

Metodologia e revestimento robótico de turbinas *in situ* - EMMA *

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

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

**Departamento de Artes e Design, PUC, Rio de Janeiro

1. INTRODUÇÃO

A metodologia empregada durante o desenvolvimento do projeto EMMA consistiu em diversas etapas, que alimentavam a seguinte e, caso necessário, realimentavam uma etapa anterior para refinamento da solução ou alinhamento de resultados.

Primeiramente, no EMMA-SOTA foi realizada uma pesquisa e delimitação do escopo do problema, etapa fundamental para o completo entendimento do problema e responsável por direcionar o esboço das primeiras soluções. A pesquisa sobre o estado da arte mostrou que nenhuma solução disponível no mercado e no meio acadêmico é capaz de suprir completamente as necessidades presentes no processo de metalização *in situ*, destacando as limitações de acesso e espaço confinado como os maiores desafios técnicos e logísticos a serem enfrentados. A fim de tentar construir uma solução mais geral, foi determinada a utilização da escotilha inferior como acesso principal e a solução conceitual inicial consiste em um manipulador robótico sobre trilhos modulares.

Como visto em EMMA-DETAIL, foi realizada uma pesquisa de mercado listando os manipuladores comerciais disponíveis e que satisfaziam as restrições de alcance e peso. Entretanto a configuração de cada manipulador, ou seja, a disposição de seus elos e juntas, influencia em seu espaço de trabalho e um estudo sobre o espaço de trabalho e a cinemática do manipulador foi necessária. O manipulador Motoman®MH12 foi eleito para integrar a solução, pois possui a capacidade de recobrimento de quase todo o alcance vertical da pá (revestimento de cima a baixo), capacidade de carga suficiente para a operação e peso dentro das restrições impostas. Paralelamente, a estratégia de posicionamento do sistema e a calibração de seus componentes foi verificada, determinando os sensores a serem utilizados, afim de satisfazer as restrições de precisão, robustez e segurança.

Neste documento será confirmada a real viabilidade de sua utilização, verificando que é possível a total cobertura da pá durante o processo de revestimento. Análises cinemática, dinâmica serão realizadas com o auxílio de ferramentas de simulação como a plataforma

OpenRAVE. Em seguida a estratégia de controle e planejamento de trajetória tem o objetivo de assegurar que a movimentação do manipulador se desenvolva de forma contínua em todo o espaço de juntas e que as velocidades e acelerações máximas sejam respeitadas.

Por sua vez, a análise detalhada de cobertura da pá, fornece os requisitos mínimos que a base mecânica deve obedecer, como forças exercidas e graus de liberdade necessários para alcançar todas as posições da base do manipulador. A partir dos conceitos analisados no EMMA-DETAIL, pode-se comparar diferentes soluções e as vantagens de desvantagens de cada uma. Foi escolhido o conceito Prismático-Rotacional-Prismático-Prismático (P-R-P-P) porque mostrou-se a solução mais viável construtivamente. Foi realizado então o projeto básico da solução e o dimensionamento dos componentes. Os resultados do dimensionamento permitirão o detalhamento final da base mecânica, compra de materiais, montagem e testes.

A operação de montagem do trilho e posicionamento do robô, assim como a rotação do rotor, isto é, o ângulo em que a pá se encontra, não são fixos ou precisamente reproduzíveis e por isso a calibração deve ser realizada e as transformadas de coordenadas entre o manipulador e a pá devem ser econtradas. Para localizar o manipulador é estudada a utilização de marcadores e o posicionamento da pá será encontrado por meio da análise dos dados tridimensionais provenientes do sensor Faro®Focus X330

2. METODOLOGIA DO SISTEMA DE CONTROLE

A metodologia para a construção de um sistema de controle para o manipulador do projeto EMMA consiste nas seguintes etapas: 1) construção do ambiente de simulação da área de interesse da turbina (pás, rotor, íris, acessos e aro câmara), e modelagem do manipulador; 2) análises cinemática, dinâmica e controle do manipulador; 3) planejamento de trajetórias e velocidades.

Nesta análise de viabilidade técnica, foi utilizada a multi-plataforma arquitetura de software de código aberto Open Robotics and Animation Virtual Environment (OpenRAVE). OpenRAVE é voltado para aplicações de robôs autônomos e possui simulação 3D, visualização, planejamento, e controle. A arquitetura de plugin permite ao usuário desenvolver controladores customizados ou estender funcionalidades.

* Contrato ESBR e COPPETEC JIRAU 09/15 6631-0003/2015 (ANEEL R&D program).

O desenvolvedor pode se concentrar em planejamento e aspectos específicos do problema, sem necessitar gerenciar explicitamente os detalhes de cinemática e dinâmica do robô, detecção de colisão ou atualização do mundo (ambiente). Além disso, OpenRAVE pode ser usado em conjunção com populares pacotes de robótica, como ROS, Player e MatLab Diankov and Kuffner (2008).

2.1 Construção do ambiente de simulação

Os componentes de interesse da turbina e o manipulador foram modelados no software de projeto *Computer Aided Design* (CAD) 3D *SolidWorks*, a partir dos desenhos técnicos fornecidos pela Energia Sustentável do Brasil (ESBR). Após a visita à unidade geradora, porém, verificou-se que o modelo da pá da turbina continha inconsistências com a pá real. Portanto foi realizado um mapeamento 3D pelo sensor Laser Scanner FARO Focus3D. O sensor gera uma nuvem de pontos, que é interpolada, gerando um arquivo VRML, importado ao ambiente de simulação OpenRAVE.

