

## CONCEPÇÃO CINEMÁTICA DE UM MANIPULADOR PARA VOLUMES DE TRABALHO RESTRITOS

**Raul Guenther**

**Henrique Simas**

**Edson Roberto de Pieri**

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Robótica, Caixa Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: [simas@lcmi.ufsc.br](mailto:simas@lcmi.ufsc.br); [guenther@emc.ufsc.br](mailto:guenther@emc.ufsc.br)

### **Resumo**

O presente artigo apresenta a concepção cinemática de um manipulador para a realização de tarefas dentro de um volume de trabalho restrito. Especificamente ele será utilizado na recuperação de regiões erodidas por cavitação em turbinas hidráulicas de grande porte. A estrutura cinemática é criada a partir da caracterização do problema, da proposição de alternativas e da análise das mesmas. Para a análise utiliza-se uma combinação de simulações numéricas com simulações em maquetes.

**Palavras chaves** : Robótica, cinemática de manipuladores.

### **1. INTRODUÇÃO**

Unidades hidráulicas usadas para geração de energia elétrica são freqüentemente máquinas de grande porte. Seus rotores são construídos em aço de elevada resistência, podendo apresentar mais de 9 m de diâmetro (turbinas Francis) e pesar até 200 t.

O perfil dos rotores é projetado para apresentar grande eficiência hidráulica e condições de escoamento de forma a evitar o desenvolvimento de regiões de baixa pressão onde ocorra cavitação, fenômeno que pode provocar severa erosão nas pás do rotor reduzindo sua eficiência hidráulica e comprometendo a integridade estrutural do conjunto.

Apesar dos grandes avanços na mecânica de fluidos ainda não se consegue evitar totalmente a cavitação nas turbinas. Assim, mesmo as turbinas modernas apresentam cavitação, fenômeno mais agudo nas turbinas mais antigas.

Sendo tecnicamente complexa e economicamente inviável a substituição de rotores, a erosão por cavitação precisa ser mantida sob controle. Isto é feito através do seu monitoramento e da deposição “in loco” de ligas de aço inoxidável especiais nas regiões erodidas, com a finalidade de recompor o perfil original sempre que necessário. Essa deposição é feita mediante soldagem manual.

As regiões erodidas estão dentro do canal de condução do rotor da turbina e o operador realiza a soldagem num ambiente restrito e fortemente insalubre. Além disso, as erosões ocorrem em posições bastante desfavoráveis para a soldagem, tanto do ponto de vista do soldador como para a adesão do metal fundido.

O projeto ROBOTURB tem por objetivo desenvolver um sistema automatizado para a recuperação das regiões erodidas nos rotores de turbinas hidráulicas. Pretende-se, assim, eliminar o trabalho insalubre, obter uma melhor qualidade na recuperação e com isso

prolongar sensivelmente os períodos entre as manutenções, e reduzir o custo das recuperações.

O projeto integra pesquisas na áreas de metrologia, soldagem, acionamentos e automação e está sendo desenvolvido através de uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL). Financiado pelo PADCT, o projeto envolve os departamentos de engenharia mecânica (EMC) e de Automação e Sistemas (DAS) da UFSC, e o Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento (LACTEC) da COPEL.

