

# **Estudo do conceito para metodologia e revestimento robótico de turbinas *in situ* - EMMA \***

**Renan S. Freitas \* Gabriel Alcantara C. S. \* Eduardo Elael M. S. \*  
Estevão Fróes \* Ramon R. Costa \***

\*Departamento de Engenharia Elétrica, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro,  
Brasil

## **1. INTRODUÇÃO**

O Brasil é um dos países mais ricos do mundo em recursos hídricos, facilitando o desenvolvimento e investimento em geração de energia a partir desse recurso. A energia hidráulica é a mais dominante em todo o país, e o Brasil é o segundo país com maior consumo de energia hidrelétrica no mundo com capacidade instalada de 70.000 MW, 433 usinas hidrelétricas em operação.

Estima-se que a reforma e melhoria das grandes usinas construídas resultariam em um aumento potencial de 32.000 MW (Goldemberg and Lucon, 2007), número que pode ser alcançado, em grande parte, pela manutenção das turbinas geradoras da energia elétrica. As turbinas estão constantemente expostas aos fenômenos de abrasão e cavitação, os quais determinam sua vida útil.

O fenômeno de cavitação está muito bem estudado e detalhado em Escaler et al. (2006), onde são apresentadas seus tipos, ocorrências e os efeitos nas diferentes turbinas. Esse fenômeno físico pode causar erosões na máquina hidráulica (figura 1), gerando instabilidade de fluxo de água, vibrações excessivas e redução da eficiência da turbina.



Figura 1. Ilustração de uma pá de turbina que sofreu erosão por cavitação.

\* This work is supported by ESBR under contract COPPETEC JIRAU 09/15 6631-0003/2015 (ANEEL R&D program).

A fim de reduzir o desgaste da pá contra cavitação ou abrasão e aumentar a sua vida útil, utiliza-se a técnica de revestimento por asperção térmica, que pode ser comparada com uma tinta que protege à exposição com o ambiente. O procedimento é realizado antes da instalação das pás na turbina por um robô, pois exige alta precisão e velocidade, além de expelir substâncias nocivas à saúde. Apesar de suficiente para a proteção da pá, o revestimento também tem vida útil e precisa ser refeito de tempos em tempos para garantir a proteção da pá contra os fenômenos físicos.

No caso específico da usina hidrelétrica de Jirau, construída no rio Madeira, os fenômenos de abrasão são intensos devido ao grande número de partículas que o rio carrega diariamente, reduzindo ainda mais a vida útil do revestimento. Portanto, há a necessidade de manutenção regular, o que, na situação atual, exige paralização da máquina, desmontagem da turbina, posicionamento de cada pá na área designada ao revestimento, aplicação do revestimento, montagem da turbina e recalibração. O tempo de paralização para a realização de toda a manutenção pode levar de um a dois meses, significando uma grande perda na geração de energia.

A primeira etapa do projeto EMMA, pesquisa e desenvolvimento realizados pela Fundação COPPETEC, em parceria com a empresa Rijeza, ANEEL e ESBR, é um estudo de viabilidade técnica de um sistema robótico para realizar revestimento por aspersão térmica de turbinas *in situ*, ou seja, dentro do ambiente da turbina (aro câmara). O projeto tem como objetivo reduzir significativamente o tempo de manutenção do revestimento por ser realizado no ambiente confinado da turbina e, portanto, não havendo necessidade de sua desmontagem.

Este documento está dividido da seguinte forma: a seção 2 descreve detalhadamente o problema, contextualiza o leitor no ambiente da usina de Jirau e descreve as possíveis tarefas do robô; a seção 3 faz um levantamento do estado da arte; a seção 4 descreve os projetos conceituais para o robô; e a seção 5 conclui e descreve os próximos passos para o projeto EMMA.

## **2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

O fenômeno de cavitação e abrasão em hidroturbinas provoca desgaste superficial por erosão e alteração do perfil hidráulico da pá, gerando redução da eficiência

na geração de energia. Uma solução preventiva é o revestimento por metalização das pás, o qual aumenta a eficiência na geração de energia por gerar uma estrutura mais lamelar, e fornece maior resistência a desgastes. No caso da usina hidrelétrica de Jirau, o revestimento das pás é realizado antes da montagem e instalação da turbina, porém devido ao grande número de partículas e sedimentos que o rio madeira carrega e à cavitação, o revestimento deve ser aplicado novamente em intervalos curtos de tempo (Santa et al., 2009). A desmontagem da turbina, aplicação de novo revestimento nas pás e remontagem são um processo muito custoso e deverá ser feito regularmente. Portanto, há a necessidade de o procedimento ser executado dentro do aro câmara, *in situ*, onde as pás são instaladas.

A cavitação é a formação de cavidades de vapor (bolhas), em um líquido, devido a quedas repentinas de pressão. Quando o líquido é sujeito ao aumento de pressão, as bolhas implodem, ocasionando ondas de choque (Brennen, 2013).

Em hidroturbinas, o fenômeno de cavitação é comum próximo às pás ou na saída da turbina. O líquido apresenta a combinação de componentes cinético, potencial gravitacional e energia de fluxo. O componente cinético é em virtude do fluxo da água (velocidade), o potencial tem relação com a altitude, e a energia de fluxo é energia que um fluido contém devido à pressão que possui. De acordo com o princípio de Bernoulli, o princípio da conservação para os fluidos, implica-se que, para uma mesma altitude, o aumento da componente cinética acarreta em uma diminuição da pressão, ocorrendo cavitação.

Quando há cavitação, a formação de bolhas grandes altera as características do escoamento, ocasionando oscilações ou vibrações na máquina que, por consequência, prejudicam o rendimento do sistema hidráulico. As bolhas pequenas, ao colapsar, geram ondas de choque de alta frequência, podendo provocar erosões se próximo à superfície metálica.

Além da cavitação, como a água atravessa o aro câmara em grande velocidade, o acúmulo de sedimentos irá provocar desgaste abrasivo, isto é, perda de material pela passagem de partículas rígidas.

Nesta seção, são apresentadas as formas de reduzir os danos da cavitação pela tecnologia de revestimento por metalização, a contextualização do problema no caso da usina hidrelétrica de Jirau e as tarefas que um sistema robótico deve realizar para solucionar o problema.

## 2.1 Descrição do processo HVOF

O revestimento por aspersão térmica (ou metalização) é um processo em que partículas aquecidas são pulverizadas em uma superfície a fim de melhorar ou restaurar suas propriedades e dimensões. O revestimento estende a vida útil do material, aumentando显著mente a sua resistência à erosão e corrosão. Os diferentes tipos de metalização são: por chama, arco elétrico, detonação, chama de alta velocidade (HVOF), plasma, a frio e a quente.

Um sistema de metalização é composto por: uma pistola de aspersão, responsável pelo derretimento e aceleração das partículas a serem depositadas na superfície; um alimentador, que fornece o pó (partículas) através de tubos; um fornecedor do material de combustão; um robô para manipular a pistola; uma fonte de alimentação elétrica para a pistola; um console de controle para o sistema.

No caso específico das pás (aço inox 420) das turbinas da usina hidrelétrica de Jirau, antes da montagem da turbina, a metalização tipo HVOF é realizada em ambos os lados da pá pela empresa Rijeza com um manipulador industrial de 150 kg de carga máxima, permitindo controle de vibrações com boa margem de segurança, já que a massa do sistema pode chegar a 10 kg (cabos e pistola). O tempo mínimo do processo é de 6 horas por lado da pá.

O HVOF consiste em alimentar, numa câmara de combustão, o material de revestimento (carboneto de tungstênio), uma mistura gasosa do combustível (propano) e oxigênio. De acordo com os dados fornecidos pela empresa Rijeza, a pistola de 8 Kg projeta uma chama de 3000°C, que pulveriza as partículas com velocidade de 700 a 1000 m/s, gerando uma força de recuo de 15 N.

O manipulador robótico deve possuir precisão de 5 mm, a pistola no efetuador deve permanecer a uma distância que varia entre 230 e 240 mm, e ângulo de  $90^\circ \pm 60^\circ$ , em relação à superfície. O manipulador deve ser capaz de mover a pistola a velocidade constante de 40 m/min, e não pode permanecer uma posição da pá por muito tempo (parada), pois há acúmulo de material, deformando a superfície. Trocas de direção ou sentido na movimentação do manipulador são considerados como parada, logo as trocas deverão ser realizadas em áreas exteriores à superfície da pá ou chapas de sacrifício são utilizadas.

Placas de sacrifício, ou mascaramento, são chapas colocadas em regiões onde as peças não podem ser jateadas ou revestidas. Geralmente uma chapa de qualquer tipo de aço pode ser utilizada, pois a chama não fica parada sobre ela por um longo período, não aquecendo-a o suficiente para danificá-la. Quando a pistola permanece, em funcionamento, a chama é apontada para algum lugar onde não tenha obstáculos.

Em relação às condições de operação: o espaço da aplicação HVOF é confinado, com excesso (100 a 140 dB), gases nocivos e com risco de explosão podem ser exalados; a pá pode atingir temperaturas de até 110°C; as condições de umidade e temperatura devem ser ideais para o processo; e há perda de 40% das partículas pulverizadas (Wu et al., 2006), que são espalhadas pelo ambiente. Portanto, algumas medidas devem ser tomadas para a execução do processo: a operação deve ser remota, não há presença de pessoas *in loco*; os gases presentes e umidade/temperatura devem ser constantemente monitorados; o robô manipulador é selado; as partículas desperdiçadas devem ser removidas (limpeza); e o desligamento do sistema deve ser acompanhado por corte de gás.

A qualidade do revestimento é geralmente avaliada por um instrumento que realiza a medida de porosidade, oxidação, dureza e rugosidade da superfície. O processo é realizado manualmente, de maneira rápida e fácil, por um operador.

A tabela 1 resume as restrições e especificações do projeto:

Componente	Dado
Massa da pistola HVOF	8 Kg
Massa dos cabos HVOF	12 Kg
Tempo HVOF por pá	6 horas
Temperatura da chama HVOF	3000°C
Recuo da pistola	15 N
Precisão do manipulador	5 mm
Distância pistola-pá	230-240 mm
Ângulo pistola-pá	30°-90°
Velocidade do manipulador	40 m/s
Ruído HVOF	100 a 140 dB
Temperatura da pá	110°C

TABELA 1: Dados principais do processo HVOF

## 2.2 Descrição dos requisitos de operação de HVOF

O processo de metalização de turbinas hidrelétricas tem alguns pré-requisitos que devem ser respeitados para uma correta aplicação e fixação da camada de material durante o revestimento. Essa subseção descreverá as etapas necessárias de preparação da superfície a fim de se assegurar a manutenção da qualidade dos resultados e do perfil hidráulico da pá.

**2.2.1. Jateamento da superfície da pá** O processo de metalização sobreposto a uma superfície que já possui uma camada protetora desgastada não apresenta um resultado tão satisfatório se comparado com o processo realizado em uma superfície crua. Por esse motivo é recomendado que seja realizado um processo de jateamento abrasivo.

O jateamento consiste em direcionar um fluxo de material abrasivo na superfície do material a fim de se erodir a mesma e retirar o material depositado na camada superficial. Outra característica desse processo é a capacidade de aumentar a rugosidade da superfície e, assim, aumentar o poder de adesão da nova camada a ser metalizada.

