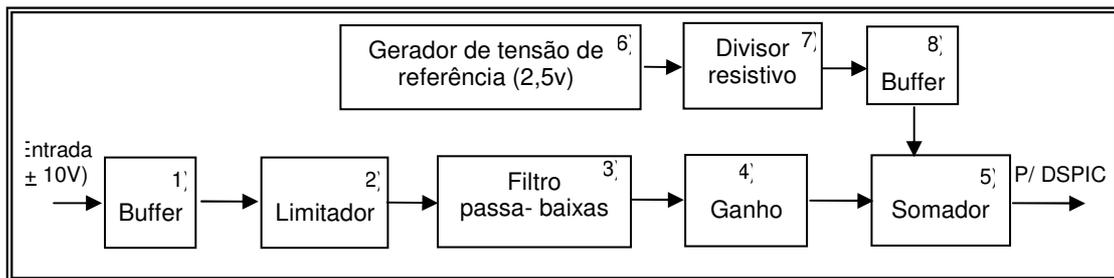


FIGURA 1 - Diagrama funcional do circuito de condicionamento de sinal.

A Tabela 1 ilustra a sequência de passos seguidos para projeto do filtro passa-baixas com ajuste de ganho através de um *trimpot* T. A Figura 2 ilustra o circuito de condicionamento dos sinais de entrada projetado.

TABELA 1 – Passos para projeto do circuito de condicionamento do sinal de entrada.

Etapas	Descrição
1ª	Cálculo de R_2C , para $f_c = 5\text{ Hz}$, resultando em $R_2 = 47\text{ k}\Omega$ e $C = 680\text{ nF}$;
2ª	Compensação de offset através de: $R_3 \leq R_2 // (R_1 + T)$, obtendo $R_3 = 39\text{ k}\Omega$;
3ª	Determinação do ganho unitário do somador, fazendo $R_4 = 10\text{ k}\Omega$;
4ª	Cálculo do ganho do filtro: $R_2 / (R_1 + T) = 0,125$, temos $(R_1 + T) = 376\text{ k}\Omega$, então escolhe-se $R_1 = 330\text{ k}\Omega$ e ajusta-se T de $100\text{ k}\Omega$ para $46\text{ k}\Omega$

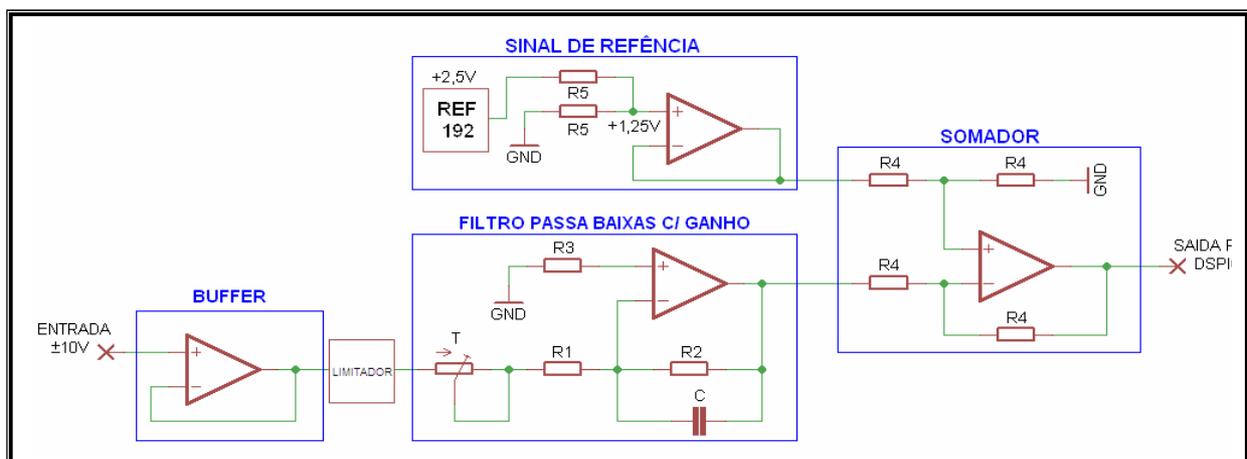


FIGURA 2 – Esquema elétrico do circuito de condicionamento de sinal.

