



### **Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH**

#### **Desenvolvimento e Construção de Sistema Robotizado para Reparos de Falhas de Cavitação em Turbinas Hidráulicas**

**FILINTO ELISIO COSTA CUTRIM(1); ERICO GODOY VEIGA(1); DAVIDSON PEREIRA CAMPOS(1); CARLOS LOPES DA ROCHA(1); JOSE MAURICIO SANTOS TORRES DA MOTTA(2); CARMO GONÇALVES(1); ELN(1);UnB(2);**

#### **RESUMO**

Este trabalho apresenta um ROBOSOLDA que usa tecnologia de soldagem automatizada, reconstrução 3D, por visão e interface de controle. A soldagem é por camadas de solda elétrica Gás Metal Arc Welding.

Foi desenvolvido para reparo da superfície das pás das turbinas hidráulicas com pás trincadas ou erodidas por cavitação. As várias etapas envolveram o desenvolvimento de algoritmos, otimização de sensor óptico, varredura a laser, estudo do processo GMAW, preenchimento de cavidade por camadas sucessivas, otimização de hardware programável, desenvolvimento de software para calibração do sistema óptico e de interface com o sistema de controle.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Turbinas hidráulicas, cavitação, reparo, soldagem robótica, rotores.

(\*) Endereço Autor Responsável, SCN Quadra 06 Conj. A – sala 1016 - Bloco B – CEP 70.716-901 Asa Norte, Brasília/DF – Brasil

Tel: (+55 61) 3429-8729 – Email: [filinto.cutrim@eletronorte.gov.br](mailto:filinto.cutrim@eletronorte.gov.br)

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Turbinas hidráulicas instaladas em usinas hidroelétricas são submetidas a vários tipos de desgaste mecânico. Os fenômenos geradores de desgaste incluem: perfil hidráulico não adequado às condições operacionais reais; características de projeto não otimizadas para o escoamento pretendido; operação do hidrogerador em pontos fora das especificações de projeto; propriedades insuficientes do material usado para a construção do rotor (1).

Um dos principais fenômenos geradores de desgaste nas superfícies das pás dos rotores hidráulicos é a cavitação, que se caracteriza pela formação de bolhas de vapor em certas regiões do escoamento em que a pressão atinge valores abaixo da pressão de vapor d'água, na temperatura de operação. Essas bolhas, ao passarem por regiões com mudanças abruptas de pressão próximas à superfície das pás, colapsam gerando 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 (2).

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 (3). Como desvantagens do processo de reparo manual podem ser citadas: altos custos de manutenção, condições inadequadas de trabalho para os operários, necessidade de submeter os operadores a posições desfavoráveis, dificuldade para reparar defeitos em lugares de difícil acesso, qualidade do reparo dependente da habilidade de operador de soldagem, necessidade de refazer reparos e deterioração da geometria das pás das turbinas.

Considerando os altos custos de recuperação de turbinas, empresas como a Hydro-Québec Turbines (Canadá) iniciaram, na década de 80, o desenvolvimento de sistemas robotizados para a realização dos reparos necessários à recuperação de suas turbinas hidráulicas. Um desses desenvolvimentos foi denominado de Hydrobot, o qual foi concebido para reparação de defeitos produzidos por cavitação em turbinas Kaplan e Francis (4). A mesma empresa, considerando o aprendizado obtido no desenvolvimento do Hydrobot, decidiu iniciar em 1989 o desenvolvimento de outro robô mais compacto, o qual foi chamado de SCOMPI. O primeiro protótipo teve sua construção finalizada em 1991 e atualmente é utilizado para a realização de reparos em turbinas. Um dos problemas desse robô relaciona-se ao longo ciclo de programação manual (on-line) necessário ao planejamento de cada reparo.

Outra solução para reparos de defeitos em turbinas hidroelétricas foi proposta nos últimos anos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em parceria com as empresas Lactec, Copel e Furnas (2). O sistema consiste de um robô articulado denominado Roboturb. Este robô possui 7 graus de liberdade, sendo seis articulados e um de deslizamento sobre trilhos. O sistema conta ainda com uma câmera de inspeção de defeitos que determina, com o auxílio de um operador, a geometria e outras características da falha e também, com uma tocha de soldagem no órgão terminal do manipulador. Um dos problemas desse sistema também se relaciona à programação do robô assim como na exigência de operadores com alta qualificação para sua operação efetiva.

