

## 8 Experimentos

O manipulador usando motores de passo e o controle proposto é testado para medir a precisão de seu posicionamento. A precisão absoluta avalia a capacidade do manipulador de se aproximar de uma posição no seu espaço de trabalho. A repetibilidade avalia a precisão do retorno do manipulador a um ponto qualquer [30]. Medidas de precisão absoluta e repetibilidade são feitas. A partir destes resultados, o controle proposto é validado.

### 8.1. Calibração do sistema

Primeiro, a base do manipulador é nivelada com um nível de precisão. Este procedimento é feito para obter uma referência precisa da posição dos elos e da orientação da extremidade. A Figura 71 apresenta o manipulador com o nível de precisão.

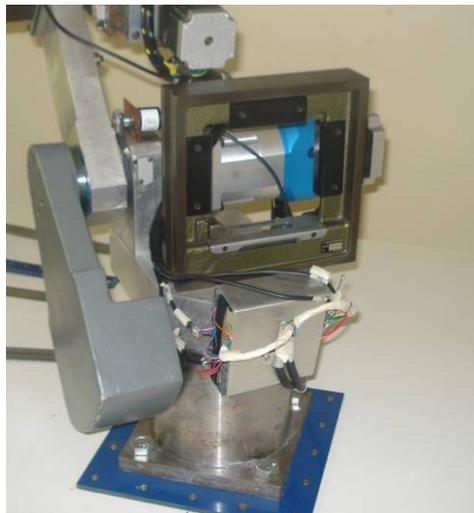


Figura 71 – Nivelamento da base

Após o nivelamento, o erro máximo obtido é de  $0,02\text{mm/m}$  na base. Em seguida, um nível comum é posto no elo 2 para obter a posição angular da junta 2 onde  $\theta_2 = 0$ . A Figura 72 mostra este procedimento.

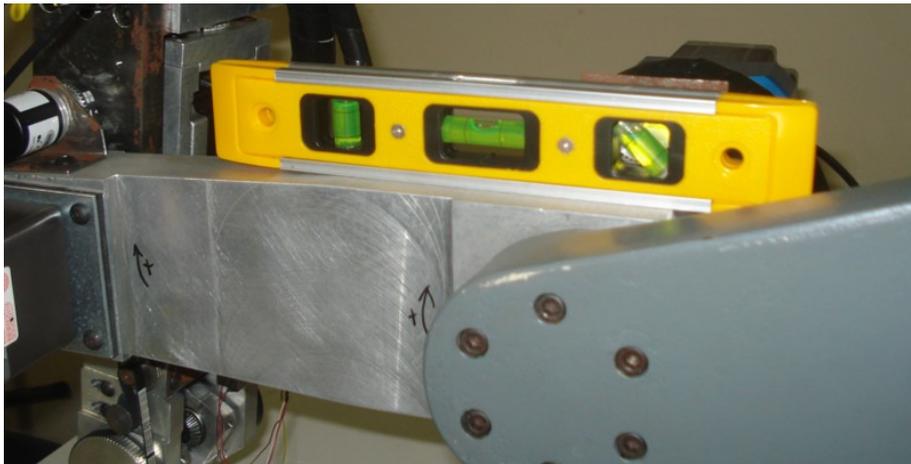


Figura 72 – Calibração da junta 2

Após observar que a junta 2 está nivelada. O botão *reset* da junta 2 é acionado, assim o controlador é informado de que está na posição inicial.

As juntas 3 e 4 são calibradas juntas, com o manipulador posicionado em  $\theta_2 = 90^\circ$ . O nível é observado em duas direções, uma relativa à junta 3 e outra à junta 4. A Figura 73 mostra a calibração dessas juntas.

