

## DESENVOLVIMENTO DO MODELO CINEMÁTICO DE CALIBRAÇÃO DE UM ROBÔ DE GEOMETRIA ESFÉRICA PARA SOLDAGEM GMAW POSICIONAL MULTICAMADAS

Ênio Prates Vasconcelos Filho<sup>1</sup>, enioprates@yahoo.com.br

Luciano Ginani<sup>1</sup>

José Mauricio S T Motta<sup>1</sup>, jmmotta@unb.br

Guilherme Caribe de Carvalho<sup>1</sup>, gccarval@unb.br

Carlos Llanos<sup>1</sup>, llanos@unb.br

Walter Vidal de Britto<sup>1</sup>, wbritto@unb.br

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF.

**Resumo:** *Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de geração de trajetórias e de controle de um robô manipulador de 5 graus de liberdade, projetado para realizar reparos em áreas erodidas por cavitação em pás de turbinas hidráulicas de Unidades Geradoras Hidroelétricas (UGH) da Eletronorte. Atualmente, reparos nas falhas de materiais que ocorrem na superfície das pás das turbinas são realizados manualmente, por soldagem. O projeto deste manipulador visa a aprimorar as condições dos procedimentos de reparo, de modo a melhorar o desempenho, minimizar os custos de operação, aumentar a consistência e a qualidade do processo e melhorar as condições de trabalho e segurança dos operários da Eletronorte. Para o desenvolvimento do manipulador estabeleceu-se, inicialmente, sua concepção geométrica, com base nos requisitos do processo de recuperação do material da turbina e nas restrições de acessibilidade aos locais de execução dos reparos. Definida a concepção geométrica, elaborou-se o modelo cinemático do mesmo, assim como uma metodologia para a calibração deste modelo. Desenvolveram-se explicitamente as soluções da cinemática inversa e do Jacobiano inverso, de modo a se produzirem equações literais para implementação direta nos algoritmos computacionais de geração das referências de controle, necessárias ao movimento interpolado no espaço de coordenadas cartesianas. O projeto do controlador está sendo implementado com tecnologias de ponta de projeto de sistemas digitais, que consiste na utilização de FPGAs e processadores embarcados. Neste artigo, são discutidos aspectos da modelagem cinemática e de procedimentos de calibração aplicados ao projeto, bem como a estratégia de controle.*

**Palavras-chave:** *Robótica, Modelos Cinemáticos, Calibração de Robôs, FPGA.*

### 1. INTRODUÇÃO

A erosão por cavitação é um fenômeno altamente indesejável na operação de uma turbina hidráulica e quase sempre inevitável. O fluxo de água em torno das pás de uma turbina em funcionamento gera campos de pressão sobre a superfície das mesmas, podendo atingir valores inferiores à pressão de vapor d'água, na temperatura de operação. Isto gera bolhas de vapor d'água que, ao colapsarem devido a mudanças abruptas de pressão em certas regiões do escoamento próximo à superfície das pás, produzem ondas de choque que resultam em um efeito de martelamento sobre o material do rotor. Esse carregamento cíclico de alta amplitude produz erosão por fadiga na superfície das pás, ocasionando perda substancial de material das mesmas. No Brasil, aproximadamente 75% das centrais hidroelétricas operam com algum problema de cavitação nos seus equipamentos. A cavitação produz também fenômenos como vibrações, ruídos e perda de eficiência das turbinas hidráulicas (Bonacorso, 2006).

Um processo consagrado de reparo da superfície das pás das turbinas que sofreram erosão por cavitação é a recomposição do material por soldagem a arco elétrico. O processo de soldagem é realizado manualmente, após inspeção visual da turbina, exigindo parada da mesma. Uma vez identificadas as falhas por cavitação, em geral na forma de cavidades na superfície da pá, seu reparo é feito por meio de preenchimento das cavidades com metal compatível metalurgicamente, utilizando processos de soldagem manual a arco tais como o processo por eletrodos revestidos (SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*), o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e o processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) com adição de material. O processo é inteiramente manual, com recobrimento em camadas e martelamento leve para retirada de escória. O acabamento é realizado por meio de lixamento da superfície reparada, de modo a se atingir o perfil hidráulico original da pá. Como desvantagens do processo de reparo manual podem ser

citadas: (a) altos custos de manutenção, (b) condições insalubres de trabalho para os operários, (c) necessidade de submeter os operadores a posições desfavoráveis, (d) dificuldade para reparar defeitos em lugares com difícil acesso, (e) qualidade do reparo dependente da habilidade de operador de soldagem, (f) necessidade de refazer reparos e (g) deterioração da geometria das pás das turbinas.

Com o objetivo de se automatizarem os processos de recuperação de pás de turbinas hidráulicas de UGH's da Eletronorte, iniciou-se na Universidade de Brasília, em 2008, o desenvolvimento de um sistema robotizado para planejamento e reparo por soldagem das áreas erodidas. Nessa contexto, este trabalho visa a apresentar a metodologia de projeto controlador do robô soldador destinado à robotização do processo de recuperação de material erodido por cavitação. Uma breve descrição do projeto é incluída, explicitando-se os aspectos relacionados à obtenção das transformações cinemáticas direta e inversa, bem como das transformações do Jacobiano direto e inverso do manipulador. Estas relações são de extrema importância para o desenvolvimento dos algoritmos de controle de movimento do robô, de forma que o mesmo seja capaz de movimentar seu elemento terminal, no caso uma tocha de soldagem GMAW, descrevendo uma trajetória definida no espaço de coordenadas cartesianas. Expõe-se também neste artigo a concepção da arquitetura de controle do sistema, a qual é baseada em tecnologias digitais reconfiguráveis (FPGA - *Field Programmable Gate Array*), de forma a se possibilitar a implementação em hardware dos algoritmos de planejamento de trajetória, os quais incluem as transformações cinemáticas do manipulador, explicitadas nos itens que se seguem.

