

# **Estudo de viabilidade técnica para revestimento robótico de turbinas *in situ* - EMMA \***

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

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

## **1. INTRODUÇÃO**

Em EMMA-SOTA, é apresentada a importância da manutenção regular das turbinas em uma usina hidrelétrica, já que, em sua operação ideal e de máxima eficiência, sua potência tem aumento de quase 46% após manutenção. Aumento significativo, principalmente para países dependentes desta forma de energia, como o Brasil e Noruega.

A eficiência de uma turbina hidrelétrica depende de inúmeras variáveis, como volume de água, queda d'água, o tipo da turbina, o distribuidor e outras. O projeto EMMA tem foco na manutenção do perfil hidráulico das pás dos rotores de turbinas hidrelétricas, por este se degradar com maior rapidez, exigindo manutenções recorrentes.

A fim de proteger a pá contra abrasão e cavitação é realizado processo de revestimento por asperção térmica, ou, especificamente, a metalização (HVOF). Atualmente, este processo pode levar cerca de dois meses por turbina, já que exige que a turbina seja desmontada, as pás serem processadas em outro ambiente, a turbina seja remontada e recalibrada.

Apesar de o projeto visar uma solução genérica para turbinas bulbos, as instalações são diferentes em cada usina. Desta forma, o ambiente de testes deste projeto é a Usina Hidrelétrica de Jirau, localizada no Rio Madeira. O Rio Madeira carrega muitos sedimentos provocando maior abrasão nas pás, se comparado com outros usinas, além disso, a queda d'água de 2 a 20 metros intensifica o fenômeno de cavitação. As principais características das instalações da turbina em análise estão descritas em EMMA-SOTA, mas vale ressaltar a particularidade dos dois acessos principais ao aro câmara, relevantes para a busca de uma solução: acesso superior (35.7 cm de diâmetro) e acesso inferior (80 cm de diâmetro).

O projeto EMMA busca uma solução para o processo de metalização *in situ*, isto é, revestimento das pás no ambiente da turbina, diminuindo o tempo de manutenção e, consequentemente, de máquina parada. A solução conceitual desenvolvida em EMMA-SOTA é a utilização de um manipulador industrial sobre uma base. As características do manipulador e da base variam de acordo com o 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, a solução é um manipulador industrial de porte médio e base tipo trilho com acopladores magnéticos.

A análise das instalações da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, em Porto Velho, vizinha à Jirau, mostrou que as turbinas não possuem um acesso superior. A fim de tentar construir uma solução mais geral, o presente documento visa dar continuidade ao projeto, detalhando o estudo de viabilidade técnica para a solução da escotilha inferior.

## **2. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DETALHADA**

O estudo de viabilidade técnica detalhada é realizado para cada acesso à turbina (superior e inferior), como em EMMA-SOTA. O estudo passa pelas seguintes etapas: 1) pesquisa de mercado; 2) geometria plana e/ou espacial; 3) espaço de trabalho e cinemática do manipulador; 4) detalhamento de bases mecânicas; 5) dinâmica do manipulador; 6) sensores para calibração; 7) planejamento de trajetórias; e 8) técnicas de calibração. Neste documento, serão abordadas as etapas: 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

A pesquisa de mercado é uma busca abrangente de soluções comerciais dentro do escopo da solução conceitual desenvolvida no EMMA-SOTA. A pesquisa envolve manipuladores comerciais que preencham os requisitos do processo de HVOF e estejam de acordo com as restrições impostas pelo ambiente e o acesso. Dessa forma, diversos fabricantes de manipuladores, Motoman, Kuka, ABB, Fanuc, Adept e Kinova, foram avaliados e suas principais características como carga, peso, dimensões, velocidade, temperatura e umidade de operação, são analisadas. A pesquisa de mercado tem como objetivo retornar o objeto para os outros estudos, ou seja, o manipulador a ser utilizado na solução.

O estudo puramente geométrico, apesar de ser diferente para cada acesso, é genericamente uma abordagem simplificada e analítica do problema e desconsidera alguns fatores do ambiente. O estudo geométrico tem como objetivo retornar um caso aproximado da situação real e estimar as possíveis soluções da posição do manipulador em relação à pá, de forma que toda ela seja revestida.

O espaço de trabalho e cinemática do manipulador é uma abordagem detalhada e de simulação. Ela considera: o meio estruturado, em um ambiente de simulação; o

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

manipulador com suas dimensões e limites de juntas reais; possibilidade de colisões; real espaço de trabalho do manipulador; modelos de bases para o manipulador; e possíveis sensores. Para a simulação é utilizada a plataforma Openrave, uma arquitetura de planejamento para robôs autônomos, sendo possivelmente integrada para controle em tempo real e monitoramento. Ela provê funcionalidades para operações de cinemática direta e inversa, e simulações físicas, e apresenta ferramentas e interfaces para planejamento de manipuladores e um protocolo que interpreta scripts na linguagem MatLab, Octave e Python (Diankov and Kuffner, 2008).

Na seção de estudo da dinâmica de manipuladores robóticos, serão realizadas análises numéricas e analíticas, em um ambiente de simulação, de cinemática diferencial e torques das juntas de manipuladores, utilizando as características do processo de revestimento. O estudo tem por objetivo tornar a simulação mais realista, analisar a execução do processo para algumas distâncias da pá e verificar a manipulabilidade do robô.

A base mecânica é definida como a estrutura de suporte e transporte do robô. Esta deve permitir ao manipulador alcançar os posicionamentos necessários, definidos nos estudos cinemáticos e dinâmicos. Para que estes posicionamentos sejam alcançados, a base mecânica oferece graus de liberdade ao sistema base e robô, adequados para levar a base do robô aos pontos ótimos para o revestimento de uma região da pá. Como principais diretrizes para o projeto da base mecânica, são considerados: a resistência aos esforços dinâmicos do manipulador; baixas vibrações; modularidade; e facilidade de transporte, montagem e ajuste. O estudo dos conceitos analisados para a base mecânica serão demonstrados em detalhe na seção 2.5.

As características e desafios logísticos da escotilha inferior já foram previamente apresentados em EMMA-SOTA, sendo aqui apontadas, na tabela 1, apenas as suas principais caracterísiticas para o desenvolvimento de uma solução detalhada.

Informação	Dado
Dimensões do acesso	800 mm de diâmetro
Distância do acesso à pá	4000 mm
Distância do solo	5000 mm
Peso máximo manipulável	150 Kg

TABLE 1: Dados principais da escotilha inferior

## 2.1 Pesquisa de mercado

A pesquisa de mercado está detalhadamente explicada na tabela A.1, no apêndice. Os seguintes robôs satisfazem os requerimentos e restrições principais, de acordo com as tabelas 1 e ??, e os requisitos abordados em ??: Viper s1300 (Adept), ARC Mate 100iC/12 (Fanuc), M-10iA/12S (Fanuc), LBR iiwa 14 R820 (Kuka), KR 10 R1100 sixx WP (Kuka), MH6F-10 (Motoman), SIA10F (Motoman), MH12 (Motoman), SIA20D (Motoman). Destes, os manipuladores LBR iiwa 14 R820 (Kuka) e Viper s1300 (Adept) deverão passar por adaptações para operar em temperaturas até 40°C e umidade relativa no ar de 91%; e os manipuladores KR 10 R1100 sixx

WP (Kuka), MH6F-10 (Motoman) e SIA10F (Motoman) têm carga máxima de 10 Kg, que é o limite para o processo. Dessa forma, os manipuladores comerciais prontos para o uso e que trabalha com folga em carga são: ARC Mate 100iC/12 (Fanuc), M-10iA/12S (Fanuc), MH12 (Motoman) e SIA20D (Motoman).

Apesar de o manipulador LBR iiwa 14 R820 (Kuka) necessitar de adaptações, seu peso (29 Kg) representa grande vantagem perante os outros manipuladores, logo não deve ser descartado em futuros estudos. O mesmo se pode dizer do KR 10 R1100 sixx WP (Kuka), que possui 56 Kg, mas estará operando perto de sua carga limite (10 Kg).

Os objetos de estudo são, portanto: KR 10 R1100 sixx WP (Kuka), MH12 (Motoman), LBR iiwa 14 R820 (Kuka), ARC Mate 100iC/12 (Fanuc) e SIA20D (Motoman).

## 2.2 Estudo puramente geométrico

A abordagem puramente geométrica é uma análise do espaço de trabalho do manipulador na pá. Utiliza os manipuladores da pesquisa de mercado como objetos deste estudo e leva em consideração as dimensões da pistola, o ângulo máximo e mínimo para o revestimento ( $90^\circ \pm 60^\circ$ ), e a distância mínima de 230 mm entre a pistola e a pá. É um estudo simplificado por não considerar as possíveis colisões com o ambiente, assumir que a pá está contida em um plano (projeção, objeto 2D) e considerar o espaço de trabalho do manipulador simétrico. A abordagem geométrica foi desenvolvida com o auxílio do software Geogebra.

Primeiramente, o espaço de trabalho do manipulador é aproximado como uma esfera, delimitada pelo espaço de trabalho real do manipulador. A pá é projetada em planos, como mostra a figura 1, e, conforme o manipulador se aproxima da pá, o plano direito corta a esfera (espaço de trabalho do manipulador), FIGURA. A interseção entre o plano e a esfera é um círculo de raio  $\overline{CB^i}$ , que pode ser calculado e estimado como a área revestida da pá. A distância ótima entre o manipulador e a pá é calculada no limite em que o ângulo  $\overline{OB^iC} = 30^\circ$ . Finalmente, podem ser calculadas quantas posições distintas o manipulador deve assumir para que toda a pá seja revestida, a partir do modelo planar da pá e da turbina, figura 2.

Essa abordagem é específica para cada manipulador da pesquisa de mercado.

2.2.0.1. KR 10 R1100 sixx WP (Kuka) A figura 3 ilustra a interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Kuka KR10 e a projeção da pá. No caso do Kuka KR 10 R1100, o raio da esfera é aproximado a  $\overline{OB^i} =$  alcance do manipulador + comprimento da pistola + 230 mm =.

Para este manipulador, obtemos área revestida de  $1.41^2\pi m^2$  e distância ótima manipulador-pá de 0.82m. Dessa forma, são necessárias, pelo menos, quatro posições distintas do manipulador a fim de toda a pá ser revestida.

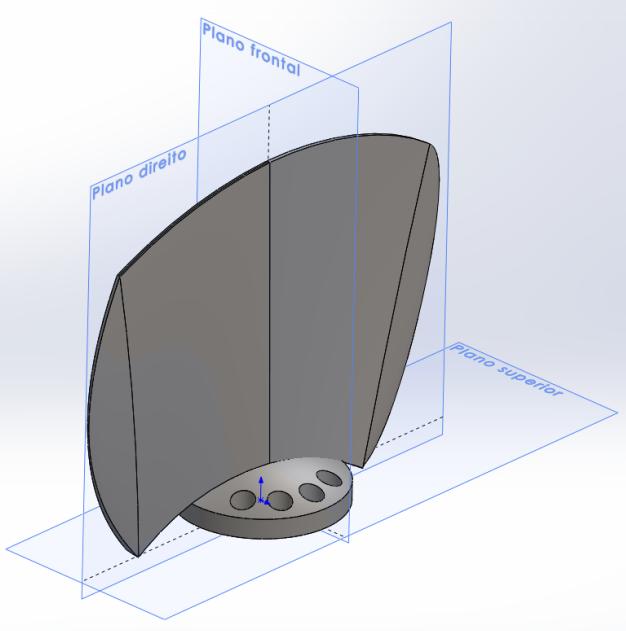


Fig. 1. Ilustração das projeções da pá em planos.

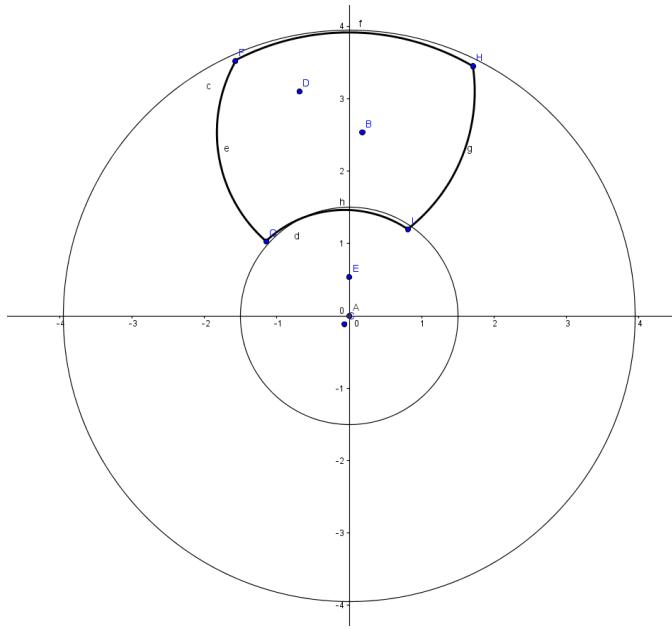


Fig. 2. Ilustração do modelo 2D da pá.

A figura 4 ilustra os pontos que o manipulador deve assumir para revestir toda a pá.

**2.2.0.2. MH12 (Motoman)** A figura 5 ilustra a interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador MH12 e a projeção da pá. No caso do MH12, o raio da esfera é aproximado a  $\overline{OB^i}$  = alcance do manipulador + comprimento da pistola + 230 mm =.

Para este manipulador, obtemos área revestida de  $1.54^2 \pi m^2$  e distância ótima manipulador-pá de 0.89m. Dessa forma, são necessárias, pelo menos, duas posições distintas do manipulador a fim de toda a pá ser revestida.

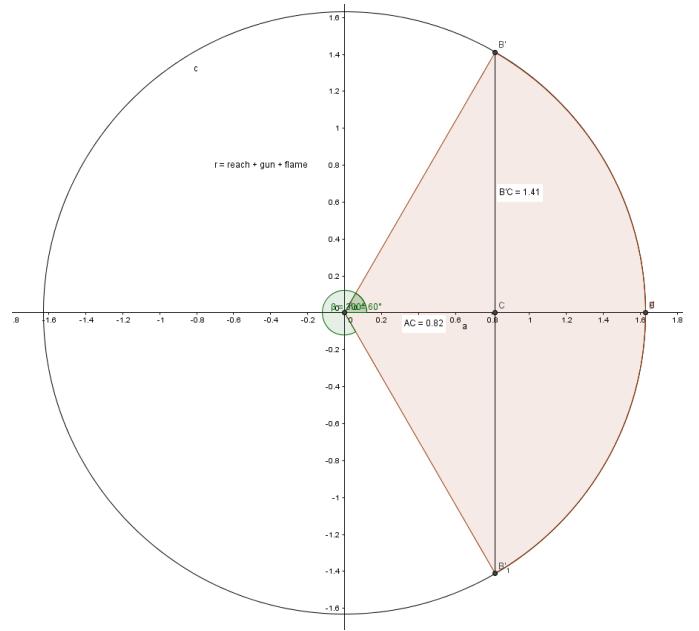


Fig. 3. Ilustração da interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Kuka KR10 e a projeção da pá.

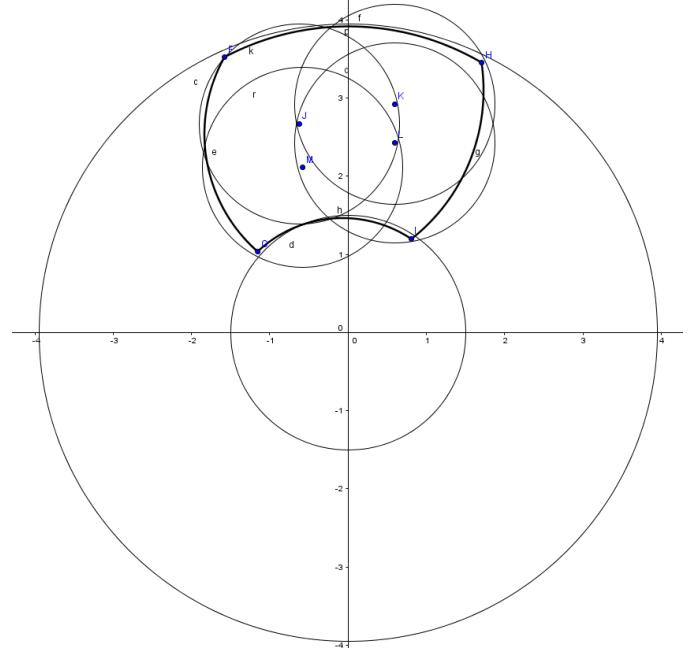


Fig. 4. Posições do manipulador Kuka KR10 para o processo de revestimento ser realizado em toda a pá.