O processo de jateamento para o tratamento específico da superfície das pás da turbina utiliza óxido de alumínio como material abrasivo e pode ser realizado por um operador. A infraestrutura necessária para esse processo é uma fonte de ar comprimido, geralmente proveniente de um compressor de ar, para propulsionar o particulado que forma o jato abrasivo.

**2.2.2. Reparo de danos existentes** Danos existentes na superfície da pá ou em sua estrutura podem reduzir a sua eficiência e até mesmo a própria integridade da pá, prejudicando a segurança da operação. O processo de metalização não tem a capacidade de reparar danos severos na superfície ou danos estruturais como rachaduras. A inspeção para procura desses defeitos

deve ser realizada antes da realização do processo de metalização, uma vez que a superfície jateada, ou seja, em metal cru sem camada de proteção, facilita a visualização de danos.

Os danos causados por cavitação, como explicado na seção 2, pode alterar o perfil hidráulico da pá e deve ser reparado sempre que possível. O procedimento de reparo varia de acordo com a severidade dos danos causados. À medida que a profundidade das cavidades geradas na pá e a extensão dos danos vão aumentando, medidas mais extremas se tornam necessárias e, por isso, a estratégia de reparo para esse tipo de dano deve estar alinhada com o tipo de processo que se deseja utilizar. Inspeções e reparos mais frequentes significam processos mais simples, enquanto que reparos mais espaçados podem resultar até na inutilização da pá. Os procedimentos mais utilizados para o reparo de danos causados por cavitação são:

- Reparo com materiais não fundidos à superfície;
- Reparo por solda;
- Reparo por solda e placa sólida.

**2.2.2.1. Reparo com materiais não fundidos à superfície** Para pequenos danos, é possível utilizar processos nos quais não é necessário fundir o material depositado para preenchimentos das cavidades ao material da superfície metálica da pá. Os processos e materiais utilizados, usualmente na indústria, são:

- Epoxy;
- Cerâmica;
- Revestimento por metalização;
- Neoprene;
- Urethane.

Vale ressaltar que a solução proposta para a metalização de uma camada protetora para se evitar os danos causados pela cavitação também poderia ser utilizado para preencher danos passados, desde que respeitem o limite de espessura para o tipo de processo utilizado

**2.2.2.2. Reparo por solda** O preenchimento dos danos causados devido à cavitação por solda é o procedimento mais comum, pois possibilita uma maior deposição de material e não obriga a realização de reparos com uma frequência elevada. Esse processo consiste na deposição de solda em camadas, até o completo preenchimento. A superfície deve ser, então, esmerilhada até entrar em conformidade com as medidas padrão de qualidade para o perfil hidráulico da pá a ser reparada. Essa tarefa é normalmente realizada por mão de obra altamente qualificada e existe, também, na literatura a presença de soluções automatizadas, como os robôs Roboturb e Scompi (Bonacorso et al., 2006; Bibuli et al., 2007)

**2.2.2.3. Reparo por solda e placa sólida** Para casos de danos mais severos, pode ser necessária a utilização de placas para o preenchimento de grandes extensões. O processo de fixação das placas é realizado por solda, assim como o preenchimento do volume restante. O

processo de solda, esmerilhamento e verificação é comum ao procedimento padrão utilizando somente solda.

### 2.3 Contextualização do Ambiente

A usina hidrelétrica de Jirau é do tipo fio d'água, na qual são utilizadas turbinas do tipo bulbo de eixo horizontal. Como a geração de energia depende da altura da queda d'água e da vazão do rio, as turbinas do tipo bulbo utilizam uma grande vazão de água para produzirem energia elétrica suficiente. A figura 2 e a tabela 2 ilustram uma turbina do tipo bulbo e os grandes dutos necessários para comportar o grande volume de água que passa através da turbina.

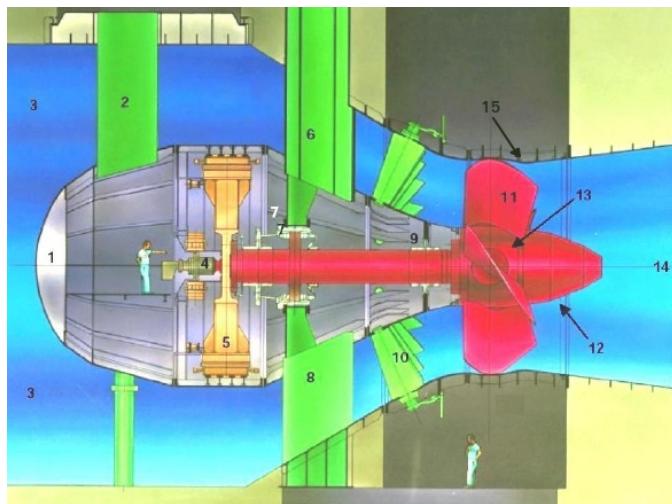


Figura 2. Ilustração de uma turbina do tipo bulbo.

Número	Componente
1	Nariz do bulbo
2	Tubo de acesso ao gerador
3	Câmara de adução
4	Cabeçote Kaplan
5	Gerador Síncrono
6 e 8	Estrutura de sustentação
6	Tubo de acesso à turbina
7 e 9	Mancais Combinado e Guia
10	Distribuidor
11	Pás do Rotor
12	Cone ou Ogiva
13	Cubo
14	Tubo de sucção/descarga
15	Aro Câmara

TABELA 2: Componentes principais de uma turbina tipo bulbo

Atualmente, caso seja necessário algum reparo ou inspeção na turbina, é necessário que se interrompa o fluxo de água e que toda a água em seu interior seja drenada. Para manutenção do rotor, existe uma escotilha de acesso de diâmetro limitado. Entretanto, caso deseje-se realizar a metalização de pás já instaladas, utilizando-se os processos atuais, é necessária a retirada de todo o aro câmara, desmontagem completa do rotor e logística de transporte das pás até o local onde a metalização será realizada. Essa operação, caso necessite

ser realizada, demandaria a mobilização de diversas equipes de manutenção, operação de pórtico rolante e transporte, além de impossibilitar a utilização da turbina durante várias semanas. No contexto da solução proposta, os pontos de interesse da turbina são:

- Hélice e pás;
- Aro Câmara e regiões adjacentes;
- Escotilhas de acesso;
- Tubo de Sucção;
- Infraestrutura disponível

**2.3.1. Hélice e pás** O rotor ou hélice da turbina é constituído do cubo, as pás e o cone. Nas turbinas da usina de Jirau, cada pá mede, aproximadamente, 2,5m de altura e 3m de largura. A partir do interior da turbina, todas as superfícies da pá são alcançáveis, com exceção da borda e do lip da pá. O único ponto de acesso à essa região é por meio da escotilha superior de acesso. A figura 3 exemplifica uma pá do rotor presente na usina de Jirau recém metalizada no galpão da Rijeza.



Figura 3. Pá do rotor recém metalizada.

A angulação de cada pá em relação ao fluxo d'água pode ser alterada em  $29^\circ$ ,  $14.5^\circ$  para cada lado a partir da posição inicial, não havendo sobreposição entre as pás, como ilustrado na figura 4. Essa angulação pode ser explorada para otimizar o espaço de trabalho necessário para o processamento da pá e também influencia o acesso à região entre o distribuidor e o rotor, uma vez que não existe acesso pela montante da turbina. Entretanto, vale observar que esta angulação não pode ser alterada manualmente e só pode ser realizada uma vez, antes do desligamento da turbina. A posição do rotor também pode ser manualmente alterada, possibilitando que o mesmo seja girado em ambas as direções e sem limite de revoluções. Entretanto, essa operação é uma tarefa imprecisa e envolve um certo risco às pessoas que a realizam. Sendo assim, a solução proposta deve otimizar o número de rotações necessárias para o processamento de todas as pás.

**2.3.2. Aro Câmara e regiões adjacentes** O aro câmara, assim como o a região próxima ao distribuidor e também ao tubo de sucção possuem superfícies metálicas. Essa característica possibilita a exploração de soluções de fixação magnética.

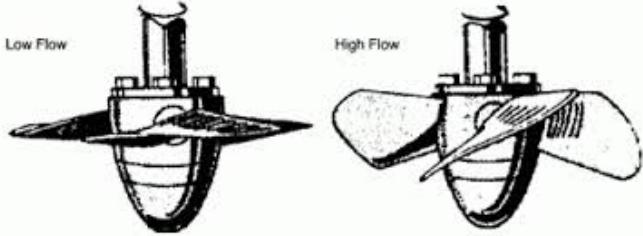


Figura 4. Exemplo de limites de rotação das pás do rotor.

Somente a região compreendida pelo aro câmara é plana e tendo como agravante a presença do distribuidor na região à montante ao rotor. É necessário que a inclinação presente nessas superfícies seja contabilizada e uma solução eficiente de apoio ou plano elevado seja desenvolvida caso haja necessidade de fixação de alguma parte do sistema. Atualmente todo o trabalho é realizado por meio da montagem de andaimes ancorados por cordas. A figura 5 ilustra uma estrutura utilizada no modo de inspeção e manutenção atuais.



Figura 5. Andaime montado no interior da turbina e ancorado por cordas

**2.3.3. Escotilhas de acesso** O acesso à turbina se dá por duas escotilhas, uma inferior, localizada no ínicio do tubo de sucção próxima ao aro câmara e outra superior, localizada na parte superior do aro câmara.

A escotilha inferior é o acesso utilizado para a entrada de pessoas na turbina e todo material utilizado para reparos é transportado através dessa escotilha. Na usina de Jirau existem dois tipos de escotilha de acesso inferior, sendo a menor delas possuindo 80cm de diâmetro.

A escotilha superior é utilizada, principalmente, para a inspeção visual do estado dos Lips das pás. O diâmetro do acesso superior é de aproximadamente 35.7cm, limitando as dimensões dos equipamentos que podem ser transportados através da escotilha. As figuras 6 e 7 ilustram o acesso à escotilha superior pelo exterior ao aro câmara e a visão pelo interior da turbina, respectivamente.

**2.3.4. Tubo de sucção** Ao final do tubo de descarga está localizado o vão dos stoplogs de jusante ou da comporta vagão e, em seguida, o leito do rio. Caso os stoplogs não



Figura 6. Vista da escotilha superior pelo exterior do aro câmara



Figura 7. Vista da escotilha superior pelo interior do aro câmara

estejam inseridos, existe um vão de, pelo menos, 10 m de largura. Porém, não é válida a utilização deste vão como acesso à turbina, pois há grande fluxo de água devido à abertura do distribuidor. O distribuidor não é fechado imediatamente por questões ambientais, já que este é o escoamento de peixes.



Figura 8. Abertura do tubo de sucção para o leito do rio, em fase de construção.

**2.3.5. Infraestrutura disponível** É importante ressaltar a infraestrutura disponível para o desenvolvimento

da solução. Após secar a turbina, é possível a disponibilização de energia elétrica e ar comprimido em seu interior, ambos importantes para o processo de metalização. Outro fator importante é a presença de um pórtico rolante que tem acesso até o andar diretamente inferior ao aro câmara, posicionando todo o equipamento necessário nas proximidades da escotilha de acesso inferior. É possível também o acesso direto, por meio de pórtico, à escotilha superior.