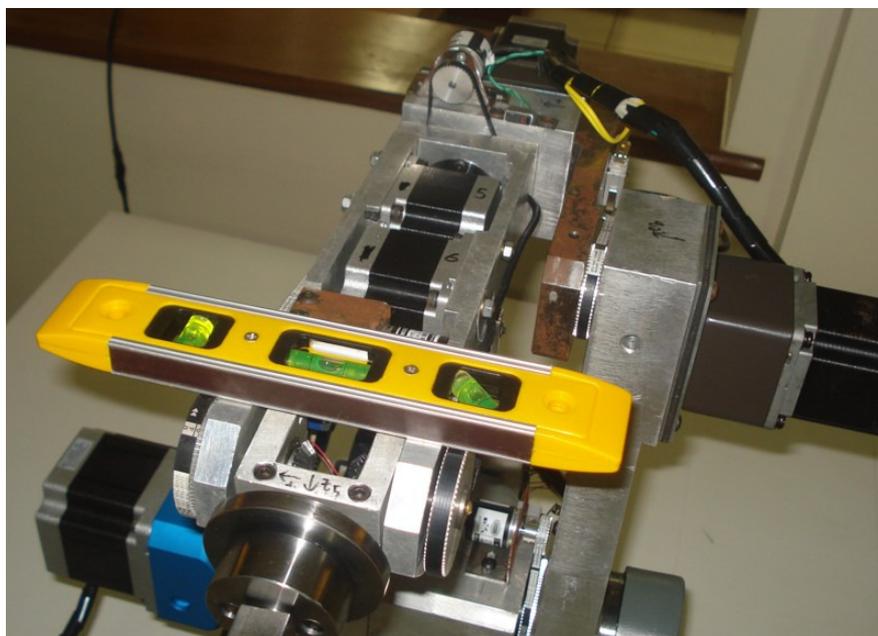


Figura 73 – Calibração da juntas 3 e 4

Nesta mesma posição, um dispositivo é fixado na flange da extremidade para auxiliar na calibração das juntas 5 e 6. Este dispositivo consiste de uma barra quadrada presa a um suporte. Análogo ao procedimento das juntas 3 e 4, o nível é

verificado em duas direções. A Figura 74 mostra este dispositivo sendo usado para calibrar as juntas 5 e 6.

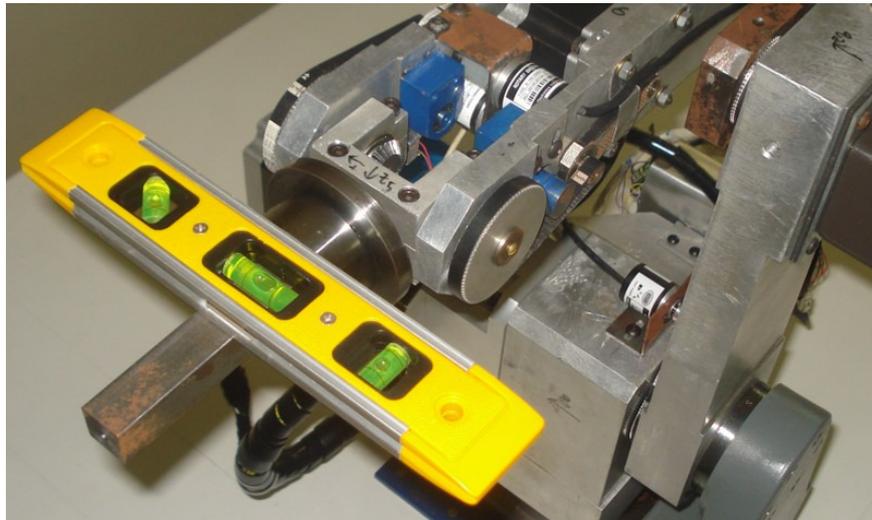


Figura 74 – Calibração das juntas 5 e 6

A junta 1 é calibrada posicionando a extremidade, com as juntas 4 e 6 na posição nula, sobre uma marca de referência na mesa do manipulador. Esta marca é feita com um esquadro de centro posicionado para passar pelo centro da base. A Figura 75 mostra a junta 1 sendo calibrada.