## 2. DESCRIÇÃO DO MANIPULADOR

Considerando as restrições de acessibilidade tipicamente encontradas em turbinas hidráulicas de UGH's e o tipo de processo a ser guiado, dentre as opções de geometria normalmente utilizadas em robôs industriais, adotou-se a topologia esférica. Esta apresenta-se indicada quando há necessidade de que seu órgão terminal atinja posições em espaços confinados situadas a uma distância razoável do local de fixação de sua base. Considerando o número de graus de liberdade necessários ao processo de soldagem a arco (5 graus de liberdade) e as geometrias tipicamente encontradas em turbinas hidráulicas, optou-se por dotar o manipular com somente 5 graus de mobilidade. Desta forma, a cinemática do manipulador apresenta-se sem redundâncias dentro de seu espaço de trabalho. O acionamento das juntas é realizado por meio de 5 motores de passo elétricos, sendo dois associados aos movimentos de rotação da base, um relacionado ao movimento translacional radial do braço do manipulador e outros dois, associados à orientação da ferramenta do robô (elemento terminal).

O manipulador apresenta um sistema integrado de controle de ações, podendo ser considerado um robô inteligente, uma vez que atua sem a necessidade de ação humana. Ele é capaz de reconhecer o ambiente, gerar trajetórias, determinar estratégias de controle e realizar as soldagens necessárias sobre o ambiente desejado de maneira independente de estímulos externos. A Fig. (1) apresenta uma versão simplificada dos blocos que constituem o sistema de movimentação e de controle do robô, os quais constituem os cinco módulos descritos a seguir:

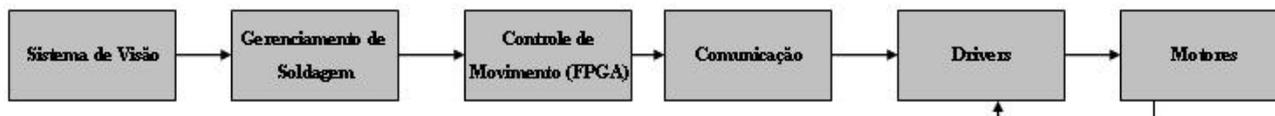


Figura 1. Controles Embarcados no Robô

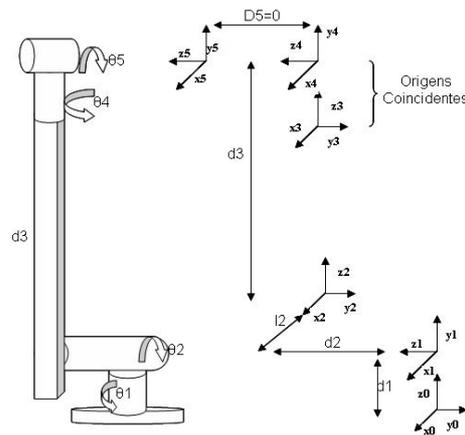
- a) **Módulo de sistema de visão:** é responsável por fazer a análise da superfície sobre a qual o robô está colocado. Inicialmente, é feita uma varredura laser sobre o ambiente da pá da turbina a ser soldada. Uma câmera faz o acompanhamento dessa movimentação, gerando uma nuvem de pontos, que será tratada para a recriação da superfície, em 3-D (Ginani, 2007). A partir da nuvem de pontos é feita a identificação da superfície, com a análise de irregularidades e identificação dos lugares onde devem ser feitos os reparos.
- b) **Módulo de gerenciamento de soldagem:** este módulo recebe os dados formatados pelo sistema de visão, indicando as regiões a serem soldadas assim como fornecendo suas geometrias específicas. Por meio de processamento gráfico e com base em dados de geometrias esperadas para os cordões de solda, para um dado conjunto de parâmetros de solda, o módulo realiza um processo de *fatiamento* dos volumes a serem preenchidos e o seccionamento das fatias em cordões de solda paralelos, que quando depositados sucessivamente, plano a plano, resultam na recuperação estrutural da pá. Este módulo também é responsável por configurar os parâmetros de soldagem na fonte de soldagem, assim como por definir os pontos iniciais e finais de cada cordão de solda, os quais se constituem, juntamente com as velocidades de soldagem para cada cordão, como entradas para o módulo de controle do movimento.
- c) **Módulo de Controle de Movimento:** controla a movimentação dos motores, em função do modelo cinemático do robô (vide seção 3). O gerenciador de Soldagem transmite, através de uma interface RS232, a lista de posições desejadas de soldagem, para o controlador de movimento, que é responsável por gerar as diretivas de movimentação do manipulador, comunicando-se com os *drivers* de potência, que acionam os motores. A implementação do módulo de controle de movimento em FPGA permite flexibilidade na otimização do mesmo, assim como a realização rápida de mudanças no hardware do mesmo, por exemplo, a inclusão de mais processadores, ou módulos aceleradores de hardware para operações aritméticas.

- d) **Módulo de comunicação:** Para a comunicação entre o módulo de controle e os motores foi implementada uma rede padrão RS485. O módulo de controle de movimento envia os comandos para os motores via porta RS232, a qual é conectada à rede RS485 por meio de um conversor RS232 para RS485. Cada controlador, associado a um nó da rede tem um endereço de identificação, permitindo que os comandos sejam enviados para todos os controladores por *broadcasting*. Cada controlador identifica seus comandos específicos por meio de análise do endereço associado a cada comando lançado na rede.
- e) **Módulo de Motores e Drivers:** Este módulo está formando pelos cinco motores, seus controladores e *drivers*.

### 3. CINEMÁTICA DO MANIPULADOR

Para fins de projeto do gerador de trajetórias e do sistema de controle de movimento do manipulador, desenvolveu-se o modelo cinemático completo (cinemática direta e inversa) do manipulador. No processo de definição do modelo, incluíram-se todos os parâmetros geométricos necessários a se obter um cálculo da posição do órgão terminal o mais próximo possível da posição real atingida. Possíveis erros de valores dos parâmetros geométricos do modelo poderão ser identificados por meio de um processo de calibração..