2.2 Análises cinemática, dinâmica e controle do manipulador

A análise da simulação revela as áreas da pá que podem ser revestidas, as áreas de mais difícil acesso, e as posições da base do manipulador para a execução bem sucedida da operação, levando em consideração a cinemática, dinâmica e controle do manipulador.

A metodologia percorre os seguintes tópicos: 1) discretização da pá; 2) avaliação de revestimento dos extremos da pá, restringindo a base a um trilho idealizado pelo projeto mecânico; 3) teste de revestimento completo; 4) teste de revestimento de áreas até então não revestidas, sugerindo novas posições para a base. Onde 1) já foi previamente avaliado em *EMMA-DETAIL*.

As variáveis do processo de revestimento são: 1) pistola de revestimento é aproximada por um cilindro de 300 mm de comprimento e 50 mm de raio, acoplada à extremidade do efetuador; 2) as pás da turbina podem girar em seu próprio eixo de 0° a 29° ; 3) o rotor da turbina pode girar de 0° a 360° ; 4) a distância entre extremidade da pistola e pá deve ser mantida em 235 ± 5 mm durante toda a operação; 4) o ângulo entre a pistola e o plano da pá deve ser $90^\circ \pm 60^\circ$, mas é aconselhável uma tolerância máxima de 30° .

Além disso, vale observar algumas conclusões feitas no relatório *EMMA-DETAIL*: 1) a análise cinemática verifica se, dado um ponto da pá, há alguma configuração das juntas para revestí-lo; 2) a análise dinâmica mostrou que, durante a execução de uma trajetória, se o manipulador estiver muito próximo do ponto que deseja revestir, os ângulos das juntas tendem a variar muito, aumentando drasticamente os torques e impossibilitando a operação.

2.2.1. Avaliação dos extremos da pá É fácil observar que as áreas de mais difícil acesso à pá são suas extremidades, áreas em preto da figura 1, devido ao alcance do robô e por serem áreas em que a pá apresenta maior inclinação. A alteração da direção do vetor normal à pá e a posição do ponto a ser revestido são os fatores importantes para a

aplicação de revestimento, isto é, pontos em uma posição elevada para o robô e vetor normal direcionada para cima são complexos. Observe a figura 2, o vetor P é um exemplo de vetor normal pertencente a um ponto da pá de difícil revestimento, tanto pela posição quanto pelo vetor normal.

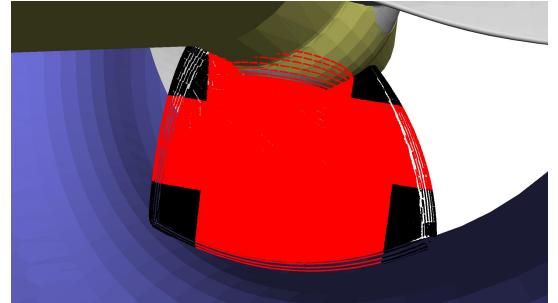


Figura 1. Extremidades da pá em preto.

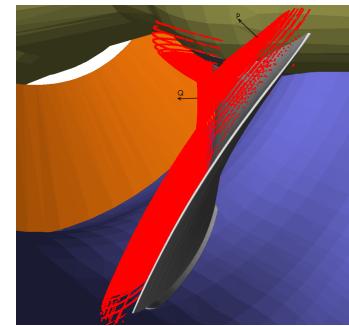


Figura 2. Vetores normais (em preto) de pontos a serem revestidos (em vermelho).

A simulação de teste de revestimento das extremidades considerou as seguintes variáveis: 1) os ângulos das pás da turbina foram fixados em 24° , ângulo natural de uso; 2) avaliou-se o giro do rotor de 0° a 30° com passo de 3° ; 3) a distância entre extremidade da pistola e pá pode variar 235 ± 5 mm; 4) o ângulo entre a pistola e o plano da pá pode variar $90^\circ \pm 30^\circ$; 5) a posição em y do robô pode variar -2970 ± 250 mm (posição global) com passo de 50 mm; 6) a posição em x do robô pode variar 715 ± 485 mm em relação à pá com passo de 50 mm; 7) a posição em z do robô foi amostrada uniformemente em 7 pontos ao longo da pá.

A figura 3 mostra todas as posições simuladas para a base do robô. As restrições dessas posições são a altura mínima da base ao aro câmara e a altura do robô. Para cada posição de base e ângulo do rotor, foi simulado o processo de revestimento para as quatro extremidades da pá, levando em consideração as respectivas tolerâncias.

Nas subseções seguintes, serão analisadas cada extremidade da pá independentemente, considerando as variáveis acima.

2.2.1.1. Extremidade inferior esquerda A extremidade inferior esquerda apresenta a complexidade de posição do ponto a ser revestido, visto que os pontos estão na borda, próximas ao aro câmara, aumentando o risco de colisões. A figura 4 mostra a discretização da

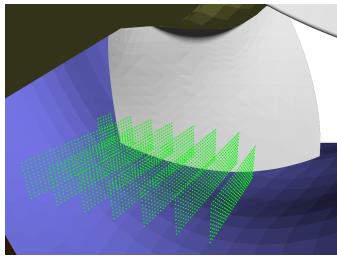


Figura 3. Possíveis posições da base do robô, em verde.

pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de 30° ; em preto, pontos revestidos sem tolerância; e em vermelho, pontos que não foram revestidos para esta posição do robô.

