

# Módulo de Posicionamento Micrométrico: Projecto, Construção e Caracterização

Rogério Pais Dionísio

Escola Superior de Tecnologia / Departamento de Engenharia Electrotécnica e das Telecomunicações  
Castelo Branco, Portugal  
[rdionisio@est.ipcb.pt](mailto:rdionisio@est.ipcb.pt)

**Resumo** — Este artigo descreve o projecto e a construção de um sistema de controlo para um actuador linear motorizado, utilizado na sintonia mecânica de redes de Bragg. O módulo realizado compõe-se de uma parte electromecânica onde a fibra óptica é colocada para ser comprimida ou esticada, e uma parte electrónica destinada a comandar o motor utilizado. A função de controlo é executada por um programa de computador. São descritos os elementos físicos e lógicos responsáveis pela função de controlo. Finalmente, o sistema é caracterizado em função da repetibilidade e precisão.

## I. DESCRIÇÃO GERAL

Por uma questão de autonomia, o módulo electrónico é alimentado directamente a partir da rede eléctrica sem necessidade de qualquer outra fonte de alimentação exterior. O utilizador pode, por intermédio de um painel de comando, verificar o estado do sistema por meio de dois LEDs (alimentação e motor). O único interruptor presente serve para ligar ou desligar o módulo. Deste modo, facilita-se a utilização e minimizam-se as necessidades de consulta de documentação e os erros de manuseamento.

O controlo do sistema é totalmente realizado por um programa instalado numa unidade externa, como por exemplo um PC. É através de uma ligação IEEE 1284-1994 (porta paralela), fixa na parte traseira da caixa, que se realiza a transmissão dos comandos.

## II. MONTAGEM FÍSICA

Na descrição da montagem física serão contempladas duas partes distintas. Na primeira, em que se foca a parte electromecânica, será descrita a construção de uma plataforma móvel experimental. Na parte relativa à electrónica, serão referidos os vários circuitos electrónicos responsáveis pelas funções de comando e comunicação com um PC.

### A. Electromecânica

Na Figura 1 encontra-se uma fotografia da montagem electromecânica do sistema de sintonia. É constituída por uma base em alumínio, onde são fixadas duas plataformas de translação linear da marca *Newport*. A primeira plataforma é actuada por um motor DC (*Newport* modelo 860), que permite deslocamentos lineares até 25 mm. A outra plataforma é acoplada a uma cabeça micrométrica com deslocamento máximo de uma polegada.

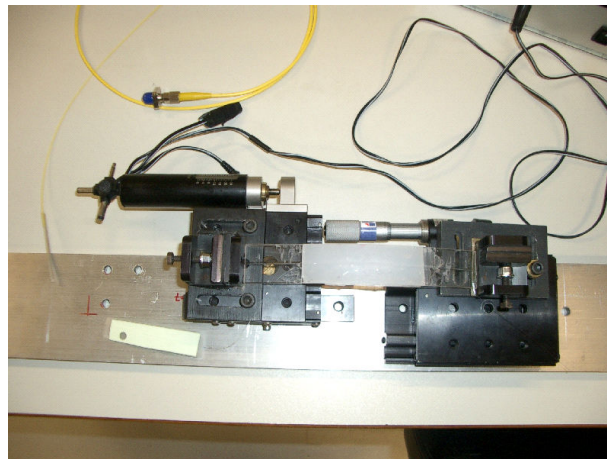


Figura 1 - Vista de topo da componente electromecânica do sistema de sintonia. É visível, entre as duas plataformas móveis, uma base em acrílico sob o efeito de uma força de compressão.

Um sistema com estas características permite acomodar-se ao método de sintonia desejado. A distância entre as plataformas é ajustada ao comprimento inicial da fibra pela cabeça micrométrica. No caso de sintonia por tensão sobre a fibra, estão colocadas duas pequenas prensas de fixação em cada plataforma. Se a sintonia utiliza uma lâmina flexível, as prensas servem de batentes para poder fixá-la, como se pode ver na figura anterior.