O robô escolhido assemelha-se ao manipulador Stanford (Spong, 2006) e ao Puma modificado (McKerrow, 1991), com um grau de liberdade a menos, tendo sua representação simplificada na Fig. (2). Para simplificar o modelo, assumiu-se que a origem do sistema de coordenadas do órgão terminal do robô localiza-se na mesma posição da origem do sistema de coordenadas da última junta do braço manipulador. Dessa forma, os cálculos da cinemática inversa ficam bastante simplificados. Esta metodologia pode ser aplicada porque o sistema, inicialmente, é calibrado em função da ferramenta utilizada – a tocha de soldagem. Dessa forma, para qualquer tamanho da tocha (desde que não ultrapasse os parâmetros de carga máxima admissível do manipulador) o robô funcionará adequadamente.



**Figura 2. Desenho esquemático do braço manipulador especificando os parâmetros e as variáveis utilizadas em sua modelagem cinemática**

Neste modelo, assume-se que os eixos z3 e z4 (e também o eixo z5) se interceptam num ponto *Oc*. A existência dessa condição serve como indicativo de que os três primeiros graus de liberdade são responsáveis pelo posicionamento do robô, enquanto os dois últimos são referentes à orientação do mesmo. Essa definição visa a facilitar a elaboração da cinemática inversa do sistema.

Para realização da modelagem do robô, foi utilizada a convenção de D-H (Denavit-Hartenberg, Spong, 2006). Tal notação pode ser observada na eq. 1 que mostra a forma de cálculo da transformação homogênea que mapeia a posição relativa entre dois sistemas de coordenadas fixados em elos consecutivos de um manipulador genérico.

$$A = \text{Rot}(z, \theta) * \text{Trans}(z, D) * \text{Trans}(x, L) * \text{Rot}(x, \alpha) \quad (1)$$

A Tab. (1) mostra os parâmetros da cinemática do sistema, obtidos a partir da análise da Fig. (2), já utilizando a convenção de D-H. É importante ressaltar que no modelo, o ângulo  $\theta_2$  é deslocado em  $90^\circ$ , em função da posição inicial desejada para o robô e suas limitações de movimentação.

A partir da Tab. 1, foi possível calcular as matrizes de transformação de cada eixo do robô e, a partir delas, obter a matriz de transformação homogênea do manipulador ( ${}^R T_H$ ), conforme mostrada na Eq. (2). Na mesma equação foi utilizada a notação  $C_i = \cos(\theta_i)$  e  $S_i = \sin(\theta_i)$ .

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} (-C_1 \cdot S_2 \cdot C_4 - S_1 \cdot S_4) \cdot C_5 - C_1 \cdot C_2 \cdot S_5 & -(-C_1 \cdot S_2 \cdot C_4 - S_1 \cdot S_4) \cdot S_5 - C_1 \cdot C_2 \cdot C_5 & -C_1 \cdot S_2 \cdot S_4 + S_1 \cdot C_4 & -C_1 \cdot C_2 \cdot d_3 - C_1 \cdot l_2 \cdot S_2 + S_1 \cdot d_2 \\ (-S_1 \cdot S_2 \cdot C_4 + C_1 \cdot S_4) \cdot C_5 - S_1 \cdot C_2 \cdot S_5 & -(-S_1 \cdot S_2 \cdot C_4 + C_1 \cdot S_4) \cdot S_5 - S_1 \cdot C_2 \cdot C_5 & -S_1 \cdot S_2 \cdot S_4 - C_1 \cdot C_4 & -S_1 \cdot C_2 \cdot d_3 - S_1 \cdot l_2 \cdot S_2 - C_1 \cdot d_2 \\ C_2 \cdot C_4 \cdot C_5 - S_2 \cdot S_5 & -C_2 \cdot C_4 \cdot S_5 - S_2 \cdot C_5 & C_2 \cdot S_4 & -S_2 \cdot d_3 + l_2 \cdot C_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tabela 1: Parâmetros D-H

Variável de Junta	Theta [graus] (Rz)	Alpha [graus] (Rx)	D [mm] (Tz)	L [mm] (Tx)
Base - Junta	0°	0°	0	0
<b>θ1</b>	θ1	90°	d1	0
<b>θ2</b>	θ2 + 90°	-90°	d2	l2
<b>d3</b>	0°	0°	d3	0
<b>θ4</b>	θ4	90°	0	0
<b>θ5</b>	θ5	0°	0	0

### 3.1 Cinemática Direta – RPY

A partir da matriz de transformação é possível determinar a cinemática direta e inversa do manipulador (McKerrow, 1991). Vale lembrar que o processo de determinação da cinemática direta é relativamente mais fácil que o processo da cinemática inversa.

Para representar a orientação do órgão terminal do manipulador escolheram-se os ângulos Roll-Pitch-Yaw (RPY, baseados em termos náuticos, originalmente em inglês). A matriz de orientação geral RPY é dada por uma seqüência de três rotações: uma em torno do eixo x, uma no eixo y e outra no eixo z. A Eq. (3) mostra a forma genérica dessa transformação.

$$RPY(\phi, \theta, \psi) = Rot(z, \phi) \times Rot(y, \theta) \times Rot(x, \psi) = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x & 0 \\ x_y & y_y & z_y & 0 \\ x_z & y_z & z_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para que a transformação mostre também a posição do manipulador é necessário que sejam incluídas as translações em relação aos três eixos coordenados. Dessa forma, multiplica-se a transformação RPY por uma translação ao longo de em cada eixo coordenado, resultando na transformação geral do manipulador,  ${}^R T_H$ . A Eq. (4) mostra a transformação RPY multiplicada pela transformação de translação..

$${}^R T_H = Trans(x, y, z) * Rot(z, \phi) * Rot(y, \theta) * Rot(x, \psi) = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x & p_x \\ x_y & y_y & z_y & p_y \\ x_z & y_z & z_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Como  ${}^R T_H$  da Eq. (2) é igual à transformação geral do manipulador (Eq. 4), obtêm-se, por meio de manipulações algébricas, as equações literais que representam os ângulos RPY ( $\phi, \theta, \psi$ ) e a posição do órgão terminal ( $p_x, p_y, p_z$ ) em função dos parâmetros e das variáveis do manipulador. A Tab. 2 mostra as equações resultantes em uma forma resumida (McKerrow, 1990).