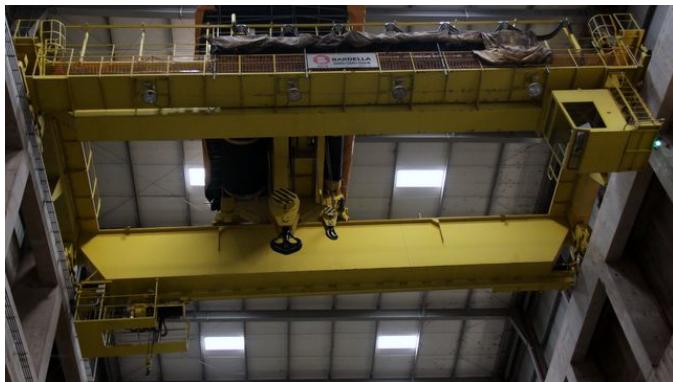


Figura 9. Pórtico rolante com acesso ao exterior do aro câmara

O ambiente pode ser resumidamente caracterizado pelas dimensões das pás, elemento a ser processado; características do aro câmara, estrutura que limita o espaço de trabalho do robô; e pelos acessos nos quais o sistema terá que utilizar.

- **Pás do rotor** - Material aço inox 420. Dimensões 2.5 x 2.5 m de superfície;
- **Aro Câmara** - estrutura cilíndrica com raio de 3.95 m e superfície metálica;
- **Acessos:**
  - Escotilha superior - 35 cm de diâmetro;
  - Escotilha inferior - 80 cm de diâmetro;
  - Tubo de descarga - 20 x 20 m, porém acessado pelo rio.

#### 2.4 Descrição das tarefas do robô

Esta subseção descreve as tarefas básicas do robô para o revestimento de turbinas *in situ*. Em linhas gerais, o robô a ser desenvolvido deve ser capaz de realizar a tarefa de revestimento tal qual seria feita caso a pá não estivesse instalada na turbina e de uma maneira autônoma. A pá, antes de ser submetida ao processo de revestimento, deve estar em conformidade com o gabarito, perfil hidráulico de uma pá intacta. Portanto, uma tarefa do robô é realizar o mapeamento do perfil hidráulico, construir um modelo 3D e analisar imperfeições.

Em caso de deformações, causados por cavitação e abrasão, estas precisam ser removidas manualmente ou de forma automatizada, possivelmente por soldagem. A tarefa de soldagem pode ser realizada por operador, manualmente, por não possuir todas as restrições da tarefa de revestimento (velocidade, precisão, carga e etc), porém o ambiente pode dificultar a operação de forma que a execução por um robô seja indispensável.

Após as pás estarem de acordo com o gabarito, faz-se a identificação do desgaste do revestimento, medindo sua espessura em pontos específicos sobre a superfície da pá. Manualmente esse processo é realizado eficientemente em 10 min, justificando a não necessidade de esta ser uma tarefa do robô.

Em caso de necessidade de aplicação de novo revestimento, é necessária a remoção do revestimento antigo por jateamento, a fim de deixar a superfície rugosa e aumentar sua aderência. A tarefa de jateamento é atualmente realizada manualmente, mas também pode ser realizada pelo robô. Como ambos os lados da pá são revestidos, o jateamento deve ser realizado em ambos os lados. Vale ressaltar que, em teoria, pode-se aplicar revestimento por metalização sem retirar o último revestimento, porém esse processo ainda se encontra em fase de estudos na Rijeza.

Por fim, o robô deverá aplicar o revestimento como forma de prevenir o dano causado pelos fenômenos abrasivos. O robô projetado para fazer o revestimento precisa preencher todos os requisitos discutidos na subseção 2.1 e ser adaptável ao ambiente, cujos as restrições são discutidos na subseção 2.3.

Das tarefas a serem realizadas, são destacadas as seguintes: Tarefas que podem ser executadas manualmente:

- Inspeção e análise de danos na pá, tanto para reparo quanto para revestimento.
- Reparo.
- Montagem do sistema.
- Jateamento da superfície.

Tarefas que poderão ser executadas pelo robô:

- Modelar o perfil hidráulico.
- Calibração.
- Jateamento.
- Reparo (soldagem e esmerilhamento).
- Revestimento por metalização.

### 3. ESTADO DA ARTE

O estudo do estado da arte de robôs para a realização de HVOF em pás de turbinas hidráulicas contempla os sistemas que atendem a alguns dos requisitos: operar em ambientes de alta periculosidade; capacidade de carga para os dispositivos HVOF; manipular a pistola HVOF com velocidade de  $0.67\text{m/s}$ ; precisão de 5mm; ter área de trabalho de 2.5 m x 2.5 m; e operar sob superfícies 3D de geometria complexa. As soluções foram divididas em subseções de acordo com as tecnologias de fixação dos robôs.

#### 3.1 Robôs sobre trilhos

Na indústria, a automatização de processos de metalização, é normalmente realizada com a utilização de manipuladores robóticos, pois oferece a versatilidade de tarefas e espaço de trabalho necessários para esse tipo de aplicação. Entretanto, um sistema composto por um braço robótico capaz de operar em toda a extensão da superfície da pá da turbina hidrelétrica não é compacto, nem móvel o suficiente para ser instalado e desinstalado para a operação de manutenção *in-situ*.

A introdução de uma junta prismática acoplada a um trilho é uma estratégia para reduzir o tamanho e o peso de um manipulador robótico. Assim, é possível estender o espaço de trabalho do robô, sem adicionar peso ao manipulador, uma vez que o trilho pode usar as estruturas presentes no ambiente como apoio.

Na literatura foram encontradas duas soluções para aplicações de manutenção e inspeção, como solda, específicas para o contexto de turbinas hidráulicas. As aplicações diferem, principalmente, na estratégia de fixação do sistema de trilhos. O Roboturb (Bonacorso et al., 2006) realiza a fixação diretamente na pá do rotor, enquanto o robô Scompi (Bibuli et al., 2007) utiliza um trilho fixado em estruturas adjacentes à pá ou peça a ser reparada.

O Roboturb consiste em um manipulador robótico com seis juntas de revolução e uma junta prismática acoplada a um trilho flexível, como pode ser observado na figura 10, utilizado para o preenchimento de cavidades geradas por cavitacão. O trilho pode ser conformado e, então, fixado à superfície da pá por meio de um sistema passivo de ventosas ou ímãs. O robô tem a possibilidade de utilizar dois efetuadores distintos, o primeiro consiste em um sensor ótico para inspeção do estado de erosão da pá e o segundo consiste em uma ferramenta de solda do tipo tocha plasma PWH-4A com alimentador automático de arame, responsável pelo depósito de solda para o preenchimento das cavidades identificadas pelo sistema.

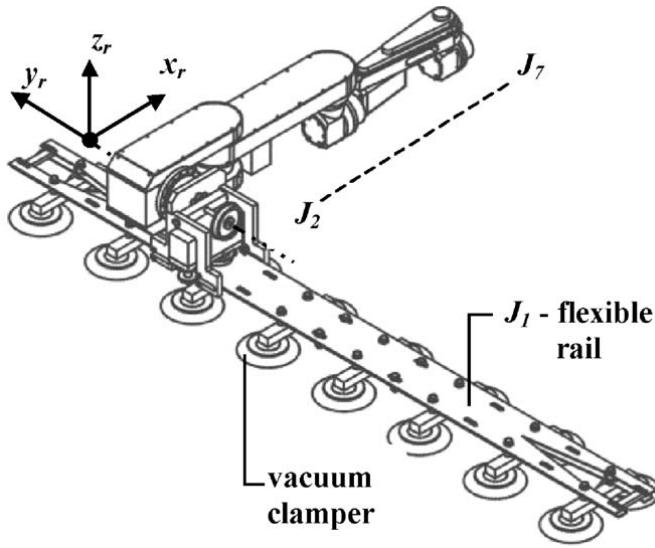


Figura 10. Roboturb - Manipulador robótico sobre trilho flexível

Por sua vez, o robô Scompi, fig 11, é um manipulador multipropósito projetado para realizar reparos em turbinas do tipo *Francis*, como solda e esmerilhamento das pás. O sistema possui seis graus de liberdade, sendo constituído por um braço robótico com cinco juntas de revolução, e o último grau de liberdade proveniente de uma junta prismática que percorre um sistema de trilhos retos ou curvos que são projetados para cada aplicação especificamente.

Sistemas baseados em trilhos tem como maior benefício a redução do tamanho e, consequentemente, do peso do

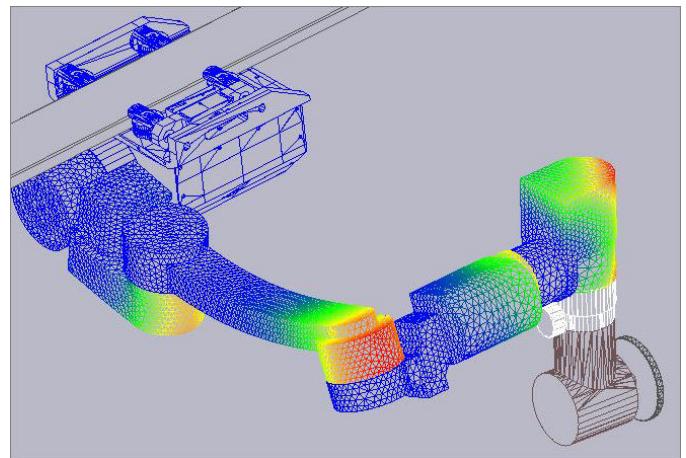


Figura 11. SCOMPI - Manipulador robótico sobre trilhos rígidos

manipulador necessário para a execução de tarefas em um espaço de trabalho que englobe toda a superfície da pá. Essa redução proporciona facilidade de transporte do robô até o interior da turbina e também possibilita o projeto de manipuladores que tenham a rigidez necessária para a realização das tarefas desejadas.

Manipuladores robóticos fixos, rígidos o suficiente para aguentar as forças intrínsecas ao processo de metalização e com espaço de trabalho necessário para trabalhar em toda a extensão da superfície da pá seriam muito pesados. Entretanto, sistemas baseados em trilhos com fixação na própria pá do rotor, necessitam que o trilho seja movido caso se deseje que toda a superfície da pá sofra manutenção, uma vez que a área em que o trilho está apoiado não pertence ao espaço de trabalho do robô. Em adição, sistemas com fixação de trilhos nas estruturas adjacentes à pá devem atentar as condições para a instalação disposta pelo ambiente para equilibrar a relação de custo benefício entre facilidade de instalação/remoção do trilho e a robustez.

#### Vantagens:

- Redução do tamanho necessário do manipulador;
- Redução do peso do manipulador

#### Desvantagens:

- Necessidade de instalação e remoção dos trilhos;
- Necessidade de movimentação dos trilhos (para trilhos fixados diretamente nas pá)

### 3.2 Robôs escaladores

Robôs escaladores são sistemas capazes de sustentar seu próprio peso contra a gravidade, movendo-se em simples ou complexas estruturas geométricas, como paredes, tetos e telhados, palhetas de turbinas e plantas nucleares. Essa classe de robôs oferece eficiência operacional em ambientes de alta periculosidade, sendo utilizados visando saúde e segurança dos trabalhadores, como em inspeção e limpeza de arranha-céus, diagnóstico de tanques de armazenamento em plantas nucleares, solda e manutenção de cascos de navios e palhetas de turbinas (Armada et al., 2003).