As características eléctricas do motor foram medidas ligando-o a um controlador de velocidade manual (*Newport* modelo 861), que acompanha o motor. As medidas de tensão e corrente estão descritas na tabela 1. Verifica-se que é necessário uma fonte de tensão variável e com características polares, para permitir alterações na velocidade e para inverter o sentido de rotação, respectivamente.

TABELA 1

Quadro das tensões e correntes medidas aos terminais do motor.

	Sentido positivo		Sentido negativo	
	Vel. Mín.	Vel. Máx.	Vel. Mín.	Vel. Máx.
Tensão (V)	1.26	8.8	-1.26	-8.8
Corrente (mA)	8	12	-6.5	-12

### B. Electrónica

Os principais aspectos funcionais da electrónica estão sintetizados no diagrama da Figura 2. Definem-se assim três grandes funções: a alimentação do conjunto, a

conversão digital – analógica e o interruptor analógico do motor.

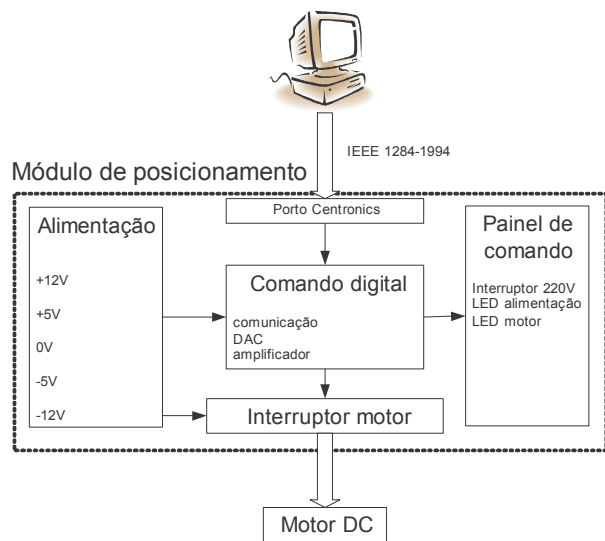


Figura 2 - Diagrama de blocos da parte eletrônica do sistema de posicionamento e respectivas interfaces.

**Alimentação:** A alimentação faz-se directamente da rede eléctrica (220 V / 50 Hz). Inclui-se um interruptor e um fusível de protecção. A entrada é transformada e rectificadora, ficando disponíveis cinco saídas para cada um dos valores: +12 V, +5 V, -5 V, -12 V e 0 V (massa).

**Conversão digital – analógica:** Esta unidade dispõe de um DAC com resolução na entrada de 12 bits, que fornece na saída uma tensão contínua proporcional ao número binário da entrada. É utilizado neste projecto para regular a velocidade do motor DC.

O comando do DAC é realizado por uma ligação à porta paralela de um PC. O registo de dados (0x378) é utilizado para transmitir o valor binário correspondente a uma tensão à saída do DAC, e os 3 primeiros bits do registo de controlo (0x37A) actuam sobre as linhas de controlo do conversor digital – analógico. A descrição das ligações encontra-se na tabela 2.

No modo bipolar, a tensão de saída do DAC [1] varia entre -2.048 V e +2.047 V. A correspondência entre o código de entrada e a saída vem descrita na tabela 3. Esse intervalo de tensões é inferior ao descrito na tabela 1. É portanto necessário incluir um andar de ganho igual a  $8.8/2.048 \approx 4.3$ . utiliza-se uma configuração inversora com um amplificador operacional [2].

TABELA 2

Quadro de correspondências físicas e lógicas entre o porto Centronics e o conversor de sinais digitais em sinais analógicos (DAC).