Tabela 2. Cinemática direta para o manipulador esférico de 5 graus de liberdade

	Eixo x	Eixo y	Eixo z
<b>Rotações</b>	$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{y_z}{z_z} \right)$	$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{-x_z}{x_x \cdot \cos(\phi) + x_y \cdot \sin(\phi)} \right)$	$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{x_y}{x_x} \right)$
<b>Translações</b>	$x = p_x$	$y = p_y$	$z = p_z$

As expressões mostradas na Tab. (2) representam a Cinemática Direta do manipulador e por meio delas é possível determinar a posição e a orientação do órgão terminal do robô (em coordenadas cartesianas em relação ao sistema de coordenadas fixado a sua base) a partir das variáveis de juntas. Essas expressões, entretanto, apresentam possíveis singularidades, além da função “tan<sup>-1</sup>” retornar valores limitadas ao intervalo [-90°, 90°]. Para solucionar esse problema, implementa-se, em substituição à função “tan<sup>-1</sup>”, a chamada função atan2(y,x), cujo algoritmo é descrito por McKerrow (1990).

### 3.2 Cinemática Inversa

A cinemática inversa determina as coordenadas de juntas do robô a partir da posição e da orientação do órgão terminal do manipulador. O cálculo desta é um processo complexo e pode ser desenvolvido de algumas maneiras. A principal questão a ser definida refere-se à opção pela da solução numérica ou pela solução analítica. A primeira apresenta a vantagem de poder ser utilizada para qualquer robô, enquanto a segunda depende de cada manipulador escolhido. Adicionalmente, a solução numérica é realizada em tempo real para cada posição desejada e pode ser demorada, causando assim erros ou atrasos nas tarefas desenvolvidas pelo robô. Por este motivo, optou-se pela solução analítica.

Neste contexto, após igualar o lado direito da Eq. (2) com o lado direito da Eq. (4) e com algum algebrismo, definem-se 16 equações, das quais 4 têm soluções triviais, reduzindo o número de equações a serem resolvidas para 12. As variáveis de juntas podem ser explicitadas, então, como mostrado abaixo:

$$C_2 = \frac{-k_2 \pm \sqrt{\Delta}}{2 \cdot k_1} \quad ; \quad S_2 = \frac{-(p_z - d_1) \cdot c_2 + l_2}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2}} \quad (5)$$

em que

$$\Delta = k_2^2 - 4 \cdot k_1 \cdot k_3 \quad ; \quad k_1 = p_z^2 + p_x^2 + p_y^2 - d_2^2 \quad ; \quad k_2 = -2 \cdot p_z \cdot l_2 \quad k_3 = l_2^2 - p_x^2 - p_y^2 + d_2^2 \quad (6)$$

e

$$d_3 = -\frac{p_z - d_1 - l_2 \cdot \cos \theta_2}{\sin \theta_2} \quad \text{se } S_2 \neq 0 \quad ; \quad d_3 = \frac{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 - d_2^2}}{\cos \theta_2} \quad \text{se } S_2 = 0 \quad (7)$$

Pode-se observar que “C<sub>2</sub>” tem duas respostas. Contudo, como o valor máximo de “θ<sub>2</sub>” é de 45°, não existe o risco de “d<sub>3</sub>” assumir um valor negativo, e

$$C_1 = \frac{-(p_y \cdot d_2 + C_2 \cdot d_3 \cdot p_x + l_2 \cdot S_2 \cdot p_x)}{(C_2 \cdot d_3 + l_2 \cdot S_2)^2 + d_2^2} \quad \text{e} \quad S_1 = \frac{p_x + C_1 \cdot C_2 \cdot d_3 + C_1 \cdot l_2 \cdot S_2}{d_2} \quad (8)$$

O valor de “θ<sub>4</sub>” é obtido da função tan<sup>-1</sup> aplicada à divisão (S<sub>4</sub>/C<sub>4</sub>), cujo numerador é obtido de.

$$S_4 = -\frac{z_x \cdot C_1 + S_1 \cdot z_y}{S_2} \quad \text{e} \quad C_4 = -\frac{z_y + S_1 \cdot S_2 \cdot S_4}{C_1} \quad \text{se } S_2 \text{ e } C_1 \neq 0 \quad (9)$$

$$S_4 = \frac{z_z}{C_2} \quad \text{se } S_2 = 0 \quad ; \quad C_4 = \frac{z_x}{S_1} \quad \text{se } C_1 = 0 \quad (10)$$

$$S_5 = -\frac{y_x \cdot S_1 - C_1 \cdot y_y}{S_4} \quad \text{e} \quad C_5 = -\frac{y_z + C_2 \cdot C_4 \cdot S_5}{S_2} \quad (11)$$

$$S_5 = -x_z \cdot S_2 - C_2 \cdot C_4 \cdot y_z \quad \text{se } S_4 = 0 \quad (12)$$

$$C_5 = -\frac{y_y + C_1 \cdot S_4 \cdot S_5}{S_1 \cdot C_2} \quad \text{se } S_2 = 0 \quad (13)$$

$$C_5 = -\frac{y_x}{C_1 \cdot C_2} \quad \text{se } S_1 = 0 \quad (14)$$

Com a utilização da função arco-tangente é possível determinar todos os ângulos, resolvendo assim a cinemática inversa do manipulador.