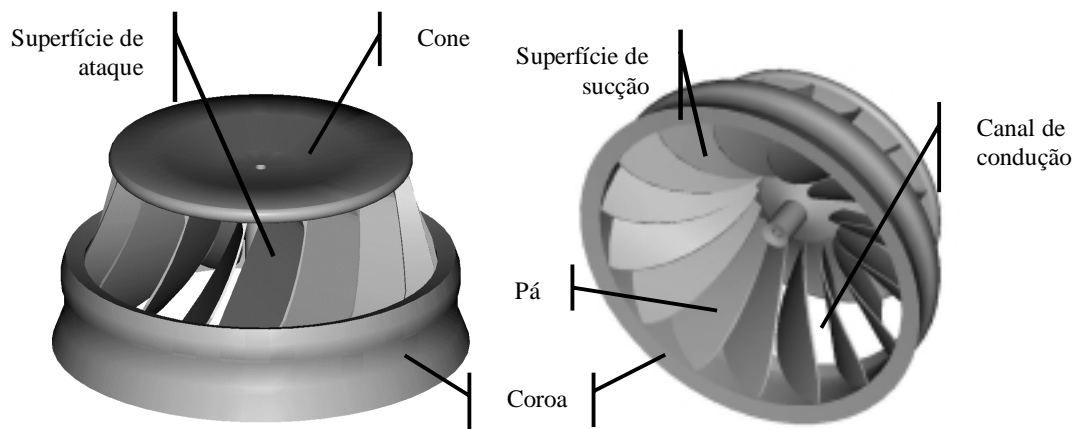
Utilizando o sistema automatizado, além de eliminar a exposição de pessoas ao ambiente insalubre, pretende-se alcançar a melhoria e a uniformização na qualidade da soldagem e, portanto, do acabamento superficial, e reduzir a quantidade de material depositada e o tempo gasto nesta operação.

O elemento central do sistema é um manipulador integrado ao processo de soldagem, com capacidade para operar no pequeno espaço restrito do canal do rotor. Esse manipulador desenvolverá também a operação de sensoramento através da qual será feita a avaliação da forma da região erodida.

Neste trabalho apresenta-se a concepção cinemática para esse manipulador a partir da caracterização do problema realizada na seção 2 e da metodologia descrita na seção 3. As alternativas para a estrutura cinemática estudadas estão apontadas na seção 4. Os resultados das simulações estão apresentados na seção 5 e a conclusão está na seção 6.

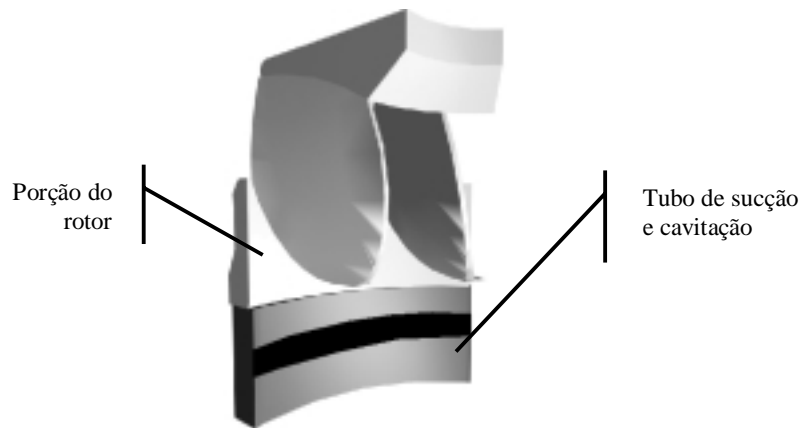
## 2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA CINEMÁTICO

De acordo com dados levantados pelo LACTEC ao longo de diversas recuperações de turbinas, as cavitações ocorrem no canal de condução do rotor formado pelas superfícies de ataque e de sucção e limitado pela coroa (veja Fig.1).



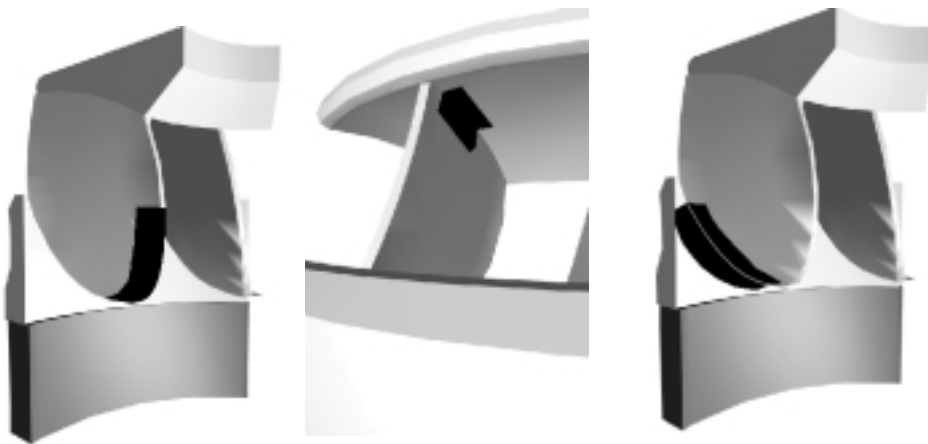
**Figura 1.** Rotor de uma turbina hidráulica

Adicionalmente existe também uma região com cavitações no tubo de sucção da turbina (Fig.2).