Outros robôs com finalidade semelhante também foram também reportados na literatura nos últimos anos (5) (6) (7), entretanto, a exemplo do SCOMPI e do ROBOTURBO, também apresentam complicações relacionadas à programação, o que dificulta sua utilização na prática.

(\*) Endereço Autor Responsável, SCN Quadra 06 Conj. A – sala 1016 - Bloco B – CEP 70.716-901 Asa Norte, Brasília/DF – Brasil

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

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. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento alcançado até o momento em relação ao projeto de pesquisa financiado pela Eletronorte, intitulado "Desenvolvimento e Construção de Sistema Robotizado para Reparos de Falhas de Cavitação em Turbinas Hidráulicas", em suas Fases 1 e 2 (ELETRONORTE/ENM - 2012/05073).

Uma breve descrição do projeto é incluída, explicitando-se seus cinco aspectos mais importantes: concepção, projeto mecânico e construção de um robô de 5 graus de liberdade; modelagem cinemática e calibração dos modelos do manipulador; controle de movimento e geração de trajetórias; medição de geometria da cavidade e planejamento do processo de soldagem para fins de preenchimento da cavidade.

## 2.0 - CONCEPÇÃO, PROJETO MECÂNICO E CONSTRUÇÃO DO ROBÔ

Considerando que o processo de soldagem a arco se caracteriza por necessitar de somente 5 graus de liberdade<sup>1</sup> de movimentação do eletrodo (três translações ortogonais e duas rotações), um manipulador robótico de 5 graus de mobilidade<sup>2</sup> foi proposto para o desenvolvimento do sistema. Escolheu-se a topologia de geometria esférica, devido a sua capacidade de atingir espaços confinados, tipicamente encontrados em turbinas hidráulicas. O projeto e a construção do protótipo basearam-se na busca de partes já disponíveis no mercado internacional e na sua integração mecânica via projeto e fabricação de elementos de conexão. Adotou-se essa estratégia de modo a possibilitar a fácil replicação do mecanismo, bastando adquirir suas peças no mercado e fabricar peças de conexão com geometria simples. O manipulador foi projetado para apresentar elevada rigidez, fácil montagem e fixação na superfície da pá (por meio de bases magnéticas ou cintas, quando necessárias) e operação simplificada. Relativo baixo custo, baixa massa, portabilidade e alta precisão de posicionamento são também características do sistema robótico resultante.

Como atuadores, optou-se pela utilização de motores de passo nas três juntas da base e servo motores nas juntas rotacionais do punho. O sistema é dotado de um sistema de medição baseado em visão de máquina, responsável por medir a geometria da cavidade a ser preenchida. Seu detalhamento é mostrado nas próximas seções.

O manipulador tem uma massa aproximada de 30 kg e apresenta espaço de trabalho com geometria esférica com 2,0 m de diâmetro externo e 0,6 m de diâmetro interno, sem considerar a dimensão da tocha de soldagem. O protótipo construído com a tocha de soldagem instalada em seu órgão terminal. ver Figura 1.

---

1 Graus de liberdade são definidos como movimentos independentes tomados em relação a um sistema de coordenadas de referência.

2 Graus de mobilidade de um manipulador referem-se ao número de juntas atuadas que compõem a cadeia cinemática de seu mecanismo.

(\*) Endereço Autor Responsável, SCN Quadra 06 Conj. A – sala 1016 - Bloco B – CEP 70.716-901 Asa Norte, Brasília/DF – Brasil

Tel: (+55 61) 3429-8729 – Email: [filinto.cutrim@eletronorte.gov.br](mailto:filinto.cutrim@eletronorte.gov.br)