#### 4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA A CALIBRAÇÃO

A calibração de robôs envolve uma série de conceitos relacionados tanto à modelagem de manipuladores, quanto à identificação de parâmetros desses modelos, e pode ser definida como o processo de melhorar a exatidão de um manipulador por meio de modificações no software de controle do robô (Motta, 1999; Bernhardt et al, 1993).

Por meio da calibração, podem ser obtidos os parâmetros geométricos que descrevem a estrutura e o movimento do robô. Para a obtenção desses parâmetros, a calibração é dividida em quatro procedimentos:

- Modelagem;
- Medição;
- Identificação de Parâmetros;
- Compensação.

A modelagem, apresentada em detalhes em vários trabalhos (Motta, 2005, McKerrow, 1991 e Schröer, 1993), consiste na determinação de um modelo matemático que represente o robô e suas características.

A etapa de medição é uma das etapas mais críticas em termos de precisão e envolve a medição da posicionamento estático do robô e, no caso da calibração dinâmica, de características dinâmicas como velocidade e aceleração de determinada junta durante o movimento.

A identificação de parâmetros é a etapa em que, a partir dos dados obtidos durante a medição, os parâmetros do modelo matemático, introduzidos no modelo de calibração, são calculados e substituídos no modelo cinemático de forma a melhor representar os dados experimentais. Dessa forma, busca-se tornar o modelo matemático o mais próximo possível do manipulador robótico real.

Uma vez de posse de um modelo matemático corrigido para o robô, pode-se utilizar essa informação para modificar seus comandos de controle, compensando-os conforme necessário e aprimorando a exatidão de posicionamento do órgão terminal desse robô.

#### 4.1 Modelagem Cinemática para a Calibração

A construção de um modelo cinemático de calibração é o primeiro passo a ser realizado. Entretanto, a construção desse modelo não é tão direta quanto a modelagem cinemática obtida pela notação de Denavit-Hartenberg para movimentação do robô.

O modelo cinemático de calibração deve conter parâmetros variáveis, que serão posteriormente identificados por meio de ensaios experimentais, e a escolha desses parâmetros deve ser planejada de forma a evitar singularidades no processo de identificação.

Usando os conceitos apresentados em (Motta, 2005) e (Motta, 2007), associados aos valores propostos do sistema, elaborou-se a Tab. (4), em que os parâmetros que podem ser calibrados têm acrescido ao seu valor, a variável “ $\delta$ ”.

**Tabela 4: Parâmetros calibráveis do modelo do manipulador**

Juntas		Parâmetros					
De (tipo de junta)	Para (tipo de junta)	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
Base (Base)	Junta 1 (Rotação)	0+ $\delta$	0+ $\delta$	0	0°+ $\delta$	0°+ $\delta$	0°
Junta 1 (Rotação)	Junta 2 (Rotação)	0+ $\delta$	0	110+ $\delta$	90°+ $\delta$	0°	0°+ $\delta$
Junta 2 (Rotação)	Junta 3 (Translação)	30	0	-100	-90°+ $\delta$	0°	90°+ $\delta$
Junta 3 (Translação)	Junta 4 (Rotação)	0+ $\delta$	0+ $\delta$	570	0°+ $\delta$	0°+ $\delta$	0°
Junta 4 (Rotação)	Junta 5 (Rotação)	0+ $\delta$	0	0+ $\delta$	90°+ $\delta$	0°	0°+ $\delta$
Junta 5 (Rotação)	TCP (TCP)	0+ $\delta$	0+ $\delta$	0+ $\delta$	0°+ $\delta$	0°+ $\delta$	0°+ $\delta$

O passo seguinte para a calibração do robô é o cálculo dos parâmetros de calibração do modelo de forma que se tenha uma representação que reproduza o mais fielmente possível o robô real.

#### 4.2 Identificação de Parâmetros

Do ponto de vista matemático, a calibração de robôs consiste em um processo de estimação não-linear de parâmetros. Ou seja, um processo matemático de adaptar-se um modelo a dados experimentais, determinando-se parâmetros desconhecidos por meio da avaliação de uma função de custo. Dessa forma, os parâmetros resultantes tornam o modelo matemático o mais próximo possível dos dados experimentais observados.

Para realizar essa estimação é necessário primeiramente observar o manipulador robótico como uma função que, a partir de uma série de parâmetros de modelagem e das variáveis de juntas, determina uma posição específica. Supondo uma modelagem seguindo a convenção de Denavit-Hartenberg (McKerrow, 1990) tem-se:

$$P = f(\theta, \alpha, d, l) = Rot(z, \theta) Trans(z, d) Trans(x, l) Rot(x, \alpha) \quad (15)$$

, onde  $P$  representa a posição e a orientação do pulso do manipulador (*Tool Center Point* - TCP).

A primeira derivada da Eq. (15) pode então ser interpretada como o erro de posicionamento e de orientação do TCP desse robô. (Hollerbach and Benett, 1988)

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial P}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial P}{\partial l} \Delta l \quad (16)$$

O valor de  $\Delta P$  na Eq. (16) é o erro de posicionamento desse robô e pode ser medido.

A partir da transformação completa ( $P$ ) do manipulador, da posição ( $M$ ) do robô, obtida por meio de medição, e da transformação ( $B$ ), que localiza a base do robô em relação ao sistema de medição,  $\Delta P$  pode ser definido segundo a Eq. (17). A transformação ( $B$ ), entretanto, pode ainda ser incorporada como parte da transformação  $P$  do manipulador, de forma que o erro de posicionamento  $\Delta P$  pode ser calculado conforme a Eq.(17):

$$\Delta P = M - P \quad (17)$$

A transformação  $P$  é iterativamente modificada à medida que os parâmetros de calibração do robô são calculados, de forma que, no final do processo a transformação  $P$  representa o robô real e o localiza no sistema de coordenadas do sistema de medição.

