



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -GGH

GRUPO DE ESTUDO GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

**UM ROBÔ DE SERVIÇO APLICADO À MANUTENÇÃO DE PÁS DE TURBINAS HIDRELÉTRICAS
DE GRANDE PORTE**

Julio F. Golin* Emerson Raposo• Henrique Simas• Tiago L.C. Pinto• Walter A. Kapp
Altamir Dias• Daniel Martins• Edson R.De Pieri• Nelso Gauze Bonacorso• Armando Albertazzi•
Eletrosul* Lab. de Robótica-UFSC• Labmetro-UFSC• Labsolda-UFSC• IFSC• LACTEC****

RESUMO

Este trabalho descreve um robô de serviço desenvolvido para tarefas de inspeção e manutenção de pás de rotores de turbinas de hidrelétricas danificadas por cavitação. O sistema é composto por um dispositivo robótico projetado para se deslocar sobre um trilho flexível que é fixado à pá, configurando um sistema de 7 graus de liberdade, um cabeçote de medição a laser para fazer a varredura da área erodida, uma tocha de solda a plasma, um *teach-pendant* para operação do robô, além de um computador industrial e dos drivers de acionamento. Resultados experimentais obtidos em laboratório e em campo são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Robótica, cavitação, metrologia, soldagem, turbinas hidráulicas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Este artigo descreve o protótipo de um manipulador de um projeto de pesquisa e desenvolvimento chamado de Roboturb. Trata-se de um sistema projetado especificamente para automatizar o processo de manutenção de pás de turbinas hidráulicas de grande porte erodidas por cavitação. A cavitação é um problema que afeta as unidades geradoras de hidrelétricas danificando as pás dos rotores. Atinge, em diferentes graus, cerca de 75% das usinas hidrelétricas brasileiras [1]. O problema ocorre por diferenças de pressão na passagem da água, que causa a implosão de bolhas de ar contidas no fluido e desta forma remove material das pás, provocando erosão e formando crateras na estrutura do rotor. A evolução do problema reduz a eficiência hidráulica e contribui no comprometimento da integridade estrutural da turbina. Assim, a erosão originada por cavitação deve estar sob controle. A figura 1 mostra exemplos de zonas erodidas por cavitação em turbinas Francis.



FIGURA 1 – Dois exemplos de zonas erodidas por cavitação em turbinas Francis

Como não há condições de saber o estado do dano, a máquina tem paradas programadas para inspeção e recuperação das áreas danificadas, preenchendo-se o volume das crateras com ligas metálicas depositadas por solda com o objetivo de regenerar o perfil original da pá. Nesta operação, um grupo de soldadores divide-se em equipes que trabalham em três turnos, durante 3 ou 4 semanas ininterruptamente. O tempo médio entre manutenções de um rotor é da ordem de cinco anos e um estudo sobre a cavitação em diferentes instalações brasileiras, incluindo número e tipo de unidades afetadas, quantidades de solda depositada e custos de reparo por unidade pode ser visto em [14].

Tipicamente, o serviço de preparação e recuperação da superfície é realizado de forma manual. A qualidade da soldagem depende, entre outros fatores, da experiência e das condições do soldador, que trabalha em um ambiente confinado, perigoso e altamente insalubre, com temperaturas da ordem de 40°C e sujeito aos gases da solda. Em função disso, o tempo de serviço efetivo de um soldador é de aproximadamente 50%.

Apesar da soldagem robotizada ser uma realidade na indústria há algumas décadas, não há no mercado um equipamento que seja passível de utilização para o caso exposto – a HydroQuébec tem um robô não redundante para soldagem, com trilho de curvatura não adaptável e sem capacidade de sensoriamento.

Neste contexto, este artigo aborda a concepção e o desenvolvimento de um sistema automatizado para a recuperação das regiões erodidas nos rotores de turbinas hidráulicas. Tem a como principal objetivo eliminar o trabalho insalubre, melhorar a qualidade de soldagem na recuperação da cavitação e reduzir o tempo de manutenção.

O elemento central do sistema é um robô desenvolvido para operar no espaço confinado do canal do rotor, medindo a região erodida e executando a soldagem na sequência. Para tanto, o sistema é também composto por um cabeçote de medição a laser desenvolvido para fazer a varredura da área erodida, uma tocha de solda a plasma, um teach-pendant para operação do robô, além de um computador industrial e dos drivers de acionamento. As principais funcionalidades e contribuições científicas obtidas são descritas da seguinte forma: na seção 2 é apresentado o projeto cinemático do braço robótico para operação em ambientes confinados e para desvio de obstáculos, na seção 3 um sensor de medição de superfície, a metodologia de digitalização e comparação de superfícies, na seção 4 as características e soluções do processo de soldagem e na seção 5 a arquitetura de hardware e software do sistema. Resultados, conclusões e perspectivas são apresentadas na sequência.