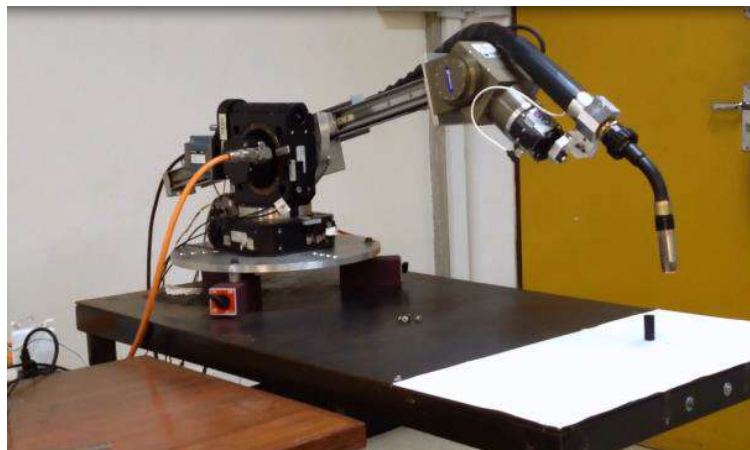


FIGURA 1 – Protótipo Construído

O robô foi concebido de modo a integrar em seu sistema de controle várias tarefas, tais como mapeamento do ambiente, via sensor de varredura a laser, cálculo de localização e volume de material necessário ao preenchimento, escolha de estratégias de fatiamento do volume em uma sequência de cordões de solda a serem depositados durante o preenchimento da cavidade, geração de trajetórias a serem seguidas pela tocha de soldagem durante a deposição de material em cada cordão e nas movimentações necessárias ao seu reposicionamento para início de um novo cordão. O sistema também gerencia a ação da fonte de soldagem.

## 2.1 Modelagem Cinemática e Calibração dos Modelos do Manipulador

O robô pode ser modelado como uma série de elos para conectar o seu elemento terminal (tocha de soldagem) à sua base, com cada elo conectado ao seguinte por uma articulação atuada.

Geralmente, os robôs de soldagem são construídos com 6 graus de liberdade para que possam ser utilizados para propósitos gerais. No entanto, este robô tem que ser leve, já que sua portabilidade é uma característica importante. Então, um robô de 5 graus de liberdade foi a melhor escolha para este robô especializado.

Como é sabido, robôs de 5 graus de liberdade não podem posicionar uma ferramenta em orientação arbitrária, ou seja, um dos ângulos de orientação da ferramenta não pode ser escolhido em função de uma posição da ferramenta especificada. No entanto, uma vez que as extremidades de tochas de soldagem são majoritariamente cilíndricas, não é necessário que o ângulo de rotação em torno do eixo de simetria da tocha seja previamente especificado.

Um diagrama com um desenho do modelo do robô e sistemas de coordenadas de cada elo, com parâmetros cinemáticos, é mostrado, ver Tabela 1, ver Figura 2.

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo Cinemático (Convenção D-H)

| Elo | $\theta$   | d (mm) | $\ell$ (m) | $\alpha$ (deg.) |
|-----|------------|--------|------------|-----------------|
| 1   | $\theta_1$ | 188,46 | 0          | -90             |
| 2   | $\theta_2$ | 105,34 | 32,27      | 90              |
| 3   | -          | d3     | 0          | -90             |
| 4   | $\theta_4$ | 0      | 0          | 90              |
| 5   | $\theta_5$ | 115,00 | 0          | 0               |

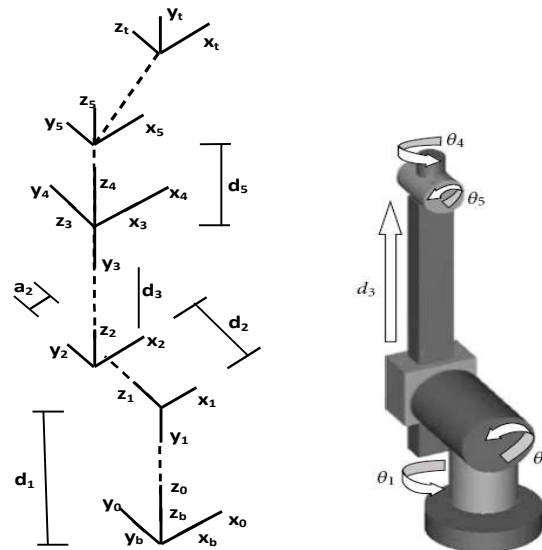


Figura 2 - Modelo do Robô e seus Sistemas de Coordenadas.

## 2.2 Calibração do Robô

A construção de um robô a partir da montagem de peças modulares de prateleira traz flexibilidade na fabricação e permite a construção de vários protótipos em chão de fábrica, mas também produz muitas fontes de imprecisões oriundas dos erros de montagem. Então, a calibração do modelo cinemático mostra-se como um passo muito importante para atingir a precisão desejada. Além disso, nunca é possível medir distâncias e ângulos entre juntas quando não há nenhum acesso a partes internas onde os sistemas de coordenadas de juntas necessitam ser posicionados para representar o movimento real do robô.