Reescrevendo a Eq.(16) em um formato matricial, de forma a representar diferentes posições e orientações do robô, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta} & \frac{\partial P_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_1}{\partial d} & \frac{\partial P_1}{\partial l} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta} & \frac{\partial P_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_2}{\partial d} & \frac{\partial P_2}{\partial l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta} & \frac{\partial P_n}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_n}{\partial d} & \frac{\partial P_n}{\partial l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \alpha \\ \Delta d \\ \Delta l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \Delta x \Rightarrow \mathbf{J} \Delta x = \Delta \mathbf{P} \quad (18)$$

, onde  $J$  é o Jacobiano do manipulador, com suas derivadas parciais, e  $\Delta x$  é um vetor com os parâmetros calibrados. Dessa forma o problema de calibração fica reduzido à solução de um sistema de equações não-lineares do tipo  $\mathbf{A}x = \mathbf{b}$ .

Uma grande variedade de métodos para a resolução desse tipo de sistemas é discutida na literatura (Jacoby *et.al.*, 1972 e Dennis *et.al.*, 1983). Dentre estes, o algoritmo de Levenberg-Marquardt (Motta, 2005) é um dos métodos mais populares para a resolução de sistemas de equações não-lineares através da minimização da soma dos quadrados. O algoritmo de Levenberg-Marquardt é um método iterativo de solução obtido a partir de alterações introduzidas no método de Gauss-Newton de forma a contornar problemas de divergência. Motta (2005) apresenta uma descrição detalhada do método e o mesmo não será repetido neste artigo por falta de espaço.

Uma vez concluída a identificação dos parâmetros de calibração do robô, têm-se dois diferentes modelos que representam esse robô. Um modelo nominal, construído para movimentação e controle do robô (seção 3) e um modelo calibrado. Idealmente, o passo final para a calibração do manipulador seria a substituição do modelo nominal pelo modelo calibrado, entretanto isso acarretaria um aumento excessivo de complexidade na cinemática e no controle do robô, o que torna essa substituição inviável. Uma vez que a substituição do modelo nominal não é viável, a solução para a integração desses modelos é o uso de técnicas de compensação de posicionamento.

### 4.3 Compensação de Posicionamento

Uma vez que os parâmetros do modelo de calibração do robô são identificados, eles podem ser utilizados para prever o erro de posicionamento e compensá-lo. Existe uma grande variedade de técnicas de compensação de posicionamento disponíveis na literatura, dentre as quais uma das mais simples é o *Método de Redefinição de Posicionamento* (Motta, 2005).

Esse método utiliza um modelo linear para prever os erros de posicionamento do robô e calcular a posição compensada ( $P_c$ ), para a qual o robô deve se mover de forma a alcançar a posição ( $P_d$ ) desejada, conforme ilustrado na Eq.(19).

$$P_c = P_d \left[ Trans(-d_x, -d_y, -d_z) \cdot Rot(x, -\phi_x) Rot(y, -\phi_y) Rot(z, -\phi_z) \right] \quad (19)$$

, onde  $[d_x \ d_y \ d_z \ \phi_x \ \phi_y \ \phi_z]^T$  são os erros de posicionamento previstos pelo modelo calibrado.

## 5 O PROJETO DO CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO

Os modelos de cinemática – inversa e direta – associados ao processo de calibração são as bases para a realização dos cálculos de movimentação do manipulador. Na fase inicial do projeto, foram desenvolvidas bibliotecas em linguagem C/C++, utilizadas pelo microcontrolador NIOS embarcado na FPGA. Estas bibliotecas permitem a determinação, com grande precisão, dos movimentos a serem desenvolvidos pelo robô. A FPGA permite embarcar vários processadores NIOS assim como componentes de hardware para desenvolver funções matemáticas. Neste contexto, as FPGAs permitem implementar o paralelismo intrínseco dos algoritmos usados para determinar a movimentação do robô.

O desenvolvimento dos processos de movimentação na FPGA vem associado à busca de alternativas para a realização de tarefas em robótica, visando desempenho e flexibilidade. Dentro da idéia de paralelização, foram embarcados na FPGA dois microprocessadores NIOS, responsáveis pela execução dos cálculos de cinemática inversa e

direta, além do cálculo da velocidade a ser desenvolvida por cada junta do manipulador (até que esse alcance a posição final desejada).

Outro importante aspecto do controle de movimentação refere-se à forma de comunicação entre o sistema que controla o movimento e os *drivers* que atuam sobre os motores.

### 5.1 Módulo de Comunicação

Visando realizar a comunicação com a entrada e a saída de dados, foi desenvolvido um projeto de hardware que implementa uma rede RS485, com conversão a partir da RS232, que permitiu as seguintes funcionalidades:

- Conversão de dados do padrão RS232 para RS485 e vice-versa.
- Recepção dos dados fornecidos por outros módulos através de interface RS232.
- Envio de comandos para os controladores e/ou drivers dos motores através do padrão RS485.
- Recepção de informações provenientes dos controladores, por exemplo, velocidade e posição dos motores (vindas dos *encoders*).

O padrão RS485 foi escolhido por sua simplicidade e por ser largamente utilizado em ambientes industriais. Neste padrão, a segurança nas transmissões é fornecida pelo padrão elétrico da interface. A Fig. (3) mostra o sistema de movimentação do robô, formado pelos controladores/drivers e seus respectivos motores. Pode ser observado que a comunicação da FPGA com a rede é via RS232.

Para garantir a sincronização da movimentação dos motores, seus *drivers* recebem, primeiramente, as respectivas informações de velocidade. Depois que todos os motores já têm sua informação, um sinal de início é enviado pelo controlador, na forma de *broadcasting*, indicando o início dos movimentos para cada motor.