2.2 – Circuito de Processamento Digital

A parte digital do sistema foi implementada em um microcontrolador do tipo DSPIC 30f3014 [7], podendo ser visualizado através do diagrama funcional da Figura 3. O sistema é baseado principalmente neste processador digital de sinais (bloco 1), que possui diversos periféricos internos dentre eles um conversor analógico-digital de 12 bits integrado com até 8 entradas analógicas. Através do conversor A/D é possível digitalizar o sinal analógico de entrada provindo do circuito condicionador. Este conversor interno utiliza uma tensão de referência de 2,5 V (bloco 2). O sinal de saída pode ser configurado entre Degrau e SBPA, os quais podem ser parametrizados através de uma interface com o usuário composta por um display LCD (bloco 3) e um teclado de navegação (bloco 4). O sinal de saída digital é convertido para a forma analógica através de um conversor digital-analógico (D/A) de 12 bits (bloco 5), o qual se comunica com o DSPIC através do protocolo de comunicação SPI. Os dados de entrada e saída são transmitidos para um PC através da UART (periférico do DSPIC) e um CI de interface serial, RS-232 (bloco 6).

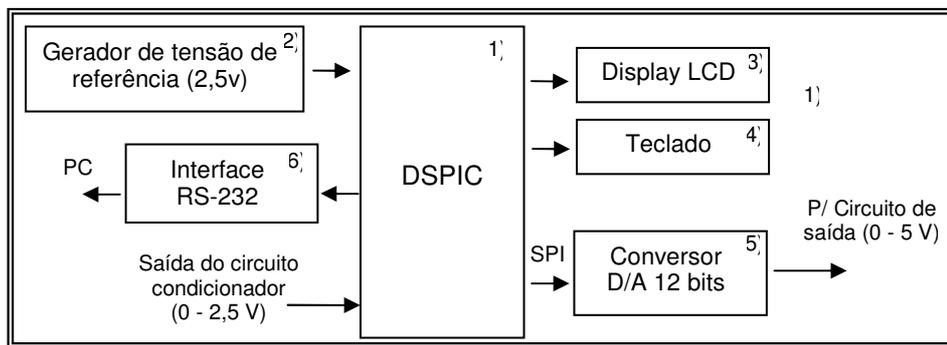


FIGURA 3 - Diagrama funcional do módulo de processamento digital

2.3 – Circuito Atuador

O sinal de saída do conversor D/A é condicionado por um circuito que permite o sinal de 0 a 5 V excursionar entre níveis positivos e negativos. Esta função foi implementada através de um circuito somador (bloco 1), (6), o qual subtrai 2,5 V (bloco 2) do sinal de saída do A/D, permitindo assim o sinal oscilar na faixa de $\pm 2,5$ V. O circuito pode ser representado pelo diagrama em blocos da Figura 4 e no esquema elétrico da Figura 5.

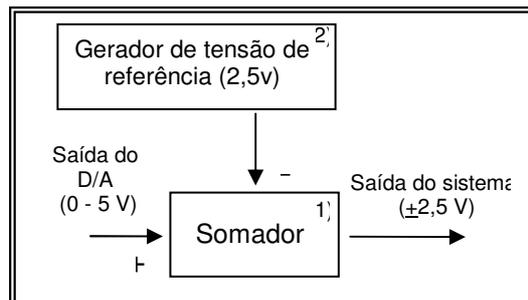


FIGURA 4 - Diagrama funcional do circuito atuador.

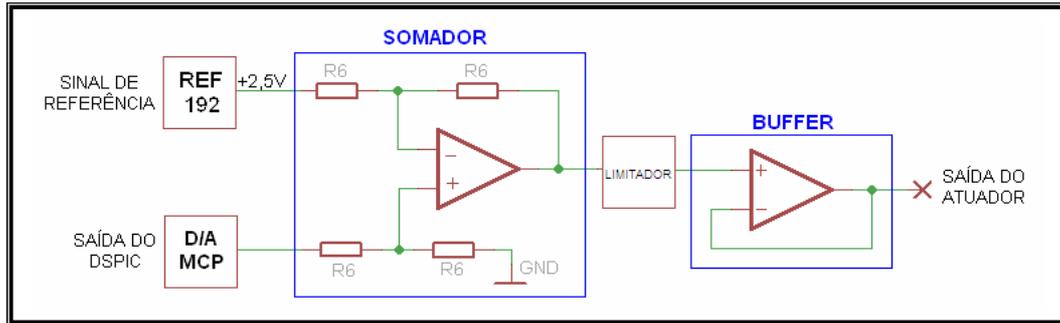


FIGURA 5 - Diagrama funcional do circuito atuador.

Limitadores na entrada e na saída do sistema digital foram incorporados com objetivo de proteger o circuito contra sobretensões e interferências eletromagnéticas [6].