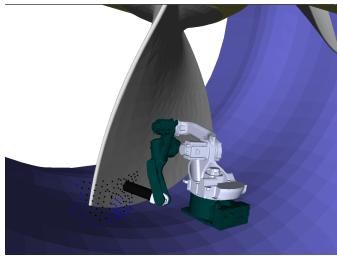


Figura 4. Estudo de revestimento para a extremidade inferior esquerda.

A simulação mostrou que o robô foi capaz de revestir toda a extremidade, na altura mínima $y = -3220$ mm, a uma distância de até $x = 1200$ mm da pá. Conforme o robô se aproxima da pá, verifica-se que a altura pode sofrer variações positivas, por exemplo para $x = 980$ mm, $y = -3070$ mm. Entretanto, como já foi verificado na simulação dinâmica, não é aconselhável aproximar o robô da pá a uma distância inferior a $x = 1000$ mm, pois os torques durante a execução podem ser elevados.

Dessa forma, a extremidade inferior esquerda não mostrou desafios técnicos.

2.2.1.2. Extremidade inferior direita A extremidade inferior direita possui complexidade de posição do ponto a ser revestido maior que a extremidade inferior esquerda, visto que a extremidade está mais próxima da área em que a curvatura do aro é superior a 20° (base mais próxima do solo). A figura 5 mostra a discretização da pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de 30° ; em preto, pontos revestidos sem tolerância; e em vermelho, pontos que não foram revestidos para esta posição do robô.

A simulação mostrou que o robô foi capaz de revestir toda a extremidade, na altura mínima $y = -3220$ mm, a uma distância de até $x = 1200$ mm da pá.

Dessa forma, a extremidade inferior direita não mostrou desafios técnicos.

2.2.1.3. Extremidade superior esquerda A extremidade superior esquerda possui complexidade de posição do ponto a ser revestido devido à altura do robô. A figura 6

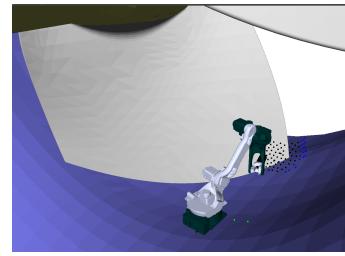


Figura 5. Estudo de revestimento para a extremidade inferior direita.

mostra a discretização da pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de 30° ; em preto, pontos revestidos sem tolerância; e em vermelho, pontos que não foram revestidos para esta posição do robô.

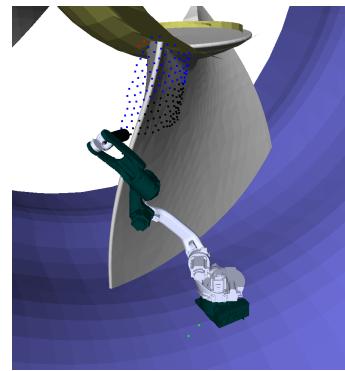


Figura 6. Estudo de revestimento para a extremidade superior esquerda.

A simulação mostrou que se mantivermos a altura da base em $y = -3220$ mm (altura mínima) e $x = 1200$ mm, são necessárias duas posições em z (ao longo do trilho) para o revestimento completo da extremidade. É interessante para o projeto manter altura fixa o quanto possível, pois há redução de grau de liberdade, e, portanto, redução na complexidade da base mecânica.

Caso haja alteração na altura do robô, por exemplo $y = -2770$ mm, só será necessária uma posição em z para a conertura completa da região. Mas é preferível mover o robô no trilho, em z , a mover o robô em altura, em y .

A extremidade superior esquerda necessitou duas posições para a base, mas não mostrou desafios técnicos.

2.2.1.4. Extremidade superior direita A extremidade superior esquerda possui duas complexidades de revestimento: posição do ponto devido à altura do robô; e vetor normal, direção de revestimento. A figura 7 mostra a discretização da pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de 30° ; em preto, pontos revestidos sem tolerância; e em vermelho, pontos que não foram revestidos para esta posição do robô.

A simulação mostra que, mesmo se utilizarmos a altura máxima para a base $y = -2720$ mm e mantivermos $x = 1200$ mm, não há posição em z (ao longo do trilho) para revestir por completo a extremidade. Aproximando

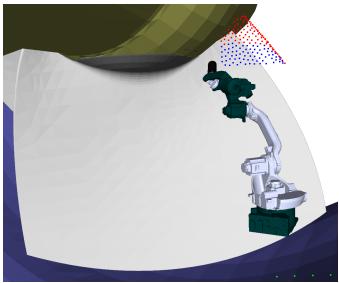


Figura 7. Estudo de revestimento para a extremidade superior direita.

o manipulador da pá, novos pontos são revestidos, mas mesmo em $x = 230$ mm o revestimento não é completo. O mesmo teste foi feito para diferentes ângulos do rotor, mas os resultados não são favoráveis, pois conforme o rotor gira, a pá se afasta do robô.

Para $y = -3220$ mm e $x = 1200$ mm, nenhum ponto da extremidade superior direita é revestido, logo outras estratégias devem ser adotadas. A extremidade superior direita mostrou grande complexidade técnica e não foi possível encontrar uma solução viável para o 2º trilho a fim de revestí-la.