**Figura 2.** Vista do rotor com o tubo de sucção de uma turbina hidráulica

No canal de condução as cavitações ocorrem na superfície de sucção e na ligação desta superfície com a coroa, principalmente nas áreas mostradas na Fig.3.



**Figura 3.** Principais áreas de cavitação no canal de condução

A movimentação da tocha de soldagem ao longo da cavitação no tubo de sucção (Fig.2) é simples porque o movimento é praticamente livre da possibilidade de colisões. Nas cavitações da superfície de sucção o movimento da tocha é dentro do canal de condução e, portanto, dentro de um espaço restrito e passível de colisões.

Para executar a recuperação das cavitações o manipulador funcionará dentro do canal de condução, que pode ser caracterizado como um volume de trabalho curvo e afunilado.

Os dados fornecidos pela LACTEC permitiram verificar que as regiões cavitadas tem uma forma caracterizada pela preponderância de uma dimensão, cujo comprimento chega a 0.70 m e cuja largura é de aproximadamente 0.30 m.

O processo de soldagem para a recuperação está sendo desenvolvido pelo Labsolda-UFSC e prevê a utilização de uma tocha com duplo arame. Por isso o processo exige que o manipulador tenha seis graus de liberdade para que a tocha possa atingir todas as posições e orientações dentro do espaço de trabalho.

O sensor laser que fará o mapeamento da superfície cavitada impõem a mesma exigência cinemática.

Fica caracterizado, portanto, que o robô deve ser projetado para realizar movimentos com seis graus de liberdade ao longo de cavitações longas em um espaço de trabalho restrito.

### 3. METODOLOGIA DE ANÁLISE CINEMÁTICA

O projeto cinemático do robô foi realizado a partir do exame de diversas propostas de estruturas cinemáticas concebidas para realizar movimentos com seis graus de liberdade em um espaço de trabalho curvo e afunilado.

A análise dessas alternativas incluiu o estudo dos movimentos em cada uma das juntas, a avaliação da manipulabilidade (Sciavicco e Siciliano, 1996), a verificação das possibilidades de colisão do manipulador com as superfícies do canal de condução, e as possibilidades de fixação do robô.

Esta análise foi realizada combinando simulações numéricas em computador com simulações em maquetes em tamanho natural (1:1) das alternativas de estruturas dos robôs e do canal de condução do rotor de uma turbina característica.

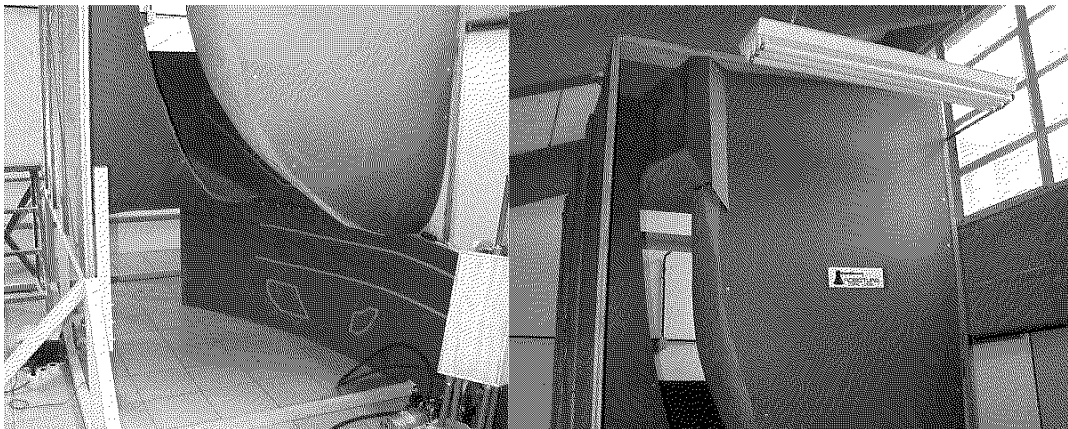
As simulações nas maquetes possibilitaram o estudo das alternativas de fixação de cada proposta de robô, e ensejaram a verificação da possibilidade de colisões. Além disso, auxiliaram na determinação das posições que as juntas do robô assumem durante o movimento ao longo das regiões cavitadas.

