



## AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ESTÁTICO DE ROBÔS INDUSTRIAIS UTILIZANDO UM BRAÇO DE MEDIÇÃO PORTÁTIL

**Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto**  
tlp@labmetro.ufsc.br

**Marco Antonio Martins Cavaco**  
Universidade Federal de Santa Catarina, CP 5053, Cep: 88040-970, Florianópolis-SC-Brasil,  
cavaco@labmetro.ufsc.br

**Resumo.** *Conhecer o desempenho de determinado robô é essencial para classificá-lo como apto ou não a realizar determinada tarefa. Isso se torna mais crítico quanto maior for a exigência da tarefa a ser realizada. Pelo fato de um manipulador estar em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina, foi desenvolvida uma metodologia para a avaliação de desempenho de robôs industriais. A metodologia utiliza uma máquina de medir por coordenadas portátil, também conhecida como braço de medição, que possui destacáveis vantagens frente a outros sistemas de avaliação, como: portabilidade, rapidez no preparo para a realização dos ensaios, flexibilidade, estabilidade metrológica de (15 a 25) °C. Esta metodologia consiste basicamente em fazer o alinhamento do sistema de coordenadas do braço de medição ao do robô, e então fazer medições em três assentos isostáticos em um flange fixo à interface mecânica do robô e analisar os dados a partir de um algoritmo de cálculo. Os principais componentes de incerteza foram levantados utilizando padrões e simulação computacional, assim como um estudo de caso foi realizado para validar a metodologia. A metodologia é satisfatória para a avaliação de desempenho estático de robôs com características semelhantes ao desenvolvido, como: volume de trabalho, velocidades e erros esperados.*

**Palavras-chave:** *avaliação, desempenho, robô, braço de medição, metrologia.*

### 1. INTRODUÇÃO

Na indústria moderna, uma das operações mais realizadas por robôs industriais é a solda a arco. Isto se deve principalmente à melhoria da qualidade de deposição de material, à possibilidade de substituição do operário em trabalhos executados em ambientes insalubres, ao aumento da produtividade e à redução de custos (Lafratta, 1990).

Contudo, conhecer o desempenho de determinado robô é essencial para classificá-lo como apto ou não apto a realizar determinada tarefa. Isso se torna tanto mais crítico quanto maior for a exigência da tarefa a ser realizada (Shirinzhadeh, 1998).

Uma vez que na Universidade Federal de Santa Catarina um robô industrial, capaz de fazer o mapeamento de superfícies livres e deposição automatizada de material, esta em desenvolvimento, verificou-se a necessidade de uma metodologia de avaliação de desempenho de robôs industriais. Desta necessidade resultou uma metodologia de avaliação baseada na utilização de um braço de medição e um flange especial.

Este artigo enfoca a avaliação de desempenho estático de robôs industriais.

## 2. DESEMPENHO ESTÁTICO

A norma ISO9283 define quais características determinam o desempenho de robôs industriais, assim como as posturas (posição e orientação) e trajetórias que devem ser avaliadas para poder realizar uma comparação entre diferentes robôs, ensaios de recebimento e testes em protótipos. Serão abordados apenas os ensaios de desempenho estáticos.

### 2.1 Posturas Programadas.

Postura é definida como a posição e orientação do sistema de coordenadas da interface mecânica ou ferramenta acoplada ao robô em relação a um sistema de coordenadas base do robô. As posturas programadas, para os ensaios estáticos, devem estar em um plano dentro de um cubo virtual no volume de trabalho do robô, de maneira que este cubo seja o maior possível com as arestas paralelas ao sistema de coordenadas, como na Fig.(1).

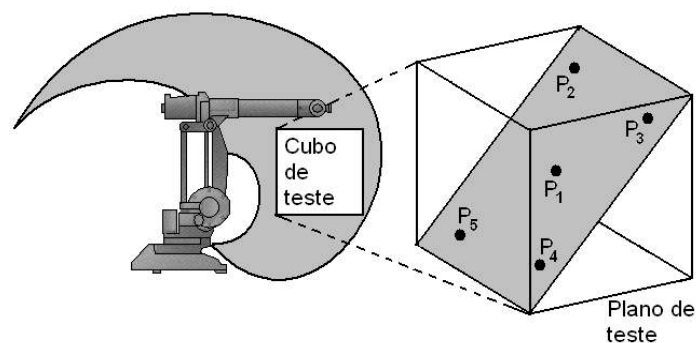


Figura 1. Exemplo de cubo virtual definido para os ensaios.