2.2.1.5. Conclusão da simulação de extremidades Os resultados da simulação das extremidades da pá mostraram que três das quatro extremidades da pá podem ser revestidas sem problemas técnicos, e mantendo fixas as variáveis $y = -3220$ mm (referência global) e $x = 1200$ mm de distância em relação à pá. A extremidade superior direita ainda não apresenta solução de revestimento utilizando o trilho 2 com as tolerâncias especificadas.

A rotação da turbina também foi simulada de 0° a 30° . Entretanto, como em 0° as três extremidades foram revestidas sem alteração de dois graus de liberdade x e y , escolheu-se manter o rotor em 0° para esta aplicação.

2.2.2. Teste de revestimento completo e novas soluções de base Após a avaliação das extremidades da pá, deve-se ainda simular o revestimento total, pois a superfície da pá é muito irregular, podendo se aproximar ou se afastar do robô para certas posições de base. Além disso, foram abordadas novas estratégias para a solução de revestimento da extremidade direita da pá. A simulação de teste de toda a pá considerou as seguintes variáveis:

- O ângulo de ataque das pás da turbina variam de 0° a 29° . O acréscimo deste grau de liberdade buscou solucionar o problema da extremidade direita.
- O rotor da turbina foi girado de 0° a 30° com passo de 3° . Manteve-se este grau de liberdade, pois em conjunto com o giro da pá, o problema da extremidade superior direita poderia ser solucionado.
- A distância entre extremidade da pistola e pá pode variar 235 ± 5 mm.
- O ângulo entre a pistola e o plano da pá pode variar $90^\circ \pm 30^\circ$. Alguns testes utilizaram a tolerância limite de 60° como tentativa de revestir a extremidade direita superior.

- A posição em y do robô foi mantida fixa. -3220 mm na referência global.
- A posição em x do robô foi mantida fixa. 1200 mm de distância em relação a pá.
- A posição em z do robô foi amostrada uniformemente em 10 pontos ao longo da pá. A equipe de mecânica restringiu o movimento em z tal que $-1240 < z < 1240$, garantindo para este y mínimo (-3220 mm) espaço suficiente para a construção do trilho.

A restrição da mecânica para a construção do trilho $-1240 < z < 1240$ mm prejudica o revestimento na lateral direita da pá, região em que o aro câmara está próximo de 20° . A figura 8 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está 0° e a pá 24° : em preto, pontos revestidos; e em vermelho, pontos que não foram revestidos. As figuras seguintes adotarão a mesma legenda de cores para os pontos revestidos. Como pode ser visto, não foi possível revestir os pontos da lateral direita, a extremidade superior direita e a extremidade superior esquerda.

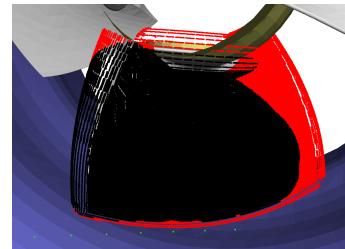


Figura 8. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo 0° do rotor e 24° da pá.

2.2.2.1. Extremidade superior esquerda Há três possíveis soluções para revestir a extremidade superior esquerda: elevação da base do robô; aumentar tolerância de ângulo de revestimento para 60° ; e rotação da turbina para -15° . Como esta região da pá tem inclinação projetada para o robô, alterar o ângulo da pá de 24° para 0° não favorece o revestimento (figura 13). Em termos de operação, as três medidas possuem desvantagens: rotacionar a turbina é complexo, visto que será necessário realizar um procedimento para transportar os equipamentos a uma área de segurança e fazer a recalibração; elevar o robô apresenta complexidade mecânica, já que exige mais um grau de liberdade da base, e fazer recalibração; aumentar a tolerância do ângulo de revestimento tem complexidade menor, mas aumenta a perda de material de revestimento.

A figura 9 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está -15° e a pá 24° . Conforme o rotor é girado no sentido horário (negativo), o revestimento na extremidade superior esquerda da pá é completa, porém o lado direito fica prejudicado.

Quando aumentamos a tolerância de ângulo de revestimento para 60° , obtemos a figura 10. A figura mostra que foi possível revestir toda a extremidade superior esquerda, salvo pontos de colisão com o rotor.

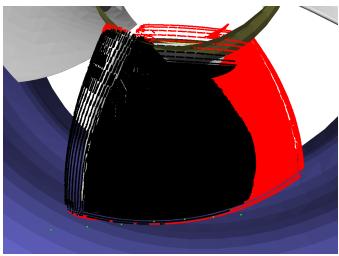


Figura 9. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo -15° do rotor e 24° da pá.

Entretanto, é importante a base ter o grau de liberdade em y para suprir eventuais problemas de modelagem.

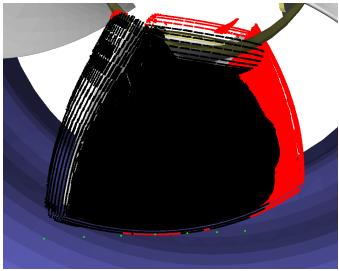


Figura 10. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo 0° do rotor e 24° da pá, tolerância de 60° de revestimento.

Ao elevarmos a base $y + 500mm$, obtemos a figura 11. A figura mostra que foi possível revestir toda a extremidade superior esquerda e, ainda, alguns pontos na lateral direita que não haviam sido revestidos. É muito provável que este grau de liberdade da base seja projetado, a fim de o projeto não ficar dependente dos movimentos da turbina.

