

Amplificadores Rápidos de Alta Tensão para Controle de Transdutores Piezoelétricos

R.L. Cavasso-Filho, R.C. Viscovini, M.P. Arruda, H.J. Onisto e F.C. Cruz

Instituto de Física 'Gleb Wataghin'

Universidade Estadual de Campinas, CP.6165, Campinas, SP, 13083-970, Brasil

Recebido em 28 Outubro, 1999

Descrevemos controladores para transdutores piezoelétricos (PZTs), baseados em amplificadores operacionais de alta tensão, que permitem saídas de tensão bipolares com amplitudes máximas de 300, 400 e 1200 Volts, e com larguras de banda na faixa de vários kHz. Estes controladores de PZTs vêm sendo utilizados em servomecanismos para estabilização da frequência de lasers a ressonâncias de cavidades ópticas e transições atômicas ou moleculares.

We describe piezoelectric transducer (PZT) drivers, based on high-voltage operational amplifiers, which can deliver bipolar voltage outputs of 300, 400 and 1200 Volts with bandwidths over several kHz. These PZT-drivers have been used in servo mechanisms for laser frequency stabilization to optical cavities and atomic or molecular resonances.

I Introdução

Os materiais piezoelétricos apresentam a propriedade de se expandir ou contrair quando submetidos a uma diferença de potencial elétrico [1]. Inversamente, podem produzir uma diferença de potencial quando submetidos a uma tensão mecânica. Devido a estas propriedades, eles encontram hoje uma grande variedade de aplicações industriais, científicas e tecnológicas. Em particular, pode-se utilizá-los para o controle preciso, através da aplicação de uma tensão elétrica, de deslocamentos submicrométricos. Como um exemplo, em experimentos de física ou engenharia envolvendo o uso de lasers, frequentemente precisamos controlar o comprimento de um caminho óptico com uma resolução e precisão superior metade do comprimento de onda da luz, que para a região visível do espectro é da ordem de 0.5 micrometros. Em particular, os PZTs (*piezoelectric transducers*), como são comumente chamados, são os atuadores básicos usados para corrigir desvios na frequência de lasers contínuos e monomodos, especialmente empregados em espectroscopia atômica e molecular de alta resolução e precisão.

Os materiais piezoelétricos, particularmente as cerâmicas ferroelétricas, são hoje largamente disponíveis no mercado em uma grande variedade de formas (discos, pastilhas, tubos, pilhas ou *stacks*, etc), tamanho, tensão máxima de operação e coeficiente piezoelétrico. Neste artigo descrevemos a construção de

amplificadores de tensão bipolar, usados como controladores de transdutores piezoelétricos (*PZT driver*). Estes amplificadores, com saídas máximas de 300, 400 e 1200 Volts, reproduzem fielmente um sinal de entrada de baixa tensão, para frequências tão altas como no mínimo 5 kHz, e são baseados no uso de amplificadores operacionais de alta tensão. Eles estão sendo empregados, em nosso grupo, dentro de servomecanismos para estabilização de lasers a frequências de ressonância de cavidades ópticas e/ou transições atômicas e moleculares. Nestes servomecanismos realimentados, um sinal de erro de baixa tensão, que pode ser obtido por diferentes métodos [2], necessita ser amplificado com alta fidelidade até os níveis de tensão exigidos pelos diversos atuadores. Entre estes estão os PZTs, que podem exigir tensões entre algumas centenas de Volts e até 1.5 kVolt, onde problemas com descargas de arco elétrico começam a aparecer.

II Descrição do Circuito e Detalhes Experimentais

A Fig. 1 apresenta o diagrama elétrico do nosso controlador que, apesar de simples, pode ser separado em três partes para efeito de discussão: 1) a seção de saída, 2) a seção de entrada e 3) a de ajuste de *offset*. Os controladores foram inicialmente montados como unidades independentes, com fontes de alimentação C.C. embuti-

das, e posteriormente reproduzidos como módulos para bastidor padrão Eurocard [3]. Neste caso a alimentação C.C. é obtida do bastidor.