IEEE 1284-1994				DAC	
Pino da tomada Centronics	Registo	Bit de registo	Lógica invertida	Função	Pino
2-9	Dados	0-7	Não	Dados	24, 1-7
1	Controlo	0	Sim	$\overline{CS}$	11
14	Controlo	1	Sim	A0/A1	8 e 9
31	Controlo	2	Não	$\overline{WR}$	10

A inversão da polaridade provocada pelo andar de ganho é compensada pelo programa de controlo descrito na secção IV. Finalmente, a corrente de saída máxima do

amplificador (25 mA) permite um fornecimento de energia adequado para o motor.

TABELA 3  
Código bipolar e respectiva tensão.

Entrada (Código binário)	Saída (V)
1111 1111 1111	2.047
1000 0000 0001	1.000
1000 0000 0000	0.000
0111 1111 1111	-1.000
0000 0000 0000	-2.048

**Interruptor analógico:** O interruptor é o responsável directo pelo corte ou fornecimento de energia para o motor. O seu estado é controlado por uma entrada digital. Em concreto, utiliza-se para o efeito o 4º bit do registo de controlo da porta paralela.

É fundamental que atraso temporal entre um comando vindo do PC e a resposta do motor seja a menor possível. Além disso, a resistência do interruptor no estado ligado deve ser muito pequena, para evitar discrepâncias entre os valores desejados e reais de tensão no motor.

A opção recaiu sobre o circuito integrado com tecnologia CMOS [3]. Trata-se de um interruptor analógico cuja resistência quando fechado é inferior a  $1.25 \Omega$ . O tempo de resposta na abertura ou fecho do interruptor é aproximadamente 100 ns, o que faz deste circuito integrado uma alternativa ao uso de relés electromecânicos.

Para que o utilizador seja informado do período de tempo em que o motor está ligado, é adicionado um LED ao terminal de controlo do interruptor analógico, que se ilumina quando o interruptor fecha.

**Esquema e placa de circuito impresso:** A placa de circuito impresso foi desenhada utilizando o programa de desenvolvimento integrado PROTEL 99 SE. O processo inicia-se pelo desenho do circuito eléctrico numa folha de esquemas. A conversão do esquema para uma placa de circuito impresso resulta inicialmente num conjunto de componentes ligados entre eles por conexões eléctricas. As pistas físicas são depois desenhadas em conformidade com as ligações eléctricas.

A placa de circuito impresso resultante tem duas faces, onde é incluído um plano de massa para uniformizar o sinal de massa (0 V) em toda a superfície.

### III. APRESENTAÇÃO VISUAL

A Figura 3 mostra a placa de circuito impresso com todos os componentes soldados. Encontra-se acondicionada numa caixa metálica, destinada a garantir a protecção mecânica e ao mesmo tempo minimiza as interferências eléctricas exteriores.

É visível, no topo da fotografia, o painel posterior da caixa onde se encontra o cabo de ligação à rede eléctrica e uma ficha Centronics conectada por um cabo à porta paralela de um computador. O cabo de saída para o motor, visível na parte inferior da fotografia, é terminado por uma ficha mini – Jack fêmea.

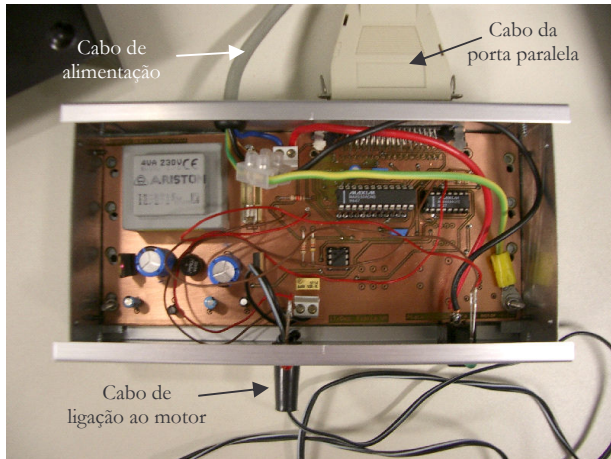


Figura 3 - Fotografia do hardware produzido.