A interface com o usuário é realizada através de um display LCD instalado no próprio módulo embarcado e também através de um PC portátil com um programa cliente. Assim, o usuário pode monitorar os dados coletados em tempo real e também configurar parâmetros tais como: tipo de sinal de excitação (SBPA ou degrau), amplitude e duração do sinal, parâmetros da SBPA, duração do ensaio e intervalo de amostragem. Os dados coletados são enviados diretamente para um PC portátil, através da UART e de uma interface serial RS-232, permitindo a análise das informações presentes nos dados em relação à modelagem dos componentes do RV, no domínio de tempo, e modo de oscilação eletromecânica presente na usina, no domínio da frequência. O sistema foi montado em uma caixa de padrão industrial com suporte para trilho DIN. A Figura 6 ilustra o sistema com a fonte de alimentação.



FIGURA 6 - Montagem do sistema de aquisição de dados.

3.0 - TESTES EM CAMPO NA UHE DE TUCURUÍ

A fim de validar o funcionamento do sistema embarcado desenvolvido, e utilizando a justificativa de se obter o melhor conhecimento de um modelo matemático que represente a dinâmica do sistema de atuação hidráulico do RV (válvula piloto, válvula atuadora e distribuidor), realizaram-se testes de identificação, onde a planta foi excitada por uma SBPA, devidamente projetada de acordo com a dinâmica verificada em ensaios de resposta ao degrau, adquirindo-se pares de dados de entrada e saída.

Dentre os ensaios realizados priorizou-se o de resposta ao degrau e SBPA no sistema de controle de velocidade da UGH 8, onde a máquina estava na condição parada e comporta fechada (teste de "água-morta"). A Figura 7 ilustra a instrumentação montada na sala de comando da UGH 8.



FIGURA 7 – Equipamentos montados ao lado do armário do RV da UGH 8.

3.1 Ensaio de Resposta ao Degrau

O primeiro teste realizado com o equipamento foi o de aplicação do sinal degrau, que foi configurado para uma amplitude de 0,6 V e 10 segundos de duração. A perturbação foi aplicada em um ponto de soma do circuito somador do sistema eletrônico de regulação de velocidade, onde um sinal positivo comanda o fechamento do distribuidor. A resposta do sistema foi adquirida através de sinais de tensão proporcionais à posição da válvula distribuidora e do distribuidor principal (Figura 8). Os dados foram amostrados com um período de 0.02 segundos.

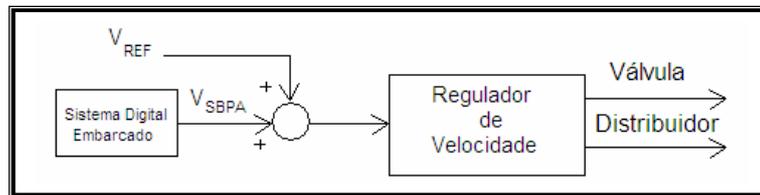


FIGURA 08 – Diagrama de blocos do circuito somador do Regulador de Velocidade.

A Figura 9 ilustra a aquisição do sinal de posição da válvula distribuidora para a perturbação do tipo degrau.

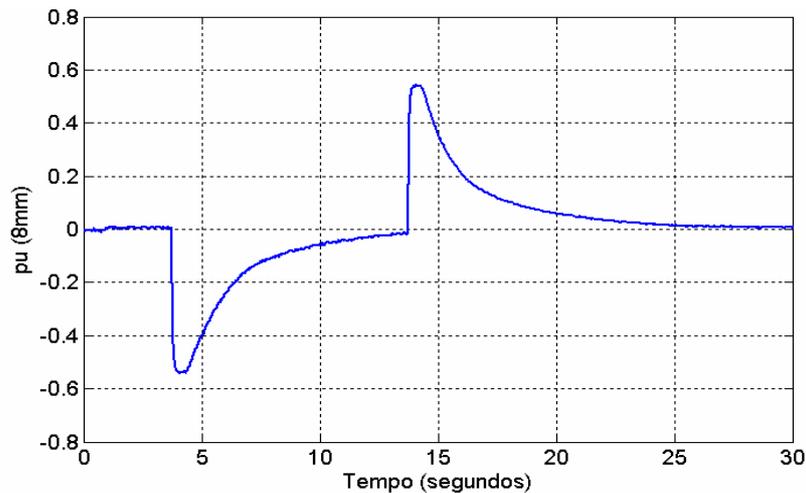


FIGURA 9 – Resposta da válvula distribuidora à uma variação degrau em ensaio com a máquina parada.