2.0 - PROJETO CINEMÁTICO E MECÂNICO

De forma a operar em um ambiente confinado e com restrições cinemáticas em seu volume de trabalho - as pás adjacentes e o rotor em si – o robô deve ser capaz de desviar destes obstáculos ao mesmo tempo em que realiza sua tarefa. Para tanto, diversas estruturas cinemáticas foram avaliadas. Inicialmente um modelo de um canal de uma turbina em escala 1:1 foi construído e permitiu à equipe de projeto a familiarização com o ambiente de operação. O modelo cinemático foi concebido a partir de um estudo baseado em maquetes de madeira, cujos objetivos foram: 1) identificar tipos de juntas a serem especificadas (rotativas ou prismáticas) e seu arranjo cinemático; 2) compreender o volume de trabalho do robô; 3) dimensionar elos; e 4) identificar especificações de operação. Como resultados desta etapa foram definidas as seguintes especificações:

- O robô deverá realizar a operação de medição da região erodida utilizando para isto um sensor laser tipo folha de luz.
- O robô deverá realizar a operação de soldagem automatizada, preenchendo a cavitação através de camadas justapostas depositadas através de cordões consecutivos.
- Por conta da possibilidade de colisão de alguma parte do robô com alguma superfície da turbina, o robô deve ter um grau de mobilidade adicional que permita a inclusão de tarefas secundárias de evitamento de colisão.

Modelos em computador foram construídos e simulados para avaliar os pré-projetos do Roboturb, utilizando para isso ferramentas CAD, Workspace e modeladores matemáticos. Das propostas de projeto, definiu-se uma estrutura articulada sobre um trilho, totalizando 7 juntas conforme apresentado na figura 2(a) [3]. Isto configura um robô redundante de sete graus de liberdade, ou seja, um grau de liberdade a mais que o necessário para realizar uma tarefa no espaço (seis). O grau de redundância é utilizado na tarefa adicional, no caso, evitamento de colisão. O projeto mecânico detalhado foi desenvolvido a partir dos resultados dimensionais da etapa de concepção, figura 2(b).

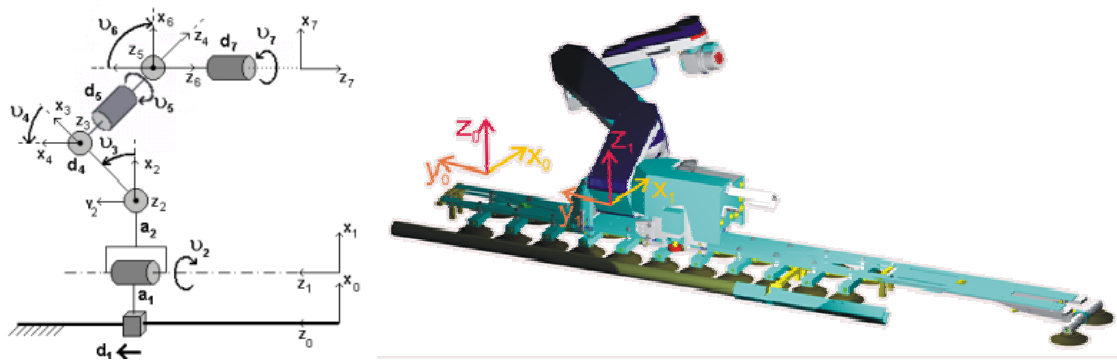


FIGURA 2 – Projeto cinemático e projeto mecânico do manipulador

Conforme a figura 2, a estrutura articulada do robô possui três juntas rotativas, que conectam os três primeiros elos do braço do manipulador ($\theta_2, \theta_3, \theta_4$), e um outro conjunto de três juntas, também rotativas, com eixos mutuamente ortogonais que se interceptam em um ponto comum, configurando portanto um punho esférico ($\theta_5, \theta_6, \theta_7$). Esta configuração permite o desacoplamento entre posição e orientação da ferramenta na solução da cinemática inversa do mecanismo [4]. A primeira junta é de translação (d_1), formada por um trilho flexível que é fixado à pá do rotor que sofrerá a manutenção. O trilho representa um sétimo movimento para o robô, que realiza seu principal movimento ao longo do comprimento da erosão. As dimensões dos elos componentes do Roboturb podem ser reduzidas devido à mobilidade extra do trilho, o que também contribui para diminuir as possibilidades de colisão.