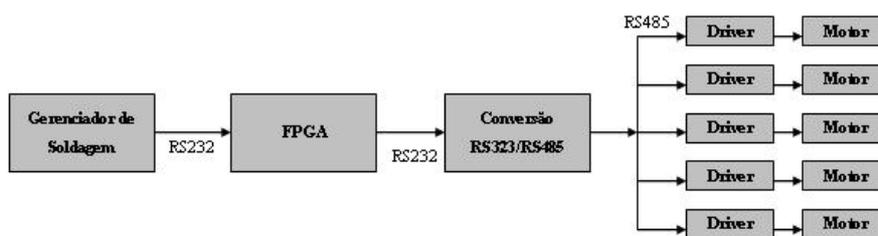


Figura 3. Interface de Comunicação

### 5.2 Algoritmo de Movimentação

O projeto do módulo de movimento do manipulador foi baseado em quatro etapas, que podem ser observadas na Fig. (4), e que são explicadas em seguida.

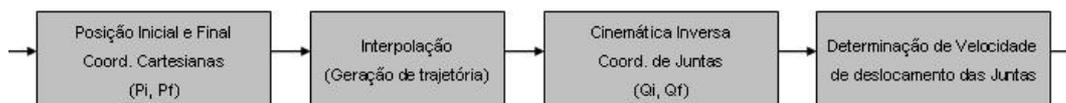


Figura 4. Sequência para determinação de movimentação do manipulador

- Etapa 1:** o controlador recebe uma lista de posições iniciais e finais dos cordões de solda. Tais posições são fornecidas pelo módulo gerenciador de soldagem e são descritas através de coordenadas cartesianas, no formato  $[p_x, p_y, p_z, \psi, \theta, \phi]$ .
- Etapa 2:** é feita uma interpolação linear desses parâmetros, de modo a gerar a trajetória entre esses pontos. Na etapa 1 o robô iria realizar apenas soldagens em linhas retas. Através da interpolação efetuada na etapa 2, são determinados os pontos por onde o manipulador deve passar, de modo a garantir que sua movimentação satisfaça as condições de soldagem determinadas anteriormente.
- Etapa 3:** De posse dos pontos por onde o robô deve passar – com distância máxima de 10 mm entre eles –, o controlador faz os cálculos de cinemática inversa destes, obtendo assim as coordenadas de juntas, tanto atuais quanto finais.
- Etapa 4:** utilizando as coordenadas das juntas sobre o Jacobiano, são determinadas as velocidades de movimentação de cada junta (entre os pontos). Dessa forma, garante-se a proximidade da trajetória determinada, dentro da velocidade esperada.

### 5.3 Implementação da Movimentação

O sistema desenvolvido na FPGA é capaz de receber os dados do gerenciador de soldagem, bem como de enviar instruções para os *drivers* de acionamento dos motores. Além disso, realiza os cálculos de cinemática inversa que permitem a movimentação do manipulador, da maneira mais rápida possível.

Para tanto, foi utilizada a ferramenta SOPC Builder (Altera, 2008), da Altera, para gerar a configuração do hardware da FPGA. O SOPC permite a implementação da comunicação entre os diversos periféricos do sistema de maneira transparente, através da utilização do barramento Avalon, também da Altera (NIOS, 2008) (Vasconcelos, 2007).

## 6 RESULTADOS PARCIAIS

Com relação ao cálculo da cinemática, inversa e direta, pode-se observar exatidão do algoritmo suficiente para operações de soldagem, uma vez que o erro médio encontrado foi menor que 0.001 (graus para as juntas rotacionais e centésimos de milímetros para a junta prismática), para a determinação da posição a ser alcançada pelo elemento terminal do manipulador. A Tab. (5) mostra alguns dos pontos buscados e as respostas encontradas. Importante ressaltar também que foram testadas mais de  $1 \times 10^9$  posições. Ou seja, o algoritmo utilizado mostrou-se muito eficiente.

**Tabela 5: Alguns resultados da Cinemática Inversa**

Resultados	$\theta_1$	$\theta_2$	$d_3$	$\theta_4$	$\theta_5$
Esperados	0,00000	0,00000	290,00000	0,00000	0,00000
Obtidos	0,00000	0,00000	290,00000	0,00000	8,99994
Esperados	15,00000	43,52000	333,41000	22,65000	31,00000
Obtidos	14,99999	43,519998	333,410004	22,649998	30,99998
Esperados	-36,92000	-23,62000	415,10000	-68,15000	-42,95000
Obtidos	-36,919996	-23,619999	415,100006	-68,149997	-42,949995

Além disso, o uso de unidades lógicas da FPGA foi de aproximadamente 17% de sua capacidade, ainda sem as otimizações possíveis, enquanto sua capacidade de memória foi utilizada em 52%. Ou seja, a implementação de mais um controlador NIOS, por exemplo, é completamente viável, promovendo um aumento de 50% na velocidade do cálculo da trajetória completa do manipulador, não considerando possíveis melhorias em desempenho advindas de otimizações adicionais em hardware.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou a metodologia e o projeto de um manipulador para reparo de pás de turbinas hidráulicas. Para o projeto foi realizado o modelo de cinemática direta e inversa do manipulador, assim como a proposta de uma metodologia de calibração do mesmo. O projeto mostrou-se bastante interessante em todo o seu contexto, com a aplicação de uma modelagem bem definida e complexa. Além disso, foi determinante a necessidade de concepção bem feita do conjunto do manipulador, visando o produto final, bem como sua possível execução. Em função dos estudos prévios, foi possível levantar os dados a respeito do modelo, gerando assim as bases para a determinação dos modelos cinemáticos e de calibração.

Do ponto de vista de validação do modelo, a série de testes realizados mostra uma aproximação muito boa entre os resultados esperados e os obtidos. Dessa forma, pode-se analisar como tendo sido bem sucedida a elaboração do modelo, bem como de seus cálculos de cinemática direta e inversa. Isso contribui para o sucesso futuro do projeto, uma vez que permitem a projeção de um funcionamento correto das instruções enviadas pelo controlador.

