

Automação de recuperação de cavitação em turbinas hidráulicas

A. C. Costa, FURNAS e W. A. Kapp, LACTEC

Este documento apresenta a segunda etapa do projeto ROBOTURB, que foi focada no desenvolvimento do software do sistema, onde foram sedimentados todos os processos necessários ao serviço de recuperação de turbinas hidráulicas. Na primeira etapa já tinha sido desenvolvida a primeira versão do hardware do projeto. Nesta etapa também foram feitas evoluções no hardware e foi feito um experimento de campo, onde de maneira inédita no Brasil um robô foi empregado nesta função. Este artigo irá evidenciar os resultados obtidos, comparando com o estado atual da técnica a nível mundial.

Palavras-chave — Cavitação; Medição; Robotização; Soldagem; Turbina hidráulica.

I. INTRODUÇÃO

A cavitação é um fenômeno hidráulico inerente a máquinas hidráulicas, como bombas, hélices e turbinas. O fenômeno afeta todas as turbinas geradoras de energia, em algumas destas o fenômeno é muito intenso, causando grandes remoções de material, que exigem paradas regulares para recuperação deste tipo de desgaste. Estas paradas têm impactos na rotina de operação da usina, tanto pelos custos de manutenção e de não geração, quanto pela indisponibilidade da máquina geradora. O desgaste por cavitação também ocorre na superfície de sucção da pá [3], que obriga uma recuperação sempre na posição sobre cabeça. Também os materiais especiais desenvolvidos visando elevada resistência a cavitação são de difícil aplicação. Todos estes fatores motivaram o desenvolvimento de robôs especializados nesta função, um no Canadá e outro no Brasil, este trabalho apresenta o robô desenvolvido no Brasil, comparando-o com a versão canadense.

II. OBJETIVOS

Desenvolver não apenas um robô manipulador, mas sim todo um sistema automatizado para recuperação de desgaste por cavitação em turbinas hidráulicas. O desenvolvimento abrangeu a concepção de projeto e construção de: um robô manipulador portátil e compatível com espaço restrito de trabalho; um cabeçote de medição que quando acoplado ao manipulador permite a medição das superfícies da turbina; uma fonte de soldagem multi-processo, com recursos de

soldagem por plasma. Foram também desenvolvidos e integrados em um software todos os procedimentos para que o sistema operasse de maneira integrada visando a recuperação da turbina.

III. DESENVOLVIMENTOS

A. Concepção do manipulador:

1) Projeto Mecânico:

Foram aplicadas técnicas de modelamento em CAD, prototipagem virtual e física, visando um projeto completo e integrado de acordo com os seguintes objetivos:

- Transportabilidade, que implicou em compactação e baixo peso. Um robô industrial convencional tem em geral uma relação de 1:30, entre a massa útil transportável no atuador final e massa própria do robô. Assim um robô que pesa 180 kg tem em geral uma capacidade útil de 6 kg. O projeto do robô de cavitação alcançou a relação de 1:10, ou seja, o robô tem capacidade de 2 kg úteis no atuador final, e o conjunto móvel sobre trilhos tem uma massa de aproximadamente 20 kg.

- Adaptabilidade, que implicou na utilização de uma junta robótica tipo trilho flexível, com acionamento por cremalheira sem folgas. Este recurso permite adaptação fácil do robô à superfície da turbina. O projeto do robô canadense para recuperação de turbinas, concorrente que já existia no começo deste projeto, é baseado em trilho rígido, o que exige uma parada para inspeção prévia, a fim de se planejar a fixação do robô, para que na ocasião da recuperação, as equipes tragam os trilhos pré-curvados corretos. Este recurso de flexibilidade empregado trouxe dois desafios tecnológicos que foram superados no projeto: o primeiro é o da rigidez necessária para a base do robô, e isto foi alcançado através de um projeto mecânico aprimorado; O segundo desafio é a determinação da trajetória no trilho, necessária para o controlador cinemático.

- Trabalho em espaços restritos, que implicou na concepção de uma cadeia cinemática redundante para o manipulador, ou seja, um robô industrial tem em geral 6 juntas, que possibilitam todos os graus de liberdade necessários em um ambiente não restrito. Este projeto empregou um robô com 7 juntas, permitindo desta maneira um sistema com infinitas soluções cinemáticas para uma dada posição no espaço.

2) Projeto eletro-eletrônico

Do ponto de vista eletrônico a metodologia empregada foi a de se usar controladores comerciais.

O acionamento das juntas dos robôs teve abordagem bastante convencional, foram utilizados basicamente motores DC.