A figura 6 ilustra os pontos que o manipulador deve assumir para revestir toda a pá.

### 2.3 Espaço de trabalho e cinemática do manipulador

Como já mencionado, o ambiente de simulação foi desenvolvido utilizando a arquitetura de planejamento Openrave. Para cada manipulador selecionado após a pesquisa de mercado, serão analisados os reais espaços de trabalho, e o processo de revestimento da pá em um ambiente simulado que representa as principais características do ambiente real.

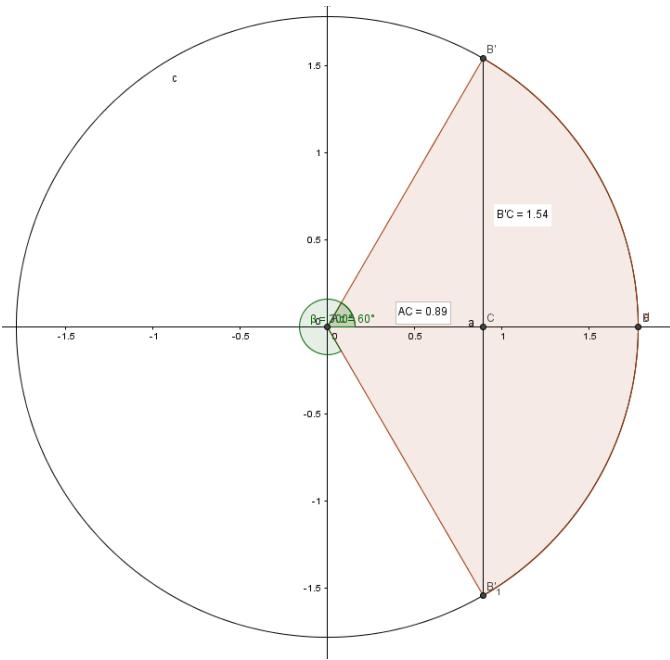


Fig. 5. Ilustração da interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Motoman MH12 e a projeção da pá.

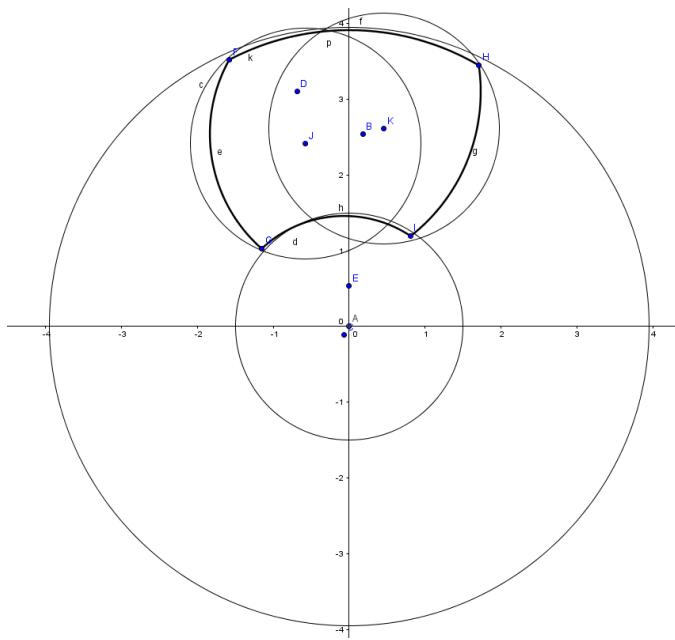


Fig. 6. Posições do manipulador MH12 para o processo de revestimento ser realizado em toda a pá.

Para gerar o espaço de trabalho, o Openrave utiliza um método de força bruta, onde são executadas iterações sob iterações de todas as juntas, por seus ângulos limites e com o passo de ângulo dependendo da resolução do manipulador. O grau de manipulabilidade do robô é representado por um gradiente de cores, cujo grau varia do azul claro (menor manipulabilidade) ao vermelho escuro (maior manipulabilidade). Entende-se por manipulabilidade a capacidade que o robô possui de manipular objetos em direções específicas, isto é, para uma posição específica é possível alcançar variadas

orientações. Em todas as simulações, a pistola foi representada como um cilindro de comprimento 300 mm e raio 50 mm, e o efetuador está no extremo do cilindro.

A superfície da pá é amostrada, formando uma grade de tamanho fixo. A técnica *axis-aligned bounding box* (AABB) é utilizada para obter os pontos e suas respectivas normais, na superfície da pá. Nesta técnica, a superfície alvo é inscrita em um bloco, que é uniformemente amostrado. É, então, realizada uma verificação de colisão entre os pontos amostrados no bloco e a superfície alvo e, caso haja interseção, o ponto é armazenado junto com sua normal à superfície. Dessa forma, podemos amostrar a pá e deslocar estes pontos 230 mm em relação à sua normal com a superfície, garantindo a requerimento do revestimento. A representação dos pontos amostrados e deslocados em relação às normais da pá podem estar nas figuras 7 e 8.

Utilizando as informações dos pontos amostrados e o espaço de trabalho do manipulador, foram gerados scripts para calcular a melhor distância do manipulador em relação a pá, de forma que o maior número de pontos revestidos com angulação de 90° fossem cobertos. Essa distância é calculada em relação à normal da pá. Com esse dado, é possível estimar quantas posições da base do manipulador serão necessárias para o revestimento de toda a pá.

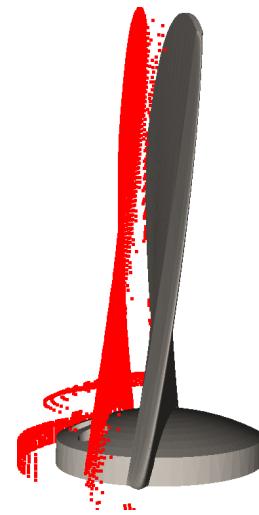


Fig. 7. Pontos amostrados da pá - vista lateral

As tabelas 2 e 2 abaixo resumem as características de cada robô e o estudo cinemático realizado, respectivamente:

Robô	Payload (Kg)	Massa (Kg)	Alcance (mm)
KR10	10	56	1100
MH12	20	130	2551
LBR 14	14	30	820
SIA20D	20	120	910

TABLE 2: Características principais dos robôs.

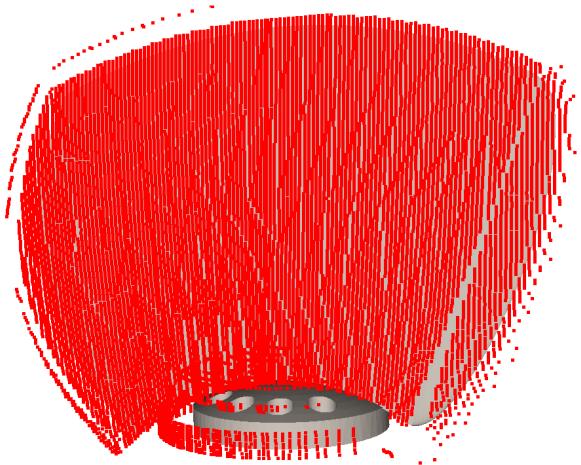


Fig. 8. Pontos amostrados da pá - vista frontal

Robô	Pontos revestidos (%)	Posições de base
KR10	24.33	13
MH12	53.3	4
LBR 14 ↑	17.2	13
LBR 14 →	17.37	13
SIA20D ↑	23.14	9
SIA20D →	24.76	9

TABLE 3: Resumo do estudo cinemático.

2.3.0.3. KR 10 R1100 sixx WP (Kuka) A figura 9 e figura 10 mostram as vistas lateral e superior do espaço de trabalho do manipulador, respectivamente. Em vermelho, estão representados os pontos a serem revestidos e em preto os pontos que o manipulador foi capaz de revestir.

O script que calcula a melhor posição da base em relação à pá retornou a posição 870 mm, sendo que 3825 pontos foram revestidos, representando 24.33% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 13 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 11.

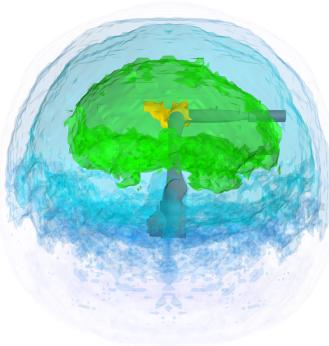


Fig. 9. Espaço de trabalho do manipulador Kuka KR10 - vista lateral

2.3.0.4. MH12 (Motoman) A figura 12 e figura 13 mostram as vistas lateral e superior do espaço de trabalho do manipulador, respectivamente.

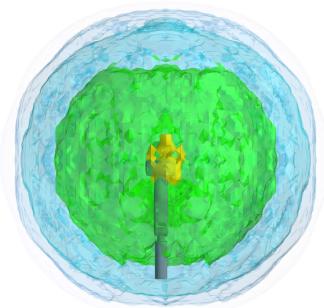


Fig. 10. Espaço de trabalho do manipulador Kuka KR10 - vista superior

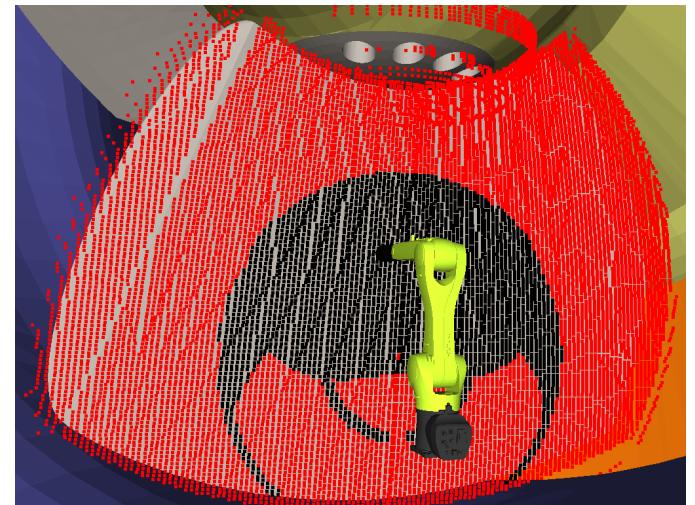


Fig. 11. Melhor posição para o revestimento - robô KR10 da Kuka.

O script que calcula a melhor posição da base em relação à pá retornou a posição 950 mm, sendo que 8379 pontos foram revestidos, representando 53.30% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 4 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 14.

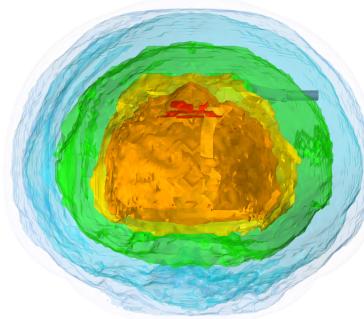


Fig. 12. Espaço de trabalho do manipulador MH12 - vista lateral

2.3.0.5. LBR iiwa 14 R820 (Kuka) O manipulador LBR iiwa 14 R820 possui 7 graus de liberdade e, devido a sua grande flexibilidade e facilidade de montagem, foram estudadas duas configurações para a base.

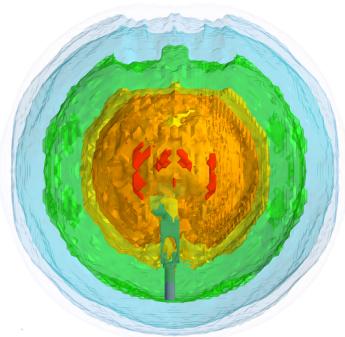


Fig. 13. Espaço de trabalho do manipulador MH12 - vista superior

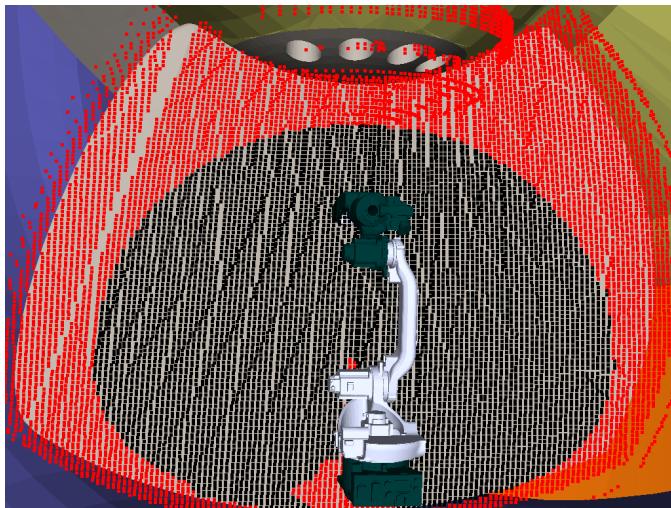


Fig. 14. Melhor posição para o revestimento - robô MH12 da Motoman.

O script que calcula a melhor posição da base na posição vertical em relação à pá retornou a posição 1.06, sendo que 2648 pontos foram revestidos, representando 17.20% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 13 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 15.

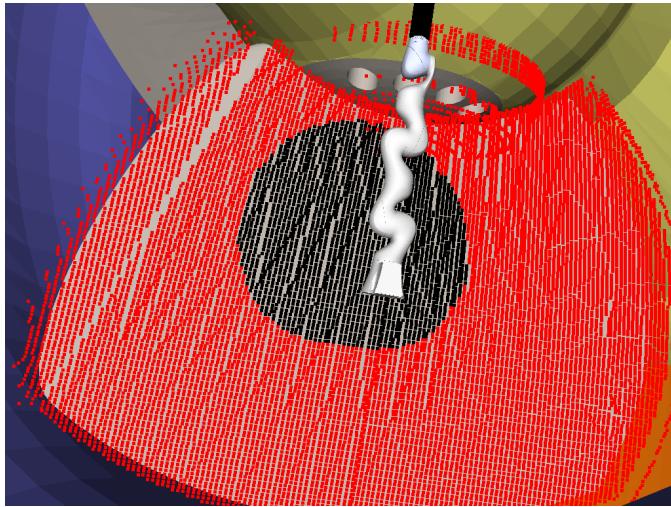


Fig. 15. Melhor posição para o revestimento - robô LBR da Kuka com base na posição vertical.

O script que calcula a melhor posição da base na posição vertical em relação à pá retornou a posição 1400 mm, sendo que 2730 pontos foram revestidos, representando 17.37% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 13 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 16.

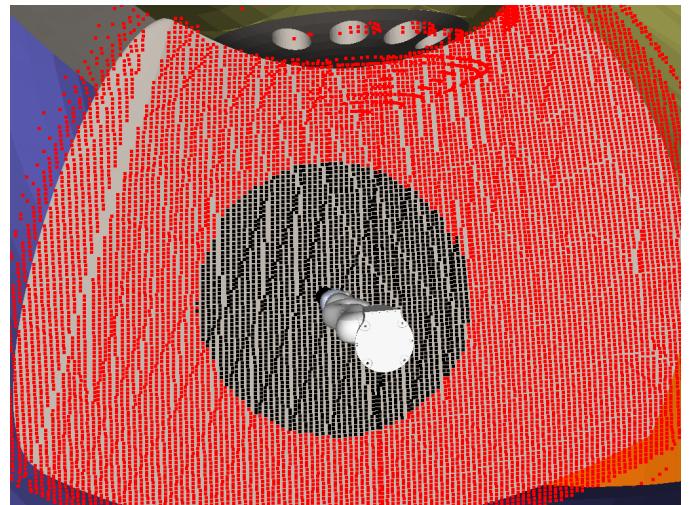


Fig. 16. Melhor posição para o revestimento - robô LBR da Kuka com base na posição horizontal.