A seção de saída consiste em um único amplificador operacional de alta tensão, usado numa configuração inversora padrão [4], proporcionando um ganho de tensão de 20 vezes. Testamos três amplificadores operacionais, produzidos pela Apex Microtechnology Corp. [5]: PA84, PA88 e PA89, que são alimentados respectivamente por ± 150 V, ± 200 V e ± 600 V e fornecem saídas de corrente de até 50 mA, 100mA e 75 mA [5]. O circuito mostrado na Fig. 1 se aplica portanto ao PA88 e a discussão que faremos neste trabalho será baseada nele. Para o PA89 algumas poucas alterações e comentários seriam necessários na Fig. 1, como o uso de componentes compatíveis com alta tensão. Os amplificadores acima são relativamente sensíveis a eletricidade estática e os cuidados adequados na manipulação devem ser tomados. Entre as possíveis desvantagens do uso destes dispositivos estão a necessidade de importação, com os longos tempos usualmente envolvidos, e o preço (aproximadamente US\$200 para o PA84 e PA88 e US\$500 para o PA89). Entre as vantagens estão aquelas inerentes ao uso de amplificadores operacionais [4]: simplicidade do circuito, facilidade de montagem e manutenção, confiabilidade, estabilidade, baixo ruído e excelente resposta em frequência, como veremos na próxima seção. Uma alternativa, não testada por nós, inclui o amplificador operacional 3583JM (± 150 V), produzido pela Burr-Brown [6], e que pode ser obtido, por exemplo, através do representante em São Paulo [7], ao preço aproximado equivalente a US\$250.

O amplificador operacional de alta tensão é alimentado por uma fonte regulada de tensão bipolar. A Fig. 2 apresenta um diagrama do circuito para uma fonte simétrica e regulada de ± 200 V que construímos para uso com o PA88 e que pode ser facilmente modificada para uso com o PA84. Utilizamos o regulador LM317, trabalhando com uma margem de 40 Volts. Fontes reguladas de ± 15 V foram também utilizadas para alimentação dos outros amplificadores operacionais do circuito (TL071 ou equivalente). Para alimentar o PA89, utilizamos duas fontes comerciais de tensão regulada [8], com saída unipolar e selecionável de até ± 1500 V. O circuito do controlador pode ser facilmente modificado neste caso para uma configuração assimétrica (por exemplo - 200,+1000V), dependendo do interesse e aplicação específicos. Uma vez que PZTs são cargas capacitivas, uma precaução tomada foi a de colocar um resistor de proteção ($R=1$ k Ω) conectado entre o terra e a

saída do controlador (Fig.1). A função deste resistor é a de descarregar o PZT antes de se desligar a alimentação do amplificador operacional, impedindo que a saída do amplificador seja exposta a uma possível carga elétrica armazenada no PZT, o que poderia danificá-lo. Para isto, usamos uma chave de três posições, colocada no painel frontal, para ligar ou desligar o controlador. Entre a posição “ligada” e a “desligada”, há uma posição, que denominamos *standby*, que permite a conexão do resistor de proteção ao PZT, descarregando-o numa escala de tempo de poucos microsegundos. Além da saída de alta tensão, adicionamos uma saída de monitoração, onde uma amostra de baixa tensão do sinal de saída é disponível. Esta amostra é obtida pelo uso do divisor de tensão (100:1) na saída do amplificador operacional. O miliamperímetro indicado na Fig. 1 foi colocado no painel frontal, sendo bastante útil para monitorar o sinal de saída.

A seção de entrada possui três entradas de sinal distintas, que se superpõem num somador de tensão. Um relê acionado por uma chave, localizada no painel frontal, permite a inclusão opcional de um amplificador inversor de ganho unitário no percurso do sinal (Fig. 1). Isto é importante quando o sinal de entrada é um sinal de erro, que muda de polaridade no ponto desejado com uma inclinação positiva ou negativa. As opções de entrada podem ser usadas independentemente ou somadas e suas amplitudes podem ser variadas com potenciômetros do tipo multivoltas. Em nosso caso, frequentemente estamos controlando um PZT que suporta um espelho em uma cavidade óptica, seja a própria cavidade de um laser ou uma cavidade externa (por exemplo uma cavidade de Fabry-Perot). Sendo assim, usualmente as três opções de entrada correspondem a: 1) uma rampa de tensão, que pode ser usada para fazer uma varredura da frequência do laser; 2) um sinal tipicamente senoidal, que pode ser usado para modular a frequência do laser ou 3) um sinal de erro que pode ser usado para estabilizar a frequência de um laser a uma frequência óptica estável de referência.