Os grandes desafios nos projetos de sistemas escaladores são mobilidade e aderência, além de consumo de energia, capacidade de carga e peso. Em J. Maempel and Witte (2009) e B. Chu and Hong (2010), os robôs escaladores são divididos em tipos de locomoção: pernas; como andador; utilizando segmentos deslizantes; rodas; esteiras; avanço pendurado por braços; por cabos; e biomimética. E categorias de adesão: sucção ou pneumática; magnética; eletrostática; química; preensão; e híbrida.

No caso específico deste estudo da arte, destacam-se os robôs escaladores com as seguintes aplicações:

- *Navios e turbinas*: RRX3 para soldagem (J. Kim and Kang, 2004), *Climbing Robot for Grit Blasting* para limpeza (A. Faina and Fernandez, 2009) e ICM Robot para inspeção (Machines, 2015);
- *Industrial*: ROMA II (C. Balaguer and Abderrahim, 2002) e CROMSCI (C. Hillenbrand and Berns, 2008), ambos para inspeção;
- *Planta petroquímica*: TRIPILLAR (Rochat et al., 2009) para inspeção.

O RRX3 (figura 12), Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, é um robô para a soldagem de casco de navios. Possui adesão por preensão, locomoção transversal utilizando segmentos deslizantes e locomoção longitudinal por rodas. Possui um manipulador de 1.5 m com três juntas prismáticas e três juntas de revolução (3P3R) para a operação de soldagem.

As características principais do robô são: base e manipulador com capacidades de carga de 120 kg e 5 kg, respectivamente; manipulador com precisão milimétrica e efetuador de baixa velocidade; robustez para operar em ambiente de alta periculosidade; opera instrumento de solda; e locomoção transversal é restrita à aplicação.

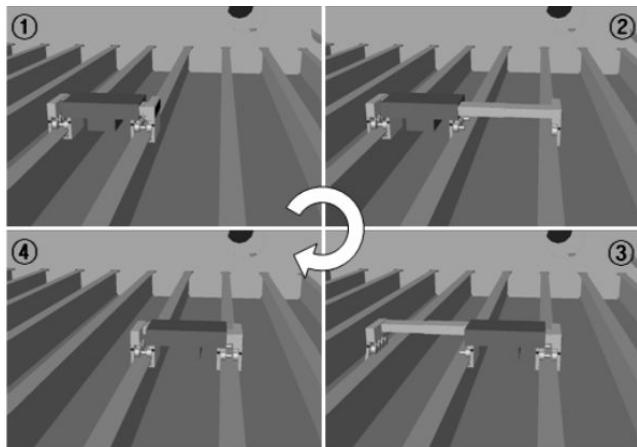


Figura 12. Translação horizontal do robô RRX3.

O *Climbing robot for Grit Blasting* (figura 13), University of Coruna, é um robô para jateamento abrasivo em navios. O robô utiliza duas plataformas deslizantes com sistema de adesão por ímã magnético. Os módulos apresentam movimentação relativa entre si e pode rotar para compensar as curvaturas do casco do navio ou desviar de objetos.

As características principais do robô são: base com capacidade de carga de sistema abrasivo semelhante a

HVOF; base com locomoção de precisão milimétrica; locomoção ampla, mas não aplicável a estruturas complexas; e não possui manipulador, sendo necessário percorrer todo o casco.



Figura 13. Climbing robot for Grit Blasting

*The Climber* (figura 14), ICM Robotics, é um robô para inspeção de turbinas eólicas, remoção de revestimento, limpeza de superfície, e aplicação de revestimento. Possui adesão pneumática (sucção) e locomoção por esteiras.

As características principais do robô são: base com capacidade de carga de 25 kg; base com locomoção de precisão milimétrica; manipulador modular pode ser acoplado à base; manipulador de dimensão reduzida e baixa velocidade; e locomoção apresenta restrição a algumas curvaturas acentuadas.

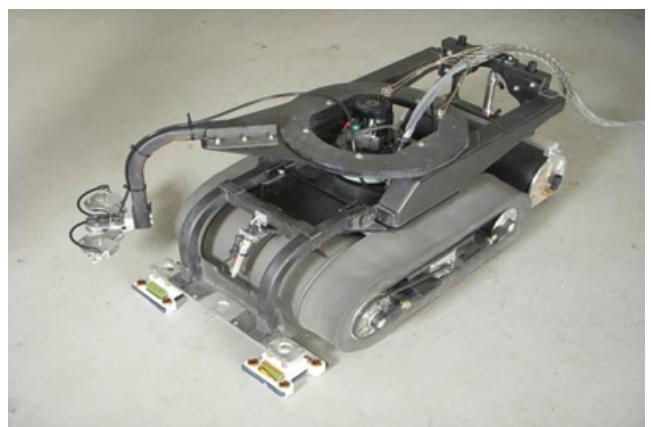


Figura 14. Robô The Climber da ICM Robotics

O ROMA II (figura 15), Universidade Carlos II de Madrid, é um robô para inspeção de ambientes complexos. A sua tecnologia de adesão é pneumática (sucção) e locomove-se como uma lagarta (biomimética). Sua movimentação e planejamento de trajetória são realizados de maneira ótima de forma a garantir estabilidade e evitar obstáculos.

As características principais do robô são: base com grande capacidade de carga; base com locomoção de precisão

milimétrica; não possui manipulador; locomoção em ambientes de grande complexidade.

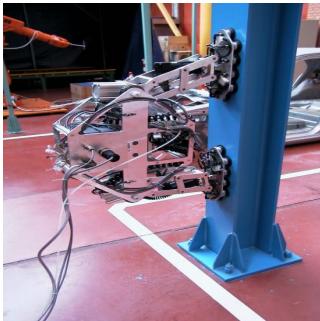


Figura 15. ROMA II.

CROMSCI (figura 16), Kaiserslautern University of Technology, é um robô autônomo para inspeção de grandes paredes de concreto, como pilares de pontes, barragens. Seu sistema de adesão é composto por sete câmaras de vácuo (sucção), com um sistema de controle por válvulas e sensores de pressão para reagir rapidamente a condições adversas. Locomove-se com rodas omnidirecionais para locomoção.

As características principais do robô são: base com pouca capacidade de carga; base com locomoção de precisão milimétrica; não possui manipulador; e apresenta baixa velocidade.



Figura 16. Robô CROMSCI.

TRIPILLAR (figura 17), École polytechnique fédérale de Lausanne, é um robô escalador de pequeno porte (96 x 46 x 64 mm) desenvolvido para a inspeção de plantas petroquímicas. Utiliza um sistema como pernas de lagarta magnéticas em um formato triangular. Locomove-se por esteiras.

As características principais do robô são: base com pouca capacidade de carga; base com locomoção de precisão milimétrica; sistema robusto a aplicações em ambientes de alta periculosidade; sistema de controle simples; robô de pequenas dimensões; não possui manipulador;

sistema ainda não testado em estruturas geométricas complexas.

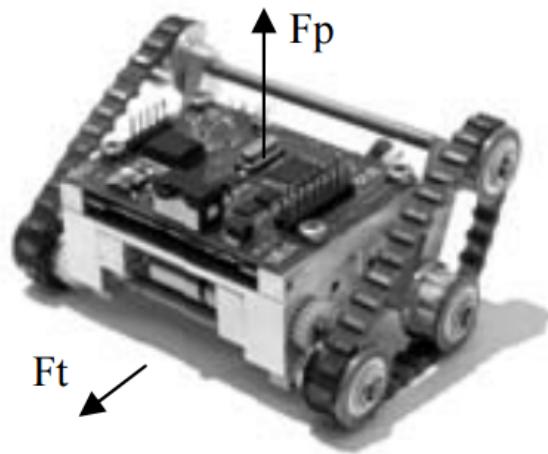


Figura 17. Robô TRIPILLAR.

Os robôs escaladores são utilizados em diversas aplicações e possuem diferentes soluções de aderência e locomoção, como foi exposto nesta subseção. Não há, até o momento, um robô escalador que possui todas as características exigidas para a tarefa de HVOF em pás de turbinas, porém a adaptação de alguns desses sistemas, como *The Climber* da ICM Robotic, pode gerar soluções completas.

As vantagens e desvantagens para solução de robôs escaladores são:

#### Vantagens:

- Facilidade de instalação;
- Manipulador de pequenas dimensões, já que o robô se movimenta sob a pá da turbina;
- Base de pequenas dimensões;
- Pouco peso;
- Autonomia durante a operação em uma pá;

#### Desvantagens:

- Sistema de locomoção complexo com desvio de obstáculo e planejamento de trajetória;
- Desafio mecânico na construção de uma estrutura capaz de sustentar seu peso mais o manipulador com sistema HVOF;
- Robô deve ser manualmente instalado em cada pá ou um complexo sistema de locomoção por braços deverá ser desenvolvido;
- Sistema de segurança do robô deverá ser bem desenvolvido;
- Bateria limitada ou sistema de gerenciamento de umbilical para robôs móveis;

### 3.3 Robôs cabeados

São classificados como robôs cabeados quaisquer sistemas robóticos que façam uso de um conjunto de cabos e/ou cordas para auxiliar ou mesmo garantir seu posicionamento adequado na sua região de trabalho. Sendo assim, robôs cabeados podem possuir outros métodos de fixação em conjunto com seu cabeamento.

A idéia do uso de um sistema de cabos surge naturalmente quando o deslocamento se mostra majoritamente restrito a um plano vertical e não há exigência de grandes velocidades de deslocamento. O sistema é usado como forma de reduzir o peso e melhorar o desempenho de um braço mecânico de mesmo alcance, ou diminuir a complexidade e a força de aderência necessária para um escalador.

Para exemplificar essa categoria foram selecionados dois robôs. O *torboMate* é um escalador que possui adesão magnética que o permite caminhar livremente. Pode ter dois ou um emissor de jatos com capacidade para abastecimento em até 4000 bar. Possui 45 kg e atinge uma velocidade de até 20 m/min (Torbo, 2008).



Figura 18. Robô TorboMate "Crawler", Torbo (2008)

RIWEA é um robô puramente cabeado, no sentido em que ele não possui nenhum outro tipo de forma de ajuste de posição além do sistema de cabos. É um conceito de robô de estrutura aberta que faz uso de quatro cordas para se deslocar verticalmente (Jeon et al., 2012). Seu maior diferencial reside na capacidade de se adaptar a curvatura da pá mantendo sempre um ponto de apoio sobre ela, sendo também menos suscetível a vibrações (Elkmann et al., 2010).

Em geral, podemos sumarizar as características do robôs cabeados segundo as seguintes vantagens e desvantagens.

#### Vantagens:

- Redução da carga sobre a fixação do robô / maior capacidade de carga.
- Alcance do robô pelo cabeamento pode ser estendido a baixo custo.

#### Desvantagens:

- Complexidade do sistema de gestão do cabeamento.
- Necessidade de um ponto de apóio superior para fixação dos cabos.