Do ponto de vista matemático, a calibração de um robô é um processo de estimativa não-linear de parâmetros, ou seja, um modelo matemático para identificar parâmetros desconhecidos de dados experimentais usando uma função de custo adequada para minimizar os erros (11).

Um modelo cinemático de um robô pode ser visto como uma função que relaciona os parâmetros constantes de seu modelo cinemático e as variáveis de juntas com as coordenadas de posição de elemento terminal do robô. Para exemplificar a matemática envolvida, um modelo cinemático, seguindo a Convenção de D-H pode ser derivado como (12):

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

onde P representa as coordenadas de posição e orientação do elemento terminal do manipulador (posição de ferramenta central – TCP) e  $\theta$ ,  $\alpha$  and  $l$  são os quatro parâmetros que definem a transformação de um sistema de coordenadas de junta do robô para o próximo sistema, onde  $\theta$  e  $\alpha$  são os parâmetros de rotação,  $d$  e  $l$  são parâmetros de translação. A equação (a) pode ser interpretada como a equação de erro de posição e de orientação das coordenadas TCP robô (13), onde  $\Delta P$  é o erro de posição e pode ser medido fisicamente.

Reescrevendo (a) em uma forma matricial para várias posições medidas e orientações do elemento terminal do robô, pode ser formulada a matriz Jacobiana que contém as derivadas parciais de P, tal que  $\Delta x$  é o vetor de erros de parâmetro do modelo como formulado em (b).

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

Um método para resolver problemas de mínimos quadrados não-linear que provou para ser muito bem sucedido na prática e, portanto, recomendado para soluções gerais, é o algoritmo proposto por Levenberg-Marquardt (algoritmo de LM) (14).

Uma vez que os parâmetros geométricos do modelo robô tenham sido identificados no modelo de calibração, dois modelos de cinemáticos estão disponíveis, ou seja, o modelo cinemático nominal e o modelo calibrado. O modelo calibrado não pode ser invertido com variáveis explícitas, uma vez que existem mais parâmetros geométricos (diferentes de zero) do que o modelo nominal. A solução para corrigir as coordenadas do robô associadas a um conjunto de variáveis juntas é compensação de posição (15), (16).

### 2.3 Sensor de Visão

O sensor de visão embarcado baseia-se em varredura a laser e triangulação ativa para aquisição densa de superfícies e construção de modelos 3-D da superfície da pá.

O processo de reconstrução 3D de objetos a partir de imagens de profundidade consiste de três etapas:

- Aquisição, em que a superfície do objeto será varrida de vários pontos de vista, gerando n imagens de profundidade.
- Registro, em que uma transformação rígida M deve ser estimada para localizar as imagens, par a par, em um sistema de coordenadas único.
- correspondência, em que redundâncias entre vistas registradas são processadas para construir um único modelo 3D completo.

O sensor desenvolvido utiliza uma nova metodologia baseada em segmentação/reconstrução de imagens de profundidade, fazendo uso de uma técnica de detecção de borda combinada com uma técnica de agrupamento usando dizimação de malha. Nas bordas detectadas, utiliza-se um descritor de propriedades invariantes sob transformações de similaridade, incluindo rotação, translação e escala uniforme, e também é robusto a ruído (17).

A fim de projetar um sensor de visão capaz de mapear a superfície da pá com alta velocidade e precisão, foram considerados três aspectos principais: a) estrutura do sensor; b) processamento de imagem; c) calibração. A estrutura do sensor define os parâmetros de triangulação e equações; o processamento de imagem detecta as listras do laser e da amostra, gerando dados de entrada para as equações de triangulação; e a calibração resolve os parâmetros do sensor e é um processo crítico para a precisão de medição.

O sistema de visão é composto por uma câmera de alta resolução (1616 x 1216), 2 diodos laser de (7mW) com lente de projeção de listra e um atuador rotativo controlado (motor de passo) para um diodo. O sistema não necessita qualquer codificador (encoder) de posição angular. Uma avaliação do primeiro protótipo da precisão do sistema de visão em comparação com a distância do sensor para a superfície de turbina foi medida como sendo 1:1000.

(\*) Endereço Autor Responsável, SCN Quadra 06 Conj. A – sala 1016 - Bloco B – CEP 70.716-901 Asa Norte, Brasília/DF – Brasil



## 2.4 Medição de Geometria da Cavidade

A medição da cavidade é realizada através de software desenvolvido ao longo desta pesquisa que cobre as etapas de aquisição das imagens de profundidade, geração de malhas tridimensionais de superfície e geração do mapa de profundidade 3D.