Com relação ao projeto geral do manipulador, foram apresentados os módulos do sistema, assim com aspectos do desenvolvimento dos mesmos. Adicionalmente, foi apresentado o projeto da implementação do módulo de controle, onde foram introduzidas tecnologias de ponta, especificamente: FPGAs, sistemas embarcados, processadores embarcados e processamento paralelo. É importante dizer que os resultados apresentados na seção 6 são referentes aos cálculos já feitos dentro dos processadores embarcados na FPGA. A implementação do controlador usando processadores embarcados mostrou-se factível, pelo fato de não ocupar muita área dentro da FPGA (Stratix II).

## 8 REFERÊNCIAS

- McKerrow, P. J. (1990). *Introduction to Robotics*. Addison Wesley.
- Spong, M. W. (2006). *Robot Modeling and Control*. Wiley.
- Peterson I.R. *Computing Euler Angles from a rotation matrix. A Vector Representation of 3D Rotations*. Relatório técnico do *Centre for Molecular and Biomolecular Electronics*, Coventry University, NES, UK. Disponível em <http://arxiv.org/pdf/cs/0104016>. Acessado em setembro de 2008.
- Hidro-Québec (2008). Disponível em <http://www.hydroquebec.com/fr/>. Acessado em setembro de 2008.
- Bernhardt, R., Albright, S.L. (1993). *Robot Calibration*, Chapman & Hall, Cambridge, UK.
- Zhuang, H., Roth, Z. S. (1996). *Camera-Aided Robot Calibration*, Ed. CRC Press, USA.
- Dennis, J.E., Schnabel, R.B. (1983). *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, Prentice Hall, New Jersey, USA.

- Jacoby, S.L.S., Kowalik, J.S., Pizzo, J.T. (1972). *Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems*, Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Hollerbach, J. M., Benett, D. J. (1988). *A Survey of Kinematic Calibration*, Robotics Review, pp. 207-242.
- Motta, J.M.S.T., McMaster R.S. (1999). *Modeling, Optimizing and Simulating Robot Calibration with Accuracy Improvement*, J. of The Brazilian Soc. Mechanical Sciences, Vol. 21, No. 3, pp. 384-401.
- Motta, J.M.S.T. (2005). *An Investigation of Singularities in Robot Kinematic Chains Aiming at Building Robot Calibration Models for Off-line Programming*, J. of The Brazilian Soc. Mechanical Sciences, Vol. 2, No. 2, pp. 200-204.
- Motta, J.M.S.T. (2007). *Robot Calibration: Modeling, Measurement and Applications*. In: Low Kin-Huat. (Org.). *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications*. 1 ed. Mammendorf - Germany: Verlag Robert Mayer-Scholz, v. 1, p. 107-130.
- Nios II Hardware Tutorial, 2008, San Jose, Ca: Altera. Disponível em <http://www.altera.com>. Acessado em setembro de 2008.
- Quartus II, 2008, "Version 7.0 Handbook", San Jose, Ca: Altera. Disponível em <http://www.altera.com>. Acessado em setembro de 2008.
- Bonaccorso, N. G., Gonçalves Jr., A. A., Dutra, J. C (2006). *Automation of the processes of surface measurement and of deposition by welding for the recovery of rotors of large-scale hydraulic turbines*. Journal of Materials Processing Technology 179, Elsevier, pp. 231-238.
- GINANI, Luciano Selva ; MOTTA, J. M. S. T. (2007). *A Laser Scanning System for 3D Modeling of Industrial Objects Based on Computer Vision*. 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007, Brasília-DF. Proceedings of the COBEM2007, 2007. v. 1. p. 30-40.
- Altera (2008). Disponível em [www.altera.com](http://www.altera.com). Acessada em setembro de 2008.
- Vasconcelos Filho, Ê P; Llanos, C H; Rozenwald, G F. "An environment for robot soccer game simulation using reconfigurable architectures based on a FPGA-PCI Board." In: COBEM 2007, 2007, Brasília. Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007. p. 1-10.

## 9 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# DEVELOPMENT OF THE CALIBRATION KINEMATIC MODEL OF A SPHERICAL ROBOT FOR MULTILAYER POSITIONAL GMAW WELDING

Ênio Prates Vasconcelos Filho<sup>1</sup>, [enioprates@yahoo.com.br](mailto:enioprates@yahoo.com.br)

Luciano Ginani<sup>1</sup>

José Mauricio S T Motta<sup>1</sup>, [jmmotta@unb.br](mailto:jmmotta@unb.br)

Guilherme Caribe de Carvalho<sup>1</sup>, [gccarval@unb.br](mailto:gccarval@unb.br)

Carlos Llanos<sup>1</sup>, [llanos@unb.br](mailto:llanos@unb.br)

Walter Vidal de Britto<sup>1</sup>, [wbritto@unb.br](mailto:wbritto@unb.br)

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF.

**Abstract:** *This article presents the development of a system for generating trajectories and to control a robot manipulator with 5 degrees of freedom, designed to perform repairs in hydraulic turbine blades eroded by cavitation in Hydroelectric Generating Plants (UGH) of Eletronorte. Currently, procedures for repairing material flaws occurring on the surface of the turbine blades are carried out manually by welding. This project aims at improving the conditions of the repairing procedures, improving performance, minimizing costs of operation, increasing the consistency and quality of the process and improving working conditions and safety of workers. Initially, the manipulator geometric design was established, based on the requirements of the recovering process on the turbine blades material and the restrictions on accessing the places to execute the repairs. Subsequently to the geometric design, the kinematic model was developed, as well as a methodology to calibrate this model. The solutions of the inverse kinematics and inverse Jacobean were explicitly obtained in order to produce literal equations for direct implementation in computer algorithms, in order to generate the references to control the interpolated motion in Cartesian coordinates. The controller design is currently being implemented with high technology of digital systems, i.e., by using FPGAs and embedded microprocessors. In this article, aspects of the kinematic modeling and calibration procedures applied to the project are discussed, as well as the control strategy.*

**Keywords:** Robotics, Kinematic Models, Robot Calibration, FPGA.