A seção de ajuste de *offset* permite que seja adicionado um sinal CC estável e ajustável ao sinal de entrada do amplificador operacional. Esta seção baseia-se numa referência estável de tensão (tipicamente +10V, fornecidos pelo REF102 da *BurrBrown* [6] ou +6.95V, fornecidos pelo LM399 da *National Semiconductor*), que pode ser atenuada com um potenciômetro do tipo multivoltas, e que então passa por um amp-op (TL071 ou similar) de ganho unitário.

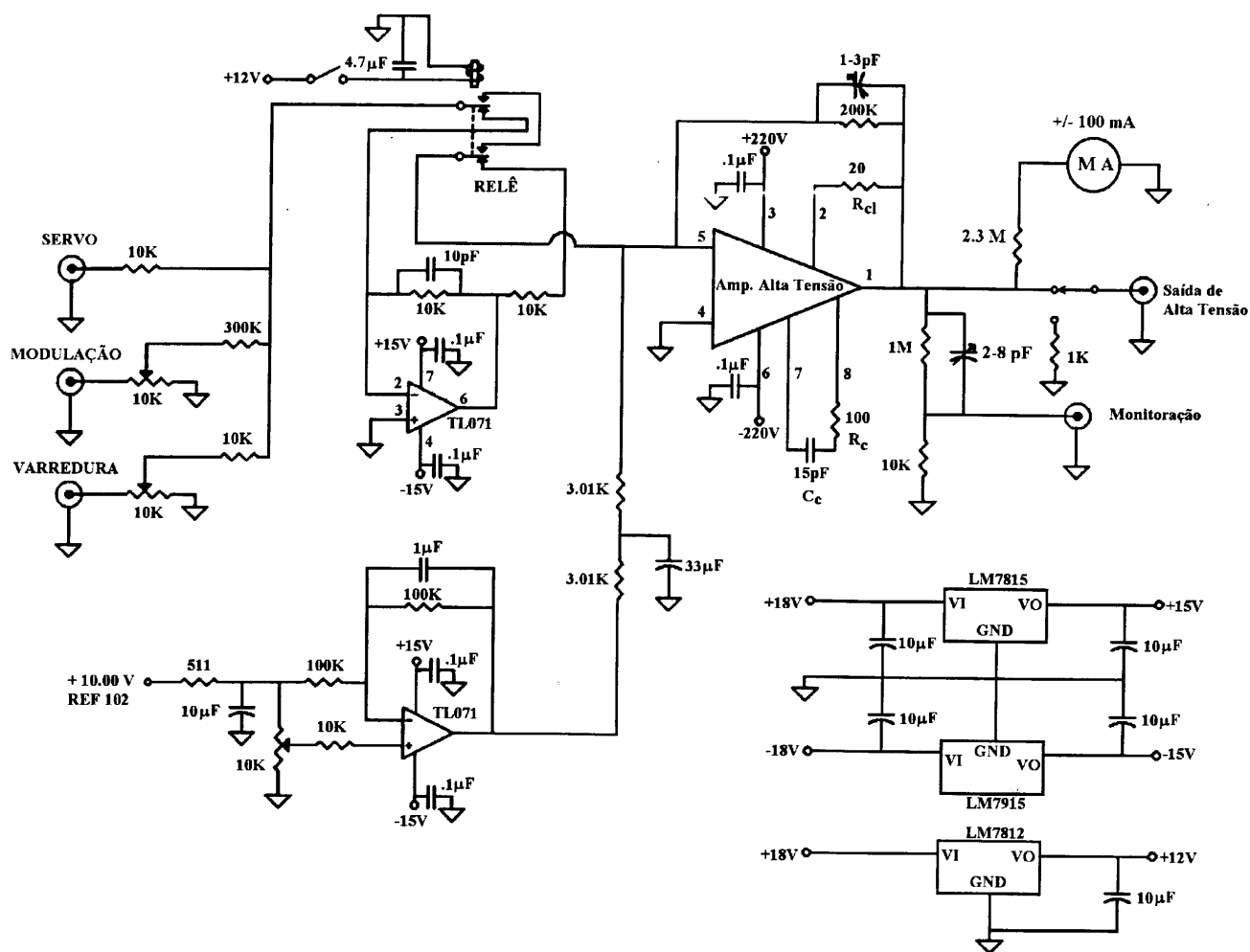


Figura 1. Diagrama esquemático do circuito para o controlador de PZT, baseado em um amplificador operacional de alta tensão. O circuito, como indicado, foi utilizado com o amplificador PA88.