As medições, nos ensaios estáticos, devem ser realizadas quando a interface ou a ferramenta acoplada ao robô alcança uma postura em resposta à postura programada (P1 a P5 na Fig. (1)). As medições devem ser realizadas depois da estabilização da postura alcançada.

### 2.2 Características de Desempenho Estático

As características de desempenho estático definidas na norma ISO9283 são: (a) Tendência e repetitividade de postura; (b) Variação multidirecional na tendência de postura; (c) Tendência e repetitividade de distância; (d) Variação das características de postura e (e) Flexibilidade estática (ISO9283, 1998). Neste artigo serão abordadas apenas a tendência e a repetitividade de postura, embora a metodologia desenvolvida seja capaz de realizar a quantificação de todas as características acima citadas.

A tendência de postura é a diferença entre a postura comandada e a média das posturas atingidas quando a aproximação é realizada pela mesma direção. Pode ser dividida em tendência de posicionamento e tendência de orientação, como pode ser visto na Fig.(2). A tendência de posicionamento (APp) é a diferença entre uma posição comandada e a média das posições atingidas e a tendência de orientação (Apc) é a diferença entre uma orientação comandada e a média das orientações atingidas (ISO9283, 1998).

A repetitividade de posição (RP) expressa a dispersão das posições atingidas após  $n$  visitas à mesma postura comandada na mesma direção, e a repetitividade de orientação (3Sc), é a faixa de três desvios padrão das medidas angulares em torno dos valores médios dos ângulos de orientação (ISO9283, 1998).

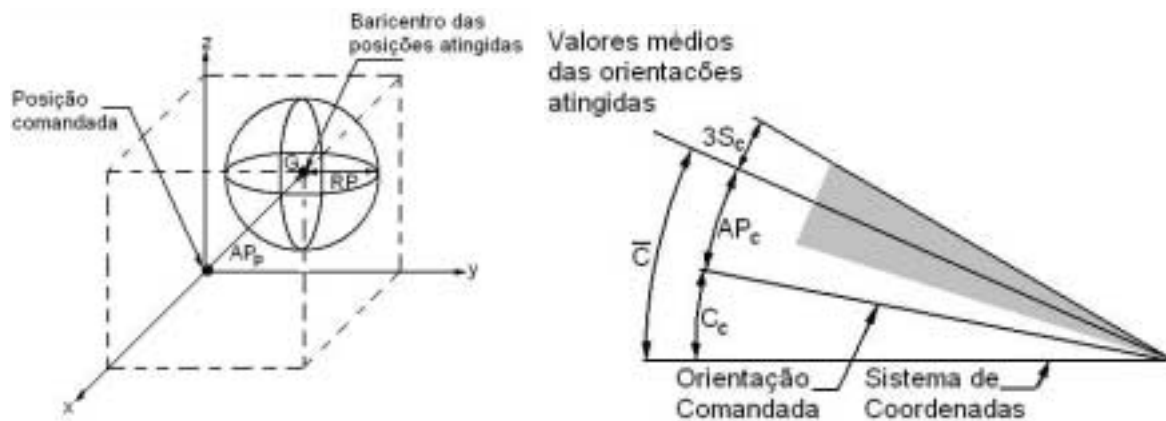


Figura 2. Tendência e repetitividade de posição e orientação (ISO9283, 1998).

### 3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

A metodologia desenvolvida para a avaliação de desempenho de robôs industriais, baseia-se na utilização de um sistema de medição denominado braço de medição, e na utilização de um flange especialmente projetado e fabricado. Após o alinhamento do sistema de coordenadas do robô e do braço de medição o flange é fixo à interface mecânica do robô. São feitas então medições em três assentos especiais e posteriormente os dados são analisados por um algoritmo.

Os elementos utilizados na metodologia são abordados nesta seção.