O trilho tem 1200mm de comprimento, podendo ser fixado em superfícies com raio de curvatura mínimo de 600mm. A fixação nas pás do rotor se dá por sapatas magnéticas e/ou ventosas, servindo para superfícies de aço carbono e aço inox. A figura 3(a) apresenta o trilho flexível, o carro de acionamento da junta prismática e o primeiro elo de rotação (junta 2) do manipulador. O trilho é composto de duas lâminas, uma superior e lisa, que serve de guia ao mecanismo, e outra inferior e dentada, servindo para tração, que se dá por um mecanismo de dupla cremalheira com molas. A estrutura mecânica do manipulador e o punho esférico são apresentados na figura 3(b) e 3(c), respectivamente. Para os acoplamentos das juntas rotativas, foram utilizados redutores pulsados do tipo harmonic-drive que garantem compacidade (requisito do projeto) e elevadas razões de transmissão. Estes mecanismos têm ainda a vantagem de não apresentarem histerese e folgas.

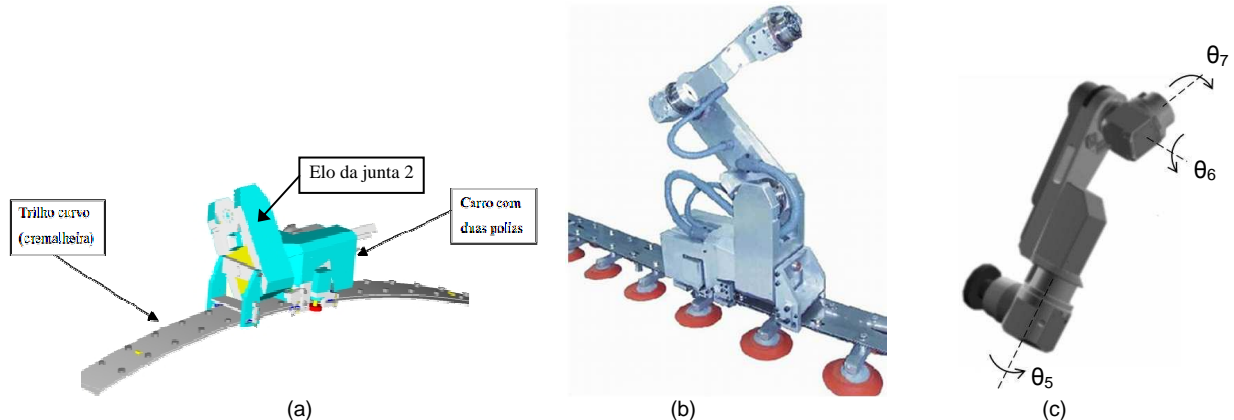


FIGURA 3 – Trilho flexível (junta prismática do manipulador) adaptável à curvatura da pá do rotor (a), estrutura mecânica geral (b) e punho esférico.

Os parâmetros Denavit-Hartenberg são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros cinemáticos de Denavit-Hartenberg

Elo	1	2	3	4	5	6	7
a	100mm	150mm	300mm	0	0	0	0
α	0	$\pi/2$	0	$-\pi/2$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0
d	d_1	0	0	-89mm	-300mm	0	-125mm
θ	0	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7

2.1 Tratamento da redundância, evitamento de colisão e controle

O tratamento da colisão foi incluído na modelagem das cinemáticas de posição e diferencial do Roboturb. Estratégias clássicas de modelagem diferencial de robôs e mecanismos, tais como baseados em Denavit-

Hartenberg, não se adequam à solução pretendida, pois não atendem ao requisito do evitamento de colisão com o da cinemática inversa redundante. Métodos atuais de modelamento diferencial são baseados na teoria de helicoides, a qual tem por princípio representar qualquer movimento por uma decomposição em uma rotação mais um deslocamento linear [5].

Como aplicação, [6] propõe uma classe de cadeias cinemáticas, chamadas cadeias virtuais ou grupos de Assur, que não existem fisicamente mas são utilizadas na solução matemática para monitorar ou impor movimentos a um mecanismo. As cadeias virtuais são acopladas à cadeia cinemática real do mecanismo (em seu modelo matemático e portanto nos algoritmos de solução) formando uma cadeia cinemática fechada. Os grupos de Assur utilizados não interferem na mobilidade da cadeia real à qual estão conectados. De forma a resolver a cinemática diferencial de uma cadeia fechada, utilizou-se o método de Davies (Davies, 1981) e o modelo diferencial do Roboturb utiliza duas cadeias cinemáticas virtuais: 1) Cadeia cinemática virtual 3P3R conectada entre a origem do sistemas de coordenadas de referência e o efetuador final; 2) Cadeia cinemática virtual 3P3R para evitamento de colisão entre o cotovelo do Roboturb (entre elos 3 e 4) e o ponto sobre a pá de menor distância para este elo. A geração das trajetórias do robô considera as restrições cinemáticas de acordo com a seguinte estratégia: 1) Fora da possibilidade de colisão, a velocidade do trilho é imposta como forma de resolução da redundância; 2) Sob iminência de colisão com alguma superfície, a terceira junta prismática virtual (direção normal à superfície) da cadeia de evitamento é acionada, ajustando a posição do cotovelo do robô para uma distância de segurança pré-definida.