Agradecimentos aos Financiadores: Esta etapa do projeto foi financiada por FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. A primeira etapa foi financiado em cooperação pelo PADCT/FINEP e COPEL/ANEEL entre estas duas etapas os recursos humanos para o desenvolvimento deste projeto foram mantidos pelo programa RHAE/CNPq.

Na integração foi utilizada a comunicação diferencial entre todos os módulos, visando dar imunidade contra o intenso campo magnético ao qual o robô estaria submetido durante a operação da soldagem, pois os processos de soldagem eram todos pulsados e a corrente de pico pode atingir 400 A. Também o acendimento do arco piloto se dá através de descargas em alta frequência. A comunicação diferencial requer duas linhas independentes por sinal. Assim para um robô de 7 juntas foi necessário um cabo umbilical de 77 linhas. Isto utilizando motor DC, que tem comutação mecânica e precisa de apenas dois fios para ser alimentados, se fossem utilizados servos-motores AC (“brushless”), seria necessários 10 fios para alimentar o motor de maneira diferencial, o que acrescentaria mais 56 linhas no umbilical, que devido a estrema compactação do protótipo seria muito complicado, pois a conexão do cabo atual já ocupa toda o painel traseiro do robô.

B. Programação e controle de robôs:

1) Controlador Cinemático:

Devido a redundância do robô com 7 juntas, a técnica usual baseado na teoria de Denavit Hartenberg, tornaria o jacobiano do sistema de equações muito grande, levando a uma complexidade elevada e muito esforço computacional para as soluções do controlador cinemático. Foi então empregada a “Teoria dos helicóides” (screws)[4]. Dentre as infinitas possibilidades de solução para a conversão de coordenadas cartesianas em coordenadas de juntas, a solução adequada é escolhida segundo critérios de erro de seguimento, faixas operativas de cada junta e também o critério da não colisão [1] e [2].

2) Gerador de trajetórias:

Um robô industrial é em geral programado ponto a ponto por aprendizagem. Isto pode ser muito demorado, porém na indústria este robô deverá repetir esta programação por até vários anos, o que dilui o tempo de programação do serviço de maneira eficiente. No caso da recuperação de turbinas hidráulicas, a forma da cavitação é muito complexa, exigindo muitos pontos e um processo sofisticado de interpolação. Assim a programação de uma cratera seria muito demorada pelo método ponto a ponto. Também cada máquina hidráulica de uma dada usina é única, a cratera de cavitação varia de pá para pá de cada máquina, e ainda na mesma pá a cratera varia de uma manutenção para outra, de maneira que a programação de uma manutenção não é aproveitada para a próxima. Por outro lado o soldador no processo manual entra na turbina e já está preparado para começar o trabalho. Assim para que este projeto de robô fosse viável foi necessário o emprego de um sistema de digitalização automático de superfícies [10], para medir a cratera e o seu entorno, a fim de discretizar com muitos pontos a cratera. Também um software específico para geração de trajetórias foi desenvolvido, visando aplicar os parâmetros adequados de soldagem a forma da cratera [8]. O resultado deste software são trajetórias que agregam, posição, velocidade, aceleração e comandos sincronizados para a máquina de solda, com estratégias especiais para começo e fim de cordão, além de um seguimento adequado ao longo de cada cordão. Este software, desta maneira gera todos os cordões que compõem as camadas e todas as camadas, com os diversos materiais necessá-

rios até que a cratera seja preenchida visando o mínimo sobre-material na solda.

C. Sistemas de medição empregados:

1) Digitalização da cratera:

Utiliza a cinemática direta do robô, com apalpação da superfície através de um cabeçote apalpador/medidor óptico, que emprega a técnica de triangulação óptica. Inovador neste sistema é a utilização de três folhas de luz ao invés de uma, o que permite melhor aproveitamento no número de pontos simultâneos por captura, além de permitir medir simultaneamente o vetor normal a superfície, e ainda permite a localização e o travamento em uma dada posição do atuador final com seis graus de liberdade. Outra vantagem do emprego de um sistema de medição é o cancelamento de erros sistemático por efeito diferencial. Isto é uma necessidade quando se programa trajetórias em robôs, por um método diferente do ponto-a-ponto, pois os robôs tem boa repetitividade, porém não tem boa exatidão [11]. Assim para este projeto o projeto do sensor foi especialmente adequado a postura de soldagem do robô, de maneira que o cabeçote de medição tem uma matriz homogênea de ferramenta muito semelhante a matriz homogênea da tocha de soldagem, além de repetir o centro de massa e a massa própria do tocha de soldagem.