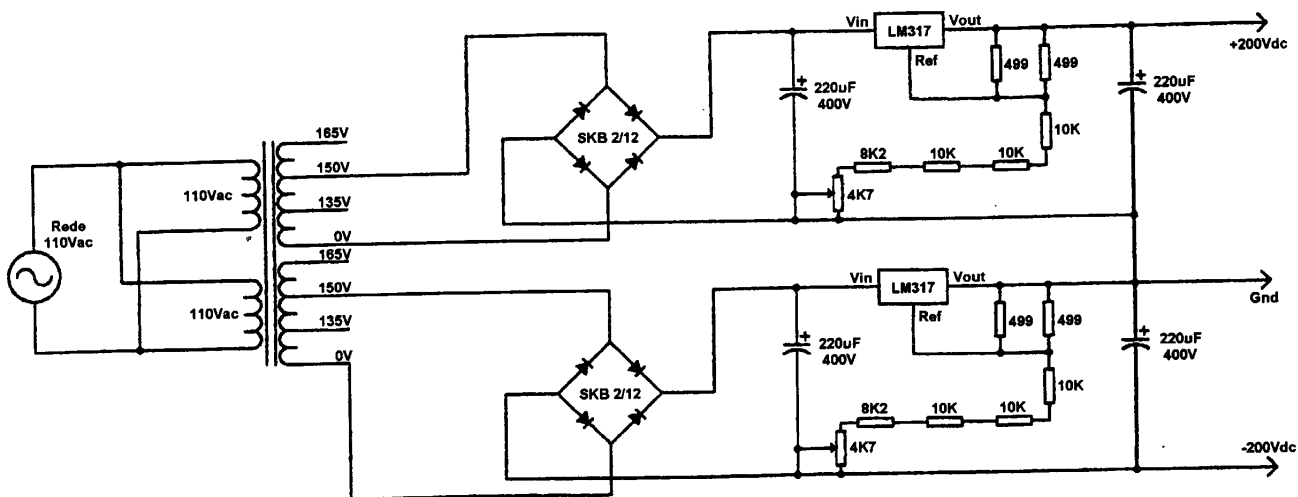


Figura 2. Fonte estabilizada de tensão, com saída de ± 200 V, utilizada para alimentar o amplificador operacional PA88.

III Resultados e Aplicações

Uma vez que usaremos o controlador de PZT em malhas de realimentação negativa [9] para estabilização de lasers, é importante a caracterização de seu ganho e deslocamento de fase em função da frequência. Inicialmente fizemos estas medidas com os amplificadores PA84, PA88 e PA89, usando um sinal senoidal na entrada do controlador e medindo a amplitude e a fase do sinal de saída. A amplitude do sinal de entrada foi ajustada para dar máxima amplitude do sinal de saída, correspondente a 90% da tensão de alimentação do amplificador de alta tensão. Confirmamos a resposta esperada do controlador, com um ganho praticamente constante até algumas dezenas de kHz, sem carga na saída. Com relação ao deslocamento de fase, verificamos um desvio de 45° para uma frequência de 60 kHz para o PA84, 35 kHz para o PA88, e 20 KHz para o PA89. Uma vez que a maioria dos PZTs respondem tipicamente até frequências de no máximo 10 KHz, onde aparecem ressonâncias mecânicas, vemos que a resposta de fase do controlador é bastante satisfatória para uso em servomecanismos realimentados deste tipo.

O amplificador operacional PA84 requer compensação de fase externa, já os amplificadores PA88 e PA89 requerem, além da compensação de fase externa, um resistor externo para limitação de corrente. A escolha dos componentes R_c e C_c da compensação de fase afeta a resposta em frequência para pequenos sinais e a escolha do resistor de limitação de corrente R_{cl} afeta a *Slew Rate* do amplificador, que por sua vez limita a resposta em frequência para grandes sinais. Os valores de R_c , C_c e R_{cl} foram determinados de acordo com os requisitos das nossas aplicações e das características dos PZTs por nós utilizados. Os procedimentos gerais para se determinar os valores destes componentes encontram-se nos manuais do fabricante dos amplificadores operacionais [5].