**2.3.0.6. SIA20D (Motoman)** O manipulador SIA20D também possui 7 graus de liberdade e, devido a sua grande flexibilidade e facilidade de montagem, foram estudadas duas configurações para a base.

O script que calcula a melhor posição da base na posição vertical em relação à pá retornou a posição 1100 mm, sendo que 3638 pontos foram revestidos, representando 23.14% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 9 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 17.

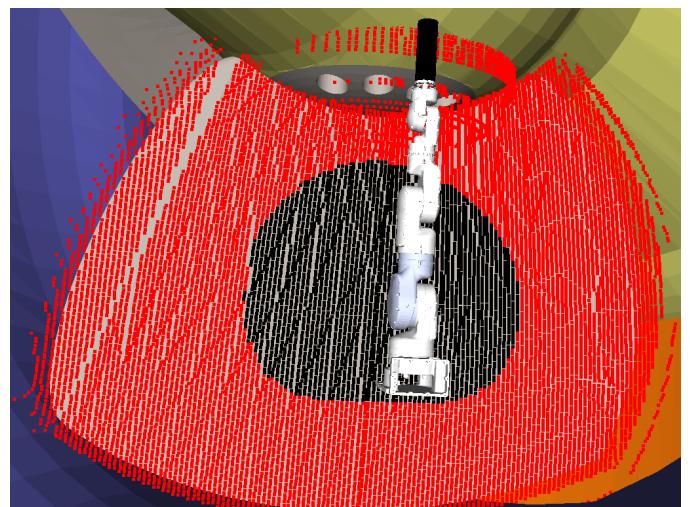


Fig. 17. Melhor posição para o revestimento - robô SIA20D da Motoman com base na posição vertical.

O script que calcula a melhor posição da base na posição horizontal em relação à pá retornou a posição 1510 mm,

sendo que 3892 pontos foram revestidos, representando 24.76% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 9 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 18.

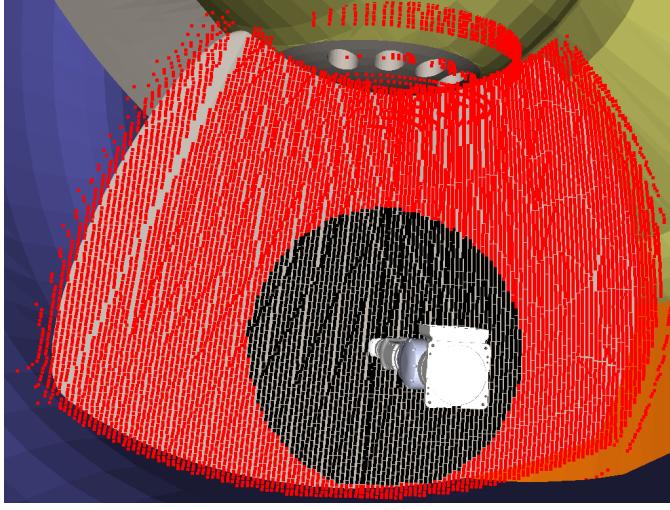


Fig. 18. Melhor posição para o revestimento - robô SIA20D da Motoman com base na posição horizontal.

**2.3.0.7. Tolerância no ângulo de revestimento** As análises de revestimento dos manipuladores exigiram que a pistola estivesse com as mesmas direções e sentidos opostos às normais dos pontos a serem revestidos, isto é, a orientação da pistola é sempre perpendicular ao plano da pá. Entretanto, pode-se assumir uma tolerância de  $90^\circ \pm 60^\circ$  entre a pistola e o plano perpendicular, que foi considerada na análise puramente geométrica. Como o manipulador MH12 (Motoman) possui recobrimento de quase todo o alcance vertical da pá (revestimento de cima a baixo), mostra-se interessante a análise de tolerância neste manipulador, de forma que haja simplificação das possíveis soluções de bases.

Primeiramente, são armazenados os pontos que o robô não foi capaz de revestir (pontos em vermelho, nas figuras de espaço de trabalho dos manipuladores) e suas respectivas normais aos planos tangentes à superfície da pá. Os pontos são deslocados 230 mm na mesma direção e sentido oposto às suas respectivas normais, de forma que pertençam à superfície da pá, ponto D é deslocado até ponto C na figura 19. Para cada ponto não revestido, são gerados dois vetores unitários  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  ortogonais entre si e ao vetor normal  $\vec{N}$ , no plano tangente à superfície da pá, conforme ilustrado na figura 20. O vetor  $\vec{N}$  é girado pelo ângulo de tolerância de revestimento  $\theta$  (entre  $0^\circ$  e  $60^\circ$ ) em relação ao vetor  $\vec{w}$ , gerando o vetor  $\vec{P}_1$ , figura 21.

Finalmente, o vetor  $\vec{P}_1$  pode ser girado em relação a  $\vec{N}$  e todos os vetores que pertencem à tolerância de revestimento  $\theta$  saem do ponto C até um ponto do círculo  $h$ , como o vetor exemplo  $\vec{P}_2$ , na figura 22. Observe que este círculo deve ser discretizado, e cada ponto pertencente ao círculo e sua respectiva normal (vetor de

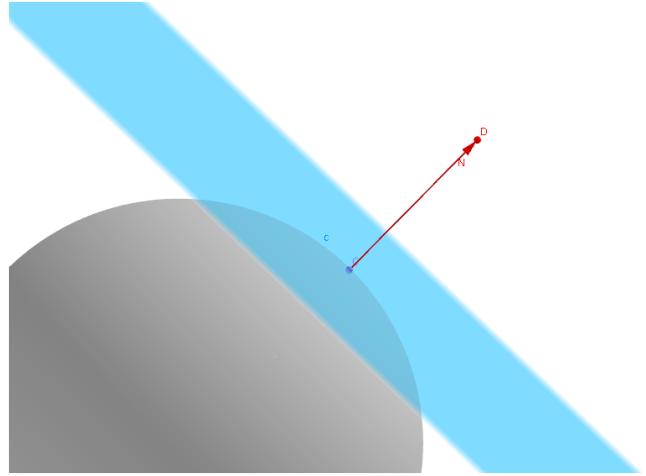


Fig. 19. Ponto D não revestido, deslocado 230 mm da superfície da pá.

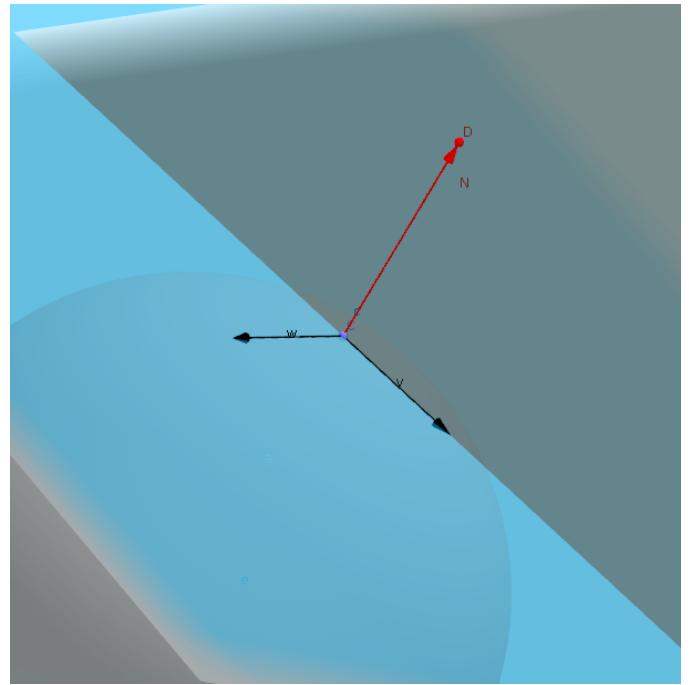


Fig. 20. Vetores v e w ortogonais ao vetor normal N.

origem C ao ponto do círculo) devem ser reavaliados, isto é, verifica-se se o robô alcança o ponto pertencente a  $h$  com pistola de revestimento apontada a sua respectiva normal. Se algum ponto do círculo puder ser revestido, o ponto D pode ser considerado como revestido. No exemplo da figura 22, o círculo  $h$  foi discretizado em dois pontos G e H, e suas normais são  $\vec{P}_1$  e  $\vec{P}_2$ , respectivamente.

Foram realizadas análises de tolerância para dois robôs: MH12, que apresentou o maior número de pontos revestido na pá, e LBR R820, que é a única solução viável de manipulador industrial para o acesso superior. Os ângulos de tolerância foram variados em  $10^\circ$  e  $30^\circ$ .

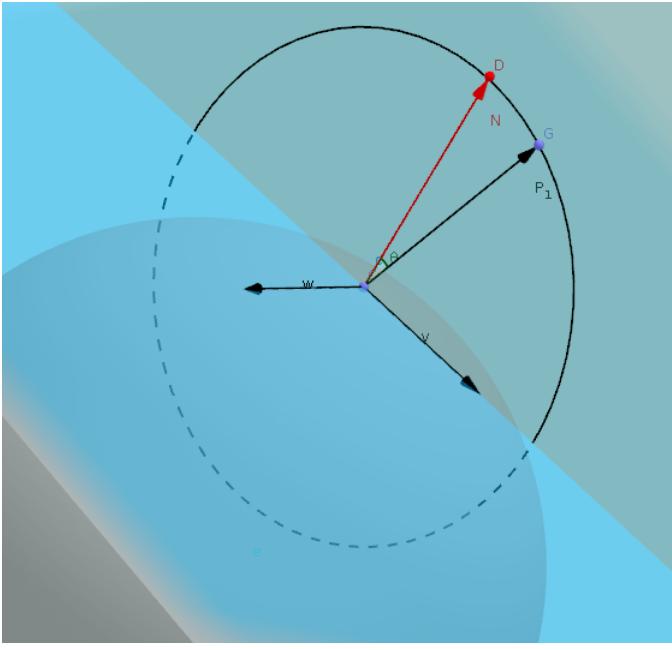


Fig. 21. Vetor N girado pelo ângulo de tolerância de revestimento.

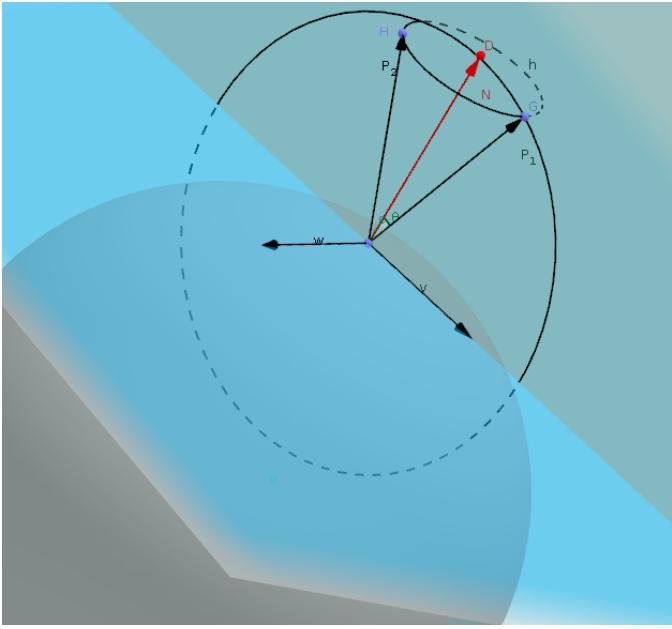


Fig. 22. Círculo  $h$  representa todos os pontos equivalentes ao ponto  $D$  com ângulo de tolerância de revestimento  $\theta$ .

#### 2.4 Dinâmica do manipulador

A dinâmica de um manipulador robótico é a análise de velocidades, acelerações e torques das juntas. Para esta análise, assume-se que o efetuador, pistola de revestimento, possui velocidade 40m/min constante em todos os pontos amostrados da pá. Como velocidades e acelerações exigem a computação de derivadas, é realizada uma melhor discretização da pá da turbina, na qual o passo de amostragem é menor e um filtro garante espaçamento uniforme dos pontos de 10 mm. Para um lado da pá, são amostrados, portanto, 130 mil pontos.

Para cada ponto amostrado da pá, faz-se a análise cinemática e são armazenados os pontos que são possíveis de serem revestidos, como na seção 2.3, isto é, são armazenados os pontos que possuem solução de cinemática inversa. Posteriormente, para cada ponto revestido, é criado um conjunto contendo seus 8 pontos vizinhos através de um algoritmo k-d tree, como na figura 23, onde  $p_r$  é o ponto de referência a ser analisado dinamicamente e os pontos  $p_1, p_2, q_1, q_2, r_1, r_2, s_1, s_2$  são auxiliares para o estudo.

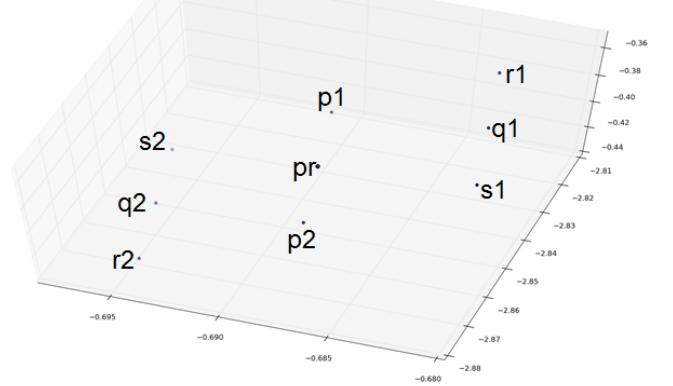


Fig. 23. Pontos exemplo amostrados da pá.

As velocidades angulares das juntas são calculadas a partir da cinemática diferencial. Para isso, usa-se o cálculo da matriz jacobiana ( $J$ ), que é a diferenciação (derivadas parciais) da matriz de cinemática direta em função das variáveis de junta (Sciavicco and Siciliano, 2000). A velocidade linear do efetuador ( $\dot{X}$ ) e o jacobiano são conhecidos em cada ponto de referência, logo podem-se calcular as velocidades das juntas do manipulador entre o ponto de referência e cada ponto auxiliar:  $\dot{X} = J\dot{q} \Rightarrow J^+\dot{X} = \dot{q}$ , onde  $J^+$  é a pseudo inversa Moore-Penrose de  $J$ .

As velocidades angulares são  $\Omega_r = \{\omega_{p_r, p_1}, \omega_{p_r, p_2}, \omega_{p_r, q_1}, \omega_{p_r, q_2}, \omega_{p_r, r_1}, \omega_{p_r, r_2}, \omega_{p_r, s_1}, \omega_{p_r, s_2}\}$ , onde  $\omega, \dot{\omega} \in \Omega_r$ , é um vetor  $n \times 1$ , e  $n$  é o número de juntas do robô. As velocidades dos ângulos das juntas é uma informação importante para a verificação da viabilidade das trajetórias do robô. Para o caso do robô MH12, onde  $\omega_{\max} = \{220, 200, 220, 410, 410, 610\}^o/s$ , por exemplo, caso não haja  $\omega \in \Omega_r$ , tal que  $\omega \leq \omega_{\max}$ , não é possível realizar o revestimento do ponto de referência  $p_r$ . Se  $\exists \omega \in \Omega_r$ , tal que  $\omega \leq \omega_{\max}$ , o ponto de referência é viável pela cinemática inversa e pela cinemática diferencial, mas pode ser inviável ainda pela análise dinâmica, que considera as acelerações, massas e forças do conjunto.

As equações dinâmicas de um manipulador são também abordados em Sciavicco and Siciliano (2000) e possuem duas abordagens bem conhecidas na literatura: equações de Newton-Euler e equações de Lagrange. O ambiente OpenRave utiliza o método de Newton-Euler para computar os torques das juntas (dinâmica inversa):  $\tau = M(q)\alpha + C(q, \omega)\omega + G(q)$ , onde  $\tau$  é o vetor de torques das juntas,  $M$  matriz de massas e momentos de inércia,  $\alpha$  é acelerações das juntas,  $C$  matriz de Coriolis,  $\omega$  é as velocidades das juntas e  $G$  o vetor de gravidade.