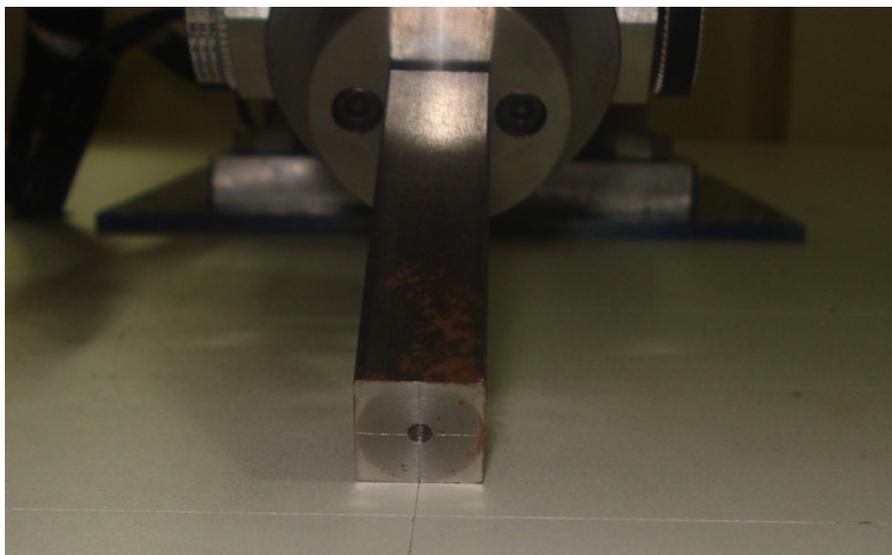


Figura 75 – Calibração da junta 1

A partir destes procedimentos, o manipulador é calibrado na posição de referência, onde todos os ângulos das juntas são nulos. Como a base está nivelada, um nível pode ser usado para medir a orientação da extremidade.

Devido à folga dos redutores, o manipulador oscila em torno da posição demandada com o controle proposto. O controlador é reprogramado para admitir um erro unitário na posição do *encoder* (procedimento conhecido como *anti-chattering*), assim este problema é atenuado. As oscilações deixam de ocorrer quando o sistema está muito próximo da posição desejada, e os ganhos do controlador são reduzidos. Após estes ajustes, o manipulador pode ser testado sem problemas. O programa apresentado no Apêndice A contém estas alterações.

## 8.2. Sistema de medição

A linha que passa pelo centro do manipulador, utilizada na calibração da junta 1, é utilizada como eixo  $x$  de medidas. Uma outra linha, perpendicular a esta, onde  $x=200mm$ , também é marcada. A Figura 76 mostra estas linhas. Apenas estas duas linhas são utilizadas para as medições. As demais linhas marcadas na mesa são apenas auxiliares, não sendo utilizadas nas medidas. Após uma posição ser marcada na mesa, com um paquímetro, são medidas as distâncias até as linhas de referência. Assim têm-se as posições em  $x$  e  $y$  de um ponto.

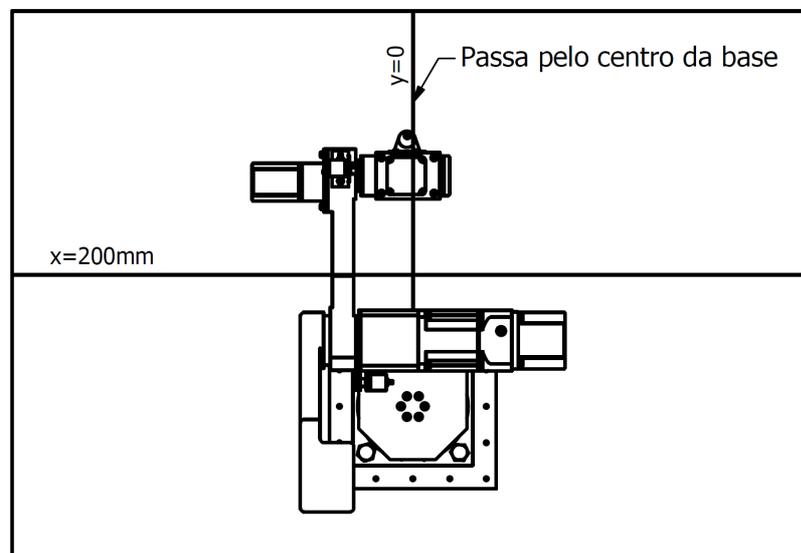


Figura 76 – Linhas de referência

A medida da distância em  $z$  é feita com um paquímetro. O paquímetro mede a distância da extremidade até a mesa, então é descontada a altura da mesa até o plano onde  $z=0$  ( $301,35\text{ mm}$ ). A Figura 77 mostra como a altura de um ponto é medido em relação à mesa.