As simulações em computador foram preponderantes no estudo dos movimentos nas juntas.

#### 3.1. A maquete do canal de condução

A construção desta maquete foi realizada a partir da escolha de uma turbina com características representativas de uma série de instalações. Esta escolha recaiu na usina de Foz de Areia, no sul do estado do Paraná, de propriedade da COPEL.

Feita a escolha, o LACTEC levantou o perfil do canal de condução e com esses dados construiu-se a maquete do canal em fibra de vidro, apresentada na Fig.4.



**Figura 4.** Maquete do canal de condução

#### 3.2. Simulações numéricas

As simulações numéricas em computador foram desenvolvidas através da utilização combinada dos programas Matlab<sup>®</sup> 5.1, Mathematica<sup>®</sup> 3.01, 3D Studio Max<sup>®</sup>, Autocad 13<sup>®</sup>.

Com o programa Matlab<sup>®</sup> 5.1 realizou-se a simulação da cinemática direta, utilizando a metodologia de Denavit-Hartenberg (Fu et al, 1987) através da qual foram analisados os movimentos nas juntas a partir das suas posições iniciais e finais obtidas em experimentações nas maquetes.

O programa Mathematica<sup>®</sup> 3.01 foi empregado no desenvolvimento dos modelos matemáticos dos manipuladores.

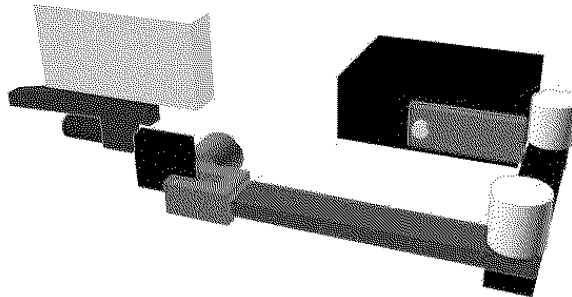
O desenho dos manipuladores foi realizado com auxílio do programa Autocad 13<sup>®</sup> e o programa 3D Studio Max<sup>®</sup> possibilitou a visualização dos movimentos em três dimensões.

#### **4. ALTERNATIVAS PARA A ESTRUTURA CINEMÁTICA**

##### **4.1. Estrutura articulada**

A estrutura articulada estudada é formada por seis juntas de rotação dispostas de na forma apresentada na Fig.5. São três juntas de rotação interligando os três primeiros elos e um punho esférico (Craig, 1986). A Fig.5 mostra também um protótipo da tocha de soldagem e do sensor acoplados à extremidade do manipulador.

Como pode ser observado da figura, a disposição dos três primeiros elos foi projetada de forma a propiciar a realização de movimentos em uma região estreita. Os elos 2 e 3 tem a função de desenvolver o movimento ao longo do comprimento da cavitação.

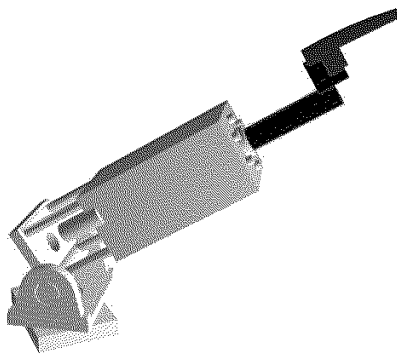


**Figura 5** – Estrutura articulada

##### **4.2. Estrutura com junta telescópica**

A estrutura com junta telescópica estudada é formada por duas juntas de rotação seguidas de uma junta telescópica cujo corpo constitui o terceiro elo (Fig.6). À extremidade deste terceiro elo é acoplado um punho esférico.