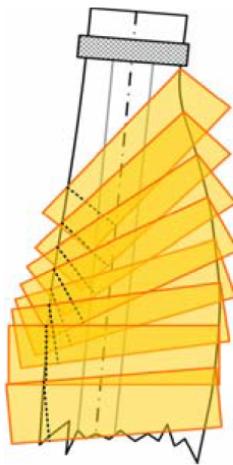


Figura 19. Robô RIWEA, sua cinemática adaptável ao formato da pá, Elkmann et al. (2010)

### 3.4 Manipulador com base esférica

Um projeto de pesquisa e desenvolvimento foi apresentado em Motta et al. (2010) com o objetivo de propor metodologia, simulação e os passos para construção de um sistema robótico para recuperar danos materiais em pás de turbinas hidráulicas. O sistema robótico faz reparo utilizando a tecnologia de soldagem a arco elétrico, antes realizada manualmente em ambientes de alta periculosidade com temperaturas que variam entre 40°C e 99°C, e operações que duram em torno de 10 horas.

O robô deve atender aos seguintes requisitos:

- Capacidade de operar em qualquer posição: horizontal, vertical, invertida;
- Pouco peso para portabilidade e fixação às pás;
- Rigidize à deflexão: carga no punho do manipulador ocorre em qualquer direção e extensão;
- Grande precisão;
- Disponibilidade de peças no mercado;
- Controle com interface de usuário;
- Grande área de trabalho;
- Facilidade de adesão às pás de turbinas hidráulicas.

A solução para o sistema robótico apresenta topologia esférica, como pode ser visto na figura 20 e características:

- Três (3) graus de liberdade no manipulador (2R1P) e dois graus de liberdade no punho (2R);
- Mapeamento de superfície 3D com laser;
- Eletrônica embarcada;
- Soldagem por arco elétrico;
- Fixação nas pás por dispositivos magnéticos ou de sucção;
- Baixo custo;
- Área de trabalho em forma de anel com 2.5 m e 60 cm de altura;
- Peso 30 kg e dimensões 30 x 25 x 100 cm;
- Robô com manipulador autônomo;



Figura 20. Ilustração do projeto do manipulador com base esférica.

O sistema robótico de manipulador com base esférica apresenta solução compatível para a aplicação de HVOF em pás de turbinas hidráulicas, já que sua aplicação original é soldagem das pás, semelhante ao desafio deste artigo. Todas as suas características são vantagens e aplicam-se à solução de um sistema para HVOF. Há, porém, desafios particulares na metalização das pás e que são desvantagens da solução:

#### **Desvantagens:**

- A metalização deve ser realizada em toda a pá. Portanto, o sistema deverá ser manualmente trocado de posição, pelo menos 4 vezes (duas posições para a frente e duas posições para a região de trás). E deve ser trocado de pá em pá;
- O efetuador deve percorrer a pá com grande velocidade, como exige o processo de metalização.

## 4. PROJETO DE ROBÔ AUTÔNOMO PARA HVOF

O projeto de robôs autônomos para HVOF em pás de turbinas hidráulicas contempla as soluções que atendem a **todos** os requisitos da aplicação. Dessa forma, serão idealizados robôs com a fusão das tecnologias expostas na seção 3 e no contexto da usina hidrelétrica de Jirau.

Na seção 2, os acessos ao aro câmara foram descritos e suas restrições são fundamentais para a elaboração da solução. Esta seção é dividida em soluções de sistemas robóticos para os dois tipos de acessos, já que estes são o fator que mais restringe o desenvolvimento do sistema robótico por limitar suas dimensões, funcionalidades, e exigir a idealização conjunta de uma logística de acesso e movimentação do robô pelo aro câmara.

### 4.1 Acesso pela escotilha superior

Essa escotilha localizada no topo do aro câmara possui uma abertura de apenas 35 cm de diâmetro, o que cria um desafio quando se pensa em utilizá-la como ponto de acesso para um robô. Por outro lado sua proximidade às pás e a área livre fora do aro câmara criam possibilidades interessantes para seu uso.

#### **Vantagens**

- Estabilidade da fixação do robô

- Ponto de referência, facilitando sistemas de localização, mapeamento, controle e calibração
- Pórtico rolante para posicionar o robô na escotilha

#### **Desvantagens**

- Dificuldade de encontrar robôs de tal dimensão (35 cm diâmetro)
- Necessidade de retirar e inserir o robô quando rodar as pás
- Solução não geral, específica para UHE Jirau

A solução mais simples para este acesso é a utilização de um robô industrial comercial. A escolha do robô está primariamente associada ao seu alcance. Por outro lado, apenas uma pequena parcela dos robôs comerciais possuem a dimensão necessária para atravessar a escotilha. Sendo assim, o estudo foi direcionada para o uso do KUKA Light Weight (LBR iiwa 14 R820), robô cuja diagonal da base é inferior aos 35 cm da escotilha.

O LBR R820 pesa 30 kg, possui 7 eixos e suporta carga de 14kg, suficiente por uma pequena margem para carregar o equipamento de revestimento. Entretanto, são necessários estudos aprofundados para validá-lo, como os requisitos de velocidade e precisão quando percorrendo a trajetória para a realização do revestimento.

Tendo como objetivo posicionar o LBR R820 em uma posição onde seja capaz de trabalhar toda a pá, um modelo de base articulada foi proposto. A base composta de dois eixos interligados por uma junta de rotação é fixada na própria escotilha. Para que seja possível cobrir toda a pá, a base deve ser capaz de assumir diversas angulações com respeito ao eixo de inserção, e a junta que conecta os dois segmentos da base também precisa ter sua posição alterada, o que pode ser realizado manualmente ou com atuador.

Introduzir o robô, composto pelo conjunto base-LBR R820, é uma tarefa cuidadosa pois a extensão total será maior que a distância do topo do aro câmara ao cone da turbina. Ou seja, o braço e a base precisarão ser rotacionados durante o processo de inserção, o que acarretará no desalinhamento do centro de massa (com relação ao eixo perpendicular à escotilha) e exigirá uma guia para resistir ao torque gerado por esse desalinhamento.

Com o robô fixado na escotilha e a junta da base travada, são esperados torques inferiores a 3000 Nm sobre a junta e 4000 Nm sobre a base, durante a operação de revestimento.

### 4.2 Acesso pela escotilha inferior

Soluções que utilizem o acesso pela escotilha inferior, de dimensão maior, apresentam as seguintes vantagens e desvantagens:

#### **Vantagens:**

- Abertura maior para passagem de robôs pequenos montados ou um robô grande desmontado;
- O acesso é livre;
- Este acesso já é usado pelos operadores para manutenção da turbina;

## Desvantagens

- Não é suficientemente grande para entrada de robôs de grande porte montados;
- Infraestrutura de transporte e complexidade logística ao acesso por andaimes e talhas;
- Dificuldade de movimentação e posicionamento do robô no aro câmara devido ao piso escorregadio e inclinado. Pode haver a necessidade de montagem de um plano horizontal;

O acesso pela escotilha inferior apresenta, como todos os outros acessos, um desafio logístico e o desafio comum do processo de metalização. O acesso à escotilha é realizado por uma abertura de 80 mm de diâmetro e 4 m acima do solo, logo os equipamentos são transportados por uma talha operada manualmente, instalada dentro do aro câmara, em andaimes. O solo é escorregadio e, devido à forma cilíndrica do aro câmara, curvilíneo e inclinado.

Dessa forma, as soluções foram focadas em robôs de médio porte, peso reduzido devido ao transporte e às necessidades de movimentação e posicionamento do robô (trajeto escotilha à pá), e modular, quando possível.

As soluções foram divididas em subseções de acordo com a fixação: robôs móveis que se locomovem em trilhos, robôs escaladores e manipuladores industriais com base fixa.

*4.2.1. Projeto de robôs em trilhos* A utilização de um manipulador robótico sobre trilhos satisfaz todos os requisitos para a realização de um processo de inspeção e metalização utilizando a técnica HVOF. O desenvolvimento de um sistema compacto para o transporte através do acesso pela escotilha inferior e sua instalação no aro câmara da turbina são possíveis, pois as dimensões do manipulador podem ser reduzidas por meio da mobilidade extra proporcionada pela introdução do trilho.

No contexto da aplicação proposta, foram concebidas duas possibilidades para a fixação do sistema de trilhos. A primeira solução consiste em um sistema semelhante ao Roboturb, apresentado na seção 3.1. O sistema proposto se trata de um manipulador robótico com fixação diretamente na pá da turbina. O trilho deverá ser flexível para ser capaz de acompanhar a curvatura da pá e possibilitar diversas opções de posicionamento. Como o material da pá não possui alta permeabilidade magnética (Inox 420), a solução de fixação seria por ventosas ativas e com material específico para suportar as grandes variações de temperatura que a pá pode alcançar (temperatura ambiente a 100°C durante a metalização).

Uma abrangente pesquisa de robôs comerciais industriais de pequeno porte apontou que há manipuladores com carga entre 12 e 20 kg e velocidade necessários, sendo o LBR da Kuka o que possui melhor benefício peso/alcance, 30 Kg e 820 mm, respectivamente.

A fixação de um trilho na pá apresenta diversas complexidades, como: a necessidade de manualmente instalar/desinstalar o sistema trilho/robô diversas vezes em cada pá; o projeto do trilho customizado e flexível; e ventosas ativas especiais que suportam variação de temperatura.

A alternativa para se evitar o contato com a pá consiste em um único trilho retilíneo fixado por bases magnéticas ou solda, no solo do aro câmara. Como o robô não possui alcance de toda a pá, há, ainda, a necessidade de posições verticais diferentes. A pá pode ser processada em movimentos circulares ou lineares e, em ambos os casos, o manipulador ficará responsável pela velocidade, posição e orientação do processo. A troca de sentido de movimento deverá ocorrer fora da pá ou devem ser utilizadas placas de sacrifício. A

Esse tipo de abordagem simplifica a movimentação do robô no trilho, uma vez que o trilho seria totalmente reto, e possibilitaria a metalização de um dos lados das quatro pás com uma única instalação de base. Porém, mesmo nesta solução, a altura do trilho deverá ser ajustada três vezes para cada lado de pá.

Em ambos os sistemas propostos, é necessária a implementação de um sistema de localização do robô em relação à pá, tornando possível a geração de um planejamento de trajetórias para o processo de metalização. O sistema de localização pode ser concebido por sensores externos ao robô (câmeras e outros), ou instalados no próprio manipulador/base.

## Conclusão da solução por robôs em trilhos

A solução com trilho externo se mostrou vantajosa em comparação ao robô em trilho customizado acoplado à pá, devido à complexidade e intervenções manuais. Há a possibilidade de utilizar um manipulador industrial, tornando o foco do projeto em processamento de sinais, mapeamento, localização e controle, além da construção do trilho. Porém, a montagem da estrutura e a instalação de todo o sistema atrás da pá podem ser custosas, sendo esta ainda uma solução considerada complexa.

*4.2.2. Projeto de robôs escaladores* Nesta subseção, consideram-se soluções para HVOF de pás de turbinas robôs escaladores com fusão das tecnologias documentadas na seção 3, subseção 3.2. Será abordada uma versão adaptada do robô *The Climber*, ICM, dado sua possibilidade de reconfiguração.

O robô *The Climber*, ICM, é uma solução comercial que atende muitas das especificações HVOF e possibilita aperfeiçoamento sem comprometer sua estrutura. O robô possui sistema de adesão por sucção e locomoção através de esteiras flexíveis. O sistema já foi testado em ambientes de alta periculosidade, como turbinas eólicas, usinas hidrelétricas e outros. Podemos dividir o projeto em quatro sistemas: locomoção, adesão, manipulador e autonomia.