Para a formação da matriz  $M$ , é necessária a estimativa de parâmetros do manipulador. A estimativa dos parâmetros pode ser realizada de maneira iterativa, isto é, aplicam-se torques nas juntas e, pela resposta do manipulador, estima-se a matriz (Slotine and Weiping, 1988); ou pelo CAD do manipulador, por exemplo, pela utilização da ferramenta SolidWorks. Foi utilizado o método de estimativa pelo CAD do manipulador, visto que os manipuladores ainda estavam em estudo e não foram adquiridos, além disso houve facilidade de aproximar os parâmetros já que o CAD fornecido pelo fabricante é bem detalhado.

A aceleração angular,  $\alpha$ , é necessária para a computação dos torques,  $\tau$ . O método analítico para cálculo da aceleração angular das juntas é através da derivada da equação da cinemática diferencial:  $\ddot{X} = \dot{q}^T H \dot{q} + J \ddot{q} \Rightarrow \ddot{q} = J^T (\ddot{X} - \dot{q}^T H \dot{q})$  ou  $\alpha = J^T (a - \omega^T H \omega)$ , onde  $H$  é a matriz Hessiana, isto é, derivada parcial da matriz jacobiana  $J$  (Hourash, 2005).

Com a informação dos ângulos, velocidades e acelerações das juntas, momentos de inércia e massa dos elos, o OpenRave calcula a dinâmica inversa através do método Newton-Euler, obtendo-se os torques. Para cada ponto de referência, há quatro direções (trajetórias) possíveis amostradas que o efetuador pode percorrer:  $\{(p_1, p_r, p_2), (q_1, p_r, q_2), (r_1, p_r, r_2), (s_1, p_r, s_2)\}$ , logo quatro ângulos, velocidades e acelerações de juntas, portanto são obtidos quatro possíveis vetores de torques:  $T = \{\tau_{rp}, \tau_{rq}, \tau_{rr}, \tau_{rs}\}$ . E, especificamente para o caso do manipulador MH12, os valores dos torques devem ser inferiores aos estabelecidos pelo datasheet:  $\tau_{\max} = \{-, -, -, 22, 22, 9.8\} \text{ Nm}$ , logo se  $\exists \tau \in T$ , tal que  $\tau \leq \tau_{\max}$ , então há uma trajetória viável.

As figuras 24, 25 e 26 representam a evolução das análises do manipulador, de um nível mais simples a um nível mais complexo de detalhamento, o qual avalia velocidades, acelerações e torques das juntas do manipulador. Ainda deverá ser executada a análise de manipulabilidade que avalia o sistema de controle do manipulador. Esta análise é importante para o planejamento de trajetórias do manipulador e para o cálculo das posições viáveis da base para uma operação completa.

## 2.5 Detalhamento da Base Mecânica

A base mecânica é composta pelos elementos de suporte, transporte e ancoragem do robô no interior da turbina. Os elementos de suporte formam a estrutura principal da base, que estruturam o ambiente para a montagem, movimentação e funcionamento seguros do robô. Os elementos de transporte oferecem ao manipulador graus de liberdade que permitem que este se posicione com facilidade nos pontos ótimos para o processo. Estes elementos podem ser trilhos, atuadores lineares, mancais de rolamento, atuadores rotativos, etc. Já os elementos de ancoragem são necessários para fixar o robô e a estrutura no ambiente. As opções de ancoragem estudadas foram as bases magnéticas e solda. A primeira opção, bases magnéticas, é de preferência pois não danifica o ambiente e não necessita de outros equipamentos para montagem. No caso da solda, seriam necessários um soldador

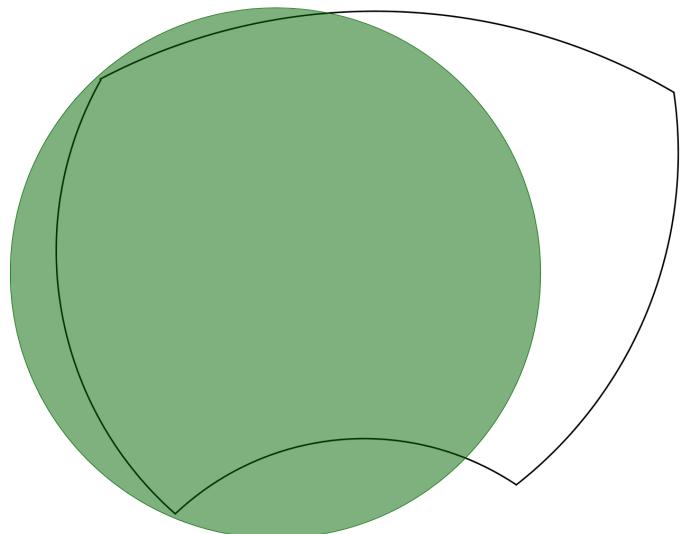


Fig. 24. Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem puramente geométrica.

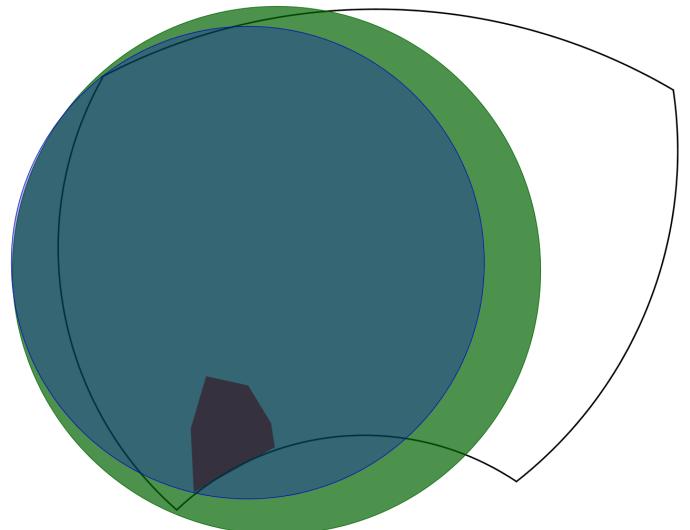


Fig. 25. Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem puramente cinemática.

capacitado e os equipamentos de soldagem no interior do ambiente confinado, quando a opção da base magnética não requer equipamentos extras.

As etapas de detalhamento da base mecânica seguem a seguinte ordem: 1) investigação dos graus de liberdade necessários; 2) configuração conceitual da base em função dos graus de liberdade; 3) escolha do melhor conceito; 4) escolha e dimensionamento dos elementos mecânicos que compõem a base; 5) testes. Avaliamos até esta etapa do projeto os itens: 1,2 e 3.

Os graus de liberdade são fornecidos através de combinações de juntas prismáticas e rotacionais, que no nosso caso irão permitir o movimento do robô desde a escotilha inferior até o ponto de interesse, tanto para o início do processo de revestimento em uma região da peça, como para a movimentação de precisão para

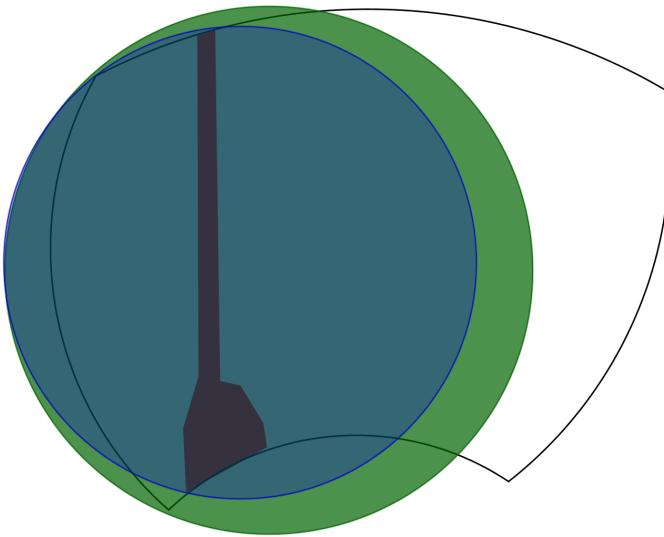


Fig. 26. Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem dinâmica.

a região seguinte. Investigou-se primeiramente alguns conceitos baseados nos graus de liberdade necessários para fornecer à base do robô todos os posicionamentos necessários, de acordo com os estudos cinemáticos e dinâmicos descritos nas seções 2.3 e 2.4. Estes conceitos serão apresentados em detalhe na seção 2.5.1.

A análise dos conceitos estudados permite então compará-los e definir o que melhor se adapta ao objetivo da solução. Nesta etapa incia-se o detalhamento da base mecânica seguindo as diretrizes e requisitos mecânicos do projeto. A estrutura deve ter capacidade de suportar os esforços dinâmicos do robô, de forma que não haja grandes deformações elásticas e oscilações que possam comprometer a precisão de posicionamento do efetuador do braço robótico. Deve-se atentar também ao caráter dinâmico dos esforços, que causam vibrações que podem resultar em esforços e deslocamentos elevados. Assim, a fixação da estrutura da base no ambiente deve ser o mais rígida possível, superdimensionando os elementos de ancoragem e minimizando as folgas nos acoplamentos. A próxima etapa do projeto é justamente dimensionar a estrutura mecânica a partir do conceito escolhido.

**2.5.1. Conceitos de base mecânica** A seguir apresenta-se os conceitos analisados, em relação aos graus de liberdade da base mecânica:

#### • Base Prismática-Rotacional-Rotacional (P-R-R):

Neste conceito estudou-se a possibilidade de utilizar uma base com 3 graus de liberdade: um prismático e dois rotacionais. O prismático seria composto por um trilho alinhado e paralelo ao eixo da turbina que transportaria o robô até a região próxima a pá. Uma junta rotacional e com eixo vertical orientaria a base nesta direção e uma junta perpendicular à primeira faria o posicionamento da base do robô para então iniciar o processo de revestimento. A figura 27 ilustra este conceito.

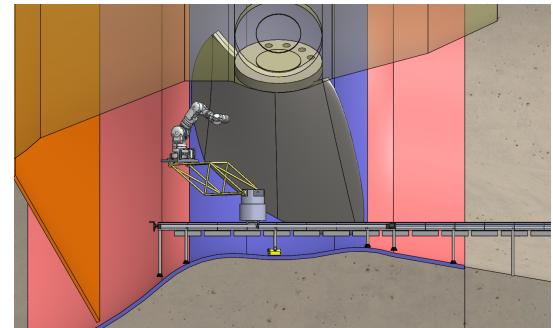


Fig. 27. Base Primático-Rotacional-Rotacional

A vantagem deste conceito é conferir um alcance grande ao manipulador através da base, permitindo que este possa ser de menor alcance próprio, mas ao mesmo tempo mais leve. Porém, devido à configuração de juntas e pelos resultados encontrados no estudo cinemático, a manobrabilidade desta base seria reduzida naquele espaço, havendo posicionamentos difíceis de serem alcançados, ou até impossíveis dependendo do manipulador escolhido.

#### • Base Prismática (P):

Este conceito consiste de um trilho (junta prismática) para o transporte do manipulador desde a escotilha até o ponto de interesse para revestimento na face anterior ou posterior da pá. Quando posicionado, remove-se a seção do trilho na direção que obstrui a rotação do rotor. Neste conceito, adiciona-se um grau de liberdade ao sistema utilizando a própria rotação do rotor, posicionando a pá em relação ao robô. A base mecânica então forneceria apenas movimento no trilho na direção do eixo da turbina, deixando fixas as outras direções. O procedimento para o revestimento seria o posicionamento do rotor, deixando a região a ser processada ao alcance do manipulador; o posicionamento do robô no trilho, em relação a pá; a ancoragem do robô no ambiente; e o revestimento da região possível para aquela posição. Repete-se então este procedimento até ter toda a face processada e posiciona-se a próxima pá para revestimento, sem necessidade de mover ou desmontar a base do robô até todas as faces daquele lado estarem completas. A figura 28 ilustra este conceito.

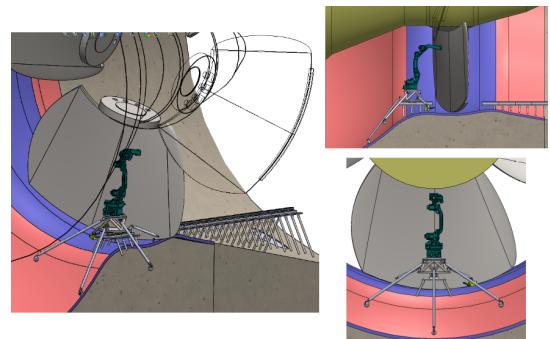


Fig. 28. Base Prismática

Este conceito foi estudado para o manipulador MH12, que de acordo com a análise cinemática consegue processar toda a extensão vertical. Para outros manipuladores, seria necessário incluir uma junta

prismática, adicionando um grau de liberdade, na direção vertical.

A análise cinemática também demonstrou que seriam necessárias muitas posições do rotor para completar uma face da pá. Há inclusive dificuldades operacionais e de segurança no procedimento de rotação do rotor que devem ser considerados. O rotor só pode ser girado manualmente, não fornecendo precisão no posicionamento da pá em relação a base. Por ser uma tarefa manual, deve-se ter procedimentos adequados de segurança para preservar tanto o operador quanto os equipamentos próximos. Estas preocupações tornam a solução pouco prática sob o ponto de vista operacional.

#### • Base Prismática-Rotacional-Prismática (P-R-P):

Este conceito consiste de uma base composta por um trilho primário (junta prismática 1), uma plataforma de base pivotada por mancal e rolamentos entre o trilho primário e secundário (junta rotacional) e um trilho secundário (junta prismática 2). Montado o trilho primário alinhado ao eixo da turbina a base rotacional sobre o trilho primário, fixa-se o robô sobre a base rotacional. Esta base permitirá a montagem do trilho secundário apenas quando o robô atingir a região de interesse para revestimento. Quando posicionado o manipulador, monta-se então o trilho secundário alinhado ao plano paralelo a face da pá e ancora-se a base no ambiente. Desta forma, o robô pode-se movimentar ao longo de toda a extensão da pá por meio do trilho secundário e também se aproximar e se afastar da superfície da pá, por meio do trilho primário. A figura 29 ilustra este conceito.

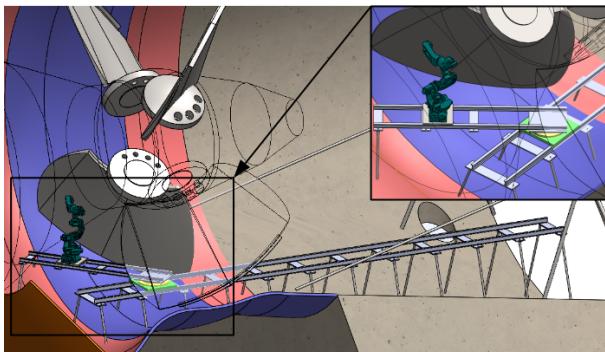


Fig. 29. Base Primática-Rotacional-Prismática

Desta forma, o rotor deve estar girado em, no mínimo  $30^\circ$  para não haver contato com o trilho primário. A análise cinemática será realizada para encontrar a melhor configuração de juntas da base que permite ao robô se movimentar nos graus de liberdade da base, sem alterar o posicionamento do rotor e, assim, cobrir uma face inteira da pá. Para a repetição do processo nas outras pás do lado da sucção da turbina, é necessária a desmontagem do trilho secundário, o recuo do robô e desmontagem de parte do trilho primário, permitindo o giro do rotor para a pá seguinte. Para as faces do lado de adução, não é necessária a desmontagem parcial do trilho primário.