Devido às baixas velocidades de acionamento, o acoplamento dinâmico entre os elos do robô é pequeno. Além disso, a utilização de transmissões com altas taxas de redução – no caso, (1:100) – tende a linearizar o modelo dinâmico. Dadas estas características, para o controle do robô, foram implementados controladores PD independentes para cada junta do manipulador. Os efeitos gravitacionais são os mais significativos e entram como um vetor de torques de compensação no controle [11]. Os parâmetros dos controladores foram determinados por métodos clássicos, como Ziegler Nichols.

3.0 - MEDIÇÃO DAS ÁREAS CAVITADAS

Há diferentes tipos de sensores passíveis de utilização para medição robotizada de superfícies – danificadas ou não – e que podem ser classificados pela forma de acesso ao meio: por contato ou sem contato. Os princípios de medição são distintos, assim como a incerteza e o desempenho inerentes a cada tipo de processo de medição. Para o caso dos sensores com contato – basicamente apalpadores – as principais desvantagens estão associadas ao tempo despendido na medição e ao fato de dever ser assistida e comandada por um operador de forma a evitar danos mecânicos ao sensor, ao manipulador e ao próprio objeto de interesse. Os sensores que operam sem contato podem utilizar técnicas ópticas para a medição baseadas em triangulação, reflexão, foco de imagem e na combinação destes princípios. Além da velocidade, a medição óptica apresenta melhor exatidão que o caso mecânico e também permite a automatização do processo de aquisição dos pontos de interesse do objeto medido, tanto do ponto de vista do posicionamento do sensor quanto no processamento dos dados da imagem.

No caso do Roboturb, foi desenvolvido um sensor óptico a laser para a varredura da área cavitada e da superfície de entorno. O sensor é acoplado ao punho do manipulador e emite três feixes paralelos de laser (sensor tipo “folha de luz”) que operam pelo princípio da triangulação óptica [8]. O uso de três linhas agrega mais informação por área medida, o que aumenta a qualidade dos dados metrológicos e agiliza o processo de medição. A técnica permite determinar localmente a orientação dos vetores tangente e normal à superfície e o raio de curvatura, que são parâmetros utilizados para a interpolação numérica da superfície. Na figura 4 temos duas fotos da medição de uma cavidade em uma pá de turbina. No detalhe, observa-se o sensor laser e os feixes sobre a superfície. A Tabela 2 apresenta as principais características técnicas do sensor, desenvolvido pelo Labmetro-UFSC.

No processo de medição, a superfície é previamente tratada para possibilitar a utilização do sensor laser (recobrimento com produtos anti-reflexo). Uma medição inicial é conduzida pelo operador do robô, que aciona o mecanismo - através de um teach-pendant - de forma a obter um conjunto reduzido de pontos. Estes pontos definirão as áreas da superfície não erodida e da cavidade que o robô medirá em seguida, de forma detalhada e autônoma.

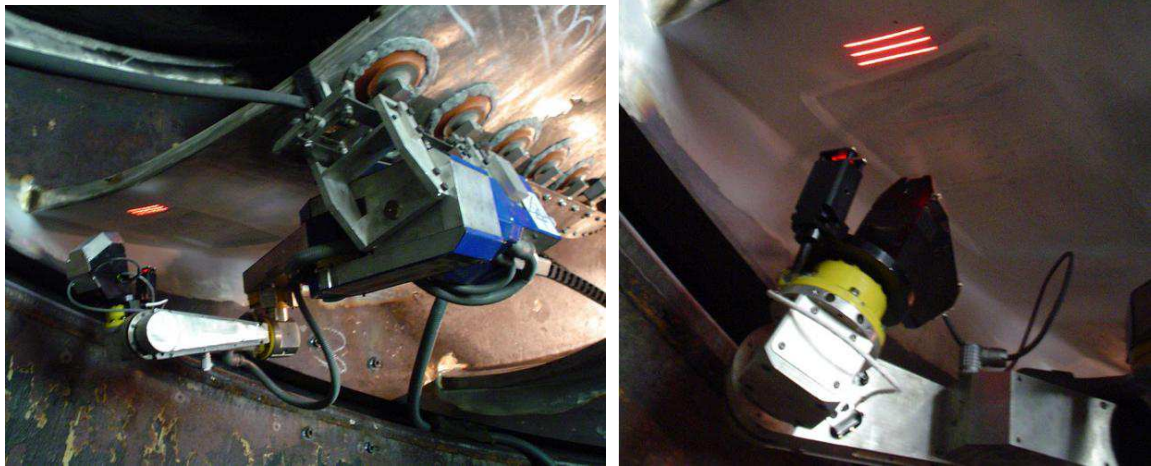


FIGURA 4 – Roboturb realizando medição de uma área danificada – vista geral e detalhe.