O sistema desenvolvido em Kim et al. (2008) tem mecanismo de locomoção por esteiras e adesão por sucção. O sistema é composto por polias, correias de borracha, ventosas, válvulas para cada ventosa, motores DC para as polias, sistemas de controle para as válvulas e para os motores. *The Climber* utiliza apenas uma câmara de vácuo, em vez de ventosas, e esteiras flexíveis que permitem maior suavidade e continuidade ao movimento. A solução por uma única câmara parece mais vantajosa, já que o robô consegue se locomover em curvaturas de até 30 cm de raio.

No caso específico da aplicação HVOF, o processo é realizado com manipulador enquanto o robô percorre a pá da turbina. A locomoção do robô sob a pá levanta algumas questões de projeto: a temperatura da turbina durante o procedimento exige uma solução por câmara ativa de material especial; e como se comporta o robô em curvaturas acentuadas.

Em sistemas de adesão por sucção, deve-se considerar um mecanismo inteligente de segurança, possivelmente utilizando acelerômetros e outros sensores, para garantir o desligamento do sistema eletrônico e o fornecimento de gás. A solução de um robô móvel com planejamento de trajetória aumenta a segurança da operação e o controle ótimo do mecanismo de adesão pode limitar a força máxima de sucção.

O manipulador a ser projetado para aplicação HVOF possui as seguintes características: é leve para não comprometer a adesão e equilíbrio do sistema móvel; rápido e preciso conforme requer a aplicação HVOF; modular, já que a operação será realizada in-situ, em espaço confinado; não possui grandes dimensões, pois o robô é móvel e pode percorrer a pá, porém deve ser suficiente para operar em pontos de difícil acesso à base e considerar a distância mínima (230 mm) entre pistola HVOF e pá; e é capaz de sustentar a carga e vibrações geradas pela pistola HVOF.

A solução de robôs escaladores exige planejamento de trajetórias tanto da base móvel, quanto ao controle de manipuladores. A literatura sobre manipuladores é bastante consolidada, sendo muitos dos problemas citados já resolvidos e disponíveis no mercado, como o desenvolvido em Manz et al.. Os menores manipuladores industriais que sustentam a carga do sistema de metalização possuem em torno de 30 a 50 kg. Portanto, o conjunto manipulador, pistola e cabos pode possuir de 50 a 80 kg de massa.

O sistema autônomo de um robô móvel é a inteligência do robô. Ele abrange o controle de missão, ou seja, o planejamento e execução das tarefas em modo autônomo. A locomoção será realizada pelo controle dos motores em conjunto com o controle do sistema ativo de adesão por sucção, o planejamento de trajetória, desvio de obstáculos e mapeamento do ambiente, através de um conjunto de sensores, como laser e acelerômetros. O controle do manipulador poderá ser cinematográfico por servovisão ou pela estruturação do ambiente. E um sistema de suporte do veículo ficará responsável pela segurança, bom funcionamento e gerenciamento de potência do robô.

As características descritas acima como solução de um robô escalador impede a troca automática entre pás. Um robô escalador com tecnologia de avanço pendurado por braços é uma solução muito custosa em termos de controle e estrutura mecânica. Outra solução seria um robô com locomoção por segmentos deslizantes, como o RRX3, e adesão por sucção, porém a flexibilidade exigida para a locomoção entre pás e a distância entre turbinas complexifica o projeto. Dessa forma, a troca entre pás deverá ser manual.

**Conclusão da solução por robôs escaladores** Apesar de tentador devido à autonomia, a complexidade da estrutura da pá, o ambiente, a velocidade requerida e a carga do sistema de metalização são grandes desafios ao projeto. São estimados 50 kg de carga para o conjunto manipulador, cabos e pistola, o que aumenta muito as dimensões da base móvel e, consequentemente, diminui a sua área de atuação, tornando o processo mais demorado.

**4.2.3. Projetos com manipuladores industriais fixos** Há diversos manipuladores robóticos industriais com as especificações necessárias para a realização da tarefa de metalização por HVOF. As empresas Fanuc, Motoman, ABB e KUKA fabricam manipuladores com dimensões compatíveis com o acesso pela escotilha inferior e velocidade, precisão, e espaço de trabalho que cumprem os requisitos para a execução do processo em todo um lado da pá, em uma base fixa. Porém, há incompatibilidade atrás da pá e a necessidade de escolher a posição correta do manipulador em relação à pá, a fim de maximizar a sua área de trabalho, no ambiente da turbina, o que pode restringir os seus movimentos. Como as pás podem ser giradas até um ângulo de 14.5°, são discutidas as ideias de posicionamento do manipulador entre as pás, a fim de executar a operação em ambos os lados da pá (um lado de cada pá), e o posicionamento fixo à frente e depois atrás à pá.

#### Posicionamento entre pás

A figura 5 mostra o espaço entre as pás da turbina, dentro do aro câmara. Um robô manipulador de médio porte pode ser fixado em uma base magnética, na posição que se encontra a escada da figura 5. Essa posição é vantajosa por possibilitar a execução da tarefa em duas pás (frente de uma e verso da outra), sem desmontar ou fazer grandes alterações no posicionamento da base do robô, diminuindo as intervenções e tempo de tarefa.

O estudo puramente geométrico demonstra que o alcance do manipulador robótico para o processamento de ambos os lados das pás, considerando uma base fixa entre as pás, deverá ser em torno de 5 metros. O manipulador industrial IRB5500, desenvolvido pela ABB para pintura, possui 3 metros de alcance, porém 180 kg, o que já dificulta ou até impossibilita a logística de movimentação e posicionamento in-situ. Não foi encontrado um robô industrial com o alcance necessário e que tivesse as dimensões máximas da escotilha inferior.

A solução conceitual de posicionar um manipulador industrial entre as pás deve avaliar, portanto, todas as configurações necessárias da base (orientações e posições) para garantir que todo o espaço de trabalho do manipulador mais base cubra os lados de ambas as pás. O número de configurações e o projeto mecânico da base são necessários para a viabilização da solução, uma vez que será possível avaliar as intervenções e complexidades. Bases autônomas diminuem o número de intervenções e aumentam a precisão do sistema, porém aumentam a complexidade, o custo devido ao número de sensores e atuadores, e o peso do sistema, prejudicando a logística.

**Posicionamento à frente e atrás da pá** Posicionar de maneira fixa um manipulador com base magnética à frente e atrás da pá para a metalização é uma solução

natural, já que é semelhante à utilizada pela empresa Rijeza atualmente. Um estudo puramente geométrico, utilizando as dimensões da pás, mostra que o manipulador deve possuir alcance de 1.7 m e ser posicionado a uma altura de 1.1 m em relação ao solo. Estudos de espaço de trabalho, manipulabilidade e colisões devem ser realizados para confirmar o estudo geométrico.

O posicionamento do sistema à frente ou atrás da pás exige intervenções para rotação da turbina e para o deslocamento do sistema. Em relação a um sistema com base autônoma entre as pás, o processo parece mais custoso em intervenções manuais e mais demorado, porém bem mais simples em termos de robótica.

**Conclusão da solução com manipuladores industriais** A utilização de manipuladores industriais é a mais simples, em termos de sistemas robóticos, dentre todas as soluções para o acesso pela escotilha inferior. Não há projeto mecânico do manipulador, já que este será adquirido em um dos fabricantes citados. As dificuldades mecânicas do projeto serão em relação à logística de posicionamento e movimentação do robô dentro do aro câmara, e no desenvolvimento de uma base, que pode ser autônoma. Além disso, o projeto fica responsável pelo controle do manipulador, processamento de dados que envolvem o HVOF, planejamento de trajetórias e UI.

Os desafios consistem na construção de uma base rígida e a locomoção dos equipamentos pelo aro câmara. Este projeto conceitual será uma das frentes para o estudo de viabilidade.

#### 4.3 Solução conceitual

Como conclusão das propostas, a solução conceito é a utilização de um manipulador industrial sobre uma base. A característica do manipulador e da base varia de acordo com o ponto de acesso: no caso da escotilha superior, a solução é um manipulador industrial de pequeno porte e base customizada operada eletronicamente; no caso da escotilha inferior, manipulador industrial de porte médio e base magnética; no último caso de acesso pela jusante, será escolhido um manipulador industrial de grande porte com base fixa magnética.

### 5. ESTUDO DE BASES PARA MANIPULADORES INDUSTRIALIS

#### 5.1 Modelagem 3D das soluções conceituais

Os estudos das possíveis soluções exigiu uma visualização mais detalhada do volume livre no interior da turbina. Para isso, foi recriado o ambiente da turbina em CAD 3D no SolidWorks, a partir dos desenhos 2D de seção da turbina fornecidos pelo cliente. O modelo tridimensional do aro câmara permite o estudo e o dimensionamento geométrico de alcance do manipulador para cada solução. Não foram necessários detalhamentos de todos os componentes, podendo ser apenas considerados, e representados com maior precisão, os perfis externos do túnel à montante, o estator, o rotor e uma pequena região à jusante, além dos acessos por escotilha superior e inferior. A figura 21

apresenta o ambiente da turbina em CAD e os possíveis acessos para realização das intervenções.

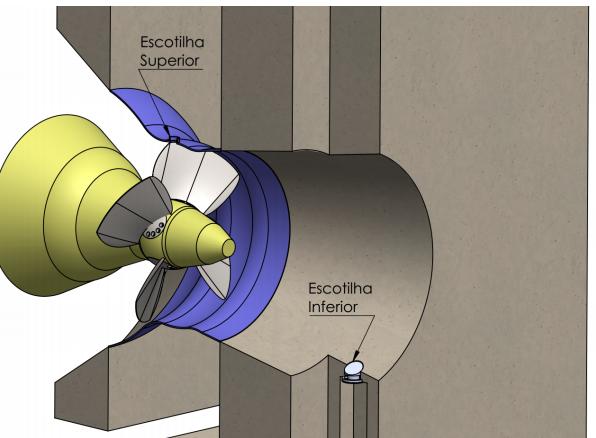


Figura 21. Ambiente 3D da Turbina, em SolidWorks

A solução pela escotilha superior, devido ao espaço reduzido de entrada, não permite a utilização de manipuladores de grande porte, sendo escolhido o KUKA LBR 820. Este manipulador não possui alcance para realizar a operação em toda a pás, exigindo uma base customizada que permita o posicionamento do manipulador para realização das operações por etapas. Para isso, foi estudada uma estrutura de base que permitisse diferentes posicionamentos para o manipulador no interior do aro câmara, de forma que este pudesse cobrir toda a superfície da pás. A base consiste em 3 braços telescópicos que permitem a extensão do sistema para prover o alcance necessário ao manipulador e o recolhimento para uma configuração inicial que permita a entrada do manipulador no aro câmara com segurança, sem o risco de choques ou interferências indesejadas. Além disso, uma junta rotativa oferece mais um grau de liberdade para o sistema, facilitando o acesso do manipulador à toda a superfície da pás.