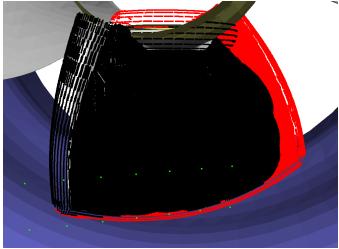


Figura 11. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo 0° do rotor e 24° da pá, $y + 500mm$.

2.2.2.2. Lateral direita Em relação à lateral direita da pá, a ideia imediata é rotar a turbina, esperando que o lado direito se aproxime do robô. Outras possibilidades é girar a pá em seu próprio eixo para 0° , em vez de 24° . As desvantagens de cada solução se assemelham às discutidas previamente: rotar a turbina exige transporte dos equipamentos à área de segurança, remontagem e recalibração; girar a pá só é possível através do circuito hidráulico e talvez não seja possível após início da operação.

A figura 12 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está 15° e a pá 24° . Conforme o rotor é girado no sentido anti-horário (positivo), embora o revestimento aumente na lateral direita da pá, a lateral esquerda e as áreas inferiores começam a ser prejudicadas. A extremidade superior direita continua sem ser revestida, como esperado, vide subseção 2.2.1.3.

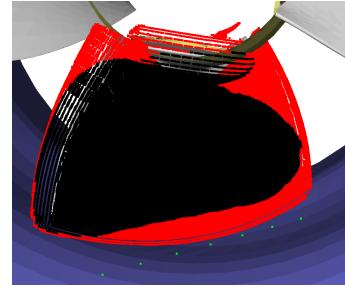


Figura 12. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo 15° do rotor e 24° da pá.

A figura 13 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está 0° e a pá 0° . Conforme a pá é girada, o revestimento aumenta na lateral direita e se mantém na lateral esquerda. Isso ocorre, pois o robô se mantém longe do aro câmara no lado direito, já que o aro ainda não está a 20° . Esta é a melhor posição para revestimento da pá, situação aparente ao método empregado pela Rijeza. Entretanto, esta configuração fornece pequeno espaçamento entre pás, estreitando a passagem do robô e, muito provavelmente, não é possível alterar esse ângulo frequentemente já que exige funcionamento do circuito hidráulico.

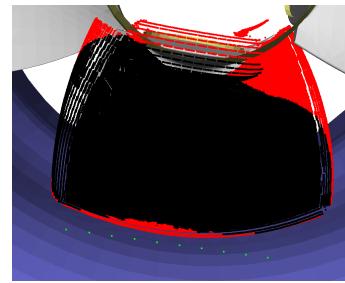


Figura 13. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo 0° do rotor e 0° da pá.

2.2.2.3. Extremidade superior direita A extremidade superior direita requer uma nova estratégia, pois todas as outras falharam até então: rotacionar turbina, girar pá, elevar o robô no trilho $y + 500mm$. Não há possibilidade, portanto, de realizar o revestimento a partir do trilho 2 (posicionamento). A solução encontrada até o momento é rotar a turbina 45° , manter a pá em 24° e posicionar o robô entre as pás, no trilho 1 (transporte). A desvantagem logística de rotar a turbina é comum às soluções antigas, porém, esta configuração da turbina já estava prevista para a entrada do robô no lado do distribuidor.

A figura 14 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está 45° e a pá 24° . O robô

se encontra com sua base nas posições destacadas em verde. Como podemos observar, nesta configuração (robô no trilho 1), é possível revestir a extremidade superior direita. A fim de melhor aproveitamento logístico da operação, esta operação deve ser realizada antes da entrada completa do robô no lado do distribuidor.

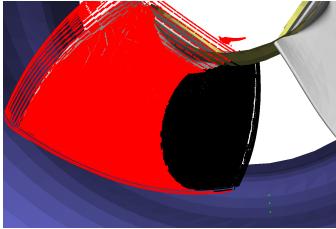


Figura 14. Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo 45º do rotor e 24º da pá, robô entre as pás.

2.2.2.4. Conclusão da simulação completa A simulação completa da pá mostrou diversas estratégias para o revestimento da pá, considerando as restrições mecânicas do trilho, o ambiente modelado da turbina, e as diversas variáveis do processo de revestimento.

A partir dos resultados das simulações, podemos concluir que é possível realizar o revestimento completo da pá, inclusive das áreas de mais difícil acesso, como as extremidades. O revestimento completo, no entanto, requer uma extensa logística de operação. Para cada face da pá, o robô deverá executar o procedimento tanto no trilho de posicionamento (trilho 2), quanto no trilho de transporte (trilho 1), a fim de revestir a área mais complexa, extremidade superior direita.

2.3 Planejamento de trajetória

O conhecimento de todas as regiões que podem ser recobertas pelo robô ajudam na validação do posicionamento do robô. Porém, ainda é necessário descrever o caminho a ser percorrido pelo efetuador no espaço de trabalho de maneira a cumprir os requisitos de revestimento e o respectivo caminho percorrido no espaço de juntas.

A definição desse caminho é facilitada pelo conhecimento analítico da superfície. A partir dessa descrição são definidos, sobre a pá, uma série de faixas que segmenta a pá, que serão chamadas de paralelos.

Os paralelos são espaçados de 3 em 3 milímetros para o cumprimento das exigências de revestimento e são dispostos de forma a não possuirem intersecção entre si. A união dos paralelos (considerando uma faixa de 3mm entre eles) inclui todos os pontos da pá, garantindo seu completo recobrimento.