#### 3.1 Braço de Medição

Para o desenvolvimento da metodologia foi utilizado um “Braço de Medição”, onde têm-se juntas articuladas na extremidade de segmentos retos que possibilitam movimentos parecidos com o braço de um ser humano (Nerosky, 2001), como ilustrado na Fig. (3) abaixo.

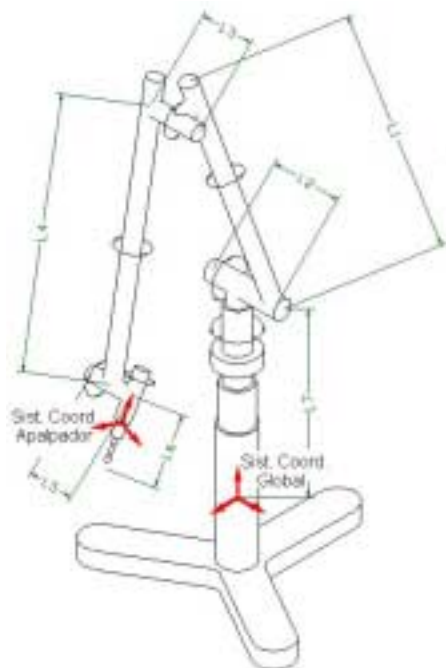


Figura 3. Esquema de um braço de medição (Nerosky, 2001).

Na extremidade do braço de medição há um apalpador rígido. Portanto para se medir as coordenadas de um ponto, deve-se posicionar manualmente o apalpador sobre o mensurando e

então fazer a leitura das coordenadas através de um microcomputador. Softwares especialmente desenvolvidos para tal finalidade, permitem não apenas a visualização dos dados, mas um pós-processamento adequado, como por exemplo, compensação do raio do apalpador em medições de cilindros (Pinto, 2001).

A determinação das coordenadas dos pontos apalpados é feita através do cálculo da posição e orientação do sistema de coordenadas local do apalpador em relação a um sistema de coordenadas global do braço de medição (Pinto, 2001).

### 3.2 Flange de Medição

Um corpo rígido pode ser localizado no espaço cartesiano através de seis graus de liberdade. Três para determinar a posição  $P(x, y, z)$  e três para a orientação  $(A, B, C)$  (Asada *et al*, 1986), como ilustrado na Fig. 4.

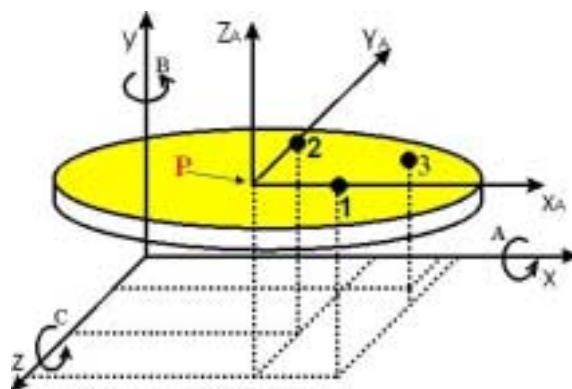


Figura 4. Localização de um corpo rígido.

Determinada a localização dos pontos 1, 2 e 3 em relação ao sistema de coordenadas base  $(X, Y, Z)$  e em relação ao sistema de coordenadas do corpo rígido  $(X_F, Y_F, Z_F)$  é possível, a partir de um algoritmo de cálculo, determinar a posição  $P(x, y, z)$  e a orientação  $(A, B, C)$  do sistema de coordenadas do corpo rígido em relação ao sistema de coordenadas base (Pinto, 2001). A metodologia de avaliação de desempenho proposta é baseada neste princípio.

No desenvolvimento da metodologia foi utilizado um flange montado na interface mecânica do robô. Com este dispositivo, especialmente fabricado para o desenvolvimento da metodologia, buscou-se localizar o sistema de coordenadas da interface mecânica do robô utilizando o braço de medição. O dispositivo foi fabricado de tal forma que, quando devidamente montado no robô, seu sistema de coordenadas fique alinhado ao sistema de coordenadas da interface mecânica, como ilustrado na Fig. (5).