2) Digitalização do trilho flexível.

O desafio é que uma junta robótica baseada em trilho flexível não tem trajetória definida, portanto é necessário um método de medição que digitalize a trajetória da junta, para que seja possível integrá-la no controlador cinemático do robô. No espaço restrito da turbina, a metodologia de medição através de giroscópios se mostrou mais promissora [8], pois não requer grandes movimentações do braço ao longo do curso do trilho.

D. Tecnologia da Soldagem e Metalurgia

1) Soldagem

Foi desenvolvido o processo e o projeto das fontes e alimentadores de arame específicos, para que pudéssemos ter total flexibilidade no desenvolvimento de um processo específico para recuperação de turbinas hidráulicas com o emprego de ligas de alto desempenho e difícil soldagem. Nesta etapa do projeto desenvolveu-se o processo PLASMA alimentado[12]: Também foi adaptada uma pistola manual de soldagem a plasma, para que esta tivesse alimentação de arame. Foram desenvolvidas fontes multiprocesso [7], que também contemplavam o processo de plasma, inclusive com ignitor de alta frequência. Este processo apresentou uma qualidade superficial boa, muito semelhante ao processo TIG [5], com produtividade bruta de 70% do que se consegue com o MIG/MAG sobre cabeça [6]. Além disso, o processo se mostrou muito flexível quanto à morfologia do cordão, sendo possível início e término dos cordões de maneira muito mais adequada a aplicação robotizada.

2) Metalurgia

Todos os procedimentos de soldagem foram desenvolvidos tanto para arames de aço carbono e inox 309, quanto para ligas especiais, com elevada resistência à cavitação. Cada um destes procedimentos gerou corpos de provas, que foram avaliados quanto às características microestruturais e

quanto a resistência ao desgaste, através de ensaios de cavitação acelerada. O procedimento de soldagem devido a sua concentração de energia resulta num aporte térmico menor e o resfriamento mais rápido produz uma microestrutura mais refinada que os processos convencionais, além de introduzir menos tensões residuais na estrutura do rotor. O controle da pulsação do processo sobre cabeça também foi realimentado pela análise metalúrgica, pois uma frequência do pulsado térmico muito baixa deixava inclusões no depósito, assim otimizou-se as exigências de processo, com a característica de resistência a cavitação.

IV. RESULTADOS

No link:

http://www.lactec.org.br/videos/roboturb_2004.wmv pode ser visto um vídeo que mostra o robô funcionando.

A. Hardware:

1. Aperfeiçoamento da fonte de soldagem MIG/MAG Multiprocesso
2. Módulos de Soldagem a Plasma – Produto novo.
3. Aperfeiçoamento do cabeçote de medição óptico (apalador):
4. Aperfeiçoamento do manipulador portátil ROBOTURB

B. Software e processos:

Todos os softwares e processos foram desenvolvidos de maneira inédita neste projeto e encontram-se ainda em sua primeira versão.

1. Software de controle cinemático de robôs redundantes.
2. Software gerador de trajetórias para medição e deposição por soldagem da cratera de cavitação.
3. Software de medição de trajetória em trilho flexível por meio de giroscópios.
4. Software de digitalização de pás de turbinas por metodologia de topografização com câmeras.
5. Software executor de trajetórias de robô.
6. Novo processo de soldagem a plasma empregando dupla pulsação para soldagem sobre cabeça.

C. Serviço

Recuperação automatizada de turbinas hidráulicas – Serviço novo, requer ainda desenvolvimento de logística adequada. Foi desenvolvido um processo inovador para recuperação das turbinas hidráulicas, pois existem diferenças significativas em relação ao processo manual, e o processo desenvolvido neste projeto, também é diferente do processo automatizado empregado pelo robô canadense.

1) Vantagens em relação ao processo manual:

O processo automatizado requer uma maneira diferente preparação de superfície, no qual as bordas da cratera são suaves, para que o manipulador consiga manter uma relação angular constante entre o eixo da tocha e o vetor normal da superfície. Isto tem a vantagem de possibilitar a deposição sem defeitos de início de cordões e ainda reduz a quantidade de material a ser depositada, já que a cavitação tem um perfil de profundidade, que aumenta suavemente conforme se percorre a região afetada.

2) Diferenças em relação ao processo canadense:

1. Não é necessária uma visita prévia para medição de forma da pá da turbina e planejamento da fixação do robô. Isto porque o sistema Roboturb emprega trilhos flexíveis que se adaptam a qualquer forma de pá de turbina. Tendo sua forma autodeterminada pelo sistema de medição com giroscópios do robô. Diferentemente no sistema canadense para cada curvatura necessária do trilho, são condicionados trilhos rígidos específicos.