O deslocamento da ferramenta de revestimento pelo caminho definido por dois paralelos é feito por meridianos. Isto é, segmentos que conectam extremidades dos paralelos e não tem função definida no processo de metalização. A válvula deve estar fechada e o revestimento interrompido durante o tempo que o efetuador percorre todo o meridiano. A razão de

existência dele é meramente definir uma maneira de levar o efetuador de um paralelo a outro.

2.3.1. Modelagem da superfície Existem diversas abordagens matemáticas para descrição de superfícies como: Parametrização Polinomial; Polinômios em três variáveis; Superfícies de Bézier (Farin (2002)); Splines e NURBS (*Non-uniform rational B-spline*); Subdivisão de superfícies (Peters and Reif (2008)); Malhas poligonais.

Todas essas formas de representar uma superfície, com exceção das malhas, recaem em alguma instância em uma descrição polinomial. Dentre essas a única descrição que ocorre de maneira implícita é por polinômios em três variáveis, descrevendo uma variedade algébrica bidimensional, enquanto as demais são parametrizações da superfície.

Por simplicidade, fácil manipulação algébrica e implementação, a descrição puramente polinomial (implícita) foi escolhida como abordagem inicial. De maneira geral a superfície é descrita como o conjunto solução sobre os números reais da equação polinomial ($f(x, y, z) = 0$) de grau N , dito grau da superfície, em x, y e z :

$$\sum_{i+j+k \leq N} C_{i,j,k} x^i y^j z^k = 0$$

Os coeficientes $C_{i,j,k}$, então, são aqueles que descrevem da superfície. Devido a restrição do grau do polinômio, o número de coeficientes é $\binom{N+3}{3}$. Podendo ser vistos como coordenadas da superfície num espaço projetivo de dimensão igual ao número de coeficiente, $\mathbb{P}^{\binom{N+3}{3}}$, em outras palavras a superfície é invariante a escalamento dos coeficientes.

Experimentalmente foi indentificado que um polinômio de quarto grau é suficiente para aproximar toda uma região de interesse da pá, onde será feito o revestimento para uma posição do robô, com erro submilimétrico. Nesse caso, o número de coeficientes que devem ser identificados é $\binom{7}{3}$, ou seja, 35.

Com base no artigo de Jüttler and Felis (2002), a conversão da descrição da superfície de nuvem de pontos para uma descrição analítica foi feita utilizando a informação da direção da normal à superfície em cada ponto, ou seja, a superfície analítica deve não apenas passar próxima aos pontos da nuvem como deve também ter seu vetor normal similar à normal desses pontos.

Explorando o fato que polinômio são lineares em seus coeficientes, um sistema superdeterminado, a ser resolvido por mínimos quadrados(*curve fitting* Arlinghaus (1994)), foi contruído a partir do cálculo dos termos do polinômio em cada ponto da nuvem (fazendo $f(x, y, z) = 0$) e da avaliação da normal em cada ponto, que deveria concordar com o gradiente do polinômio (ou seja $\nabla f(x, y, z) = \vec{n}$, onde \vec{n} é a normal no ponto (x, y, z) da nuvem), dessa forma o peso dado aos vetores normais das amostras é igual ao peso das amostras.

2.3.2. Cálculo dos paralelos Na literatura, há diversas formas de dividir a superfície a ser revestida em subregiões. Em From (2010), por exemplo, um

manipulador realiza a pintura de uma superfície (*spray gun*) cobrindo subregiões de um plano, projeção da superfície (figura 15). Outra possibilidade é, em funções paramétricas, realizar uma trajetória semelhante à figura 15 no espaço dos parâmetros, cuja transformação (jacobiano) mapeará nos ‘cortes’ curvos da superfície.

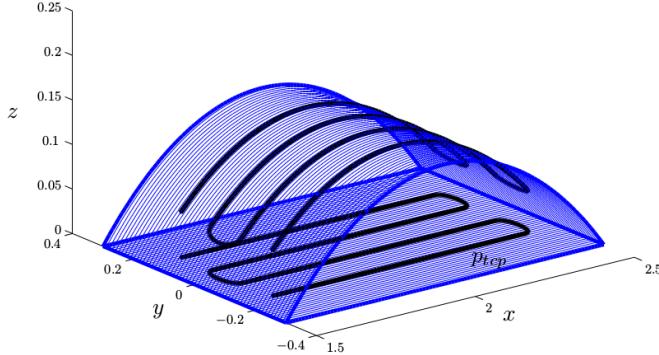


Figura 15. Subregiões de uma superfície.

A superfície descrita na seção 2.3.1 é uma equação implícita, na forma $f(x, y, z) = 0$. Neste caso, as trajetórias a serem percorridas pelo manipulador podem ser obtidas através da interseção (cortes) entre planos uniformemente espaçados e a superfície, o que gerará curvas ao seu longo. Uma ideia semelhante e propícia devido à geometria do rotor, é gerar as curvas a partir da interseção entre esferas e a superfície. As figuras 16 e 17 mostram duas visões de duas interseções entre esferas e a pá, onde as interseções estão representadas em vermelho, e as esferas em azul claro. Os mesmos cortes podem ser observados entre esferas e o modelo algébrico da pá, em figura 18, na qual a pá está representada em vermelho, as esferas estão em cinza escuro, e as interseções são as curvas sombreadas em cinza na pá.