Tabela 2 – Parâmetros técnicos do sensor laser

Parâmetro	Valor
Stand-off	155 mm
Faixa de medição	50 mm
Ângulo de inclinação α	30°
Ângulo entre planos de luz β	4,8°
Incerteza na direção y	0,2 mm
Incerteza na direção z	0,2 mm
Resolução da imagem (CCD)	768 x 572 pixels

A figura 5(a) ilustra dois conjuntos de pontos da medição inicial: p_d (pontos da área danificada) e p_e (pontos da área externa ao dano). A linha tracejada delimita a área de um plano de medição. Esta região serve para estabelecer o número de medições e a trajetória dos pontos da medição automática. Para tal, o método scallop-height, utilizado em máquinas-ferramenta, foi adaptado para este projeto: partindo-se de uma superfície bi-cúbica paramétrica (Bezier, por exemplo) um algoritmo baseado nas propriedades geométricas locais de pontos sobre a superfície permite calcular caminhos paralelos a partir da especificação de uma distância desejada entre estes caminhos (distância geodésica) [9]. Na operação de medição foi definida como distância entre caminhos a distância mínima de medição do sensor laser, evitando duplicidade de informação e permitindo recobrir com precisão toda a superfície erodida.

Os caminhos resultantes são aplicados ao algoritmo de cinemática inversa do Roboturb (incluindo o evitamento de colisão) e a medição é realizada. Os pontos obtidos da medição automatizada são apresentados na figura 5(b). A aquisição destes pontos se dá tipicamente a 150mm do objeto e a distância entre feixes de medição é de 25mm.

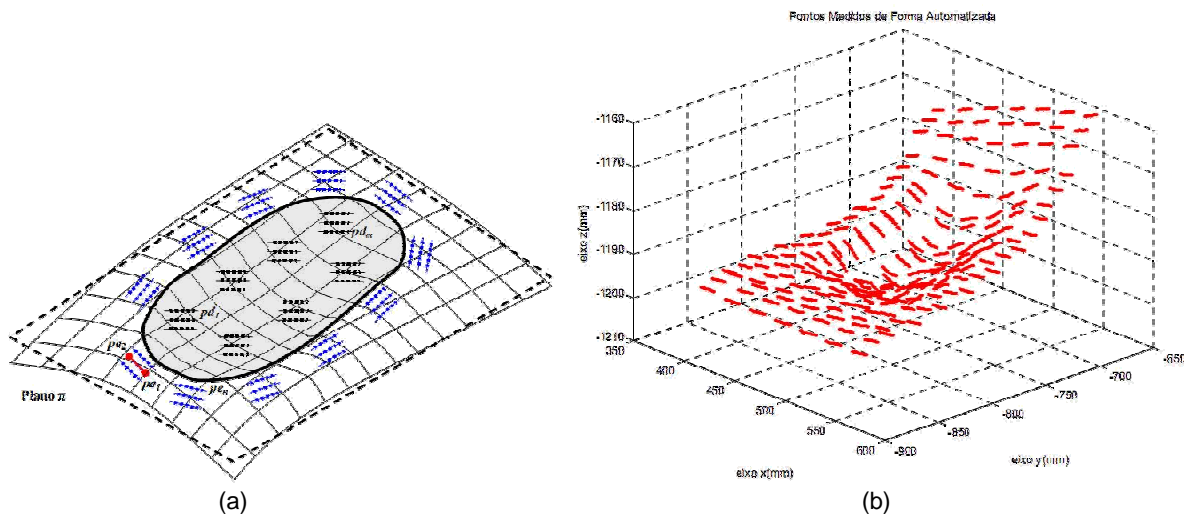


FIGURA 5 – Medições inicial (a) e automatizada (b) de uma área erodida.

A partir destes dados são geradas duas representações numéricas, uma da superfície real e outra que busca aproximar a superfície original. A figura 6 ilustra estas representações para as medições da figura 5. A partir da diferença destas superfícies é determinada a quantidade de material a ser depositado na cratera. Os limites da região cavitada são obtidos pelo método de Coons [10]. A superfície original é estimada como uma superfície bi-cúbica de Bezier ou B-spline. Testes de medição na superfície de um corpo de prova conhecido mostraram que a diferença máxima entre as superfícies original não danificada e aquela estimada por interpolação é de 0,8mm [2].