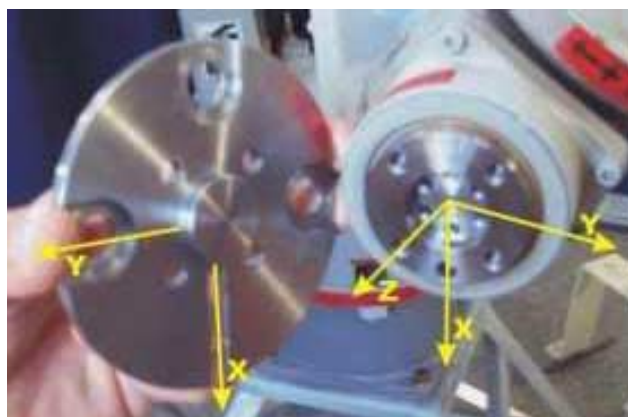


Figura 5. Sistema de coordenadas do flange e da interface do robô.

O flange de medição tem a função de, através de medições feitas com o braço de medição, determinar a postura da interface mecânica do robô. O flange de medição foi projetado e fabricado de forma a: (a) minimizar os erros de alinhamento entre o sistema de coordenadas do flange e o sistema de coordenadas da interface mecânica do robô; (b) minimizar a repetitividade de posicionamento da esfera do apalpador quando encaixada no assento; (c) facilitar a sua montagem e a desmontagem no robô; (d) minimizar os efeitos térmicos na incerteza de medição; (e) facilitar a fabricação e minimizar custos. Uma foto do flange utilizado nas medições pode ser vista na Fig. (6).

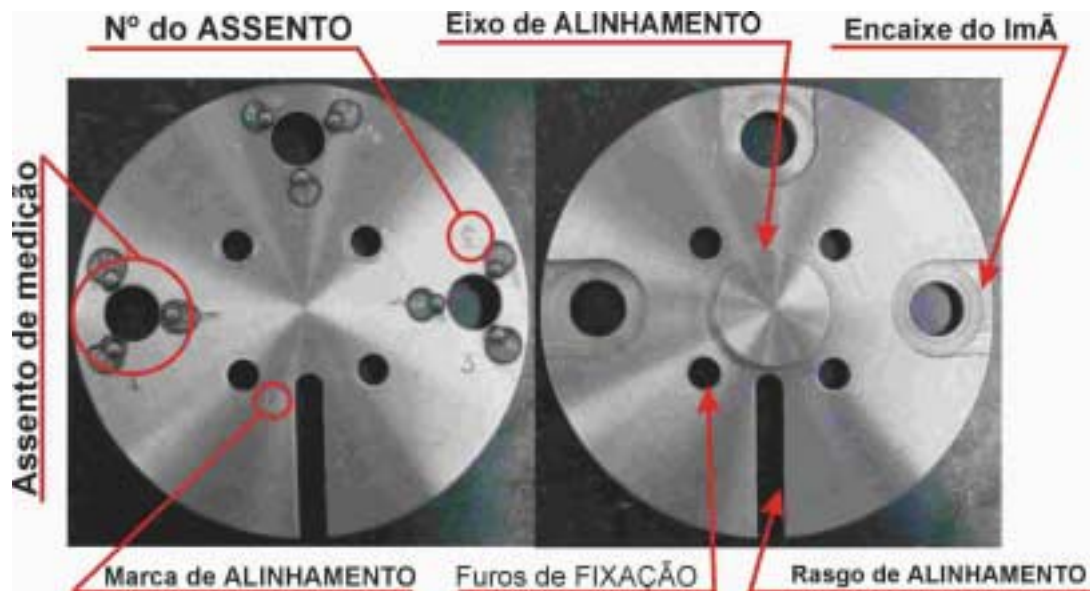


Figura 6. Foto do flange utilizado nas medições.

Para a determinação dos três pontos necessários para a localização do sistema de coordenadas do flange, através do braço de medição, são localizados três pontos não colineares no flange que garantem uma boa repetitividade de posicionamento do apalpador. Uma foto do apalpador do braço de medição encaixado em um dos assentos do flange utilizado na medições pode ser visualizada na Fig. (7).