A fim de caracterizar melhor a resposta em frequência dos vários controladores, um novo conjunto de medidas foi realizado. Na tabela 1 são apresentadas as medidas obtidas com os controladores de PZT baseados nos amplificadores operacionais PA84 e PA88, respectivamente. Para estas medidas, uma onda quadrada foi usada como sinal de entrada e os tempos de subida e descida do sinal de alta tensão foram medidos (T_1 , T_2 , T_3 e T_4 , definidos na tabela). A amplitude do sinal de entrada foi ajustada para produzir na saída uma onda quadrada com amplitude de ± 140 V para o PA84 e ± 190 V para o PA88. Medimos ainda a amplitude pico-a-pico do ruído como sendo de 50 mV para o controlador baseado no PA84 (correspondendo a 0.04%) e 100 mV para o controlador baseado no PA88 (correspondendo a 0.05%). Para estas medidas, o amplifica-

dor inversor acionado por relê (Fig.1) não foi utilizado. Através dos tempos de subida e descida, pode-se calcular a *slew-rate* (SR) [4] do circuito e então a frequência máxima de resposta (tabela 1). As medidas foram feitas sob condição de operação sem carga (segunda coluna) e com carga (demais colunas). Neste último caso, três tipos de PZTs foram usados (PZT1: pastilha de uma polegada de diâmetro e $C=2.2$ nF; PZT2: pastilha de meia polegada de diâmetro e $C=3.5$ nF; e PZT3: tubo com diâmetro externo e comprimento de uma polegada, com $C=4.9$ nF). Além deles, utilizamos dois capacitores com capacitâncias abaixo e acima das dos três PZTs ($C_1 = 1.0$ nF e $C_2 = 10$ nF).

Observando a tabela 1, vemos que os tempos de subida e descida do sinal são da ordem de microssegundos. A partir destes tempos determinamos, para operação sem carga, *slew rates* de 116 V/ μ s e 40.4 V/ μ s e frequências máximas de operação de 66 kHz e 17 kHz, para o PA84 e PA88 respectivamente. Sob condição de operação com carga, verificamos que a frequência máxima de operação, para máxima variação do sinal de saída (± 140 V para o PA84 e ± 190 V para o PA88), decresce aproximadamente de forma linear com a capacitância da carga. Para os três PZTs utilizados ($C=2.2$, 3.5 e 4.9 nF, respectivamente), estas frequências são: 12, 5.9 e 5.5 kHz, para o PA84 e 4.9, 2.6 e 2.5 kHz, para o PA88. Concluimos então que os controladores de PZT apresentados, além de apropriados para uso geral, são ainda bastante convenientes para uso em servomecanismos para estabilização de lasers, permitindo o aproveitamento de toda a faixa de resposta em frequência da maioria dos PZTs. Isto sem introduzir muita defasagem no sinal, possibilitando uma operação estável quando aplicados a sistemas com realimentação negativa.

Os controladores de PZTs utilizando os amplificadores PA84, PA88 e PA89 vêm sendo utilizados com sucesso em nosso grupo em dois experimentos principais. Em um deles, utilizamos um controlador para atuar em um PZT que controla a posição de um espelho da cavidade de um laser de Ti:Safira, também desenvolvido em nosso grupo [10]. O controle da posição deste espelho permite sintonizar a frequência deste laser, ou estabilizá-la a uma referência externa. No outro experimento, o controlador posiciona o espelho de uma cavidade óptica externa, utilizada para duplicação em frequência de um laser de diodo em 846 nm. Esta montagem é usada para gerar radiação laser em 423 nm, necessária para resfriamento e aprisionamento de átomos de Cálcio [11]. Para maximizar a potência gerada no segundo harmônico ($P_{2\omega}$), uma cavidade em anel é utilizada para aumentar a potência de luz no modo fundamental, que é focalizada em um cristal não-linear de

niobato de potássio. A frequência de ressonância desta cavidade deve estar sempre estabilizada à frequência do laser de diodo. Sendo assim, seu comprimento óptico deve ser controlado com precisão inferior a $\lambda/2$ ($846/2 = 423$ nm) para mantê-la sempre em ressonância com o laser, permitindo então que a potência intracavidade

seja dezenas de vezes maior que a potência incidente. Isto aumenta drasticamente a eficiência de conversão, uma vez que a potência gerada no segundo harmônico é proporcional ao quadrado da potência incidente no cristal, ou seja, a potência intracavidade.