A superfície descrita na seção 2.3.1 é um subconjunto de uma variedade algébrica de dimensão dois, representada na forma $f(x, y, z) = 0$ como uma imersão em \mathbb{R} , sendo assim uma superfície implícita onde $f(x, y, z)$ é um polinômio nas três variáveis. As figuras 16 e 17 mostram duas visões de duas interseções entre esferas e a pá, onde as interseções estão representadas em vermelho. Os mesmos cortes podem ser observados entre esferas e o modelo algébrico da pá, em figura 18.

A interseção de duas superfícies, a superfície da esfera $g(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$ e a superfície da pá $f(x, y, z) = 0$, gera o caminho que deve ser percorrido pelo robô. Porém, resolver algebricamente $f(x, y, z) = g(x, y, z) = 0$ é muito custoso, haveria a necessidade de calcular as soluções para os ângulos das juntas do robô posteriormente, e ainda realizar cálculos de restrição de borda da superfície, já que a função algébrica encontrada para a pá é contínua e pode ter comportamento estranho fora da região de interesse. Portanto, foi desenvolvido um método iterativo para a computação da trajetória do robô de forma que, ao mesmo tempo que o caminho é criado, os ângulos das juntas são computados, otimizando localmente a variação dos ângulos das juntas, verificando restrição de ângulo de revestimento, e bordas.

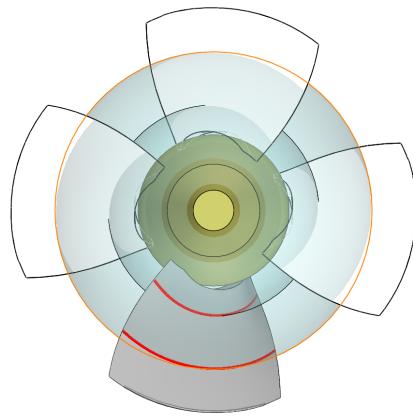


Figura 16. Interseção esfera-pá, vista frontal.

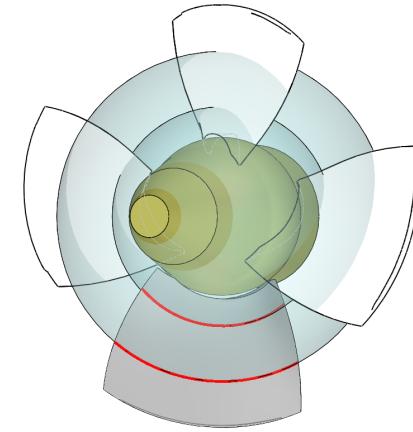


Figura 17. Interseção esfera-pá, vista isométrica.

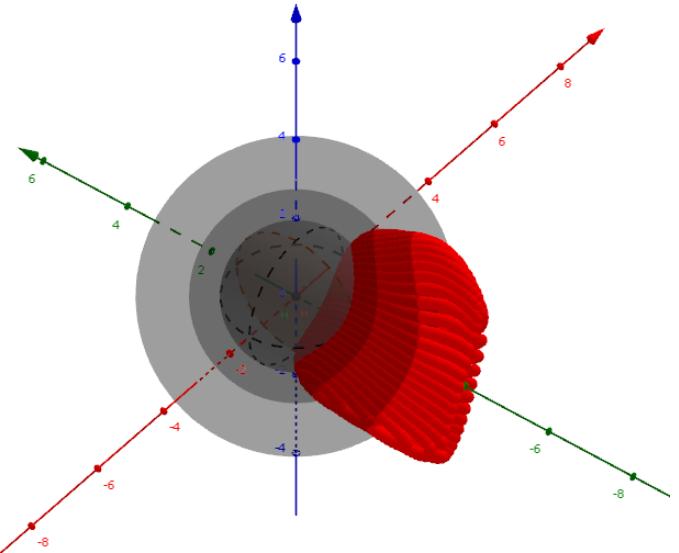


Figura 18. Interseção esfera-modelo pá.

O método será explicado a partir de um exemplo genérico: suponha a superfície algébrica da pá em vermelho, o rotor em preto, e a área que pode ser revestida dada uma base do robô em amarelo, na figura 19. Nesta etapa de revestimento (robô nesta posição de base), devem ser calculadas as curvas (trajetórias). É selecionado o ponto central da núvem de

pontos revestidos (em amarelo), e é calculado o ponto mais próximo à superfície, representado como ponto B da figura 20. AB é o vetor normal à esfera, igual a OB (origem ao ponto B), e BC é o vetor normal à superfície algébrica da pá, calculado como $\nabla f = f_x, f_y, f_z$. O vetor tangente BD , figura 21, pode ser calculado como produto vetorial entre o vetor normal à superfície da pá com o vetor normal à esfera, no ponto B : $BD = BC \times AB = OB \times \nabla f$. A integral do vetor tangente irá fornecer a trajetória (região cinza sombreada, ou em vermelho, como na figura 17), logo o caminho (ou trajetória) é calculado por:

$$c = \int OB \times \nabla f dt.$$

Em integrações numéricas, deve-se garantir que o novo ponto de cada iteração pertença à superfície, logo $B' = B + \int_0^t OB \times \nabla f dt$, onde t é o passo de integração, não é suficiente, pois deve-se reprojetar o novo ponto B' na superfície da pá. Isso é feito por uma otimização, enunciada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min & \|B - B'\|^2 \\ \text{s.t.} & f(B') = 0 \end{aligned}$$

E assim garante-se que o novo ponto B' pertence à superfície da pá.