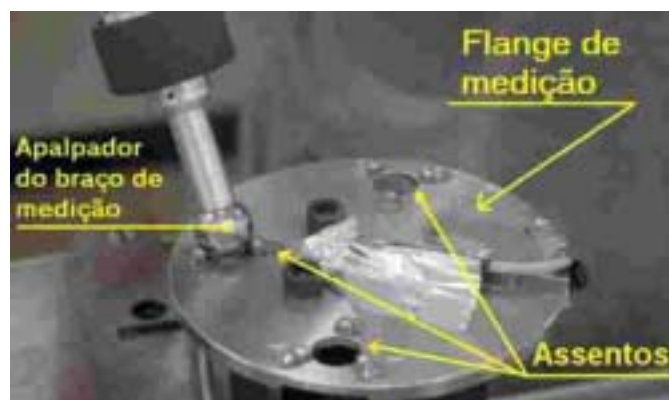


Figura 7. Apalpador do braço de medição encaixado em um assento do flange.

### 3.3 Algoritmo de Cálculo

Nesta metodologia é utilizado um algoritmo para determinar a postura do sistema de coordenadas do flange (SCF) em relação ao sistema de coordenadas base (SCB). Este cálculo é feito a partir da posição do centro do apalpador ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) encaixado em cada um dos três assentos em

relação ao sistema de coordenadas base (medido com o braço de medição) e em relação ao sistema de coordenadas do flange (medido previamente com uma máquina de medir por coordenadas convencional).

Para a solução do problema foram consideradas as coordenadas do centro da esfera encaixada no assento em relação ao sistema de coordenadas do flange como:

$$AF_{(n)} = \begin{bmatrix} x_{(n)}^F \\ y_{(n)}^F \\ z_{(n)}^F \end{bmatrix} \quad (1)$$

Para a determinação do resultado é utilizado um sistema de coordenadas intermediário (SCP) nos cálculos, definido a partir dos vetores definidos nas Eq.(2) Eq.(4) Eq.(5), como pode ser visualizado na Fig. (8)

$$\vec{V}_1 = (AF_3 - AF_1) \quad (2)$$

$$\vec{V}_2 = (AF_2 - AF_1) \quad (3)$$

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_1 \times \vec{V}_2 \quad (4)$$

$$\vec{V}_4 = \vec{V}_3 \times \vec{V}_1 \quad (5)$$

Posteriormente são extraídos os vetores unitários da Eq.(2), Eq.(4) e da Eq.(5) utilizados para montar a matriz de transformação homogênea:

$$a = \frac{\vec{V}_1}{\|\vec{V}_1\|} \quad (6)$$

Os vetores unitários (b) e (c) foram definidos de maneira semelhante à Eq.(6) utilizando os vetores  $\vec{V}_4$  e  $\vec{V}_3$  respectivamente.

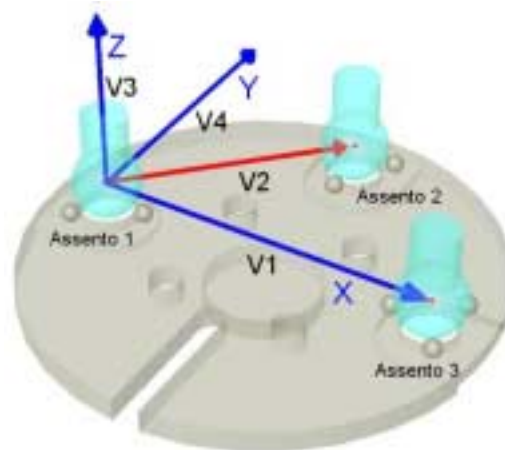


Figura 8. Sistema de coordenadas intermediário.

Com base nestes dados a matriz de transformação que determina a posição e a orientação do SCP em relação ao SCF é (Tsai, 1999):

$$M_{P,F} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & | & x_1^F \\ a_2 & b_2 & c_2 & | & y_1^F \\ a_3 & b_3 & c_3 & | & z_1^F \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