**2.5.2. Sistemas de elevação, fixação e ancoragem** A entrada dos componentes da base mecânica é uma tarefa trabalhosa, devido ao acesso limitado ao interior da

turbina. O diâmetro de 800 mm da escotilha inferior limita o tamanho e geometria dos equipamentos, fazendo com que estes tenham dimensões reduzidas. Estes componentes devem ser içados até a escotilha em uma altura de 5 m entre o piso no exterior do ambiente confinado e seu interior. Assim, a modularidade dos elementos que compõe a base é uma diretriz essencial a esse projeto. A estratégia então é ter-se pequenos módulos de componentes que poderão ser içados separadamente e acoplados entre si, até se obter a estrutura completa. A facilidade de transporte, montagem e desmontagem da base mecânica causará um grande impacto na praticidade e agilidade de implementação da solução.

A entrada de pessoal através da escotilha é feita por uma escada vertical com guarda-corpo. Equipamentos de segurança como cinto e talabarte devem ser usados para qualquer um que deseja entrar no ambiente confinado da turbina através da escada e isso impossibilita o transporte manual dos equipamentos. Por este motivo, deve ser instalada uma estrutura com talha que permita a elevação até o interior da turbina e movimentação para a área de montagem adequada. As figuras 30 e 31 ilustram a estrutura de elevação com talha e carro trole.

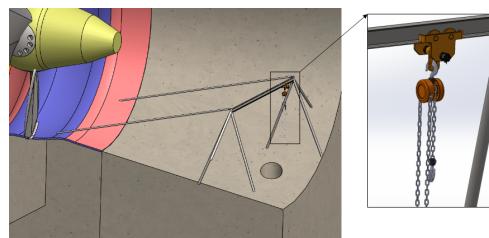


Fig. 30. Sistema de elevação dos equipamentos

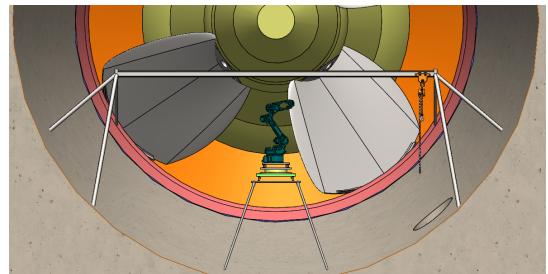


Fig. 31. Visão frontal da talha e trilho

Devido aos esforços dinâmicos de operação do robô, a fixação da estrutura da base mecânica no ambiente deve ser dimensionada com cuidado. Por se tratar de um ambiente de escoamento de fluido sob pressão, não são admitidas modificações permanentes de infra-estrutura no interior da turbina, logo, qualquer método de fixação utilizado deve ser removível, sem causar nenhum dano à qualquer superfície. Em visita técnica realizada em Outubro de 2015 foi testada a viabilidade de utilização de bases magnéticas para o sistema de ancoragem e fixação. Este teste teve o objetivo de verificar a real carga limite de tração do imã, considerando o ambiente (geometria), materiais e acabamentos superficiais reais a que estará submetido na solução final. O resultado detalhado do teste encontra-se no Apêndice B.

Outra opção para fixação provisória seria a soldagem da estrutura na superfície do túnel. Esta opção segue como uma alternativa ainda para regiões de difícil fixação da base magnética.

## 2.6 Shutter

O processo de revestimento HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) requer velocidade da pistola controlada de 40 m/min. Esta velocidade é essencial para a qualidade do processo e deve ser mantida constante para se obter uma camada regular de material ao longo de toda a superfície da peça. Na solução pesquisada demonstrou-se ser inviável utilizar um robô de grande porte, devido a limitação de acesso e ao confinamento do manipulador no ambiente. Portanto, o manipulador escolhido realizará o processo em regiões delimitadas da superfície da peça e, em sua trajetória, haverá inevitavelmente mudanças de direção, e portanto acelerações, que irão variar a velocidade da pistola. Durante essas variações não deve-se injetar o material na peça, sendo necessário um mecanismo autônomo para impedir o processo nestes intervalos.

A ideia inicialmente estudada foi de uma barreira (*shutter*) ao fluxo na saída da pistola. A figura 32 ilustra a ideia para dois conceitos nas configurações aberta e fechada. Nestes conceitos, uma barreira é movimentada automaticamente sempre que houver mudança de direção da pistola, impedindo que o fluxo de material atinja a pistola.

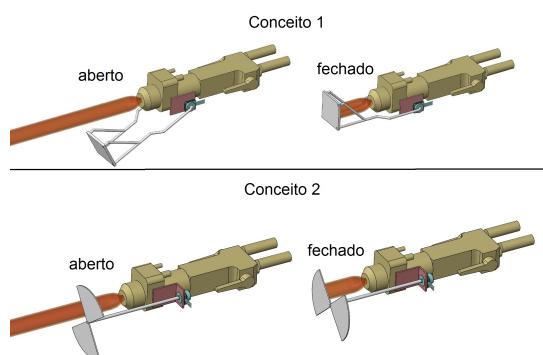


Fig. 32. Conceitos de *shutter* avaliados

Algumas considerações foram levantadas para avaliar a viabilidade desta solução, como a alta temperatura da chama, a capacidade do atuador, a resistência mecânica da barreira e a taxa de acúmulo de material. Este conceito foi abandonado principalmente devido ao acúmulo de material na barreira, o que levaria a um aumento de seu peso, e por consequência momento de inércia, alterando a dinâmica prevista, ou ainda, poderia chegar a obstruir a saída da chama causando danos à pistola.

Outra proposta que está sendo estudada é a de modificar o fluxo da linha de revestimento. A ideia é a inclusão de uma válvula direcional com atuação por solenóide para desviar o fluxo do material de revestimento para um tanque ou cilindro de retorno. Esta atuação deve ser autônoma e coordenada com a trajetória do manipulador. A válvula seria de três vias e duas posições (3/2) tal que, no repouso, direciona-se o fluxo diretamente

para a pistola e, quando atuada, bloqueia-se o fluxo para a pistola e abre-se o fluxo para exaustão. Uma válvula limitadora de pressão regulável seria utilizada na linha de exaustão para igualar as diferenças de pressão entre as duas vias, minimizando efeitos transitórios. Outra característica opcional importante para redução dos efeitos transitórios, como pico de pressão, é a de sobreposição aberta, ou seja, o fluxo só seria fechado da posição inicial quando o movimento de troca estivesse completo. A figura 33 apresenta o circuito do processo HVOF de forma simplificada.

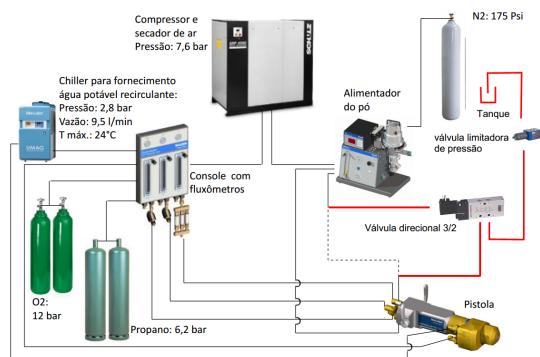


Fig. 33. Circuito do processo HVOF modificado

A linha tracejada representa o circuito original, as linhas em vermelho representam a modificação do circuito com os equipamentos adicionais indicados.

Esta é uma alternativa que tem como principal vantagem a de poder retornar a matéria-prima do revestimento para tanque, ou seja, evita-se o desperdício do material no ambiente. Esta matéria-prima poderia então ser reaproveitada no processo, separando-se o gás.

## 3. CALIBRAÇÃO

O processo de metalização utilizado atualmente considera que a posição e orientação da pá é fixa em relação ao robô e, uma vez, que corretamente posicionado, o processo é executado em malha aberta. Entretanto, para qualquer uma das soluções propostas por esse documento, não é possível assumir que nem a posição nem a orientação do manipulador, em relação a pá a ser processada, se manterão fixas.

Para um correto planejamento de trajetória que o manipulador deve seguir durante a tarefa de metalização, é importante o conhecimento da transformada entre o sistema de coordenada do manipulador e da pá a ser processada. Portanto, é necessário utilizar algum sistema que possibilite a aquisição de informações a respeito do ambiente e da posição relativa entre o manipulador e as pá.

### 3.1 Estudo de sensores

A utilização de um sensor de aquisição de dados espaciais não se limita somente a localização, mas, dependendo do sistema a ser escolhido, pode também ser útil na reconstrução do modelo do perfil hidráulico da pá, tanto do perfil ideal quanto do estado atual da pá a ser processada (Tarefas descritas em 1).

Esta seção irá apresentar os segmentos de sensores que possam suprir essa necessidade, assim como suas vantagens e limitações.

**3.1.1. 3D scanners** 3D scanners são equipamentos de alta precisão utilizados na indústria geralmente em aplicações de metrologia, construção civil, monitoramento de deformações, entre outras. O equipamento consiste em um feixe de laser que é direcionado por meio de um espelho e a partir da mudança de fase do sinal refletido é possível calcular a distância até o objeto atingido. O seu preço esta na faixa de U\$70.000,00.

**3.1.1.1. Estações de medição** Esse tipo de sensor funciona a partir de um único feixe laser que é direcionado por um espelho giratório acoplado a um motor de passo de alta resolução. O sensor possui também uma base giratória, realizando assim um escaneamento de  $360^\circ$  do ambiente. Graças a sua construção, esse tipo de sensor possui uma alta densidade de pontos e resolução, porém sua taxa de atualização não é muito alta.

- **Faro Focus X 330**

- Campo de visão (vertical/horizontal):  $300^\circ/360^\circ$
- Alcance: 330m
- Velocidade máx. de escaneamento: 976.000pts/s
- Precisão:  $\pm 2\text{mm}$
- Peso: 5,2 kg
- Tamanho: 240 x 200 x 100 mm
- Vida da bateria: 4,5 horas
- Temperatura ambiente:  $5^\circ - 40^\circ \text{ C}$
- Preço: U\$70.000,00

- **Leica P16**

- Campo de visão (vertical/horizontal):  $270^\circ/360^\circ$
- Alcance: 40m
- Velocidade máx. de escaneamento: 1.000.000pts/s
- Precisão:  $\pm 3\text{mm}$
- Peso: 12,25 kg
- Tamanho: 238 x 358 x 395 mm
- Vida da bateria: 5,5 horas
- Temperatura ambiente:  $-20^\circ - 50^\circ \text{ C}$
- Preço: U\$80.000,00

- **Nikon MV330**

- Campo de visão (vertical/horizontal):  $45^\circ/360^\circ$
- Alcance: 30m
- Velocidade máx. de escaneamento: 2000pts/s
- Precisão:  $\pm 0.5\text{mm}$
- Peso: *não informado*
- Tamanho: *não informado*
- Vida da bateria: *não informado*
- Temperatura ambiente: *não informado*
- Preço: U\$355.000,00

**3.1.1.2. Velodyne** A empresa Velodyne possui, atualmente, 3 modelos de 3D Lidar. Os modelos variam basicamente no número de pares de emissores e receptores e, consequentemente, na resolução final. Os modelos são o VLP-16, o HDL-32E e HDL-64E, com 16,32 e 64 canais respectivamente. Esse tipo de sensor possui



Fig. 34. Sensor Faro Focus X330

uma alta taxa de atualização, entretanto não possui uma alta densidade de dados. O modelo mais utilizado é o intermediário HDL-32E.

- 32 pares laser/detector
- Campo de Visão:  $+10.67^\circ$  to  $-30.67^\circ$  (vertical)
- Rotação de  $360^\circ$
- Alcance - 1m - 100m
- 10 Hz frame rate (selecionável 5-20Hz)
- Temperatura de Operação  $-10^\circ$  to  $+60^\circ \text{ C}$
- Acurácia:  $<2\text{ cm}$
- Resolução Angular (vertical)  $1.33^\circ$
- Peso: HDL-32E = 1kg; Cabos = 0.3kg
- Tamanho: 15cm altura x 8.6cm diâmetro
- Proteção: IP67
- Correção de orientação (internal MEMS accelerometers and gyros)



Fig. 35. Velodyne Models

**3.1.1.3. Forecast 3D Laser System** O sensor Forecast 3D consiste em um senor 2D laser da SICK, modelo LMS 151 ou 511, acoplado a uma unidade *pan – tilt*. O seu preço esta na faixa de U\$37.000,00.



Fig. 36. Forecast 3D Laser System

**3.1.2. ToF Cameras** Conhecidas como Time-of-Flight Cameras, são dispositivos compostos por apenas uma câmera, não necessitando de uma configuração estéreo para triangularização de imagens. Esse tipo de dispositivo utiliza uma fonte infra-vermelho interna e de

forma análoga aos dispositivos laser, calcula a distância a partir da diferença de fase do sinal refletido. Entretanto, essa tecnologia possibilita o cálculo simultâneo das distâncias de cada objeto na região iluminada pela fonte IR, mesmo que com resoluções limitadas.

### 3.1.2.1. Mesa Imaging SwissRanger SR4000

- Alcance para detecção: 0.1 - 10.0 m
- Alcance calibrado: 0.8 - 8.0 m
- Drift com a temperatura ( $T$ ) -  $\leq 1.5 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$  (max.) - For  $10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$
- Tamanho: 65 x 65 x 76 mm
- Peso: 510 g



Fig. 37. Mesa Imaging SwissRanger SR4000

### 3.1.2.2. Sentis M100 / Argos 3D - P100

- Medidas de distância e vídeo em tons de cinza
- Resolução: 160 x 120 pixels
- 40 - 160 fps
- Alcance: >3m (extensível até 10m indoor)
- Campo de Visão: 90°
- Tamanho: 75 x 57 x 26 mm
- Peso:



Fig. 38. Sensor Argos 3D - P100

**3.1.3. Câmeras de Luz Estruturada** Estes sensores constituem de uma fonte emissora de infra-vermelho e um receptor. Um padrão é projetado na cena a ser reconstruída e a partir da distorção desse padrão é possível o cálculo de distâncias.

Características	Luz Estruturada	ToF
Complexidade de Software	Média	Baixa
Custo Material	Alto	Médio
Tamanho	Grande	Pequeno
Tempo de Resposta	Alto	Baixo
Acurácia da Profundidade	Alta	Média
Qualidade com Pouca Luz	Boa	Boa
Qualidade com Muita Luz	Fraca	Boa
Consumo de Energia	Médio	Escalável
Alcance	Escalável	Escalável

TABLE 4: Comparativo Luz Estruturada vs ToF. Fonte: (Li, 2014)

### 3.2 Conclusão

As restrições apresentadas pelo problema de calibração, dentro do ambiente da turbina, impõem um conjunto de requisitos mínimos que o sensor deve apresentar:

- Alta resolução
- Portabilidade
- Alcance suficiente (>20m)
- Resistir as condições de temperatura e umidade

Além desses requisitos, é desejável também que o sensor tenha alimentação independente e que sua velocidade de escaneamento não seja um fator limitante para a eficiência do processo.

A classe de sensores que atende todas essas condições é a das Estações de medição, com exceção do sensor Nikon MV 330 que não possui a portabilidade necessária para a solução proposta, além de ter um preço muito maior que os seus concorrentes.

O sensor Faro Focus X330, além de satisfazer os requisitos mínimos, é o que possui menor preço e, por isso, foi escolhido como o sensor a ser utilizado na calibração do sistema e responsável por colher os dados espaciais do ambiente da turbina e do robô.

Entretanto, pelas especificações do sistema não foi possível garantir a perfeita operação do sensor nas condições de alta umidade apresentada no interior da turbina. O dispositivo opera com um sistema de lentes e lasers e, caso apresente condensação em um desses componentes, o resultado final de sensoriamento pode ser prejudicado. Devido a este fato, foi realizado uma bateria de testes na Usina de Jirau, no interior de uma turbina, afim de confirmar a viabilidade técnica desse sensor.

O teste realizado constituiu na utilização de quatro esferas reflexivas, representadas na figura 39, distribuídas pelo ambiente da turbina. Em seguida, foram realizadas 4 coletas de dados, sendo 3 delas à jusante do rotor e uma entre as pás do rotor e o distribuidor. Com a nuvem de pontos coletada, foi possível utilizar a assinatura única gerada pelas esferas para alinhar todos os conjuntos de dados em uma única imagem 3D.