O protótipo do sistema de sintonia é mostrado na Figura 4. É visível o painel frontal da caixa de controlo electrónico, onde o cabo de alimentação do motor partilha o espaço com um interruptor e dois LEDs indicadores. a fibra onde se encontra a rede Bragg é terminada por um conector FC.

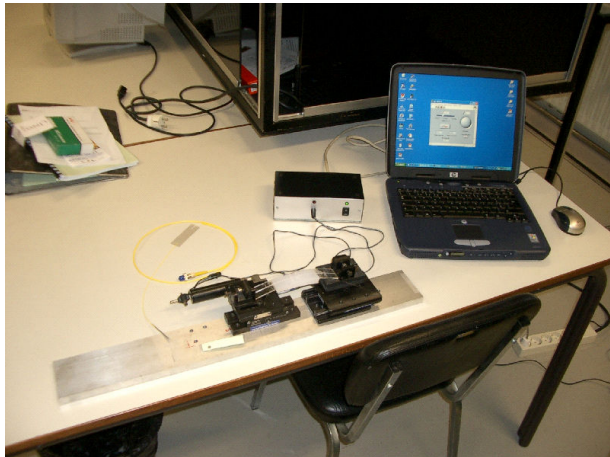


Figura 4 - Vista geral do sistema de sintonia computadorizado.

#### IV. PROGRAMA DE CONTROLO

A aplicação de controlo para o sistema de sintonia foi programada em *LabVIEW* [4]. É um ambiente de programação integrado, onde a escrita de código é substituída por um conjunto de símbolos gráficos, que se interligam entre si segundo um determinado fluxo. Uma das características mais atraentes desta ferramenta recai na facilidade e rapidez na criação de interfaces gráficas. Estas devem permitir uma utilização intuitiva do programa a quem queira utiliza-lo.

Em concreto, o programa deve permitir escolher a velocidade do motor e a distância a percorrer. O utilizador deve poder iniciar o programa quando o desejar, e deve ser permitido parar o sistema em caso de emergência. A sequência lógica da aplicação desenvolvida vem descrita no diagrama de fluxo da Figura 5. Dos vários blocos representados, merecem destaque os seguintes: a actualização da tensão de saída do DAC e a conversão da distância a percorrer numa constante temporal.

#### A. Actualização da tensão de saída no DAC

A sequência descrita na tabela 4 descreve o processo de actualização da tensão de saída do conversor digital – analógico.

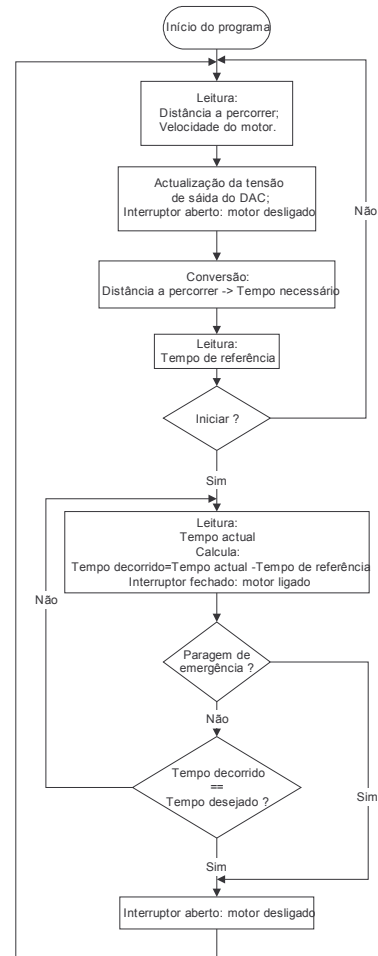


Figura 5 - Diagrama de fluxo para o programa de controlo.

O DAC é adequado para ser ligado a sistemas com linha de dados de 8 bits. Sendo o número de bits de resolução igual a doze, o programa de controlo deve primeiro escrever os 8 bits menos significativos, seguido dos 4 bits mais significativos, mediante a configuração de duas linhas de endereço, *A0* e *A1*.