O ensaio de resposta ao degrau também foi realizado adquirindo-se o sinal de posição do distribuidor (Figura 10). Como era esperada uma resposta mais lenta, o degrau foi parametrizado para 15 segundos. Os dados foram amostrados com um período de 0.02 segundos.

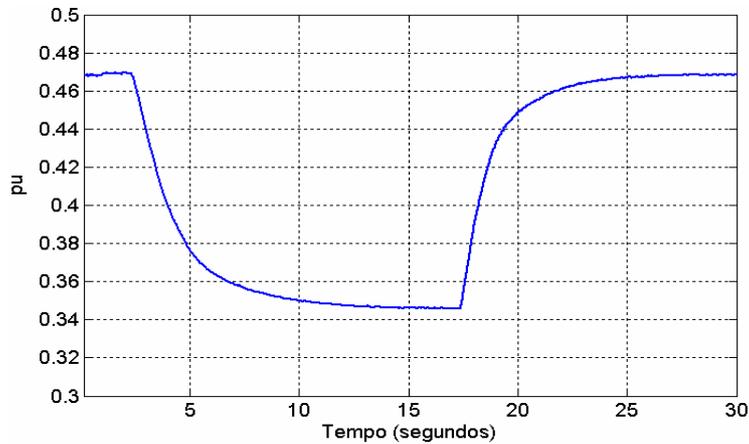


FIGURA 10 – Resposta da posição do distribuidor à uma variação degrau em ensaio com a máquina parada.

3.2 Ensaio de Resposta à SBPA

3.2.1..Caso 1 - Válvula Distribuidora

Após os ensaios de resposta ao degrau obtêm-se a informação necessária da dinâmica a ser modelada para o projeto da SBPA [3]. Durante os testes de identificação com a máquina em condição parada e comporta fechada, o sinal SBPA foi aplicado novamente no ponto do circuito somador, de acordo com o diagrama de blocos representado na Figura 8, com amplitude selecionada de ± 100 mV. O sinal de excitação do tipo SBPA foi configurado com os seguintes parâmetros mostrados na Tabela 2:

TABELA 2 – Parâmetros da SBPA Caso 1

Amplitude	Nº células (N)	Tempo entre bit's (Tb)
+ 200 mV	9	10ms

A Figura 11 ilustra os dados de entrada e saída adquiridos com um período de amostragem de 0,02 segundos.

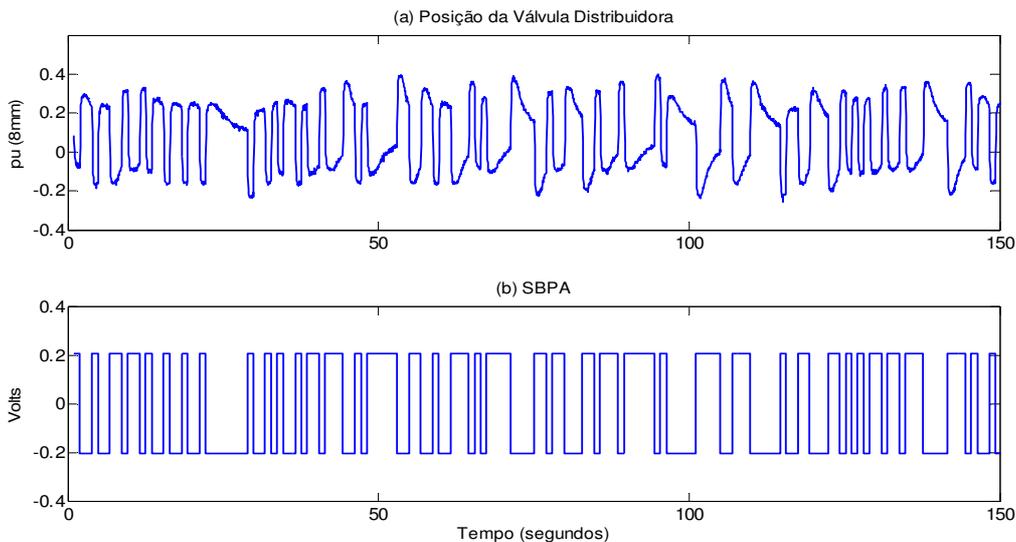


FIGURA 11 – Sinal de excitação SBPA (b) e resposta do sistema através do sinal da válvula distribuidora (a).