Amplificador PA84 (+/- 140V – Sem Inversor – Ruído = 50mV)

Medida	Sem Carga	Capacitor 1.0 nF	PZT 1 2.2nF	PZT 2 3.5nF	PZT 3 4.9nF	Capacitor 10.0nF
T ₁ (0-10%) (μs)	0.9	1.5	1.8	3.4	3.9	6.0
T ₂ (10-90%) (μs)	1.4	5.7	11.8	23.3	24.9	49.6
T ₃ (100-90%) (μs)	0.9	1.4	1.8	3.1	3.6	6.6
T ₄ (90-10%) (μs)	1.5	5.7	10.8	20.1	23.2	56.4
Slew Rate (V/μs)	116	38.9	20.6	10.5	9.7	4.4
f _{max} (KHz)	66	22	12	5.9	5.5	2.5
f _{oper} (KHz)	10	10	10	5.0	5.0	2.0

Amplificador PA88 (+/- 190V – Sem Inversor – Ruído = 100mV)

Medida	Sem Carga	Capacitor 1.0 nF	PZT 1 2.2nF	PZT 2 3.5nF	PZT 3 4.9nF	Capacitor 10.0nF
T ₁ (0-10%) (μs)	1.4	2.2	4.8	5.9	7.7	11.8
T ₂ (10-90%) (μs)	6.1	14.1	27.9	54.2	55.0	113
T ₃ (100-90%) (μs)	1.9	3.3	3.6	6.6	8.4	10.8
T ₄ (90-10%) (μs)	7.5	13.9	28.1	51.6	53.3	107
Slew Rate (V/μs)	40.4	22.1	11.6	6.3	6.1	3.1
f _{max} (KHz)	17	9.3	4.9	2.6	2.5	1.3
f _{oper} (KHz)	10	10	5.0	2.5	2.5	1.0

Slew Rate = $\Delta V/(T_1+T_2)$ ou $\Delta V/(T_3+T_4)$ [Menor]

$f_{max} = Slew\ Rate/(2\pi \Delta V)$

f_{oper}: frequência de operação sem distorção visível de onda senóide de amplitude máxima.

Tabela 1 - Caracterização da resposta com frequência para os amplificadores operacionais PA 84 e PA 88.

IV Conclusão

Descrevemos a construção de amplificadores de alta tensão, baseados em amplificadores operacionais, para uso como controladores de PZTs. A simplicidade do circuito, a resposta em frequência na faixa kHz e o baixo ruído constituem seus principais atrativos. Estes controladores foram testados e estão sendo utilizados com sucesso em experimentos que envolvem estabilização de lasers e controle preciso de caminhos ópticos.

References

- [1] *Building Scientific Apparatus, A Practical Guide to Design and Construction*, J.H. Moore, C.C. Davis, and M.A. Coplan, 2nd Ed., Addison-Wesley, 1989; *Piezoelectric Ceramics, Properties and Applications*, Phillips Corporation, Netherlands.
- [2] M.W. Hamilton, "An introduction to stabilized laser", *Contemp. Physics*, **30**, 1 (1989) 21-33.
- [3] A montagem de circuitos em placas padronizadas facilita a manutenção, a compatibilidade e a troca de dados entre diferentes instrumentos. O padrão Eurocard foi escolhido devido ao uso disseminado.
- [4] W.G.Jung, *IC Op-Amp Cookbook*, 3rd Ed., SAMS, 1994; P.Horowitz e W.Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge

- Univ. Press, 2a Ed., 1993.
- [5] Ver por exemplo: Apex Data Book, vol.6, Apex Microtechnology Corporation, Tucson, Arizona, EUA, Tel: 001-1-800-546 2739; Fax: 001- 520-888-3329. Menção do fabricante é feita apenas para fins de informação, não significando recomendação por parte dos autores, ou que não exista outro produto equivalente ou superior.
- [6] Ver por exemplo, o catálogo de amplificadores operacionais da *Burr-Brown Corporation*, ou consultar na internet (<http://www.burr-brown.com>).
- [7] Um representante atual da Burr-Brown em São Paulo é a Artimar Ltda (tel. 011- 2310277). Menção somente para fins de informação.
- [8] Utilizamos fontes estabilizadas produzidas pela Tectrol (<http://www.tectrol.com.br>). Menção do fabricante somente para fins de informação.
- [9] R.C. Dorf e R.H.Bishop, *Modern Control Systems*, Addison-Wesley, 7a Ed., 1995.
- [10] Haroldo J. Onisto, Tese de Mestrado - FEEC/ UNICAMP, em andamento.
- [11] G.Woehl Jr, G.A.Garcia, F.C.Cruz, D.Pereira, and A.Scalabrin, *Applied Optics*, **38**, (1999) 2540-2544.