O sistema de coordenadas intermediário também é definido, com o mesmo procedimento utilizado para determinar  $M_{P,F}$ , utilizando os dados de medições realizadas através do braço de medição, resultando na matriz de transformação  $M_{P,B}$ :

$$M_{P,B} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & | & x_1^B \\ a_2 & b_2 & c_2 & | & y_1^B \\ a_3 & b_3 & c_3 & | & z_1^B \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Já que o SCP é conhecido em relação ao SCF (Eq.(7)) e em relação ao SCB (Eq.(8)) é possível estabelecer a relação (Tsai, 1999):

$$M_{F,B} = M_{F,P} \cdot M_{B,P}^{-1} \quad (9)$$

com isto é calculada a matriz de transformação que determina a rotação e a translação do SCF em relação ao SCB, que coincide com a postura da interface mecânica do robô:

$$M_{F,B} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & | & t_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & | & t_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & | & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Segundo Tsai (1999), para se extrair os dados de rotação da matriz são utilizadas as fórmulas:

$$B = \text{sen}^{-1}(-R_{31}) \quad (11)$$

$$A = A \tan 2(R_{32} / \cos(B), R_{33} / \cos(B)) \quad (12)$$

$$C = A \tan 2(R_{21} / \cos(B), R_{11} / \cos(B)) \quad (13)$$

A matriz  $R$  3x3 (Eq.(14)) que esta inserida dentro da matriz de transformação homogenia 4x4 Eq.(10) representa o resultado das três rotações em relação ao sistema de coordenadas fixo (*roll-pitch-yall*) e as informações de translação são extraídas da ultima coluna da matriz de transformação (Tsai, 1999).

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z)\cos(\theta_y) & \cos(\theta_z)\text{sen}(\theta_y)\text{sen}(\theta_x) - \text{sen}(\theta_z)\cos(\theta_x) & \cos(\theta_z)\text{sen}(\theta_y)\cos(\theta_x) + \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\theta_x) \\ \cos(\theta_y)\text{sen}(\theta_z) & \cos(\theta_x)\cos(\theta_z) + \text{sen}(\theta_y)\text{sen}(\theta_x)\text{sen}(\theta_z) & -\cos(\theta_z)\text{sen}(\theta_x) + \text{sen}(\theta_z)\text{sen}(\theta_y)\cos(\theta_x) \\ -\text{sen}(\theta_y) & \text{sen}(\theta_x)\cos(\theta_y) & \cos(\theta_y)\cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 3.3 Realizando Medições

Para realizar as medições estáticas, primeiramente é feito o alinhamento do sistema de coordenadas do braço de medição com o sistema de coordenadas do robô. Então o flange é devidamente fixo à interface mecânica do robô.

Posteriormente são realizadas medições nos três assentos para cada postura alcançada, como mostra a Fig.(9)



Figura 9. Medição manual de características estáticas.

As medições devem ser realizadas de forma a minimizar a força de medição, buscando assim a minimização deste efeito na incerteza de medição na determinação das características estáticas.

### 4. ENSAIOS E RESULTADOS

Foi realizada uma série de ensaios e simulação computacional para determinar a incerteza de medição na avaliação de desempenho estático de robôs industriais, utilizando o braço de medição e o flange de medição segundo a metodologia proposta.

Os principais ensaios realizados foram: (a) Levantamento geométrico do flange de medição numa máquina de medir por coordenadas convencional; (b) Ensaio de alinhamento utilizando anel padrão e alinhamento em um robô industrial; (c) Ensaio para determinação da força de medição em um transdutor de força de três direções e (d) Estudo de caso em um robô industrial.

Em decorrência da falta de padrões adequados para localizar o flange de medição em todo o volume de trabalho necessário, foi realizada uma simulação computacional para medições em todo o volume, utilizando a incerteza do braço de medição.

Com as diversas fontes de incerteza levantadas pelos ensaios e pela simulação computacional foi feito um balanço de incertezas para a determinação da incerteza expandida, como mostrado na Tab.(1). Um balanço de incertezas semelhante foi feito para a determinação da incerteza para orientação.

Tabela 1. Balanço de incertezas para posição.