Os atuadores da base são acionados eletricamente e possuem sensores de posicionamento. Atuadores de esferas recirculantes foram escolhidos devido à baixa folga e precisão elevada. A estrutura da base é composta por cilindros de diâmetro maximizado e pequena espessura, o que oferece um momento de inércia polar elevado e baixo peso, fornecendo grande rigidez à flexão e minimizando erros de posicionamento e vibração excessiva. A figura 22 e a figura 23 apresentam o conceito da base do manipulador em duas configurações: recolhida (configuração de entrada) e estendida (configuração de operação).

Os componentes principais da base estão representados nas figuras 22 e 23, são: 1) atuador linear por sem-fim coroa; 2) base fixa; 3) braço prismático #1; 4) braço prismático #2; 5) atuadores lineares; 6) junta rotativa; 7) braço prismático #3.

A figura 24 demonstra a base com o manipulador KUKA LBR 820 e as dimensões extremas, em milímetros, estimadas para o interior e para fora da turbina, na configuração inicial de entrada no aro câmara pela escotilha superior. A figura 25 apresenta a base com o manipulador em uma configuração qualquer

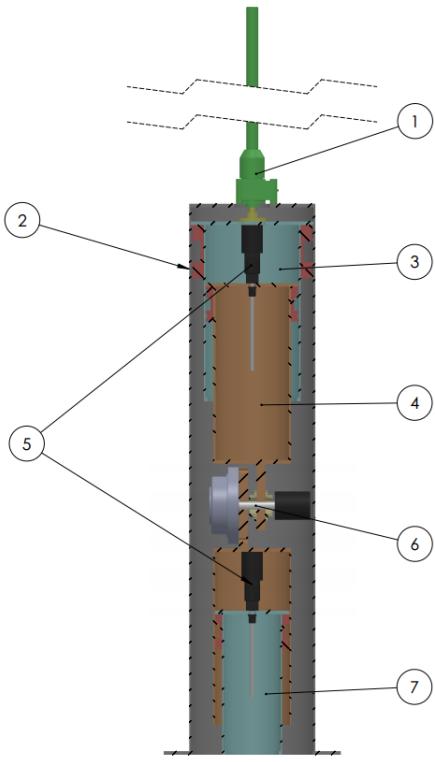


Figura 22. Detalhes em corte da base na configuração inicial recolhida

de operação, demonstrando o ganho de alcance e generalidade de posicionamento fornecidos pela base.

**5.1.1. Dimensionamento da base** Para manipuladores com longo alcance, as forças e torques envolvidos requerem uma estrutura de fixação do robô de forma que o sistema como um todo não se movimente e, no caso extremo, tombe. Normalmente, os manipuladores robóticos são fixados no chão e as características da superfície e tamanho dos parafusos necessários são estipulados pelo fornecedor a partir dos valores máximos de torque e força que o manipulador pode exercer em seu ponto de apoio. Considerando um manipulador centrado em uma base circular apoiada no chão, dois fatores influenciam capacidade de estabilização da estrutura: o raio da base e o seu peso.

O raio da base  $r_b$  é limitado pelo ambiente da turbina e para cada escolha de posicionamento existem restrições específicas. Para a realização dos cálculos de dimensionamento foi considerado, primeiramente, o manipulador posicionado em frente a pá, como ilustrado na figura 26.

Nessa posição é possível processar uma face por vez, a uma altura de 1000mm do chão, desde que o manipulador tenha um alcance mínimo de 1800mm, como especificado na seção ???. Para essa configuração, a tamanho máximo no sentido perpendicular ao fluxo d'água que a base pode assumir é de aproximadamente 1600mm. Existe ainda a curvatura do aro câmara e a estrutura deve ser projetada de forma a seguir os contornos impostos pelo ambiente. A figura 27 representa

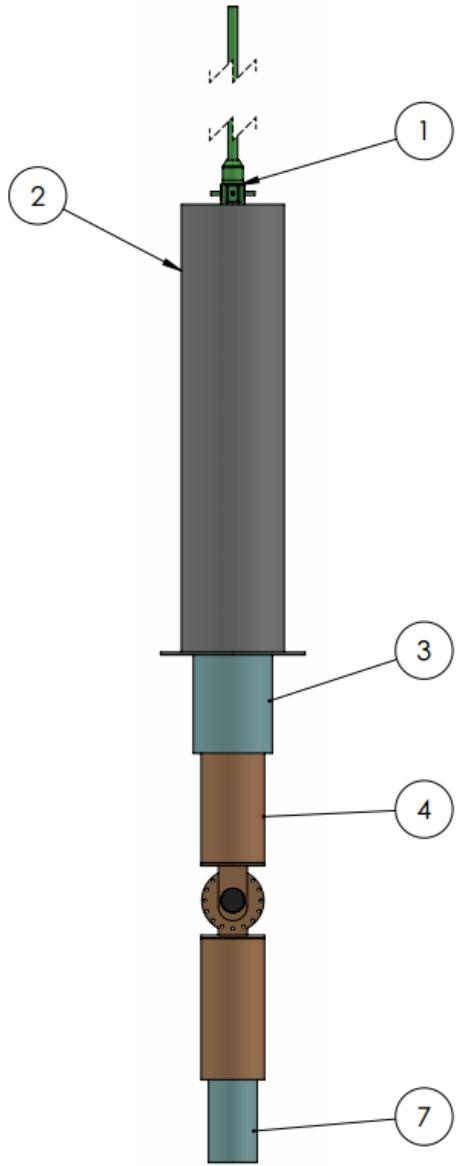


Figura 23. Base na configuração totalmente estendida

um esboço da vista frontal do aro câmara e a largura máxima que a base pode assumir. A análise da dimensão máxima da base no sentido paralelo ao fluxo d'água pode ser realizada com o auxílio do desenho técnico fornecido pela ESBR, ilustrado na figura 28.

O limite superior do raio da base nessa região é determinado pela região de transição do aro câmara para o tubo de descarga, onde há uma mudança na inclinação do plano de apoio. A região, considerada horizontal, que pode acomodar a base do manipulador tem um comprimento de aproximadamente 1400mm no sentido do fluxo do rio. Entretanto, esse limite pode ser contornado construindo-se um plano de apoio horizontal ou projetando-se a base de forma que ela acompanhe essa inclinação. É necessário, então, considerar o dimensionamento da base no cálculo do alcance mínimo do manipulador, que agora se encontra deslocado em relação à superfície da pá. Sendo assim,

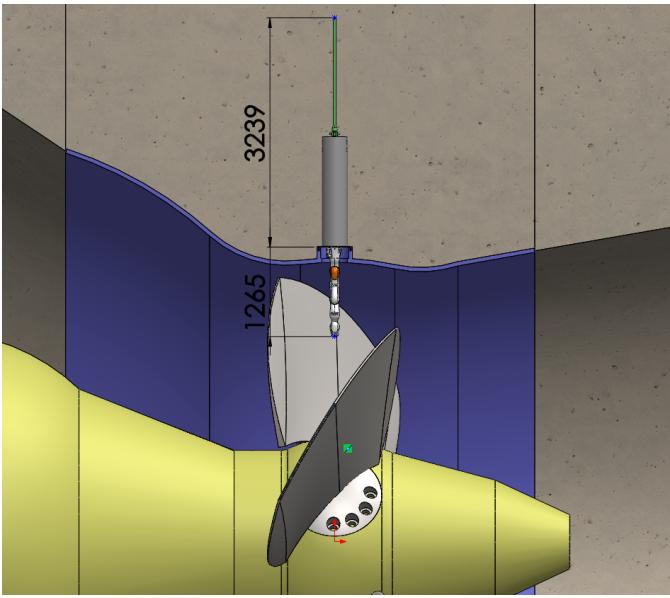


Figura 24. Base na configuração inicial no ambiente da turbina

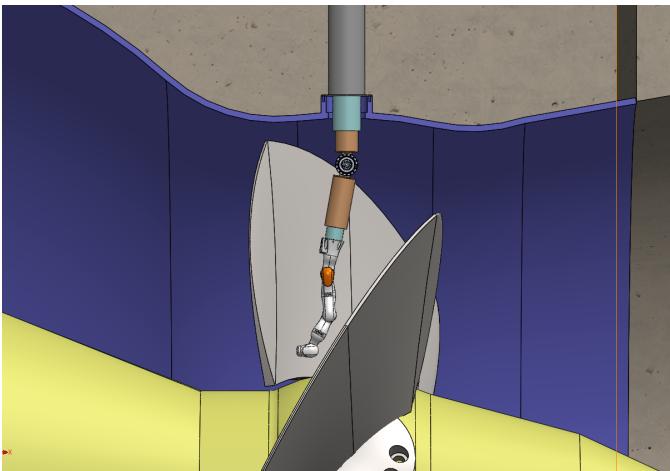


Figura 25. Base em uma geral configuração de operação

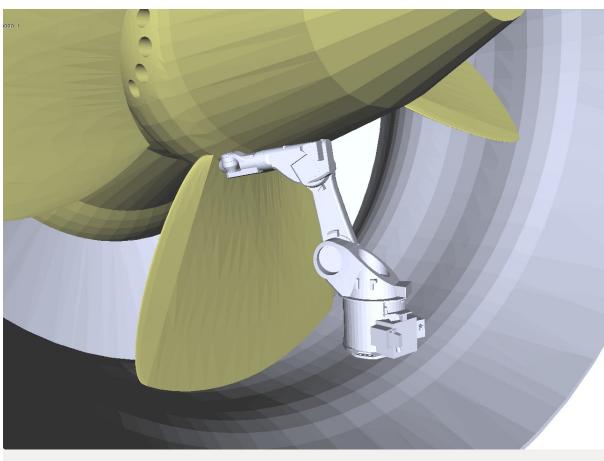


Figura 26. Exemplo de posicionamento de um manipulador robótico em frente à pá.

alcance mínimo se relaciona com o tamanho do raio da

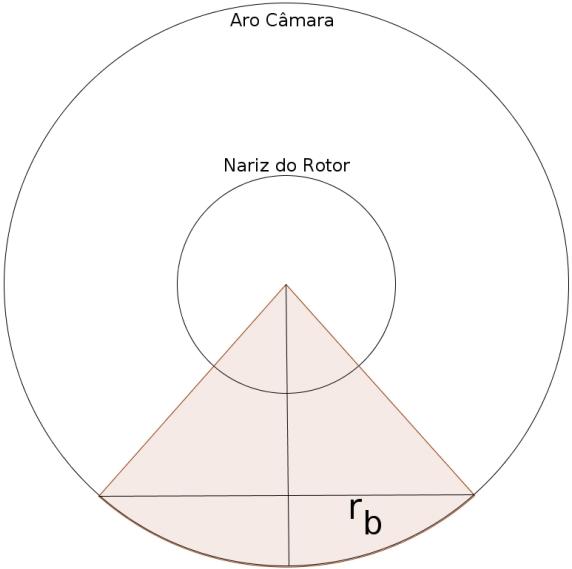


Figura 27. Visão frontal do aro câmara e raio máximo da base de acordo com

$$a_{min} = \sqrt{r_b^2 + 1800^2}.$$

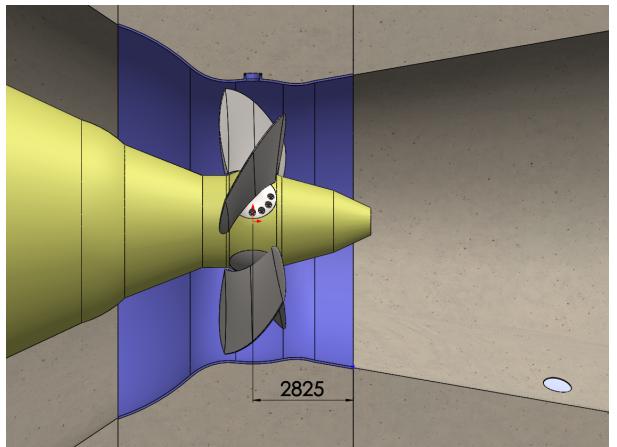


Figura 28. Visão lateral do aro câmara e raio máximo da base nessa direção.