Também neste caso a concepção da forma dos três primeiros elos buscou contemplar a necessidade de realizar movimentos em uma região restrita. Neste caso a junta telescópica tem a função de efetuar o movimento ao longo do comprimento da cavitação.



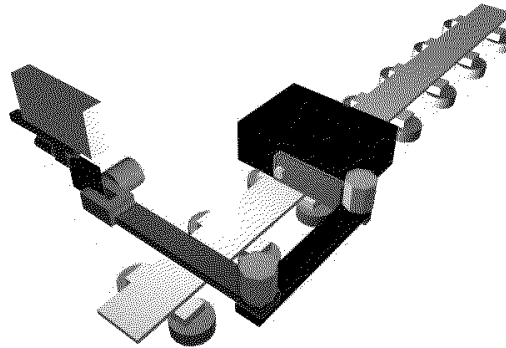
**Figura 6** – Estrutura com junta telescópica

Cabe ressaltar que a junta telescópica para realizar movimentos no espaço de trabalho restrito imposto pela tarefa foi objeto de um projeto mecânico especialmente desenvolvido para aplicação no projeto Roboturb. Trata-se de um mecanismo composto por três conjuntos de fusos de esferas recirculantes que funcionam de forma acoplada. Devido à limitações dos componentes mecânicos disponíveis no mercado, essa junta telescópica resultou com dimensões que a fazem ocupar um grande volume dentro da região restrita do canal (veja Fig.8). Maiores detalhes podem ser encontrados em (Albertazzi, 1999).

#### 4.3. Estrutura articulada com trilho

Neste caso a estrutura articulada é a mesma descrita acima, com seis juntas de rotação, acrescentando-se um movimento de translação ao longo de um trilho (Fig.7).

O trilho acrescenta um grau de liberdade, torna o manipulador redundante com sete graus de liberdade, e possibilita que o movimento ao longo do comprimento da cavitação seja realizado prioritariamente pela translação ao longo do trilho.



**Figura 7** – Estrutura articulada com trilho

### 5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para cada uma das alternativas apresentadas na seção anterior foram construídas maquetes em madeira com movimentos semelhantes aos desejados para o manipulador.

Essas réplicas utilizadas na maquete do canal de condução permitiram a análise dos melhores pontos de fixação do manipulador, dos seus movimentos e das possibilidades de colisão.

Em todos os casos a fixação do manipulador ocorreu no tubo de sucção da turbina ou nas superfícies de sucção e de ataque do canal de condução do rotor. A escolha da localização para a fixação foi realizada de tal forma que o manipulador alcançasse toda a região a ser recuperada.

Para cada alternativa a maquete do manipulador foi fixada medindo-se as posições de suas juntas no início da operação de recuperação e no final. Esses dados foram então utilizados na simulação do movimento em computador.

Apresenta-se a seguir os resultados das simulações em maquete.

#### 5.1. Estrutura articulada

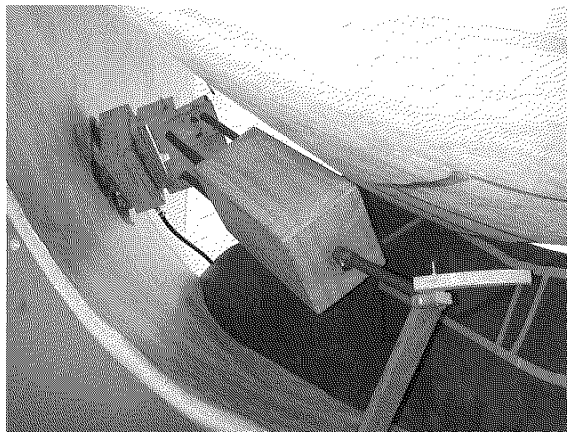
A estrutura articulada exige uma escolha judiciosa dos locais de fixação, o que dificulta sua aplicação pelo fato dessa escolha cuidadosa nem sempre ser possível “in loco”.