Por uma questão de simplicidade, as linhas de endereço estão ligadas entre si. Desse modo, um nível lógico '0' permite actualizar os 8 bits menos significativos, ao passo que o nível '1' actua sobre os 4 bits mais significativos.

#### B. Conversão da distância em tempo

O sistema de sintonia foi projectado de forma a não utilizar qualquer elemento codificador que detecte a posição efectiva da plataforma móvel. Utiliza uma técnica de controlo em malha aberta. Dado um comando de posicionamento ao motor, a posição da plataforma móvel resultante não é medida, mas sim inferida.

O método usado consiste inicialmente em calcular e armazenar numa variável o tempo necessário para que as variáveis *distância* e *velocidade*, definidas pelo utilizador na interface gráfica da Figura 8, sejam satisfeitas:

TABELA 4

Sequência lógica para actualização da tensão de saída do DAC. O símbolo × significa que esse bit pode ter o valor lógico '1' ou '0'.

Fase	Descrição	IEEE 1284-1994		DAC
		Registo	Código binário a transmitir	Endereço A0 / A1
1	Inicialização do DAC	Controlo	××××1110	0
			××××1100	1
2	Colocar o valor binário na entrada do DAC	Dados	××××××××	×
3	Activação da escrita no DAC CS=0	Controlo	××××1111	0
			××××1101	1
4	Escrita no DAC WR =0	Controlo	××××1011	0
			××××1101	1
5	Actualização da tensão à saída do DAC WR =1	Controlo	××××1111	0
			××××1101	1
6	Desactivação da escrita no DAC CS=1	Controlo	××××1110	0
			××××1100	1

$$\text{tempo necessário} = \text{distância} / \text{velocidade} \quad (1)$$

A variável *distância* pode tomar valores entre  $-10 \text{ mm}$  e  $+10 \text{ mm}$ . A velocidade, embora não tenha uma escala numerada na interface gráfica, é internamente associada a uma variável *escala*, que corresponde à posição do botão regulador de velocidade (ver a Figura 8). Relaciona-se com o código binário a transmitir ao DAC por:

$$\text{código binário} = \begin{cases} 2047 + \text{escala}, & \text{distância} \leq 0 \\ 2047 - \text{escala}, & \text{distância} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

No instante em que é dada ordem para ligar o motor, o programa armazena na variável *referência* o último valor dum contador interno, para servir de referência temporal. O motor é desligado quando o valor do contador for igual a: *referência* + *tempo necessário*.

Este esquema só resulta se for caracterizada a velocidade do motor num regime de carga, e daí ser calculada a correspondência entre o código binário à entrada do DAC e a velocidade medida experimentalmente. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos. Cada ponto obtido resulta da média de 4 medidas, alternando sucessivamente o sentido de rotação do motor.

Caracterizado o comportamento do motor, define-se uma recta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados, que relaciona a variável *escala* com a velocidade do motor. O tempo é então calculado com base na equação (1). O bloco de código que implementa esta relação está representado na Figura 7.

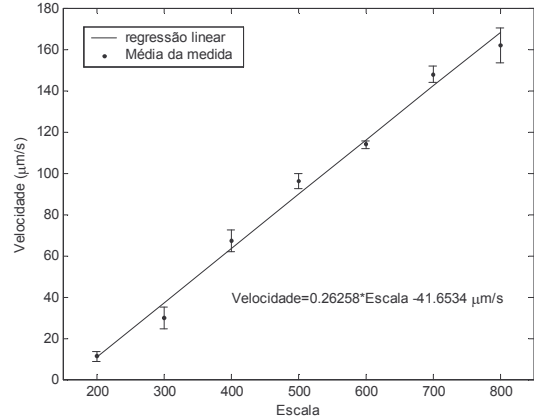


Figura 6 – Relação entre a variável *escala* e a velocidade. Cada ponto vem representado com o desvio padrão, resultante do processo de medida.

```

tempo=abs(dist)/
(0.2626*escala-41.6534);
tempo=tempo*1000000;

```

Figura 7 – Conversão da distância em tempo, em função da equação de velocidade.