A figura 40 representa a vista frontal da imagem gerada e, por sua vez, a figura 41 representa uma reconstrução 3D gerada a partir da nuvem de pontos coletadas e utilizando o software proprietário do fornecedor do sensor.

A partir dos resultados gerados durante os testes foi comprovada que o sensor é capaz de operar nas condições extremas impostas pela turbina e com um nível de ruído aceitável para a aplicação em questão.

**3.2.1. Medidor de distância a Laser** Durante o processo de metalização o 3D scanner estará desligado, pois o tempo de varedura não torna prático para obter informações em tempo real. Assim o sistema estaria funcionando em loop aberto, o que gera receios com relação à segurança. A fim de evitar tais riscos é desejável alguma realimentação para o sistema sobre sua



Fig. 39. Conjunto de esferas reflexivas e tripé



Fig. 40. Vista frontal da imagem gerada a partir dados adquiridos durante o teste.

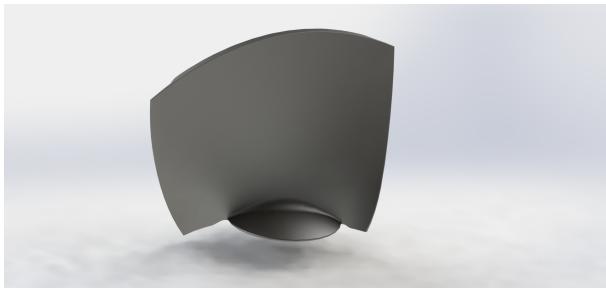


Fig. 41. Reconstrução em CAD da pá com os dados do teste.

posição. Essa realimentação será realizada pelo uso de um medidor de distância a Laser, a ser posicionado próximo à pistola de metalização, com o intuito de aferir a distância da pistola até a pá em tempo real.

Para a escolha de medidor compatível foram analisadas as seguintes variáveis:

**3.2.1.1. Temperatura** A temperatura da superfície pode influenciar na precisão do sensor devido à radiação de corpo negro. Caso essa radiação térmica atinja níveis

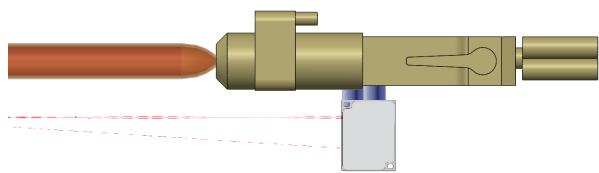


Fig. 42. Ilustração da posição do medidor de distância, em cinza, na pistola de metalização.

relevantes na faixa de frequência do Laser utilizado ocorre degradação da qualidade de resposta do sensor. Análises de campo identificaram que, apesar da alta temperatura da chama de metalização, a pá da turbina não chega a emitir níveis preocupantes de radiação na faixa do vermelho ( $670\text{nm}$ ), onde operam os Lasers padrões. Para casos de exceção existem Laser que trabalham em regiões do azul/violeta.

Por outro lado a temperatura do ambiente também influencia o sensor, que não costuma ter alta resistência à temperatura, ficando algo em torno de  $50^\circ\text{C}$ . Para evitar que o calor da chama seja recebido diretamente pelo sensor, aumentando a temperatura ambiente na região, ele deve ser posicionado na pistola com uma distância de segurança da chama (figura 42).

**3.2.1.2. Distância de operação** A metalização ocorre com a pistola entre 23cm e 24cm de distância da pá. Somado a isso temos a distância do sensor à chama para então sabermos a distância da pá ao sensor. Considerando que a pistola possui em torno de 30cm de comprimento, a faixa de operação de distâncias do sensor deverá incluir 40-50cm. Para termos essa região no centro da faixa de operação, ela deverá iniciar em 20-25cm e trabalhar até 80-100cm.

**3.2.1.3. Poeira e Umidade** A alta umidade ambiente dentro do aro câmara, e em todo circuito hidráulico, impõe mais um requisito sobre o equipamento. Além disso, o pó residual da aplicação da metalização pode ser danoso ao sensor. Um isolamento apropriado para o sensor pode ser encontrado segundo a padronização IP69K.

**3.2.1.4. Precisão** Como a tolerância está na ordem de milímetros (a distância do sensor à pá deve se manter em uma faixa de  $\pm 5\text{mm}$  entre 23cm e 24cm), logo é desejável que o sensor possua precisão de  $1\text{mm}$  ou menor.

**3.2.1.5. Peso** Considerando a carga máxima no punho do robô de 10kg, e a massa da pistola de 8,5kg e aplicando as restrições dinâmicas (para manter a velocidade desejada em todos os pontos) conclui-se que o medido deve ter uma massa inferior a 1kg.

### 3.3 Estudo de técnicas de reconhecimento

As informações de distância recebidas pelos sensores descritos na seção anterior podem ser armazenados como uma estrutura de dados chamada nuvem de pontos, isto é, uma representação tridimensional do espaço cartesiano, na qual cada distância medida pelos sensores a partir de sua origem representa uma coordenada x e z. Entretanto, essa representação não é capaz de diferenciar, ou classificar, os limites de cada objeto presente na cena, ou seja, não é possível determinar *a priori* qual conjunto de pontos pertence a cada elemento que se deseja identificar para realizar a calibração.

A identificação de cada conjunto, ou *cluster*, de pontos é importante para que a posição e orientação de cada objeto de interesse seja determinada e, assim a transformação do sistema de coordenadas entre cada objeto seja calculada. Esse processo necessita, então, do estudo e implementação de algoritmos para a análise da nuvem de pontos, identificação dos elementos necessários, extração de suas respectivas posições e, finalmente, cálculo da transformação entre as posições.

Dependendo das características de cada objeto a ser identificado e da possibilidade de implementação de uma estrutura de apoio para facilitar a sua identificação, podem ser utilizados diferentes métodos e estratégias de identificação e localização, que serão exploradas a seguir.

**3.3.1. Reconhecimento do Robô** O Robô é uma estrutura que a identificação pode ser facilitada pelo uso de padrões de fácil reconhecimento (como esferas e padrões de xadrez, figuras 43 e 44), pois alterações na base do robô não ocasionam problemas para o funcionamento do sistema.



Fig. 43. Exemplo de esfera utilizada para reconhecimento.  
Fonte: <http://shop.talwin.net/>

Devido a baixa iluminação ambiente dentro do circuito da tubina, a opção mais simples é o uso de nuvem de pontos sem identificação de cor. Ou seja, o reconhecimento se dará apenas pelo formato. Isso restringe o uso de padrões de xadrez e o foco se voltará, então, para o uso de formatos geométricos. Em especial o mais simples objeto de três dimensões: a esfera.

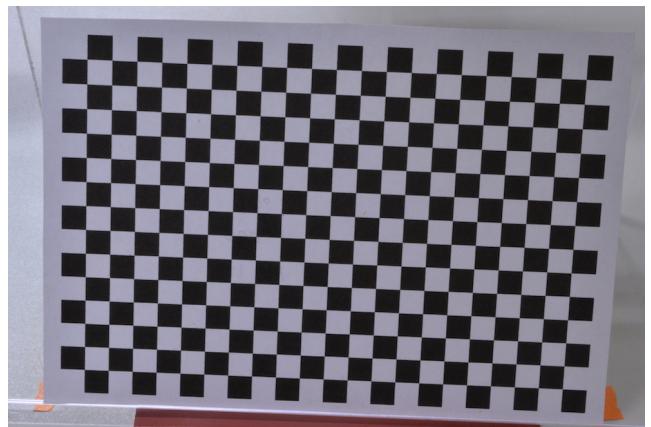


Fig. 44. Exemplo de padrão de xadrez utilizado para renhecimento.

Fonte: <http://stereomorph.blogspot.com.br/>

O reconhecimento de formas geométricas simples em três dimensões é um assunto já razoavelmente explorado na literatura. Dentre eles pode-se destacar 2 métodos: RANSAC e Hough Transform.

**3.3.1.1. RANSAC** O método RANSAC (acrônimo para “RANdom SAmple Consensus”, *consenso por amostragem aleatória* em tradução livre) é um método iterativo que tem como premissa a presença de *outliers* (elementos fora do corpo principal) na amostra e objetiva a identificação dos parâmetros matemáticos que descrevem o objeto geométrico em questão PLC (2015). É o método disponível na amplamente utilizada biblioteca de processamento de nuvem de pontos “PCL”.

Esse método consiste na seleção aleatória de pontos para serem considerados como partes integrantes do corpo principal (no caso, uma esfera), a partir desses os parâmetros da esfera são calculados (comumente, os valores x, y e z do centro da esfera e seu raio). Então os demais pontos são julgados como fazendo parte ou não da esfera de acordo com esses parâmetros. O modelo é avaliado como bem estimado se uma quantidade razoável de pontos são considerados como pertencentes à esfera. Se for visto como bem estimado, os parâmetros são então reestimado levando em conta de todos os pontos que foram considerados como pertencentes à esfera. O erro do modelo é inferido a partir dos pontos que foram considerados como fazendo parte da esfera e uma esfera reconstruída pelos parâmetros calculados. O processo então é repetido um número arbitrário de vezes, e se mantém armazenado o modelo que obteve menor erro.

Um dos principais pontos negativos do RANSAC é que ele tem como premissa a presença de apenas um corpo principal, ou seja, apenas uma esfera. Isso implica em um tratamento especial quando temos mais de uma esfera no ambiente.

**3.3.1.2. Transformada de Hough 3D** Anos de pesquisa em reconhecimento de objetos geométricos de duas dimensões levaram ao desenvolvimento e aprimoramento de técnicas baseadas em “Transformada de Hough”.

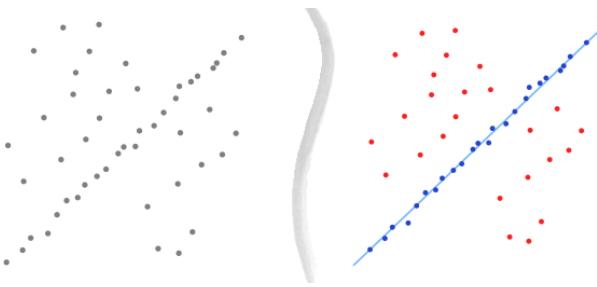


Fig. 45. Exemplo de reconhecimento de uma linha em 2 dimensões usando RANSAC. (Fonte: PLC (2015))

Essas técnicas tem sido recentemente adaptadas para o universo de três dimensões (ver Camurri et al. (2014)) e adequadamente chamadas de Transformada de Hough 3D.

O método consiste em transformar cada ponto do espaço 3D em uma variedade mergulhada no espaço quadridimensional dos parâmetros da esfera ( $x$ ,  $y$  e  $z$  do centro mais  $r$  do raio). A variedade se identifica com todas as possíveis esferas que contém aquele ponto. O espaço de parâmetros é então restrito dentro de certos limites e quantizado por razões de implementação (os recursos computacionais são finitos). É definido então um acumulador, basicamente uma função que conta quantas variedades interceptam determinada região discretizada do espaço de parâmetros. Um algorítmo de reconhecimento de picos é aplicado sobre o espaço de parâmetros (com as variedades já mergulhadas nele) para detectar qual o conjunto de parâmetros que está melhor descrevendo um maior número de pontos. O algorítmo pode ser utilizado para reconhecer mais de um pico e, assim, identificar a presença de mais de uma esfera na nuvem de pontos (exemplo na figura 46).

A dificuldade no uso do método é seu custo computacional, mas existem soluções que exploram amostragens estatísticas para reduzir o custo computacional.

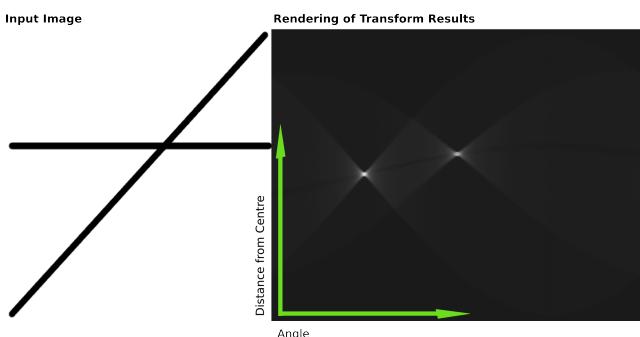


Fig. 46. Exemplo de reconhecimento de duas linhas em 2 dimensões usando Transformada de Hough. Na esquerda estão pontos que compõem as duas retas, na direita uma sobreposição das variedades referentes a cada ponto das retas (mergulhadas em um espaço paramétrico bidimensional). Os pontos mais brilhantes refletem os picos referentes aos parâmetros que melhor descrevem as duas retas. (Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hough\\_transform](https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform))

Tendo conhecimento da posição de quatro esferas, pelo uso de um dos métodos descritos acima, é possível unicamente identificar a posição de um corpo preso a elas. Em outras palavras, consegue-se a transformada entre origem do sistema de coordenadas (tipicamente no sensor) e o robô. Para descobrir a transformada entre o robô e a pá (posição relativa entre eles) falta identificar a transformada entre a origem e a pá, esse caso será explorado na próxima seção a seguir.

**3.3.2. Reconhecimento da Pá** Para a identificação e localização das pás das turbinas não é possível a utilização de nenhum artifício de apoio que facilite o processamento da nuvem de pontos, pois a instalação de qualquer um desses aparelhos não pode ter precisão garantida nas operações de campo. Uma instalação de um elemento de apoio em pontos precisos da pá necessitaria também de calibração para cada utilização, retirando assim o propósito do método.

Portanto, para a localização das pás da turbina é necessário explorar as características espaciais intrínsecas à superfície do próprio objeto e identificá-las na nuvem de pontos do ambiente. O objetivo principal nessa etapa do processo é, então, identificar um conjunto mínimo de características do objeto que o represente unicamente com um baixo grau de ambiguidade e sem exigir muito esforço computacional.

A escolha do tipo de característica a se usar é uma decisão fundamental para a eficiência do processo e tem sido alvo de estudos na literatura para a análise e reconhecimento de imagens 2D, como imagens RGB de câmeras e mais recentemente também para imagens 3D.

Uma boa representação de *point feature* deve ser capaz de capturar as mesmas características locais da superfície na presença de:

- **Transformadas** - rotações e translações 3D nos dados não devem influenciar a estimativa dos descriptores;
- **Variações na densidade de amostragem** - em princípio, uma de superfície amostrada mais ou menos densamente deve ter a mesma assinatura característica do vetor
- **Ruído**

O reconhecimento de objetos em aplicações robóticas também vem recebido grande atenção, principalmente com o crescimento da robótica móvel e em ambientes não estruturados, onde é necessário identificar e localizar os objetos a serem manipulados em cada tarefa. O problema é enfrentado basicamente utilizando-se duas abordagens: analisar os dados 3D ou realizar algum tipo de processamento e projeção para se trabalhar com imagens 2D e utilizar as técnicas mais maduras desse tipo de imagem.

Nesta última categoria, a técnica mais usada consiste em converter as informações tridimensionais em *Range Images*, na qual é realizada uma projeção a partir de um ponto de vista (geralmente o do sensor) e utiliza escala de cores ou cinza para representar a distância, ou seja, quanto mais escuro o objeto na imagem, mais longe ele se encontra. É importante resaltar que esse tipo de método

introduz perdas de informação ao se realizar projeções e é sensível à escolha do ponto de vista escolhido. A escolha do descriptor a ser utilizado depende da aplicação e deve ser estudada a melhor opção para a nossa solução, assim que tivermos dados aquisitados pelo sensor. Aplicações semelhantes envolvendo identificação de objetos no ambiente tridimensional, mas sem localizá-los, e utilizando diferentes descriptores podem ser encontradas em Bayramoglu and a.a. Alatan (2010); Hetzel et al. (2001); Chen and Bhanu (2007). Uma comparação dos descriptores utilizados para reconhecimento de objetos 2D e 3D pode ser encontrado em Zaharia and Prêteux (2004); Weber et al. (2014).