De acordo com o esperado e verificado nas simulações na maquete, as simulações numéricas mostraram que a movimentação maior ocorre nos elos 2 e 3. Devido a isso eles necessitam ter grandes dimensões para poder alcançar toda a região erodida.

A grande dimensão desses elos amplia a possibilidade de ocorrerem colisões do “cotovelo” que eles formam com as superfícies do canal de condução da turbina.

## **5.2. Estrutura com junta telescópica**

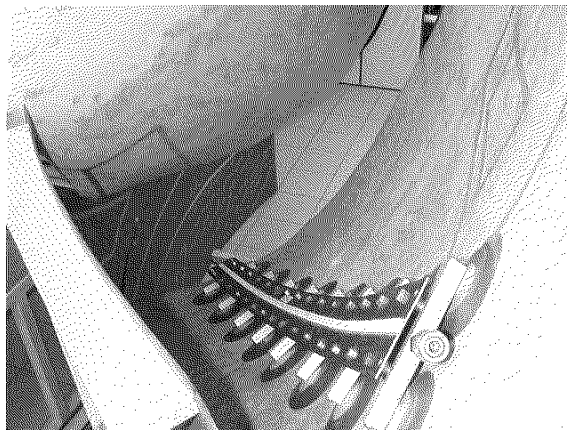
Essa estrutura também exige uma escolha criteriosa dos locais de fixação. O projeto mecânico da junta telescópica resultou em um mecanismo com dimensões externas que ocasionam colisões com as superfícies do canal de condução, conforme pode ser observado na Fig.8. Esse fato inviabiliza sua utilização.



**Figura 8** – Manipulador com junta telescópica no interior do canal de condução

## **5.3 – Estrutura articulada com trilho**

A fixação do trilho pode ser feita na superfície de sucção e de ataque do canal de condução do rotor. A Fig.9 mostra o trilho fixado através de ventosas na superfície de ataque.



**Figura 9** -Trilho fixado na superfície de ataque da turbina hidráulica

A experimentação mostrou que essa alternativa não exige maiores cuidados na escolha do local de fixação do trilho, facilitando seu emprego “in loco”.

A utilização do trilho para a realização do movimento ao longo do comprimento da região erodida adequa a estrutura cinemática à forma da erosão. Com isso, o movimento a ser realizado pelos elos é menor, fazendo com que eles possam ter menores dimensões. Isso faz com que a possibilidade de colisões seja sensivelmente reduzida.

Uma vantagem adicional é que com sua fixação à uma das superfícies do canal, o trilho (flexível) assume a forma curva do volume de trabalho, facilitando a movimentação da tocha ao longo do região cavitada.

Devido a esses fatores essa é a estrutura cinemática escolhida.

## **6. CONCLUSÃO**

Este artigo descreve a concepção cinemática de um manipulador a ser empregado na recuperação de regiões erodidas pela cavitação em turbinas hidráulicas de grande porte. Apresenta-se também uma metodologia desenvolvida para proporcionar a análise cinemática e a verificação de colisões em um manipulador cujos movimentos ocorrem em um volume de trabalho restrito. Essa metodologia combina simulações numéricas com simulações em maquete. Essa combinação mostrou-se adequada, e possibilitou a definição da estrutura cinemática do manipulador.

## **7. REFERÊNCIAS**

- Sciavicco, L., Siciliano, B., 1996, “Modeling and Control of Robot Manipulators”, McGraw-Hill, New York.
- Fu, K. S., Gonzalez, R.C. , Lee, C.S.G, 1987, “Robotics, Control, Sensing, Vision, and Intelligence”, McGraw-Hill, Singapore.
- Craig, J.J. 1986, “Introduction to Robotics Mechanics & Control”, Addison-Wesley Publishing Company
- Albertazzi, A., 1999, “Relatório Projeto Roboturb” . Florianópolis.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desse trabalho contou com o apoio financeiro da FINEP e da COPEL e com a colaboração técnico-científica dos laboratórios de Metrologia e de Soldagem do departamento de engenharia mecânica da UFSC, e do Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento (LACTEC) da COPEL. Os autores agradecem todas as contribuições.