Simbolo	Componentes Incerteza	Valor [mm]	Distribuição	Divisor	u [mm]	vi ou vef.
ReAl	Re alinhamento	0,034	Normal	2,000	0,0170	100000
FmF	Folga máxima do flange	0,016	Retangular	1,732	0,0092	100000
ReAS	Re encaixe no assento	0,0005	Normal	2,000	0,0003	100000
Res	Resolução	0,001	Retangular	1,732	0,0006	100000
Dsim	Maior desvio padrão simulação	0,043	Normal	1,000	0,0430	5000
ImF	Incerteza de medição flange	0,002	Normal	1,000	0,0020	5000
Tamb	Temperatura ambiente	*****				
Rigf	Rigidez flange/robô	*****				
uc	Incerteza combinada		NORMAL		0,04720	7248,407
<b>U<sub>95</sub></b>	<b>Incerteza expandida 95%</b>		<b>k =</b>	<b>2,00</b>	<b>0,094</b>	



Os principais resultados do desenvolvimento da metodologia desenvolvida para avaliação de desempenho estático de robôs industriais podem ser visualizados na Tab.(2), quando realizando apenas uma única medição em cada assento para cada postura medida. Se mais de uma medição for realizada em cada assento para cada postura alcançada, é possível diminuir esses resultados.

Tabela 2. Principais resultados.

Descrição da característica		Ensaio
Incerteza na determinação de posicionamento	$U_{95\%}$ (mm)	<b>0,094</b>
Incerteza na determinação de orientação	$U_{95\%}$ (°)	<b>0,2</b>
Força máxima de medição estática	$F_{máx}$ (N)	<b>3,9</b>
Repetitividade de encaixe do apalpador	$Re_{95\%}$ (mm)	<b>0,0005</b>

A norma ISO9283 determina que o sistema de medição para avaliar o desempenho de robôs deve ter uma incerteza de no máximo 25% da magnitude da característica a ser quantificada. Com isto é possível concluir que a metodologia atingiu seu objetivo, uma vez que se espera um erro de posicionamento do robô desenvolvido na UFSC maior do que quatro vezes a incerteza de medição.

## 5. CONCLUSÃO

Espera-se dar, com a realização deste trabalho, uma significativa contribuição e uma nova perspectiva de utilização de braços de medição. Este sistema é ainda pouco difundido em escala nacional e esta aplicação é pouco ou nada difundida em escala global.

A característica de portabilidade do sistema de medição abre espaço para a prestação de serviço de avaliação de desempenho de robôs de diversos tipos.

A principal contribuição desta metodologia é a utilização de um flange de medição que torna as medições extremamente rápidas e simples.

Com o desenvolvimento da metodologia exposta foram alcançados os resultados esperados, uma vez que este alcança todas as posições de teste e a incerteza de medição na quantificação das características de desempenho de robôs é baixa o suficiente para a avaliação do sistema desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina.

## 6. REFERÊNCIAS

- Asada, H. , Slotine, J., 1986, “Robots analysis and control”, Wiley Interscience.
- ISO 9283, 1998, “Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods”, International Organization for Standardization, Switzerland.
- Lafratta, F. H., 1990, “Metodologia e instrumentação para qualificação de robôs industriais – Ensaio de repetibilidade”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Nerosky, L. A. R., 2001, “Medição de formas livres através da integração de um sensor óptico tipo “folha de luz” em um braço de medição”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Pinto, T. L. F. C., 2001, “Avaliação de desempenho de robôs industriais utilizando um braço de medição portátil”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Shirinzhadeh, B., 1998, “Laser-interferometry-based tracking for dynamic measurements”, Industrial Robot: An International Journal, V. 25, N. 1, MCB University Press.
- Tsai, L. W. ,1999, “Robot analysis - the mechanics of serial and parallel manipulators”, John Wiley & Sons, New York.

## STATIC EVALUATION OF INDUSTRIAL ROBOTS USING A PORTABLE MEASUREMENT ARM

**Abstract.** *This work presents a method to evaluate the static performance of industrial robots, using a portable coordinate measuring machine, also known as measuring arm. The main motivation for this work is the performance evaluation of an industrial robot that is under development in the Federal University of Santa Catarina. This methodology consists basically in making measurements with the portable arm coupled, with an especial flange, in a robot and analyzing the collected data with a specific algorithm. A metrological evaluation is presented using different kinds of standards and computer simulation. The methodology was satisfactory for the evaluation of static performance of industrial robots with similar characteristics such as: volume of work, velocity, acceleration and expected errors.*

**Keywords:** *evaluation, performance, robot, measurement arm, metrology.*