Após o reconhecimento do objeto, é necessário identificar a sua posição. Em Steder et al. (2009), o alinhamento é realizado utilizando-se a própria *Range Image* e a informação de profundidade presente na mesma. Por outro lado, em Nüchter et al. (2005) a região onde o objeto identificado está presente é selecionada e, por meio de *raycasting* o conjunto de pontos da nuvem pertencentes à região identificada na *Range Image* é reprojetado. Após essa segmentação, é utilizado um algoritmo de alinhamento como o ICP.

O primeiro passo para tornar possível a localização da pá é a aquisição de seus dados espaciais e a criação de uma nuvem de pontos que a represente. A figura 47 ilustra uma nuvem de pontos representando uma pá de uma das turbinas da usina de Jirau, esse modelo foi construído utilizando-se os dados aquisitados durante a viagem de campo e teste de sensibilidade do sensor Faro Focus X330, como citado anteriormente. É importante ressaltar que o modelo deve representar, se possível, todas as características pertinentes do objeto de interesse. Nesse sentido, se faz necessário a criação de um modelo para cada tipo de pá que deverá ser processada, ou seja pás com diferentes perfis hidráulicos possuem modelos diferentes.

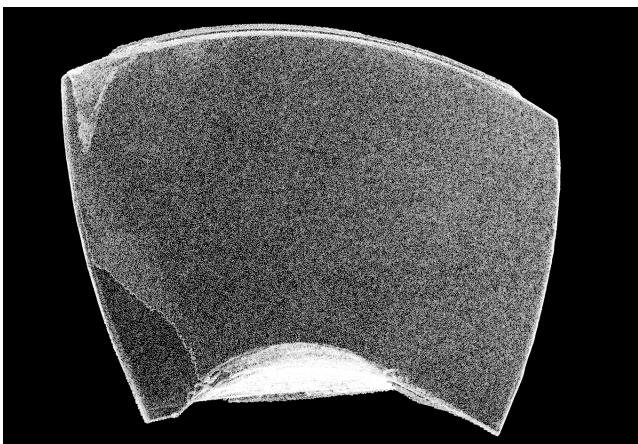


Fig. 47. Modelo da pá em nuvem de pontos

A partir do modelo, é necessário a extração de seus pontos chaves e descriptores. A figura 48 ilustra descriptores do tipo SHOT, identificados no modelo de referência da pá. Para a nossa aplicação, não é necessário, a princípio, o reconhecimento do objeto em questão, apenas a sua localização e orientação no espaço tridimensional. A possibilidade de inserir no sistema a informação de

qual modelo de pá deve ser procurado, simplifica o algoritmo e o torna menos suscetível a erros, uma vez que não é necessário avaliar qual o modelo mais próximo das medições atuais e ainda é possível utilizar essa informação para fornecer uma avaliação da similaridade do modelo com os dados reais aquisitados.

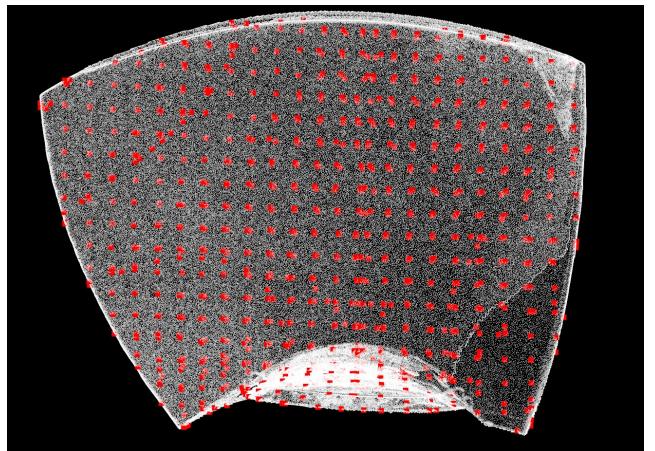


Fig. 48. Pontos de interesses com descriptores associados no modelo da pá

Uma vez que os pontos de interesse do modelo e seus descriptores são extraídos, é possível armazená-los para evitar o seu processamento durante cada nova calibração. Utilizando-se a estratégia de *Correspondence Grouping* e o algoritmo *Hough Voting* Tombari and Di Stefano (2010), a nuvem de pontos aquisitada em campo terá também seus pontos de interesse extraídos e um desritor associado para cada ponto. A seguir, os descriptores de ambas as nuvens, cena e modelo, são comparados afim de se encontrar correspondentes em cada conjunto. Se um número suficiente de correspondências é encontrado, o objeto é então detectado e localizado na imagem. É importante ressaltar que essa técnica pode gerar falsos positivos. A figura 49 ilustra a implementação do algoritmo com dados sintéticos de uma cena, utilizando-se porém o modelo real da pá. O modelo da pá está representado em amarelo, a pala identificada na cena em vermelho e as correspondências conectadas pelas setas verdes. Como próximos passos é necessário a utilização de dados reais para validação do algoritmo e também a utilização de diferentes descriptores, uma vez que apenas os descriptores do tipo SHOT foram testados.

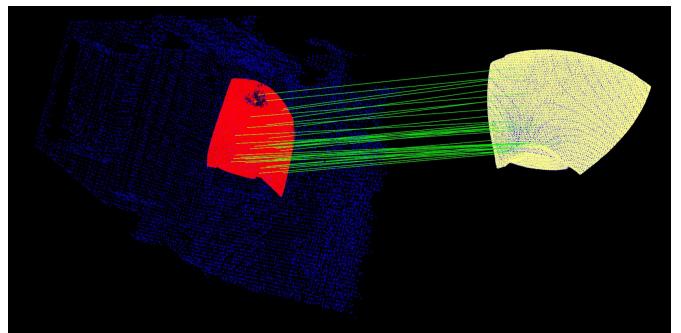


Fig. 49. Identificação e localização de uma pá utilizando *Correspondence Grouping*

## 4. INTERFACE DE USUÁRIOS

A interface gráfica do usuário permite a interação com o manipulador para a executar as tarefas inspeção e metalização das pás in Situ. O objetivo é de facilitar a usabilidade do software dando visibilidade aos dispositivos do sistema e monitorando o processo de metalização das pás. O estudo de viabilidade técnica prevê seu detalhamento até seu design conceitual, uma vez que seu desenvolvimento efetivo acontecerá posteriormente na fase de execução do projeto EMMA.

### 4.1 Pesquisa de usuários

A pesquisa de usuário identifica todos os atores possíveis no contexto de uso do software em questão, assim como coleta dados a respeito de seus possíveis usuários com o intuito de aprender sobre suas características, necessidades e preferências. Seu objetivo é de elaborar arquétipos que sirvam como referência na tomada de decisões e na arquitetura e design do sistema, bem como auxiliar nos requisitos funcionais e não funcionais.

### 4.2 Análise de Tarefas

A análise de tarefas ocorre de forma simultânea a pesquisa de usuários, podendo ser aplicado a uma variedade de técnicas para identificar e compreender a estrutura, o fluxo, e os atributos de tarefas executadas na metalização das pás. Seu objetivo é de identificar as ações e processos cognitivos necessários que o usuário complete uma tarefa ou atinja um objetivo particular. A partir desta análise de tarefas é possível projetar e atribuir atividades de forma adequada dentro do novo sistema. Para realizar a metalização das pás in Situ o software do robô EMMA vai realizar 3 tarefas distintas: calibração, planejamento de trajetória e metalização.

**4.2.1. Calibração** A etapa de calibração é efetuada toda vez que o robô precisa ser posicionado ou reposicionado no ambiente do aro câmera. O objetivo é de reconhecer no ambiente confinado todos os elementos que fazem parte da operação. Através de um sensor laser é obtida uma nuvem de pontos que posteriormente é analisada e fornece as posições do manipulador em relação a pá e ao trilho mecânico. A partir desses dados é oportuno realizar o planejar a trajetória do robô.

**4.2.2. Planejamento de Trajetória** Planejamento de trajetória define como o robô irá executar a aplicação de revestimento nas pás. A partir das posições do robô em relação a pá são geradas trajetórias que o efetuador irá percorrer para realizar o revestimento em toda a superfície da pá. Cada configuração do manipulador se relaciona com uma lista de ângulos das juntas do robô. A aplicação de metalização é dividida em etapas, para cada uma delas são geradas n configurações gerando assim uma matriz de ângulo dessas juntas.

**4.2.3. Metalização** A etapa de metalização conclui o processo de reparo e manutenção das pás pa partir da aplicação de revestimento metálico. Como definido no *Estudo do conceito para metodologia e revestimento robótico de turbinas In situ*

### 4.3 Casos de Uso

Casos de uso descreve os cenários e usuários presentes nas atividades do robô. Desta forma é possível visualizar funcionalidades do sistema do ponto de vista do usuário e de auxiliar na comunicação entre desenvolvedores e clientes.

### 4.4 Design Conceitual

Design conceitual corresponde a um protótipo baseado na pesquisa de usuários, análise de tarefas e casos de uso. É elaborado um desenho de estrutura, mais conhecido como 'wireframe' onde se descreve as funcionalidades e posicionamento de dispositivos. A partir são elaborados os primeiros testes de interação para verificar seu funcionamento.

### 4.5 Estrutura de Testes de Usabilidade

Em um primeiro momento é preciso testar a estrutura do teste por meio de observação dos usuários. Ao verificar se os testes são capazes de prover as informações necessárias, é definido como o teste de usabilidade será aplicado. Nesse contexto é de suma importância que todas vezes que o teste ocorra, seja aplicado a um usuário diferente. O objetivo é que este não tenha em mente o teste anterior a fim de garantir sua eficiência.

## 5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### Appendix A. PESQUISA DE MERCADO

Nas tabelas, estão marcadas em vermelho as características que os manipuladores não preencheram, em relação aos requisitos do processo HVOF ou às restrições do ambiente e logística, de acordo com o acesso em estudo. Em amarelo, são assinalados os manipuladores que cumpriram com as principais caracterísiticas, mas ainda não cumprem as exigências da solução conceitual, sendo necessária alguma alteração no manipulador. Em verde, são assinalados os manipuladores que cumprem todas as exigências e estão pronto para o uso.

### A.1 Acesso pela escotilha inferior - estudo de mercado

Robô	Fabricante	Carga	Peso	Velocidade	Dimensão	Temperatura	Umidade
IRB 120	ABB	3					
IRB 140	ABB	6					
IRB 1410	ABB	5					
IRB 1600	ABB	8,5					
IRB 1600ID	ABB	4					
IRB 2400	ABB	20	380				
IRB 260	ABB	30	340				
IRB 2600	ABB	20	284				
IRB 2600ID	ABB	15	276				
IRB 4400	ABB	60	1040				
IRB 4600	ABB	60	435				
IRB 660	ABB	250	1650				
IRB 6620	ABB	150	900				
IRB 6620LX	ABB	150	610				
IRB 6640	ABB	235	1405				
IRB 6650S	ABB	200	2250				
IRB 6660	ABB	130	1730				
IRB 66602	ABB	205	1730				
IRB 7600	ABB	500	2450				
IRB 52	ABB	7					
IRB 580	ABB	10	630				
IRB 5400	ABB	25	1060				
IRB 5500	ABB	13	540				
Viper s1700D	Adept	20	268				
Viper s650	Adept	2,5					
Viper s850	Adept	2,5					
Viper s1300	Adept	10	78	168°/s	305	?	?
Jaco	Kinova	2,5					
Micro	Kinova	2,5					
CR-35iA	Fanuc	35	990				
ARC Mate 100iC/6L	Fanuc	6					
ARC Mate 120iC	Fanuc	20	250				
ARC Mate 120iC/10L	Fanuc	10	255				
ARC Mate 50iD/7L	Fanuc	7					
ARC Mate 0iB	Fanuc	3					
ARC Mate 100iC/7L	Fanuc	7					
ARC Mate 100iC/12	Fanuc	12	130	225°/s	388	45°C	95,00%
ARC Mate 120iC/12L	Fanuc	12	250				
ARC Mate 100iC/8L	Fanuc	8					
LR Mate 200iD	Fanuc	7					
LR Mate 200iD/4S	Fanuc	4					
LR Mate 200iD/7L	Fanuc	7					
LR Mate 200iD/4SH	Fanuc	4					
LR Mate 200iD/7H	Fanuc	7					
M-10iA/12S	Fanuc	12	130	230°/s	388	45°C	95,00%
M-10iA/7L	Fanuc	7					
M-20iA	Fanuc	20	250				
M-20iA/10L	Fanuc	10	255				
M-20iA/20T	Fanuc	20	185				
M-20iA/35M	Fanuc	35	252				
M-20iA/12L	Fanuc	12	250				
M-410iB/140H	Fanuc	140	1200				

M-410iB/300	Fanuc	300	<b>1940</b>
M-410iB/450	Fanuc	450	<b>2430</b>
M-410iB/700	Fanuc	700	<b>2700</b>
M-410iC/185	Fanuc	185	<b>1600</b>
M-410iC/315	Fanuc	315	<b>1330</b>
M-420iA	Fanuc	40	<b>620</b>
M-421iA	Fanuc	50	<b>520</b>
M-430iA/4FH	Fanuc	<b>4</b>	
M-430iA/2PH	Fanuc	<b>2</b>	
M-430iA/2F	Fanuc	<b>2</b>	
M-430iA/2FH	Fanuc	<b>2</b>	
M-430iA/2PH	Fanuc	<b>2</b>	
M-710iS/50	Fanuc	50	<b>560</b>
M-710iC/70	Fanuc	70	<b>560</b>
M-710iC/50S	Fanuc	50	<b>545</b>
M-710iC/20L	Fanuc	20	<b>540</b>
M-710iC/50T	Fanuc	50	<b>410</b>
M-710iC/70T	Fanuc	70	<b>410</b>
M-710iC/50H	Fanuc	50	<b>540</b>
M-710iC/12L	Fanuc	12	<b>540</b>
M-710iC/45M	Fanuc	45	<b>570</b>
M-900iA/150P	Fanuc	150	<b>1860</b>
M-900iA/350	Fanuc	350	<b>1720</b>
M-900iA/260L	Fanuc	260	<b>1800</b>
M-900iA/200P	Fanuc	200	<b>2670</b>
M-900iA/400L	Fanuc	400	<b>3150</b>
M-900iB/700	Fanuc	700	<b>2800</b>
M-900iB/280L	Fanuc	280	<b>1600</b>
M-900iB/360	Fanuc	360	<b>1540</b>
M-2000iA/900L	Fanuc	900	<b>9600</b>
M-2000iA/1200	Fanuc	1350	<b>8600</b>
Paint Mate 200iA	Fanuc	<b>5</b>	
Paint Mate 200iA/5L	Fanuc	<b>5</b>	
P-250iB	Fanuc	15	<b>530</b>
P-50iB	Fanuc	15	<b>364</b>
R-1000iA/80F	Fanuc	80	<b>620</b>
R-1000iA/100F	Fanuc	100	<b>665</b>
R-1000iA/80H	Fanuc	80	<b>610</b>
R-2000iA/165F	Fanuc	165	<b>1170</b>
R-2000iB/210F	Fanuc	210	<b>1240</b>
R-2000iB/165R	Fanuc	165	<b>1480</b>
R-2000iB/100P	Fanuc	100	<b>1560</b>
R-2000iB/125L	Fanuc	125	<b>1190</b>
R-2000iB/100H	Fanuc	100	<b>1150</b>
R-2000iB/150U	Fanuc	150	<b>1070</b>
R-2000iB/220U	Fanuc	220	<b>1150</b>
R-2000iC/210F	Fanuc	210	<b>970</b>
R-2000iC/125L	Fanuc	125	<b>1115</b>
R-2000iC/210R	Fanuc	210	<b>1370</b>
R-2000iC/165F	Fanuc	165	<b>1090</b>
LBR iiwa 7 R800	Kuka	<b>7</b>	
LBR iiwa 14 R820	Kuka	14	30
KR 6	Kuka	6	75°/s
			180
			33°C
			80,00%