2. A superfície do fundo da cratera não precisa ser paralela à superfície final. Esta necessidade no robô canadense é devido ao método de programação deste, que se baseia na medição da forma da turbina não desgastada, medida por um outro sistema em visita prévia, e que é utilizada na pré-programação das trajetórias de soldagem do robô, bastando então poucos pontos de medição para a adaptação do número de camadas até que se chegue na forma definitiva da pá recuperada. No sistema desenvolvido neste projeto existe um sistema de digitalização da forma da cratera, através da integração um cabeçote de medição óptico a cinemática do robô, e um software gerador de trajetórias baseado na forma da cratera, integrado os parâmetros de soldagem, a estas trajetórias para a programação direta do robô. Isto simplifica a preparação da superfície, pois menos material precisa ser retirado e a superfície precisa apenas ser suavizada, sem nenhum requisito de paralelismo com a superfície final. Como menos material é depositado, e o reparo tem bordas suaves, menor será o aporte de tensões residuais à turbina.

3. Os processos de soldagem aplicados pela tecnologia canadense são convencionais, aos quais o robô e a cratera têm que estar adaptados. No projeto Roboturb foram desenvolvidos processos de soldagem especialmente adaptados à posição de soldagem, ao processo robotizado e aos materiais empregados. Para isto foi necessário projetar e construir os equipamentos de soldagem. Os resultados superaram as expectativas de tal forma, que o robô não precisou de proteções, pois não ocorrem salpicos, e todo o material do arame é depositado na peça. A morfologia dos cordões é controlada e adaptada de forma a se conseguir um início e término adequado para os cordões. Com estes recursos o controle de geometria e a qualidade da camada depositada reduzem muito o trabalho de acabamento superficial pós-soldagem.

D. Melhoria do processo interno

Quando o processo estiver implantado na concessionária ele trará os seguintes impactos:

1. Redução em 25% do tempo de preparo da superfície, pois diferentemente do processo atual onde a borda é preparada com formato abrupto, o procedimento de preparo recomendado para o robô prevê bordas suaves, como é o perfil de profundidade da cavitação, assim apenas será empregado o esmeril para suavizar a superfície cavitada.

2. Redução de 30 % do material depositado: O menor volume de material retirado na preparação e a possibilidade de mínimo sobre-material depositado, irão reduzir em média 30% o material total necessário. Sendo muito importante a economia de material devido ao mínimo sobre-material, pois quando se empregam materiais especiais, de elevada resistência a cavitação, estes tem um custo muito alto, e é justamente esta a camada desbastada no acabamento. Como é um material muito duro o trabalho de acabamento acaba sendo

muito penoso, além de quase retirar completamente o material resistente. No processo robotizado, o controle de forma da superfície minimiza o sobre-material, podendo atingir um valor máximo de no máximo 3 mm, enquanto que o no processo manual chega-se com freqüência a um sobre-material de 10 mm.

3. Redução de 30% do tempo de soldagem. O robô requer um certo tempo de preparação, e por isto ele começa a depositar efetivamente depois do soldador. Porém quando começa o robô tem uma efetividade de 100% do tempo, enquanto que o operador manual dificilmente suporta um tempo superior a 50%. Ainda assim o processo de plasma desenvolvido é mais lento, o que se compensa pelo melhor controle de morfologia dos cordões e pelo aproveitamento de 100% do material. Por fim pela menor quantidade de material economiza-se tempo de soldagem.

4. Menor aporte térmico ao rotor da turbina e conseqüente menor tensionamento da estrutura do rotor, resultando em menor incidência de trincas nos rotor. Isto se deve a três fatores: Menor quantidade de material soldado a estrutura; camada aplicada mais fina (menor sobre-material), com bordas suaves que fazem que o reparo tenha menor rigidez; a temperatura de aplicação mais elevada, pois planeja-se empregar simultaneamente 4 robôs distribuídos de maneira simétrica em relação ao rotor, sendo que estes robôs trabalharão com fator de carga de 100%. As fixações dos robôs a pá da turbina estão preparadas para suportarem até 250 °C, e os motores do robô suportam até 130 °C. Temperaturas muito acima das suportadas pelo soldador.

5. Redução de 50% do tempo de acabamento. Como o robô deposita uma camada com mínimo sobre material, o tempo de acabamento será drasticamente reduzido.