## 2.5 Geração de trajetórias

A geração das trajetórias de soldagem é feita a partir de seleção manual de uma região de soldagem sobre o mapa de superfície, o que define as bordas onde se iniciam e terminam os cordões de solda. Esse processo tem de ser manual para adequação às diferentes necessidades no processo de recuperação de pás de turbinas hidráulicas, seja na variação de geometria entre camadas ou em aplicações similares à recuperação de superfícies cavitadas, dando mais flexibilidade às diferentes aplicações em soldagem robotizada.

Uma vez selecionada a região a ser recuperada, uma reta inicial é marcada, também manualmente, sobre a tela para definir a orientação do cordão de solda, com ponto inicial e final. O sistema, então, traça retas paralelas à inicial, em direção e espaçamentos escolhidos, produzindo curvas tridimensionais em fatias sobre planos verticais paralelos, definindo todos os pontos dos cordões de solda que cubram toda a superfície selecionada. ver Figura 3.

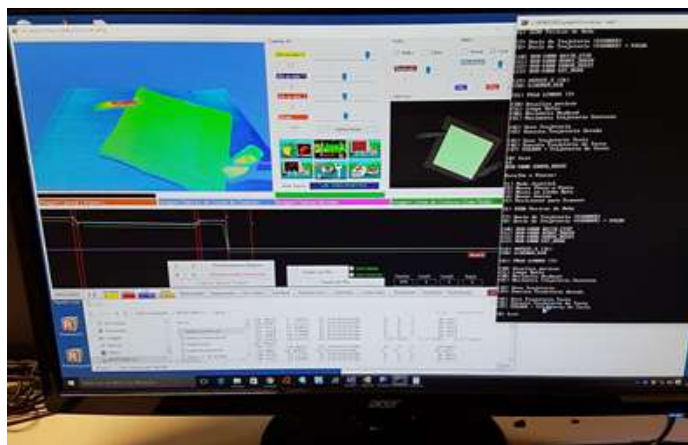


Figura 3 - Tela Mostrando o Mapa de Profundidade Gerado de uma Superfície Selecionada para Soldagem. (a região verde define a área a ser soldada).

## 2.6 Controlador do robô

O controlador do robô é projetado com uma arquitetura reconfigurável baseada em FPGA (Field Programmable Gate Array). O controlador embarcado no robô foi desenvolvido usando uma abordagem de co-projeto de hardware e software, em que um processador soft (NIOS II) foi incorporado em uma FPGA IV da Altera Cyclone sobre o kit de desenvolvimento DE2-115, juntamente com vários módulos de hardware, tais como temporizador, JTAG, I/O, memória e RS-232, ethernet e conectado via barramento Avalon. Além disso, foram desenvolvidos dois módulos de hardware específico (ou seja, circuitos de freq. div-motor e contadores codificadores quadratura) para fornecer sinais para os drivers dos motores e medir sinais do codificador. Os sinais estão relacionados tanto com frequência como com número de passos que devem ser executados em um período de tempo. Além disso, uma placa de alimentação foi projetada para fornecer uma conexão de opto-acoplamento para os três primeiros drivers dos motores e de seus respectivos codificadores. Finalmente, o sistema de controle também fornece uma interface RS-232 para o pan-tilt, o que proporciona os últimos dois graus de liberdade para o manipulador.

A cinemática inversa do robô foi descrita em linguagem C, executando no NIOS II, que recebe os pontos de coordenadas espaciais do processo de soldagem, através de uma interface ethernet. O software incorporado garante uma sincronização adequada entre todos os motores do manipulador usando uma Finite State Machine (FSM) (18).

## 2.7 Controle de movimento

A implementação do algoritmo tem de atingir um desempenho com velocidade suficiente para controlar os motores em uma trajetória suave. Neste caso, as velocidades de soldagem lineares são cerca de 10 mm/s e, embora o tempo de resposta do motor-de-passo seja abaixo dos 10 ms (para um único passo), uma trajetória suave pode ser garantida com um intervalo de tempo de 100 ms entre pontos intermediários. Para um controlador em tempo real todo tempo computacional tem que ser menor que 100 ms e, portanto, deve ser desenvolvida uma estratégia de otimização. Como exemplo, os requisitos computacionais para o cálculo da cinemática direta, exigem o cálculo de seno e cosseno de cinco ângulos diferentes ( $\theta_1$ ;  $\theta_2$ ;  $\theta_4$ ;  $\theta_5$ ;  $\beta$ ) e também a multiplicação de sete matrizes 4 x 4. Em um único loop, esta tarefa requer 384 multiplicações de ponto-flutuante e 288 adições/subtrações de ponto-flutuante além da avaliação de seno e cosseno.