KR 10 R1100 sixx WP	Kuka	10	56	225°/s	245	45°C	WP
KR 5	Kuka	5					
KR 6-2	Kuka	6					
KR 16-2	Kuka	16	235				
KR 16 L6-2	Kuka	6					
KR 16-3 S	Kuka	16	235				
KR 20-3	Kuka	20	254				
KR 5-2 arc HW	Kuka	5					
KR 16 arc HW	Kuka	16	245				
KR 16-2 F	Kuka	16	235				
KR 16-2 KS-F	Kuka	16	235				
KR 16 L6-2 KS	Kuka	6					
KR 16 -2 CR	Kuka	16	235				
KR 30-3	Kuka	30	665				
KR 30 L16-2	Kuka	16	700				
KR 40 PA	Kuka	40	700				
KR 60-3	Kuka	30	665				
KR 30-3 F	Kuka	30	665				
KR 30-4 KS-F	Kuka	30	600				
KR 30-4 KS	Kuka	30	600				
KR 30-3 CR	Kuka	30	665				
KR 30 HA	Kuka	30	665				
KR 60-3 F	Kuka	30	895				
KR 60-4 KS-F	Kuka	60	600				
KR 60-4 KS	Kuka	30	615				
KR 60 L16-2 KS	Kuka	16	650				
KR 60 HA	Kuka	60	665				
KR 90 R2700 PRO	Kuka	90	1058				
KR 120 R2500 PRO	Kuka	120	1049				
KR 90 R3100 EXTRA	Kuka	90	1092				
KR 120 R2900 EXTRA	Kuka	120	1084				
KR 150 R2700 EXTRA	Kuka	150	1068				
KR 180 R2500 EXTRA	Kuka	180	1059				
KR 210 R2700 EXTRA	Kuka	210	1068				
KR 90 R3100 EXTRA	Kuka	90	1092				
KR 120 R2900 EXTRA	Kuka	120	1084				
KR 120 R3200 PA	Kuka	120	1075				
KR 150 R2700 EXTRA	Kuka	150	1068				
KR 180 R2500 EXTRA F	Kuka	180	1059				
KR 150 R3100 PRIME	Kuka	150	1114				
KR 180 R2900 PRIME	Kuka	180	1106				
KR 210 R2700 PRIME	Kuka	210	1111				
KR 240 R2500 PRIME	Kuka	240	1102				
KR 240 R2700 PRIME	Kuka	240	1111				
KR 90 R3700 PRIME K	Kuka	90	1204				
KR 120 R3500 PRIME K	Kuka	120	1192				
KR 150 R3300 PRIME K	Kuka	150	1184				
KR 180 R3100 PRIME K	Kuka	180	1168				
KR 210 R2900 PRIME K	Kuka	210	1180				
KR 180 R3200 PA	Kuka	180	1093				
KR 210 R2700 F	Kuka	210	1111				
KR 240 R3200 PA	Kuka	240	1103				
MH6S	Motoman	6					

MA1400 (AW)	Motoman	3					
VA1400	Motoman	3					
MA1440	Motoman	6					
HP20	Motoman	20	268				
MA1800	Motoman	15	380				
HP20D-6	Motoman	6					
MA2010	Motoman	10	280				
MH50 II-20	Motoman	20	495				
MH50-20	Motoman	20	495				
MA3100	Motoman	3					
VS50	Motoman	50	640				
MS80W (SW)	Motoman	72	580				
MS80W II	Motoman	88	558				
MS100 II	Motoman	100	655				
MS120	Motoman	120	950				
ES16RD (SW)	Motoman	152	1540				
MS165	Motoman	165	1020				
ES200D (SW)	Motoman	186	1100				
MS210	Motoman	210	1020				
ES280D-230 (SW)	Motoman	230	1120				
ES280D (SW)	Motoman	280	1120				
MHJF	Motoman	2					
MH3BM	Motoman	3					
MH3F	Motoman	3					
MH5LS II	Motoman	5					
MH5S II	Motoman	5					
SDA5D	Motoman	5					
SDA5F	Motoman	5					
SIA5D	Motoman	5					
SIA5F	Motoman	5					
HP20D-6	Motoman	6					
MH6F	Motoman	6					
MH6S	Motoman	6					
MH6F-10	Motoman	10	130	130°/S	300	40°C	90,00%
SDA10D	Motoman	10	220				
SDA10F	Motoman	10	220				
SIA10F	Motoman	10	60	170°/S	264	40°C	90,00%
MH12	Motoman	12	130	220°/S	300	?	?
HP20	Motoman	20	268				
SDA20D	Motoman	20	380				
SDA20F	Motoman	20	380				
SIA20D	Motoman	20	120	130°/S	280	45°C	90,00%
MH24	Motoman	24	268				

**Appendix B. RELATÓRIO DE TESTE DA BASE  
MAGNÉTICA**



Financiamento



Execução



## Relatório de Teste Experimental

### Teste da Base Magnética

Usina Hidrelétrica de Jirau

14 de Outubro de 2015

# 1 Visão geral

Este teste visou testar a aplicabilidade da base magnética comercial do fabricante MagTek, modelo PME-300, no ambiente da turbina. A base magnética comercial é projetada para aderir a superfícies planas ou cilíndricas convexas. No caso da turbina, as regiões testadas têm formatos variados, que dependendo da orientação da base, podem ser cilíndricos côncavos ou convexos. As superfícies também variam de material, tratamento superficial e pintura, assim como limpeza e rugosidade.

Por esse motivo viu-se a necessidade de testar *in situ* a base magnética comercial e verificar os reais limites de adesão magnética do equipamento.

## 1.1 Equipamentos utilizados

1. Base Magnética 300 kgf;
2. Plataforma de apoio;
3. Alavanca 0,8 m;
4. Dinamômetro 25 kgf

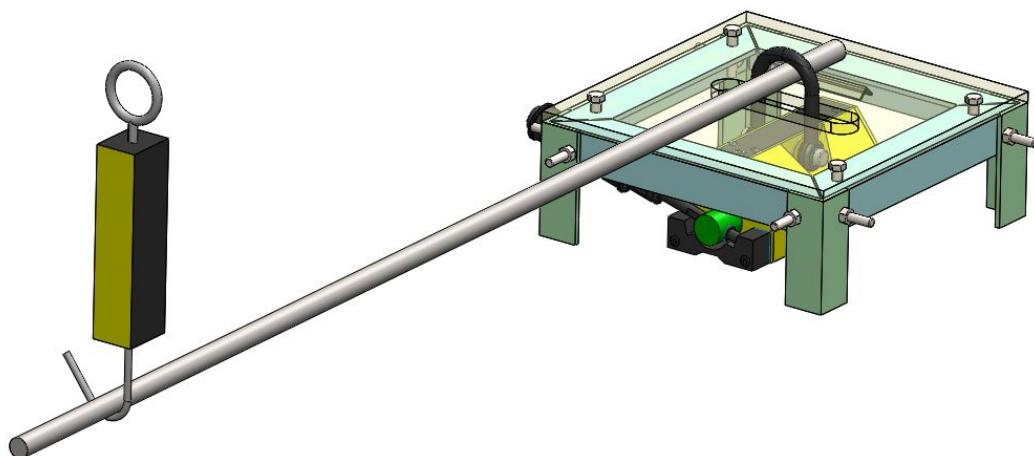


Figura 1: Conjunto de teste da base magnética

## 1.2 Dados dos equipamentos

### Base Magnética

- Capacidade nominal:
  - no plano: 300 kgf
  - cilindro convexo: 150 kgf
- Capacidade máxima no plano: 960 kgf

### Alavanca

De acordo com a figura 2:

- Comprimento da alavanca: L
- Distância entre os apoios: d

Os valores de L e d foram medidos em cada resultado do teste e a razão L/d está indicada na tabela 1 da seção 2.

### Dinamômetro

Capacidade máxima do dinamômetro: 25 kgf

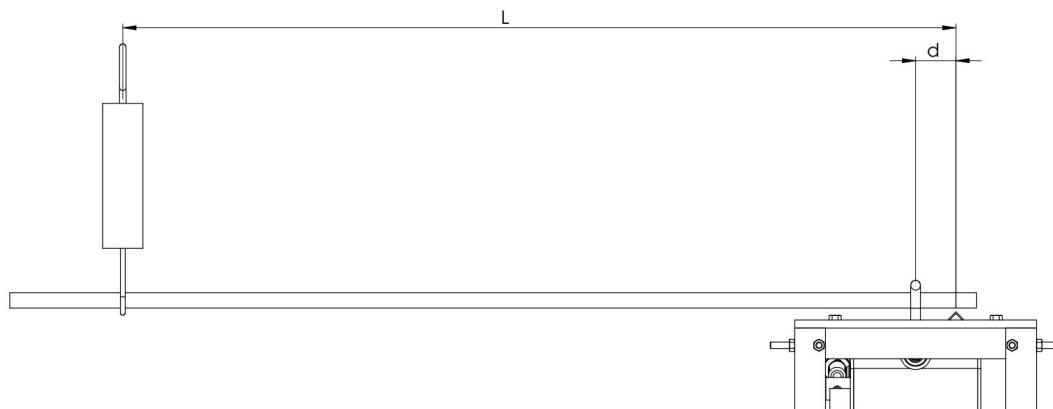


Figura 2: Esquemático da estrutura de teste com parâmetros de cálculo indicados

## 1.3 Cálculo da força magnética máxima

A força magnética, em função da força medida no dinamômetro, está de acordo com a equação 1:

$$F_{\text{mag}} = \frac{L}{d} F_{\text{din}} \quad (1)$$

## 1.4 Mapa de posicionamento

Abaixo, apresenta-se um mapa esquemático das posições onde foram testadas a adesão magnética da base.

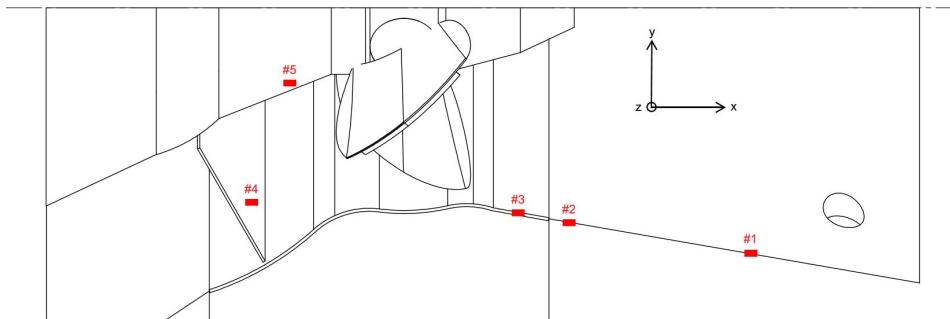


Figura 3: Mapa esquemático de posições

## 1.5 Procedimento

A adesão magnética foi testada nas posições indicadas no mapa esquemático da seção 1.4. Para as posições 1 e 2 variou-se a orientação da base de acordo com o eixo de coordenadas indicado na figura 3.

O procedimento de teste é o seguinte: 1) posiciona-se a base magnética; 2) ativa-se o imã; 3) posiciona-se o apoio e a alavanca; 4) mede-se a distância entre os apoios e o comprimento do braço de alavanca até o dinamômetro (dimensões "d" e "L"); 5) aplica-se gradualmente a carga na alavanca, observando a indicação no dinamômetro, até que ocorra o primeiro dos dois casos: a) o dinamômetro indica a carga máxima, ou b) a base magnética descola-se da superfície; 6) anota-se o resultado.



Figura 4: Fotos durante o teste

## 2 Resultados

A tabela 1 apresenta o resultado do teste da base magnética nas posições indicadas na seção 1.4.

Posição	Orientação	Força limite no dinamômetro (kgf)	L/d	Força magnética limite (kgf)
1	x	25	10,3	256
1	x	25	14,7	367
1	x	14	17,8	249
1	z	18	17,8	320
1	x	14	21,1	295
2	z	12	22,9	274
2	x	8,5	21,1	179
2	xz 45°	10	22,9	229
3	x	0	22,9	0
3	z	0	22,9	0
4	n/a	n/a	n/a	n/a
5	n/a	n/a	n/a	n/a

Tabela 1: Resultados do teste experimental

## 3 Conclusões

O teste possibilitou verificar a capacidade de adesão magnética para diferentes posições, geometria de superfície e materiais no interior da turbina. O maior valor encontrado, de 367 kgf, é superior até à capacidade de carga nominal para superfícies planas indicada pelo fabricante. O menor valor encontrado, de 179 kgf ainda é superior ao valor máximo para superfícies cilíndricas, indicado pelo fabricante.

Desta forma, considera-se que os valores nominais do equipamento fornecem uma boa referência para o dimensionamento deste equipamento como base para uma amarração robusta da solução mecânica do projeto.

A posição 3, de acordo com o mapa esquemático da seção 1.4, é uma região composta por aço inoxidável e não forneceu adesão magnética. As posições 4 e 5 são respectivamente a superfície das paletas do distribuidor e a superfície do rotor. Estas superfícies apresentaram boa adesão magnética, mas não foi possível medir valores limite, pois tais posições não estavam previstas no teste e o equipamento projetado não permitiria uma medição adequada.

## REFERENCES

- Bayramoglu, N. and a.a. Alatan (2010). Shape Index SIFT: Range Image Recognition Using Local Features. *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*, (September), 1–5. doi:10.1109/ICPR.2010.95.
- Camurri, M., Vezzani, R., and Cucchiara, R. (2014). 3d hough transform for sphere recognition on point clouds. *Machine Vision and Applications*, 25(7), 1877–1891. doi:10.1007/s00138-014-0640-3. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-014-0640-3>.
- Chen, H. and Bhanu, B. (2007). 3D free-form object recognition in range images using local surface patches. *Pattern Recognition Letters*, 28(10), 1252–1262. doi:10.1016/j.patrec.2007.02.009.
- Diankov, R. and Kuffner, J. (2008). Openrave: A planning architecture for autonomous robotics. *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-08-34*, 79.
- Hetzler, G., Leibe, B., Levi, P., and Schiele, B. (2001). 3D object recognition from range images using local feature histograms. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, 2. doi:10.1109/CVPR.2001.990988.
- Hourtash, A. (2005). The kinematic hessian and higher derivatives. In *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Symposium on*, 169–174. IEEE.
- Li, L. (2014). Time-of-flight camera – an introduction.
- Nüchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., and Surmann, H. (2005). Accurate object localization in 3D laser range scans. *2005 International Conference on Advanced Robotics, ICAR '05, Proceedings*, 2005, 665–672. doi:10.1109/ICAR.2005.1507480.
- PLC (2015). Random sample consensus. PLC website. <http://www.pointclouds.org/documentation/tutorials/randomsampleconsensus.php> Acessado dia 30 de Novembro, 2015.
- Sciavicco, L. and Siciliano, B. (2000). Differential kinematics and statics. In *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 79–129. Springer.
- Slotine, J.J.E. and Weiping, L. (1988). Adaptive manipulator control: A case study. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 33(11), 995–1003.
- Steder, B., Grisetti, G., Van Loock, M., and Burgard, W. (2009). Robust on-line model-based object detection from range images. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, 4739–4744. doi:10.1109/IROS.2009.5354400.
- Tombari, F. and Di Stefano, L. (2010). Object recognition in 3D scenes with occlusions and clutter by Hough voting. *Proceedings - 4th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, PSIVT 2010*, 349–355. doi:10.1109/PSIVT.2010.65.
- Weber, T., Hellwich, O., Vision, C., and Sensing, R. (2014). Comparison of 3D Interest Point Detectors and Descriptors for Point Cloud Fusion. II(September), 5–7. doi:10.5194/isprsannals-II-3-57-2014.
- Zaharia, T.B. and Prêteux, F.J. (2004). 3D versus 2D/3D shape descriptors: a comparative study. *Image Processing: Algorithms and Systems*, 5289(Section 3), 47–58. doi:10.1117/12.533092. URL <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/ipas/ipas2004.html{\#}ZahariaP04>.