### C. Interface gráfica

A interface da Figura 8 realiza a ligação entre o sistema de sintonia e o elemento humano. A velocidade do motor é ajustada por um cursor rotativo. A distância a percorrer é introduzida numericamente ou seleccionada por um cursor linear.

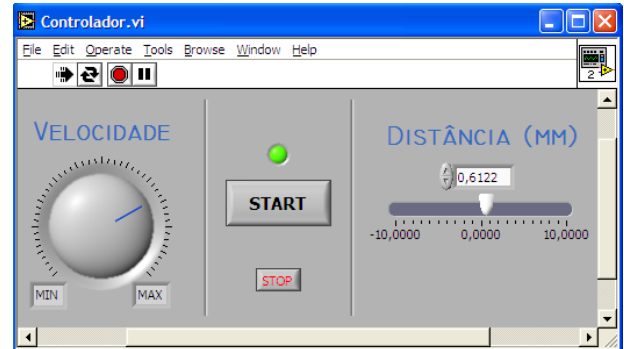


Figura 8 – Interface gráfica da aplicação de controlo.

O interruptor *START* dá início ao funcionamento do motor. Sempre que necessário, o sistema de sintonia é desligado carregando no botão *STOP*. Finalmente, o utilizador pode obter informação do estado do motor através de um indicador luminoso.

## V. CARACTERIZAÇÃO

Realizada a montagem do sistema de sintonia nas suas componentes electrónica e electromecânica, efectuou-se um conjunto de medições tendentes à sua caracterização. Todo o processo de caracterização é baseado na norma ISO 230-2 [5].

### A. Medidas realizadas

Os dados são recolhidos à temperatura ambiente, utilizando um método de translação linear e bidireccional, ilustrado na Figura 9. A distância pretendida entre cada posição é fixada em  $500 \mu\text{m}$  no programa de controlo, num total de  $3.5 \text{ mm}$  em cada sentido, o que corresponde a 15% do percurso total realizável. A distância percorrida é depois confirmada com a ajuda de um micrómetro com resolução máxima de 0,1 milésima de polegada. A velocidade do motor deve ser relativamente pequena, para minimizar o erro do sistema. Em concreto, se a variável *escala* for igual a 500, a velocidade usada é aproximadamente igual a  $90 \mu\text{m/s}$ .

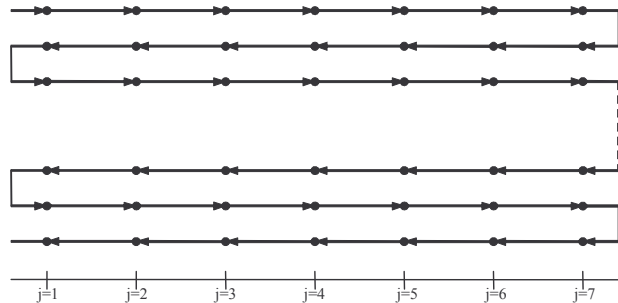


Figura 9 – No método de recolha linear, as medições iniciam-se movendo a plataforma móvel para a posição  $j = 1$  (a extremidade mais à esquerda) e seguindo em direcção à extremidade oposta ( $j = 7$ ). O sentido de translação é depois invertido, de forma a recolher novos dados, da extremidade direita para a esquerda. O método repete-se até serem recolhidas 5 medidas para cada posição.

A Figura 10 mostra o conjunto de medidas realizadas. O desvio vertical entre as rectas de melhor ajuste do sentido crescente e decrescente, deve-se à *zona morta* do sistema. É fruto da combinação da histerese do material e do movimento relativo entre os diversos componentes do sistema.