O cálculo das dimensões da base com o robô posicionado dentro do aro câmara e entre as pás, como ilustrado na figura 29, depende do ângulo de ataque das pás.

A distância entre as pás pode ser calculada por meio do cálculo do ângulo diédrico entre elas. A amplitude do movimento de rotação  $\alpha$  das pás é de  $14,5^\circ$  para cada lado a partir da posição zero, entretanto **essa posição não pode ser informada no momento da viagem de reconhecimento e ainda não foi disponibilizada**. Para critério de cálculos foi utilizado um ângulo de  $45^\circ$  como a posição de maior abertura das pás e o zero foi considerado como a reta perpendicular ao fluxo de água. O ângulo diédrico  $\theta$  entre as pás depende do ângulo de ataque das pás e obedece a relação  $\cos \theta = \sin^2 \alpha$ .

O a distância entre as pás, considerada como o arco de circunferência no aro câmara descrito pelo ângulo

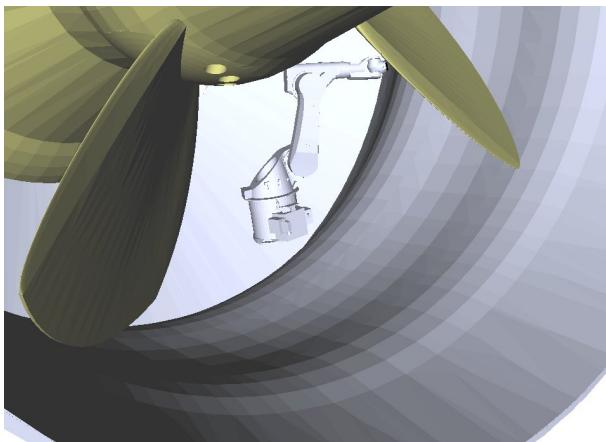


Figura 29. Exemplo de posicionamento de um manipulador robótico entre as pás.

diédrico calculado, pode ser obtido a partir da relação  $\text{arc} = R\alpha$ . Considerando o raio do aro da câmara como  $R=3850\text{mm}$ , o raio máximo da base pode ser calculado como

$$r_{b_e} = (R - h_{b_e}) \tan \theta / 2$$

e com  $h_{b_e}$  sendo a altura da base.

O peso mínimo que a base do robô deve possuir está diretamente relacionada com o tamanho de seu raio. A figura 30 faz uma representação simplificada da forma que o torque de capotamento máximo atua no robô e em sua base. Na situação limite, considerando um torque com sentido horário, a força normal entre a base e a superfície de apoio,  $N_2$ , teria módulo igual a zero. No pior caso, podemos considerar que a força vertical exercida pelo robô em sua base é composta apenas pelo seu peso  $W$  e, para que a base não se move, o somatório das forças e torques devem ser iguais a zero.

A análise do somatório das forças nos fornece a relação  $N_1 = W$  e o somatório dos torques se reduz a  $M_k - Wr_b = 0$ . Sendo assim, a relação entre o raio da base, seu peso e o torque máximo de capotamento exercido pelo robô é da forma

$$M_k = Wr_b.$$

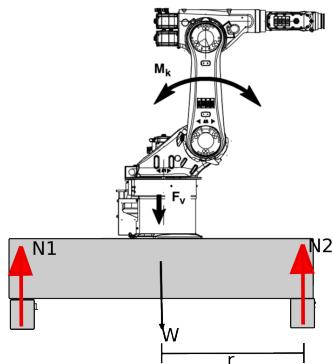


Figura 30. Forças e torques máximos entre o robô e sua base.

Uma vez que a superfície do aro câmara e a região adjacente no tubo de sucção são ferromagnéticas,

é possível a utilização de bases magnéticas para uma compensação do peso e raio necessários para a estabilização do robô. Os dispositivos magnéticos se dispõem de duas em duas principais categorias para essa aplicação: dispositivos eletromagnéticos e de imãs permanentes. O primeiro caso tem como principal vantagem a possibilidade de acionamento remoto, entretanto para situações de falha em que haja perda de fornecimento de energia, a força de atração também é perdida. O segundo caso consiste em imãs permanentes arrumados de maneira que seja possível organizar o seu fluxo magnético e, assim, controlar por meio de uma alavanca a presença ou ausência de força magnética. A figura 31 ilustra os dois tipos de bases magnéticas citados.

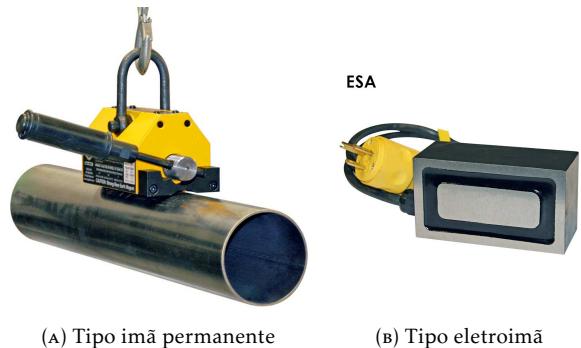


Figura 31. Tipos de bases magnéticas comerciais.

Comercialmente, foram encontrados bases magnéticas com capacidade de até 3000N. Um dos requerimentos para a utilização de bases magnéticas, sejam eletromagnéticas e de imãs permanentes, é a limpeza da superfície de contato para um acoplamento eficiente. Essa restrição força a presença humana para a limpeza e, sobretudo, a verificação de uma correta fixação. Sendo assim, as bases magnéticas de imã permanente se mostram mais coerentes para a aplicação, pois não possuem ponto de falha para o caso de perda de energia do sistema e possuem uma maior capacidade de carga. A curvatura do ambiente não é um limitante, sendo possível até a confecção de uma máscara para a base de maneira que a superfície de apoio se conforme perfeitamente com a superfície de fixação.

## 6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este documento teve como objetivo: fazer uma análise das restrições do processo de revestimento por aspersão térmica; caracterizar o ambiente de trabalho onde o processo será realizado; fazer um estudo detalhado do estado da arte que visaram solucionar um problema semelhante ou possuíam tecnologias que poderiam ser utilizadas como solução; apresentar soluções conceituais; e fazer um estudo de viabilidade técnica para as soluções.

O estudo de viabilidade de uma solução para revestimento *in situ* se mostrou promissor e foram apontadas algumas possíveis soluções considerando cada acesso ao aro câmara da turbina. Todas as soluções esbarraram em alguns desafios logísticos e técnicos que serão abordados detalhadamente até o fim do projeto EMMA. Os projetos de bases mecânicas para as diversas

soluções serão abordados, assim como suas instalações, manuseio e posicionamento. Além disso, toda a parte de localização, calibração e mapeamento realizado pelo robô, seu controle e interface de usuário ainda serão desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS

- A. Faina, D. Souto, A.D.F.L.P.R.J.D. and Fernandez, X. (2009). Development of a climbing robot or grit blasting operations in shipyards. *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 200-205.
- Armada, M., De Santos, P.G., Jiménez, M.A., and Prieto, M. (2003). Application of clawar machines. *The International Journal of Robotics Research*, 22(3-4), 251–264.
- B. Chu, K. Jung, C.H. and Hong, D. (2010). A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No 4, pp. 633-647.
- Bansal, N.P. (2005). *Handbook of Ceramic Composites*. Springer US.
- Bibuli, M., Caccia, M., and Lapierre, L. (2007). Path-following algorithms and experiments for an autonomous surface vehicle. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 7(PART 1), 81–86. doi:10.1002/rob.
- Bonacorso, N.G., Goncalves, J.a.a., and Dutra, J.C. (2006). Automation of the processes of surface measurement and of deposition by welding for the recovery of rotors of large-scale hydraulic turbines. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 231–238.
- Brennen, C.E. (2013). *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press.
- C. Balaguer, A.G. and Abderrahim, M. (2002). Roma robots for inspection of steel based infrastructures. *Industrial Robot: An international Journal*.
- C. Hillenbrand, D.S. and Berns, K. (2008). Cromsci - a climbing robot with multiple sucking chambers for inspection tasks. *WSPC Proceedings*.
- Elkmann, N., Felsch, T., and Forster, T. (2010). Robot for rotor blade inspection. In *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*, 1–5. IEEE.
- Escaler, X., Egusquiza, E., Farhat, M., Avellan, F., and Coussirat, M. (2006). Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical systems and signal processing*, 20(4), 983–1007.
- Goldemberg, J. and Lucon, O. (2007). Energia e meio ambiente no brasil. *Estudos Avançados*, 21(59), 7–20.
- J. Kim, K. Y. Lee, T.K.D.L.S.L.C.L. and Kang, S.W. (2004). Rail running mobile welding robot rrx3 for double hull ship structures. *Proc. of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 1061-1069.
- J. Maempel, T. Koch, S.K.A.O. and Witte, H. (2009). Concept of a modular climbing robot. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*.
- Jeon, M., Kim, B., Park, S., and Hong, D. (2012). Maintenance robot for wind power blade cleaning. *Seoul, Korea: Department of Mechanical Engineering, Korea University*.
- Kim, H., Kim, D., Yang, H., Lee, K., Seo, K., Chang, D., and Kim, J. (2008). Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism. *Journal of mechanical science and technology*, 22(8), 1490–1498.
- Machines, I.C. (2015). The climber. International Climbing Machines (ICM) website. <http://www.icm.cc/climber.php> Accessed on March 30<sup>th</sup>, 2015.
- Manz, M., Hilljegerdes, J., Dettmann, A., and Kirchner, F. (????). Development of a lightweight manipulator arm using heterogeneous materials and manufacturing technologies.
- Motta, J., Llanos, C., Carvalho, G., and Alfaro, S. (2010). A prototype of a specialized robotic system for repairing hydraulic turbine blades. In *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*, 1–6. IEEE.
- Rhodes, W.H., Clougherty, E.V., and Kalish, D. (1970). Research and development of refractory oxidation resistant diborides.
- Rochat, F., Schoeneich, P., Nguyen, O.T.D., and Mondada, F. (2009). Tripillar: Miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability. In *Proceedings of 12th International conference on climbing and walking robots and the support technologies for mobile machines (CLAWAR)*, volume 1, 343–350. World Scientific.
- Santa, J., Espitia, L., Blanco, J., Romo, S., and Toro, A. (2009). Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear*, 267(1), 160–167.
- Torbo (2008). torbomate crawler. torboMate Crawler website. <http://www.torbo24.com> Acessado no dia 30 de Março, 2015.
- Wu, J., Fang, H., Yoon, S., Kim, H., and Lee, C. (2006). The rebound phenomenon in kinetic spraying deposition. *Scripta materialia*, 54(4), 665–669.