3.2.1..Caso 2 – Abertura do Distribuidor

A partir do primeiro ensaio de identificação, verificou-se que a SBPA projetada para excitar a dinâmica da válvula não era apropriada para a identificação do distribuidor, visto que este apresenta uma resposta mais lenta. Logo, com as mesmas condições operacionais, o ensaio foi repetido adquirindo o sinal de posição do distribuidor e mudando-se a faixa de frequências do sinal SBPA, de acordo com os parâmetros mostrados na Tabela 3:

TABELA 3 – Parâmetros da SBPA Caso 2

Amplitude	Nº células (N)	Tempo entre bit's (Tb)
± 200 mV	9	300ms

Os dados de entrada e saída foram coletados com um período de amostragem de 0,002. A Figura 12 ilustra os dados de entrada e saída adquiridos.

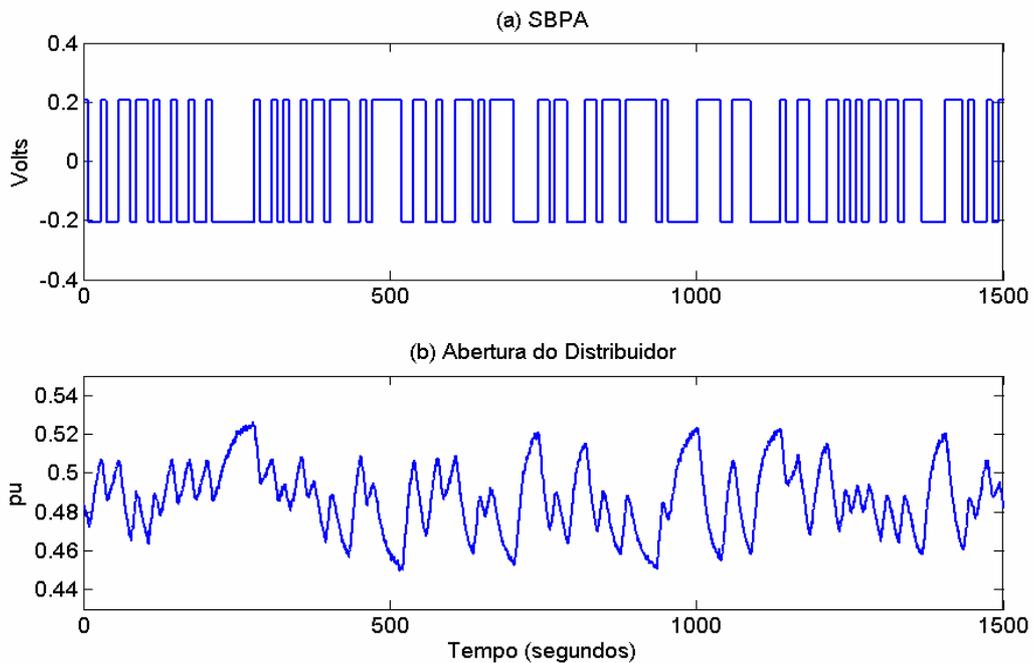


FIGURA 12 – Sinal de excitação SBPA (a) e resposta do sistema através do sinal de abertura do distribuidor (b).

4.0 - CONCLUSÃO

O sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho mostrou-se eficaz devido aos resultados obtidos na realização dos testes em laboratório e em campo, adquirindo dados no sistema de regulação de velocidade de uma UGH da UHE de Tucuruí. Dentre as principais características é possível citar o armazenamento de dados com alta confiabilidade que a partir dos quais é possível estimar modelos através de testes experimentais. Uma das grandes vantagens deste sistema é que pode ser utilizado com eficiência em testes de diversos tipos de sistemas, e apresenta relativamente baixo custo de implementação, pois utiliza componentes com alta disponibilidade no mercado brasileiro.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Kundur, P. – Power System Stability and Control – McGraw-Hill, 1994.

- (2) Aguirre, L.A.– Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais – Editora UFMG, Belo Horizonte, 2000.
- (3) Vermeulen, H.J.; Strauss, J.M.; Off-line identification of an open-loop automatic voltage regulator using pseudo-random binary sequence perturbations; IEEE; Volume 2,28 Sept.-1 Oct. 1999 Page(s):799 – 802.
- (4) Shen F.; He, R.; A feasibility study of excitation system parameters identification based on measured perturbation; Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International 3-6 Dec.2007 Page:904-909
- (5) Landau, Z, ZITO, Digital Control Systems – Springer, France, 2006.
- (6) Sedra, A. S.; Smith, K. C., Microeletrônica. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000.
- (7) Oliveira, A. S. de, Andrade, F.S. Sistemas Embarcados: hardware e firmware na pratica; 1 ed. – São Paulo: Érica, 2006.