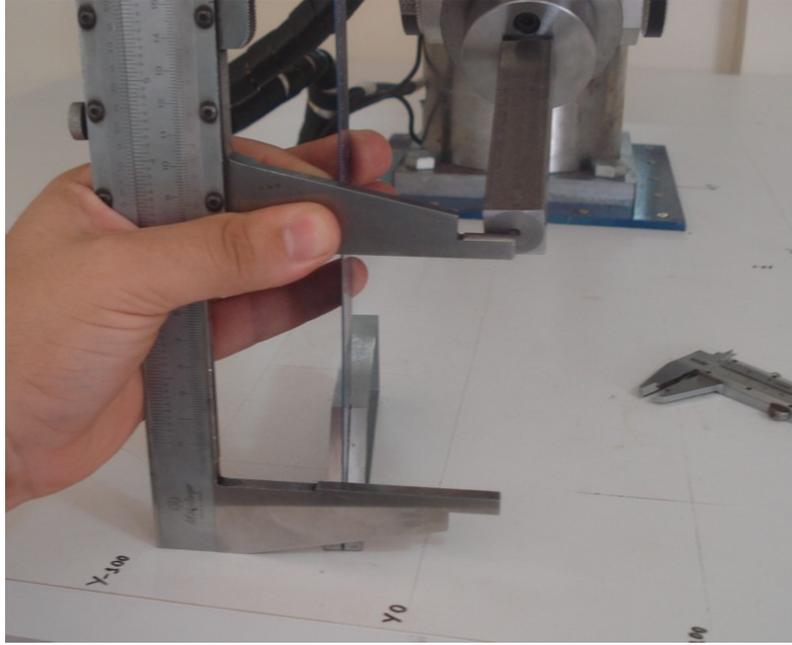


Figura 77 – Media da altura de um ponto

A medida da orientação da extremidade é feita com um transferidor de ângulos acoplado a um nível. Posicionando a base do transferidor no dispositivo acoplado à extremidade, é possível medir o ângulo em relação a horizontal de dois eixos. A Figura 78 mostra o transferidor posicionado na extremidade.

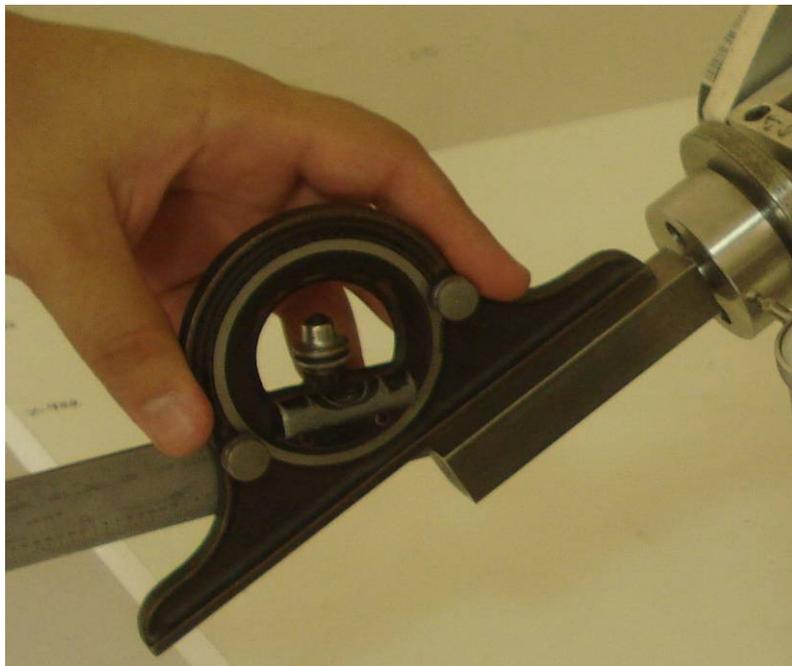


Figura 78 – Medida de orientação da extremidade

Assim, podem ser medidos dois ângulos que a extremidade faz com o plano horizontal. O ângulo feito com o plano vertical pode ser medido projetando o dispositivo na mesa, através de esquadros.