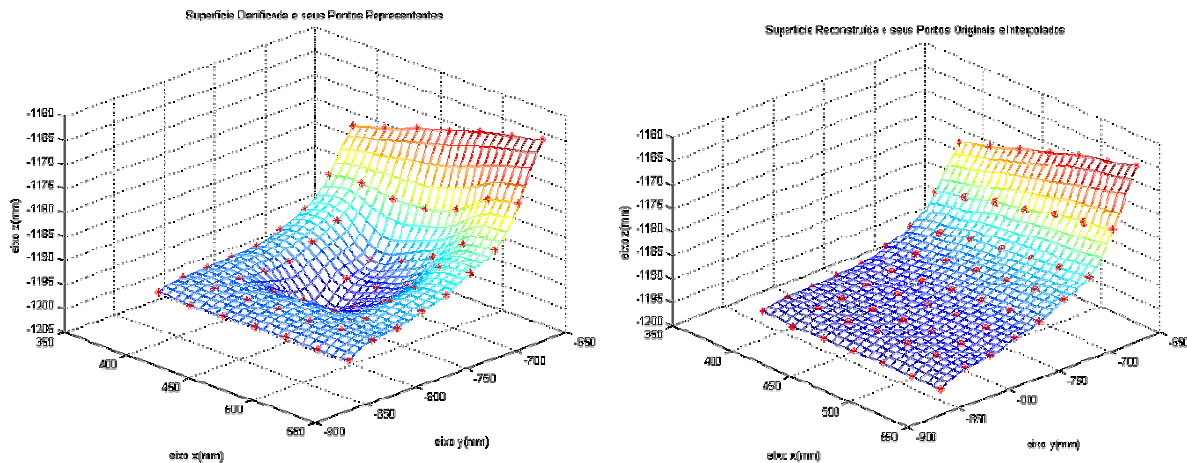


FIGURA 6 – Representações das superfícies real (a) e estimada (b) de uma área erodida.

Uma vez concluída a medição e a delimitação da erosão, a próxima etapa é a geração de trajetórias da soldagem.

4.0 - SOLDAGEM

A partir da descrição paramétrica da superfície danificada, passa-se para a fase de soldagem. Para tanto, deve-se estabelecer estratégias para determinar a localização dos cordões de solda, as trajetórias de soldagem e o número de camadas de solda. Estes parâmetros dependem, evidentemente, das características do processo: tipo da solda, largura e qualidade superficial dos cordões, velocidade (constante) de avanço da tocha, entre outros. Como alguns requisitos da soldagem desta aplicação, podemos citar que o processo de solda não deve apresentar respingos e salpicos (que poderiam, por exemplo, atingir e danificar o próprio manipulador), ser factível em diversas posições de soldagem, inclusive sobre-cabeça, e ter elevada taxa de deposição. De forma a atender estes requisitos, foram realizados testes com solda MIG convencional e pulsada e desenvolvido um processo de solda a plasma pulsada com realimentação de arame. Neste projeto, utilizou-se o processo a plasma desenvolvido pelo Labsolda-UFSC. Cabe dizer que o Roboturb pode operar com diferentes processos de soldagem, inclusive em uma mesma operação de recuperação – onde as camadas mais internas são depositadas com uma liga de menor custo e as camadas superiores com ligas mais resistentes à cavitação, por exemplo. Comparações entre estes processos podem ser vistas em [2].

4.1 – Trajetórias de soldagem

A deposição através de cordões de solda implica que a distância entre estes cordões deverá ser controlada. Por conta disso é utilizado também o método scallop-height, cuja distância entre os caminhos é ajustada de acordo com a largura do cordão de solda. O comprimento dos cordões de solda é limitado pela curva de delimitação, obtida originalmente na etapa de medição e recalculada para cada nova camada de solda.

Outra característica do processo é a deposição se dar por camadas, de forma a se preencher todo o volume cavitado. Uma especificação é que os cordões de solda de camadas adjacentes devem ser intercalados (interpostos), ou seja, os cordões da camada superior devem ser depositados nos espaços entre as concavidades dos cordões da camada inferior. As trajetórias de soldagem são especificadas com distância igual a $d/2$, sendo d a largura dos cordões. Ao especificar a metade das distâncias entre cordões de solda, tem-se o dobro de cordões de solda calculados. Tomando os caminhos pares para as trajetórias de soldagem de camadas pares e os caminhos ímpares para as trajetórias de camadas ímpares fica garantida a interposição de cordões. Para cada camada, uma nova intersecção de superfícies é realizada. As curvas delimitadoras são obtidas deslocando-se a superfície cavitada (modelo matemático) na sua direção normal principal de uma distância igual à altura do cordão de solda. A cada deslocamento recalcula-se a curva de delimitação utilizando a superfície original interpolada.

Os resultados obtidos neste processo são utilizados nos algoritmos de cinemática inversa do robô (com evitamento de colisão) e as trajetórias das juntas são armazenadas em arquivos. A geração de trajetórias é, portanto, off-line. A figura 7 ilustra os caminhos de soldagem para duas camadas adjacentes e os círculos indicam o início das trajetórias para cada camada.