Para reduzir o tempo de cálculo, as equações polinomiais resultantes como termos da matriz final reduzem o número de multiplicações e adições/subtrações para 69 e 32, respectivamente. Mais otimização é realizada identificando todos os termos repetidos dessas expressões e realizando cálculos apenas uma vez por elemento. Um exemplo é a expressão  $s1.s5 - c5.c1.c24$  que se repete três vezes nas equações. O resultado final produz 45 multiplicações e 30 operações de adição/subtração. Isso resulta em uma velocidade no desempenho 9 vezes maior em comparação com a expressão original. Neste caso, o algoritmo da cinemática inversa, em geral, leva cerca de 20 ms para calcular cada posição, que é baixa o suficiente para atender as exigências de tempo do robô.

No movimento ponto-a-ponto, o controlador recebe uma localização de destino (ou seja, posição e orientação da tocha de soldagem), bem como um intervalo de tempo para executar um movimento em que as posições intermediárias ao longo da trajetória não são relevantes. Neste caso, o controlador usa a posição atual do robô e calcula as variáveis de juntas para as posições finais usando o algoritmo da cinemática inversa, conforme descrito em (19). Depois disso, a diferença angular de cada junta é calculada para definir o número de passos, direção e a velocidade necessária para cada motor realizar o movimento. Neste caso, o cálculo da velocidade do movimento das juntas é definido a partir da velocidade máxima permitida em cada eixo. A junta com o maior deslocamento será aquela com maior velocidade e as restantes terão velocidades proporcionalmente mais lentas para conseguir um movimento sincronizado. No caso do pan-tilt, uma função de deslocamento é usada onde cada junta recebe o ângulo absoluto, bem como a duração total do movimento. ver Figura 4.

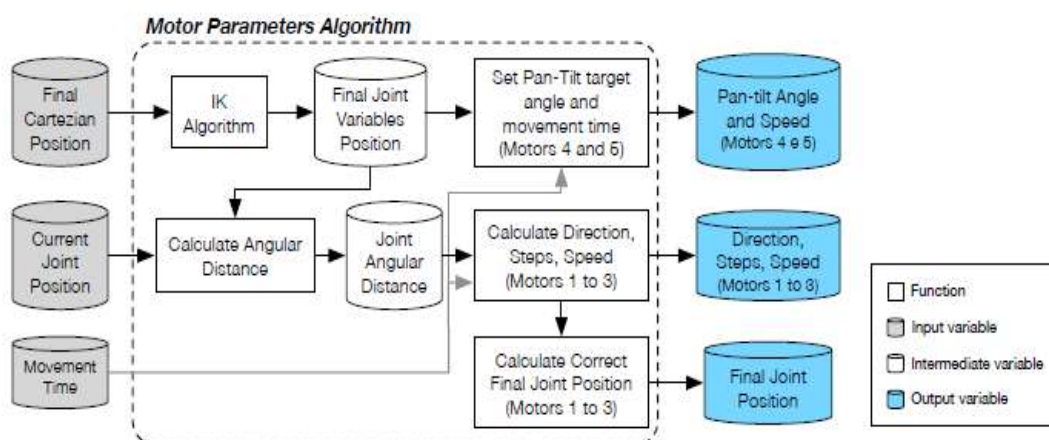


Figura 4 – Diagrama do Algoritmo do Movimento Ponto-a-Ponto



Com o número de passos, direção e velocidade, o algoritmo de controle é chamado para executar o movimento que avalia cada movimento de junta e cria uma aceleração de forma trapezoidal e uma curva de desaceleração para cada motor, a fim de executar o movimento suavemente. Ao final de cada movimento, o algoritmo leva em conta os dados do codificador para os 3 primeiros eixos e calcula a diferença entre o número de passos enviado para o motor e a posição real desejada. Se alguma diferença for detectada, a correção do movimento é executada.