O sistema de medida apresentado mede a posição e orientação da extremidade. Um sistema adicional é utilizado para medir a repetibilidade, mas em apenas uma direção. Apesar de unidirecional, é mais preciso que o sistema proposto anteriormente. A Figura 79 apresenta este dispositivo.



Figura 79 – Medida com relógio comparador

Este sistema consiste de um relógio comparador em uma base magnética. Como a mesa é de madeira, esta base magnética é fixada a uma anilha de ferro fundido. O relógio tem resolução nominal de  $0,01mm$ , mas medidas da ordem de milésimos de  $mm$  podem ser estimadas.

### 8.3. Posições medidas

Três posições são utilizadas para realizar as medidas. Para simplificar as medidas, a orientação desejada da extremidade é sempre a mesma. Esta orientação possui os vetores unitários:

$$u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

$$v = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

$$w = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

A primeira posição de medidas possui coordenadas  $x=250mm$ ,  $y=-320mm$  e  $z=200mm$ . Nesta posição, pela cinemática inversa, a posição angular de cada junta é

$$q = [-57,995^\circ; 61,674^\circ; 21,122^\circ; -85,518^\circ; 58,277^\circ; 81,522^\circ] \quad (8.4)$$

Este cálculo é feito com a rotina em MATLAB para cálculo da cinemática inversa apresentada no Apêndice B.

A segunda posição de medidas possui coordenadas  $x=400mm$ ,  $y=0mm$  e  $z=-160mm$ . Neste caso, a posição angular de cada junta é

$$q = [0^\circ; 0^\circ; 0^\circ; 0^\circ; 90^\circ; 0^\circ] \quad (8.5)$$

As coordenadas  $x=350mm$ ,  $y=300mm$  e  $z=-50mm$  correspondem à terceira posição de medidas. A partir da solução da cinemática inversa, a posição angular de cada junta é

$$q = [45,000^\circ; 19,456^\circ; 14,143^\circ; 50,208^\circ; 66,965^\circ; -25,163^\circ] \quad (8.6)$$

#### 8.4. Cálculo do erro

O erro absoluto de posicionamento da extremidade do manipulador é calculado por

$$erro(abs) = \sqrt{(x_m - x_d)^2 + (y_m - y_d)^2 + (z_m - z_d)^2} \quad (8.7)$$

onde o índice  $m$  representa o valor medido e  $d$  o valor demandado.

O erro de repetibilidade é calculado por

$$erro(rep) = \sqrt{(x_m - x_{ref})^2 + (y_m - y_{ref})^2 + (z_m - z_{ref})^2} \quad (8.8)$$

onde o índice  $ref$  representa o valor de referência, no caso, o primeiro valor medido.

## 8.5. Resultados

A Tabela 7 apresenta os resultados das medidas na primeira posição.

Tabela 7 – Medidas na primeira posição

x(mm)	y(mm)	z(mm)	Erro (abs)	Repet.
250,5	-320,3	200,4	0,7	
251,1	-320,5	200,4	1,3	0,8
250,5	-320,2	200,5	0,7	0,1
250,7	-320,3	201,1	1,3	0,7
250,1	-319,7	200,2	0,4	0,7
250,3	-320,4	200,5	0,7	0,2
250,9	-320,3	200,3	1,0	0,4
251,0	-319,9	200,3	1,0	0,6
250,6	-319,8	200,4	0,7	0,5
250,2	-320,3	200,2	0,4	0,4

O erro de posicionamento absoluto máximo é de  $1,3mm$ . O erro máximo na repetibilidade é de  $0,8mm$ . A Tabela 8 apresenta as medidas da repetibilidade com relógio comparador, portanto unidirecional.

Tabela 8 – Medida na primeira posição com relógio comparador

Relógio(mm)
0,281
-0,243
-0,259
0,131
-0,155
0,253
0,127
-0,156
-0,250
-0,111

O relógio é colocado em uma posição aleatória. As medidas estão entre  $0,281mm$  e  $-0,259mm$ . A Tabela 9 apresenta os resultados das medidas feitas na segunda posição de medidas.