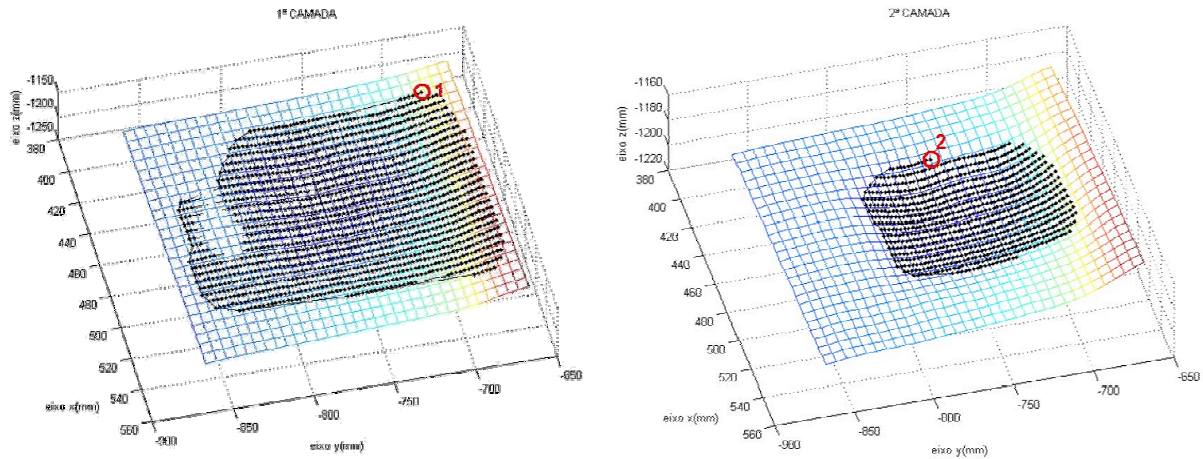


FIGURA 7 – Trajetórias para duas camadas de soldagem.

5.0 - ARQUITETURA DE SOFTWARE E HARDWARE

O Roboturb, como se viu, é um sistema mecatrônico composto de um robô, um processo de medição e outro de soldagem. De forma a integrar logicamente estes componentes e fazer o controle dos vários níveis do sistema, idealizou-se uma arquitetura de sistema embarcada e aberta que permitisse adaptações em seus componentes. Para tanto, desenvolveu-se um modelo computacional expresso de maneira padronizada, unificada e fundamentado em sistemas abertos e de orientação a objetos. Para garantir flexibilidade, o modelo foi concebido de maneira top/down e especificado em UML (Unified Modelling Language), objetivando-se torná-lo independente de qualquer componente de hardware ou software [12]. Foram modelados diagramas de caso de uso, de distribuição, de componentes e de estado, cada um cumprindo sua função na modelagem UML. No **diagrama de caso de uso** mais geral do modelo, o sistema é modelado por um robô (Robot), as ferramentas disponíveis (Tool), um módulo gerador de trajetórias (Trajectory Generation) e a interface com o usuário (User Interface – UI), estabelecendo configurações e controle dos componentes necessários tal que se realize a tarefa em questão. O **diagrama de distribuição** modela a estrutura do controlador, ou seja, de que forma seus elementos estão distribuídos e como interagem entre si. No caso, são três camadas, cada uma correspondente a um nível de abstração: uma camada física (interfaces com o robô e teach-pendant, drives de acionamento e motores das juntas, interfaces com as ferramentas), uma camada lógica (intermediária), que implementa estruturas lógicas e os algoritmos de controle do robô, das ferramentas, do teach-pendant e de geração de trajetórias, e uma camada de aplicação, que são as interfaces com o usuário. Os **diagramas de componentes** organizam e estabelecem dependências entre os diversos componentes, que podem ser um arquivo fonte, uma biblioteca ou um executável. A título de exemplo, o pacote Robot encapsulado em uma biblioteca denominada *robot.dll*, é formado por dois arquivos: uma API (*robot.h*) e os Métodos (*robot.cpp*). Por fim, os **diagramas de estado** especificam a evolução da operação e funcionamento do sistema, mapeando os casos de uso em estados. Neste caso, são destacados eventos que implicam transições e mudanças de estado – por exemplo, um click ou comando de um operador, que causam transição de um estado para outro e as ações que resultam dessas mudanças. A plataforma de software foi desenvolvida em C++ e o sistema operacional é o Windows 2000 Embedded.

Fazem parte do controlador placas de controle de movimento para as sete juntas servo-controladas, uma placa de captura de imagens para interface com a ferramenta de medição e uma placa de entrada/saída de sinais para interface com a ferramenta de soldagem e um chassi industrial com barramento PXI compatível com as placas citadas e robusto às operações de manutenção. O amplificador de potência é formado por sete placas padrão Eurocard, uma para cada uma junta do manipulador, com amplificadores de tensão com modulação por largura de 250 W de capacidade de acionamento individual.