O segundo tipo de movimento implementado no sistema embarcado está relacionado com linhas retas, onde são definidos os pontos iniciais e finais e o algoritmo cria um procedimento de interpolação para alcançar uma linha reta no espaço 3D, garantindo as orientações iniciais e finais interpoladas em um movimento suave. O algoritmo ver Figura 5, consiste em calcular a distância Euclidiana entre os pontos iniciais e finais e, a partir da velocidade espacial desejada e o intervalo de tempo entre pontos, define todos os pontos intermediários em pequenos incrementos (0,5 mm) para criar uma trajetória linear. Para cada ponto intermediário, o número de passos, a direção e a velocidade são calculados usando o algoritmo de parâmetros do motor descrito no movimento de ponto-a-ponto. ver Figura 5.

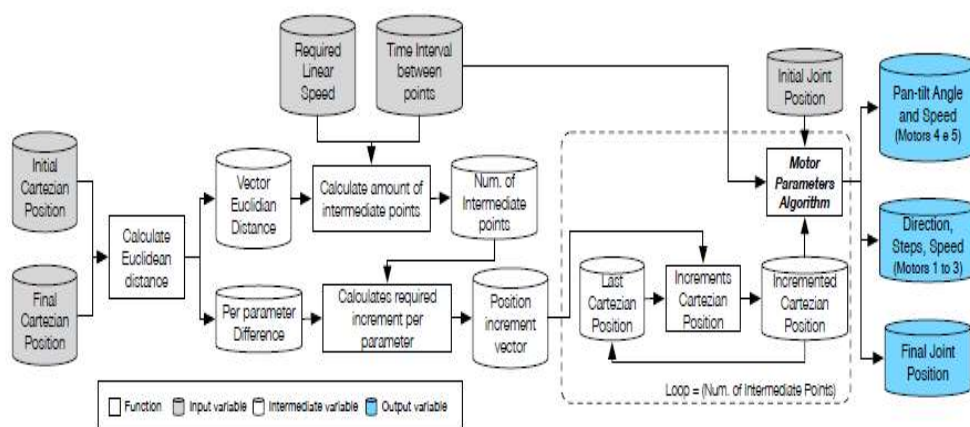


Figura 5 - Diagrama do Algoritmo do Movimento em Linhas Retas

Para se obter um deslocamento em linha reta, o movimento é decomposto em pequenos segmentos em linha reta, em que um processo de correção é realizado tendo em conta os dados do codificador. Neste caso, o número de passos é retificado, adicionando ou subtraindo passos perdidos no próximo segmento linear a ser executado.

## 2.8 Procedimentos para o processo de soldagem

De forma sucinta, os procedimentos para o reparo da superfície da pá da turbina podem ser listados como:

- Posicionamento e fixação robô sobre pá em posição conveniente.
- Ajustes de parâmetros em teclado portátil ou PC.
- Medição automática das superfícies selecionadas.
- Análise e correção de áreas afetadas.
- Soldagem automática em camadas.
- Parada a cada camada completa para limpeza.
- Controle de qualidade da solda.
- Movimentação do Robô sobre a pá para alcance de nova área.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um projeto de pesquisa que envolve diversos tópicos relacionados à engenharia mecânica e mecatrônica. As principais características mecânicas do robô são descritas e discutidas brevemente, seus módulos de controle, modelo cinemático e calibração, sistema de visão, sistema de comunicação e aplicação.

O robô foi projetado para ser usado com um sistema de controle de malha aberta, usando um sensor de visão embutido para gerar um mapa de profundidade a partir da superfície a ser reparada. O posicionamento do robô com sistemas de controle em malha aberta requer grande precisão na determinação dos parâmetros geométricos do robô, uma vez que os sistemas de coordenadas do sensor e do robô devem ser referenciados em um único sistema para a programação automática da posição da junta. Isto é equivalente à programação fora de linha do robô, uma vez que não é possível corrigir o posicionamento do robô usando o sensor em operação on-line. No entanto, o sistema foi projetado para operar automaticamente.