Tabela 9 – Medidas na segunda posição

x(mm)	y(mm)	z(mm)	Erro (abs)	Repet.
400,4	0,1	-160,2	0,5	
400,8	-0,5	-159,8	1,0	0,8
400,5	0,1	-160,5	0,7	0,3
399,9	0,3	-159,9	0,3	0,6
399,5	-0,3	-160,3	0,7	1,0
400,2	0,0	-160,2	0,3	0,2
400,7	0,4	-160,4	0,9	0,5
400,8	0,2	-160,5	1,0	0,5
400,6	0,1	-160,3	0,7	0,2
400,3	0,5	-160,4	0,7	0,5

Nesta posição, o erro máximo de posicionamento absoluto é de  $1,0mm$ . O erro máximo na repetibilidade é de  $0,8mm$ . A Tabela 10 apresenta a medida da repetibilidade com relógio comparador.

Tabela 10 – Medida na segunda posição com relógio comparador

Relógio(mm)
0,050
0,144
0,100
-0,291
-0,251
-0,020
0,071
0,230
-0,036
-0,263

As medidas estão entre  $0,230mm$  e  $-0,291mm$ . A Tabela 11 apresenta os resultados das medidas na terceira posição de medidas.

Tabela 11 – Medidas na terceira posição

x(mm)	y(mm)	z(mm)	Erro (abs)	Repet.
350,4	300,2	-49,8	0,5	
350,9	299,7	-50,2	1,0	0,8
350,7	300,2	-49,8	0,8	0,3
350,5	300,1	-49,7	0,6	0,2
350,3	299,9	-50,2	0,4	0,5
350,4	300,5	-49,5	0,8	0,4
350,2	300,3	-49,8	0,4	0,2
350,3	300,2	-50,1	0,4	0,3
350,4	300,1	-50,3	0,5	0,5
350,3	300,3	-50,4	0,6	0,6

O erro máximo de posicionamento absoluto, nesta posição, é de  $1,0mm$ . O erro máximo na repetibilidade é de  $0,8mm$ . A Tabela 12 apresenta a medida da repetibilidade com relógio unidirecional.

Tabela 12 – Medida na terceira posição com relógio comparador

Relógio(mm)
-0,030
-0,168
0,243
-0,205
0,030
-0,221
-0,090
0,023
0,298
0,213

O erro máximo e mínimo médios destas três posições consideradas são  $0,298mm$  e  $-0,221mm$ , respectivamente. Tendo como base as medidas em todas as posições, este manipulador possui precisão absoluta de  $1,3mm$ . A repetibilidade medida através das referências da mesa indica um erro de  $0,8mm$ . Entretanto, medidas com um relógio comparador indicaram um erro máximo de  $0,3mm$  em uma direção. Se o erro em cada direção for igual a este, o erro máximo total na repetibilidade seria de  $0,5mm$ . Devido à maior precisão do relógio comparador, esta medida é mais confiável.

O erro de orientação da extremidade é medido com o transferidor acoplado a um nível. Durante os testes, todas as medidas feitas mostraram um erro inferior à menor resolução do instrumento. Logo, não é possível medir com exatidão este

erro. Mas, como este instrumento tem precisão de cerca de  $\pm 0,5^\circ$ , pode ser afirmado que o erro é inferior a este valor. Considerando o erro de orientação nulo, na medição onde o erro absoluto é máximo, é calculada a cinemática inversa. Subtraindo este resultado da posição demandada, o erro de posicionamento de cada junta é

$$\text{erro}(\text{angular}) = [-0,07^\circ; 0,12^\circ; -0,61^\circ; 0,29^\circ; 0,10^\circ; -0,57^\circ] \quad (8.9)$$

A rotina implementada no controlador admite um erro unitário na posição do *encoder* para maior estabilidade. Somando este ao erro da discretização, o erro de dois incrementos dos *encoders* em cada junta é dado por

$$\text{erro}(\text{encoder}) = [\pm 0,12^\circ; \pm 0,12^\circ; \pm 0,18^\circ; \pm 0,18^\circ; \pm 0,29^\circ; \pm 0,29^\circ] \quad (8.10)$$

Logo, o erro do sistema se deve principalmente ao erro da discretização dos sensores somado ao erro admitido para melhorar a estabilidade.

Estes resultados mostram que o controle de motores de passo proposto apresenta desempenho adequado no equipamento testado.