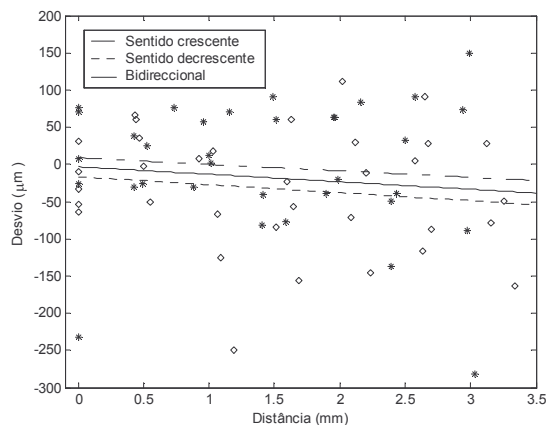


Figura 10 – Representação gráfica dos desvios medidos em cada posição, nos sentidos crescente (\*) e decrescente (◊). As rectas de melhor ajuste são obtidas pelo método dos mínimos quadrados.

### B. Repetibilidade e precisão

Uma das características que merece uma análise cuidada é a repetibilidade. É uma medida da capacidade de um sistema atingir uma determinada posição após várias tentativas, seguindo sempre a mesma direcção, ou partindo de direcções contrárias.

A norma ISO 230-2 assume que a repetibilidade é igual a quatro vezes o desvio padrão. Numa distribuição normal, 95% dos dados recolhidos estão dentro do intervalo de incerteza caracterizado pela repetibilidade.

Por outro lado, a precisão é a diferença entre o deslocamento efectivo e o deslocamento pretendido. É também conhecida como o erro do sistema e pode ser facilmente compensado por software.

TABELA 5  
Informação estatística das medidas realizadas com o sistema de posicionamento motorizado.

	Sentido crescente ( $\mu\text{m}$ )	Sentido decrescente ( $\mu\text{m}$ )	Bidireccional ( $\mu\text{m}$ )
Média	496.91	535.01	515.96
Variância	5476.511109	7066.719274	6534.370019
Desvio padrão	74.00345336	84.06378099	80.83545026
Erro do sistema	3.09	35.01	15.96
Repetibilidade	296.0138134	336.255124	323.341801

Do estudo estatístico levado a cabo resultaram os números da tabela 5. Verifica-se uma grande diferença de valores nos resultados da precisão, para o sentido positivo e negativo. O fenómeno de *zona morta* é a principal causa. Os resultados no modo bidireccional são por isso utilizados para caracterizar o sistema: A repetibilidade máxima é  $323.3 \mu\text{m}$  e a precisão é aproximadamente  $16 \mu\text{m}$ .

## VI. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido demonstrou características adequadas à aplicação para a qual foi concebido. No entanto, as medidas de repetibilidade e de erro podem ser reduzidas se o deslocamento real for medido e utilizado num esquema com realimentação, utilizando sensores ópticos ou métodos interferométricos.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação para Ciência e Tecnologia pelo financiamento do projecto POSI/2001/CPS/40009 integrado no WO-NET.

## REFERÊNCIAS

- [1] MAX530 +5V, low power, parallel input, voltage output, 12-bit DAC (1995). Consultado em 30 de Setembro de 2003, em Maxim Integrated Products: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX530.pdf>
- [2] LM741 Operational amplifier (2000). Consultado em 30 de Setembro de 2003, em National Semiconductor corporation: <http://cache.national.com/ds/LM/LM741.pdf>
- [3] MAX4690 1.25Ω, dual SPST, CMOS analog switches (1999). Consultado em 30 de Setembro de 2003, em Maxim Integrated Products: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX4680-MAX4700.pdf>
- [4] LabVIEW 6.1 - User Manual [Programa de computador] (2000). Austin, Texas: National Instruments (32099C-01).
- [5] Farrar, R., Kongmebol, B. & Bartholomäus, T. (2003). Specifications don't always tell the whole story. *Laser Focus World*, **38**, pp. 105-109.