O sensor laser, a tocha de solda e o próprio robô foram calibrados através de um braço de medição. Os dados das ferramentas foram utilizados na especificação das matrizes de transformação de coordenadas entre o ponto central da ferramenta (*Tool Center Point, TCP*) e a flange do robô. Os dados da calibração do robô serviram para validar a fabricação e montagem e ajustar parâmetros reais nos algoritmos de software.

6.0 – RESULTADOS

Foram realizados testes nas usinas de Estreito (Furnas) e Foz do Areia (Copel). Os resultados em campo corroboraram a viabilidade do sistema e a qualidade das soldagens obtidas em laboratório: as camadas de solda não apresentaram respingos e salpicos, pouca ondulação e ótima qualidade superficial. Já os corpos de prova de laboratório apresentaram insignificante quantidade de poros na avaliação radiográfica de [2]. A figura 8 ilustra uma soldagem manual MIG e uma camada de solda realizada automaticamente pelo Roboturb. Cabe ressaltar que o esmerilhamento necessário no pós-solda foi cerca de 80% menor para o caso robotizado, o que é um ganho

relativo ao retrabalho [1]. Espera-se também um aumento no tempo entre paradas de uma turbina recuperada pelo processo robotizado.



FIGURA 8 – Soldagens manual e robotizada. À direita, robô executando solda in loco.

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um sistema robotizado inédito desenvolvido para recuperação automática de pás de turbinas de hidrelétricas danificadas por cavitação. O Roboturb se mostrou viável em suas tarefas: medir uma superfície erodida, planejar as trajetórias evitando colisão com as superfícies de seu entorno, e realizar a soldagem in loco, atendendo requisitos de qualidade geométrica e de solda. Trata-se de uma alternativa técnica, tecnológica e econômica à recuperação manual tradicional.

Como perspectivas, pretende-se desenvolver uma versão capaz de realizar a tarefa de esmerilhamento, e para tanto se estuda uma configuração paralela do equipamento. Pretende-se também diminuir a necessidade de técnicos especializados em robótica na sua operação, permitindo a técnicos de pouca ou nenhuma experiência em robótica a utilização e operação do sistema.

Este projeto teve o apoio da ANEEL, Copel, FINEP, Furnas e RHA. Participaram os Departamentos de Automação e Sistemas (DAS) e de Engenharia Mecânica (EMC) da UFSC e o Lactec.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Leal, R.D.G. "*Impactos sociais e econômicos da robotização: Estudo de caso do Projeto Roboturb*", Dissertação de Mestrado, UFS, 2005.
- (2) Bonacorso, N.G. "*Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte*", Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- (3) Simas, H., Martins, D. E Guenther, R. "A redundant manipulator to operate in confined spaces", *In Proceedings IV Induscon – Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, Joinville- Brasil, 2004.
- (4) Siciliano, B. Sciavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G. "*Modeling and control of robot manipulator*", Springer, 2009.
- (5) Hunt, K.H., "Don't corss-thread the screw!", *Symposium Upon the 100th Anniversary of A Treatise on the Theory of Screws. University of Cambridge*, 2000.
- (6) Campos, A., Guenther and Martins, D. "Differential kinematics of parallel manipulators using assur virtual chains". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, pp. 1697—1711, 2009.
- (7) Davies, T.H., 1981. "Kirchhoff's circulation law applied to multi-loop kinematic chain", *Mechanism and Machine Theory*, Vol.16, pp. 171—173, 1981.
- (8) Pinto, T.L.F.C. "*Medição óptica, comparação e sinalização de superfícies com forma livre de grande extensão*". Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- (9) Qiulin, D. and Davies, B. J. "Surface engineering geometry for computed-aided design and manufacture", Ellis Horwood Limited, 1987.
- (10) Zeid, I., "CAD/CAM Theory and practice", Prentice Hall, 1991.
- (11) Golin, J.F., Dias, A., Guenther, R. "*Estudo e Simulação Cinemática e Dinâmica do Roboturb*" – Relatório de projeto – Marco Contratual – UFSC, 2005.
- (12) Raposo, E. "*Um modelo aberto para robôs manipuladores de serviço*". Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- (13) Pinto, T.L.F.C., Golin, J.F., Simas, H., Raposo, E., Leal, R.D.G. "*Calibração e Revisão de Software*" – Relatório de projeto – Marco Contratual – UFSC, 2005.
- (14) Calainho, J.A.L., Horta, C.A., Gonçalves, C. e Lomônaco, F.G. "*Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil*". XV SNTPEE, 1999.

Julio F. Golin atualmente é engenheiro da Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

Walter Antonio Kapp atualmente é diretor técnico da EngeMOVI Automação e Projetos Mecânicos Ltda.