Atualmente, o projeto desenvolvido está plenamente funcional, capaz de realizar soldas em camadas para reparo de danos de cavitação sobre pás de turbinas hidráulicas de forma automática. O projeto está em fase final para uma adequada utilização do robô em soldas de campo e a procurar parceiros para dar continuidade ao processo, após o registro de sua patente ter sido concedido.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) X. ECOBER, E. EGUSQUIZA, M. FARHAT, F. AVELLAN, M. COUSSIRAT, "Detection of cavitation in hydraulic turbines", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, Issue 4, pp.- 983-1007, 2006.
- (2) N. G. BONACORSO, A. A. GONÇALVES JR., J. C. DUTRA, "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*, vol. 179, pp. 231–238, 2006.
- (3) WILLIAM DUNCAN JR, (ed.), *Turbine Repair. In: Facilities Instructions, Standards, & Techniques*, vol. 2-5, USBR, 1989.
- (4) HIDRO-QUÉBEC (2008). Disponível em <http://www.hydroquebec.com/fr/>. Acessado em setembro de 2008.
- (2) Q. CHEN, Z. SIM, W. ZHANG, AND Z. GUI, "A Robot for Welding Repair of Hydraulic Turbine Blade", in *Proceedings of the 2008 Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, China.
- (3) K. XIANG, Z. SUN, H. DAI, et al., "CAN-Bus Based Distributed Control System for Hydraulic Turbine Blade Repairing Robot", in *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Robotics and Applications (ICIRA 2010)*. Shanghai, China. (Lecture Notes in Artificial Intelligence. 6425, pp 695-704).
- (4) B. HAZEL, J. COTÉ, Y. LAROCHE AND P. MONGENOT, "A Portable, Multiprocess, Track-Based Robot for In Situ Work on Hydropower Equipment". *Journal of Field Robotics*, vol. 29, pp. 69-101, 2012.
- (5) MCKERROW, P. J., *Introduction to Robotics*, 1st ed., Ed. Addison Wesley, Singapore, 800 p., 1991.
- (9) PAUL, R. P., *Robot Manipulators - Mathematics, Program-ming, and Control*, Boston, MIT Press, Massachusetts, USA, 279 p., 1981.
- (10) PARK, J, KIM, J-M, PARK, H-H, KIM, J-W, KANG, G-H, AND KIM, S-H, "An iterative algorithm for inverse kinematics of 5-dof manipulator with offset wrist", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 6, pp. 144-149, Dec. 2012.
- (11) SCHRÖER, K., "Theory of Kinematic Modelling and Numerical Procedures for Robot Calibration", In: *Robot Calibration*, Ed. Chapman & Hall, pp. 157-193, 1993.

(\*) Endereço Autor Responsável, SCN Quadra 06 Conj. A – sala 1016 - Bloco B – CEP 70.716-901 Asa Norte, Brasília/DF – Brasil

Tel: (+55 61) 3429-8729 – Email: [filinto.cutrim@eletronorte.gov.br](mailto:filinto.cutrim@eletronorte.gov.br)

- (12) GINANI, L. S. AND MOTTA, J. M. S. T., "Theoretical and practical aspects of robot calibration", J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. vol.33 no.1 Rio de Janeiro Jan./Mar. 2011.
- (13) HOLLERBACH, J. M., BENETT, D. J., "A survey of kinematic calibration", Robotics Review, pp. 207-242, 1988.
- (14) Dennis JE, Schnabel RB. Numerical Methods for Unconstrained Optimisation and Non-linear Equations, New Jersey:Prentice-Hall, 1983.
- (15) MOTTA, J.M.S.T., "An investigation of singularities in robot kinematic chains aiming at building robot calibration models for off-line programming", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 200-204, Apr-Jun 2005.
- (16) MOTTA, J. M. S. T., "Robot Calibration: Modeling Measurement and Applications", in Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications, Low Kin Huat (Ed.), ISBN: 3-86611-286-6, InTech, 2006.
- (17) IDROBO-PIZO, G.A., "Projeto de um descritor para o alinhamento de imagens de profundidade de superfícies com aplicação em visão robótica (Design of a descriptor for the alignment of surface depth images with application in robot vision)," Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Univ. of Brasilia, Brazil, 2014.
- (18) ALTERA: [www.altera.com](http://www.altera.com) (accessed in Ago 2014).
- (19) MOTTA, J., LLANOS, C., CARVALHO, G., ABSI-ALFARO, S., IDROBO-PIZO, G. AND SAMPAIO, R., 2014. "A specialized robotic system prototype for repairing surface profiles of hydraulic turbine blades". In Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2014 3rd International Conference on. pp. 1–5.

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### FOTO DO AUTOR PRINCIPAL OBRIGATÓRIA

#### **Filinto Elisio Costa Cutrim**

Engenheiro de Processos de Soldagem

Ex-professor da UnB- Universidade de Brasília nas cadeiras de

Engenharia dos Materiais, Processos de Fabricação e Desenho Técnico,

Mestre em Engenharia Mecânica pela UnB.