6. Redução de 75% do tempo re-trabalho. A princípio não deve haver re-trabalho, porém na prática podem ocorrer erros de processo, e por pequenos defeitos não vale a pena o custo de reprogramação do robô. Também haverá casos em que a posição de um defeito muito pequeno inviabilize a aplicação do robô. Então nestes casos será feito um pequeno re-trabalho manual localizado. De qualquer forma estes re-trabalhos deverão ser drasticamente reduzidos com a aplicação desta tecnologia.

7. Extensão da vida do reparo em 50%: O principal apelo da aplicação do robô é a aplicação de ligas de alta resistência a cavitação. Estas ligas têm uma durabilidade até 100% maior, conforme medições de desgaste acelerado por ultrassom. Na prática, em campo a durabilidade destas ligas não atinge estes valores, devido aos defeitos de aplicação, pois a aplicação destas ligas é mais difícil, e devida a grande remoção da camada com este material no acabamento. Assim como o robô permite uma melhor repetição dos procedimentos estabelecidos em laboratório, espera-se um rendimento prático mais próximo do que se consegue em laboratório.

8. Logística de reparo mais simples já que será necessário um número menor de trabalhadores no processo de reparo.

9. Maior disponibilidade de máquinas geradoras, já que a obra para o reparo será mais rápida e o reparo terá maior durabilidade.

10. Estima-se que o impacto das melhorias listadas devam reduzir o custo anual de manutenção com cavitação por planta geradora em até 50%.

V. AGRADECIMENTOS

Agradecimento aos Co-executores. Este projeto foi co-executado pela UFSC, através de seus departamentos de Engenharia Mecânica - EMC e de Automação e Sistemas - DAS. Envolvendo: A. Albertazzi - Labmetro/EMC; J. C. Dutra e A. Buschinelli - Labsolda/EMC; C. A. Martin - LHW/EMC; R. Guenther, D. Martins e A. Dias - LAR/EMC; M. Stemmer e E. R. de Pieri - LCMI/DAS. O projeto contou ainda com o Prof. C. L. Veiga - PUC/PR.

O desenvolvimento contou ainda com engenheiros dedicados ao projeto, de mestrandos e doutorandos, além de bolsistas de iniciação científica. No total participaram deste projeto 52 pessoas.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Periódicos:

- [1] GUENTHER, R.; MARTINS, D.; SIMAS, H. . A "REDUNDANT MANIPULATOR TO OPERATE IN CONFINED SPACES" - artigo aceito pelo IEEE.

Artigos Apresentados em Conferências (Não publicados):

- [2] GUENTHER, R.; MARTINS, D.; SIMAS, H. . A "REDUNDANT MANIPULATOR TO OPERATE IN CONFINED SPACES" In: VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais - VI INDUSCON 2004, Joinville.

Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

- [3] A. ALBERTAZZI e OUTROS. "Novos Procedimentos em Recuperação de Cavitação em Turbinas Hidráulicas" IX Congresso Brasileiro de Energia e IV Seminário Latino Americano de Energia. COPPE/UFRJ - Rio de Janeiro /RJ - 2002.
- [4] SIMAS, H.; MARTINS, D.; GUENTHER, R. "Projeto Roboturb - desenvolvimento de um algoritmo de cinemática inversa baseado na teoria de helicóides". In: Congresso Nacional De Engenharia Mecânica - CONEM 2002, João Pessoa

Dissertações e Teses:

- [5] L. C. DELGADO. "Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática de Arame". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 2000.
- [6] M. F. MOTTA. "Soldagem Mig/Mag com Duplo Arame e Potencial Isolado". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 2002.
- [7] R. GOHR. "Desenvolvimento de Novos Métodos de Controle do Arco Voltaico e Transferência Metálica para o Processo Mig/Mag usando Técnicas Computacionais". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 2002.
- [8] W. E. SANTOS. "Minimização do Erro de Postura em Robô Instalado Sobre Trilho Curvo e Flexível". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 2003.
- [9] N. G. BONACORSO. "Desenvolvimento de um algoritmo de controle para um robô de soldagem executar a recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 2004.
- [10] L. A. R. NEROSKY. "Medição de formas livres através da integração de um sensor ótico tipo 'Folhas de Luz' em um braço de medição". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC - 2001.
- [11] T. L. F. C. PINTO. "Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de desempenho de um sistema automatizado para recuperação de turbinas hidráulicas de grande porte". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC. 2001.
- [12] M. A. OLIVEIRA. "Estudo do Processo de Soldagem Plasma com Alimentação Automática de Arame na Deposição de Revestimentos Metálicos". Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFSC - 2001.