Em cada passo da integração numérica, deve-se computar a solução dos ângulos das juntas (cinemática inversa) para o revestimento. Caso não haja solução, ou o ângulo entre avanço do efetuador e normal da pá seja maior que 30° , a trajetória está concluída e a integração é interrompida. Calculam-se os valores dos ângulos das juntas em cada passo por uma otimização, enunciada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min & -\nabla f \cdot x_T \\ \text{s.t.} & \|p_T - B\|^2 = 0 \end{aligned}$$

Onde x_T são as três primeiras linhas da primeira coluna da transformação homogênea T_{bB} (b é a base do manipulador), pois o vetor de avanço do efetuador do manipulador é $x = (1, 0, 0)$, logo a primeira coluna. E p_T são as três primeiras linhas da quarta coluna da transformação homogênea T_{bB} , representando a posição do efetuador.

A figura 22 mostra duas curvas computadas pelo algoritmo descrito acima. Os caminhos tem espaçamento exagerado, maior que 3 mm, para facilitar a visualização. A transição entre os paralelos, no entanto, é executada por outro algoritmo, que calcula os meridianos do planejamento de trajetória.

2.3.3. Cálculo dos meridianos Os paralelos, ou caminhos “horizontais”, são computados pelo algoritmo descrito na subseção 2.3.2. Entretanto, o algoritmo não descreve as transições entre linhas horizontais, como se o manipulador “pulasse” de um paralelo a outro, o que não pode acontecer, já que o caminho deve ser contínuo. Dessa forma, há a necessidade de computação das curvas de transição, os caminhos “verticais”, ou meridianos da superfície da pá.

Ao fim da execução do cálculo de um paralelo (por exemplo, ao fim do cálculo da curva em vermelho da

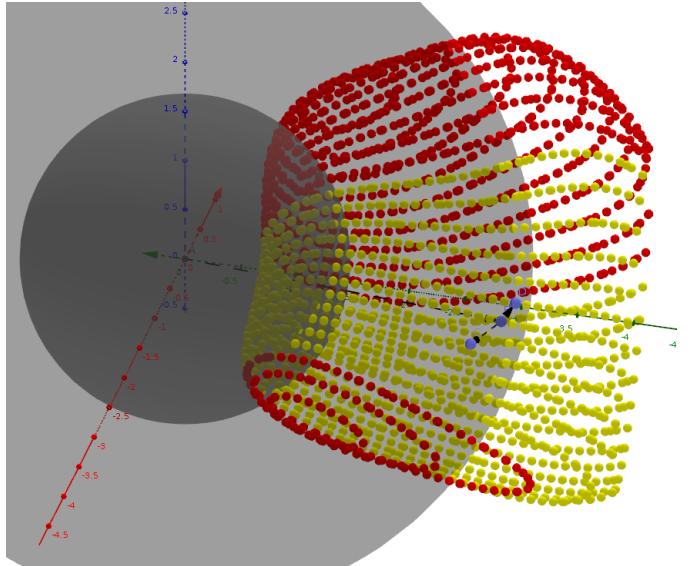


Figura 19. Vetores de interesse na interseção esfera-pá.

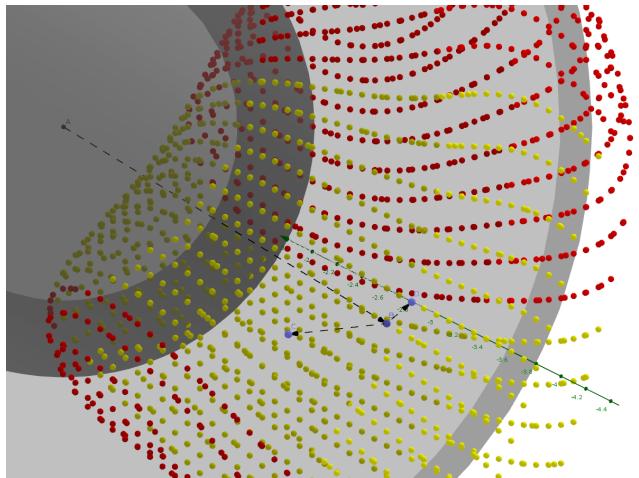


Figura 20. Vetores de interesse na interseção esfera-pá.

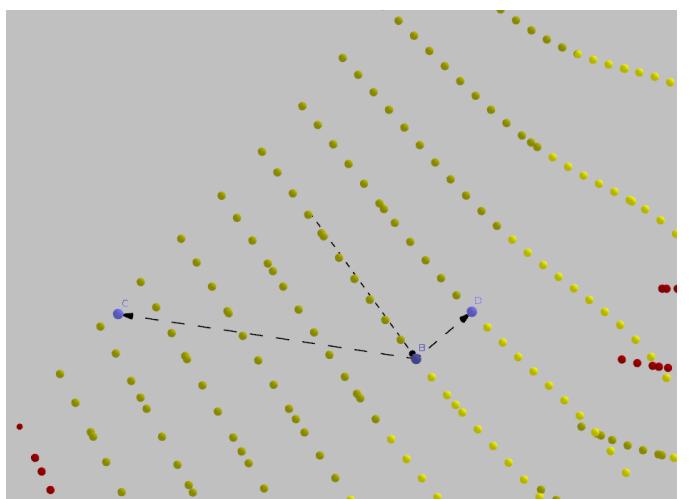


Figura 21. Vetores de interesse na interseção esfera-pá.

figura 17), o efetuador estará apontando para o último ponto com solução viável neste paralelo, dentro das restrições de ângulo de revestimento, no lado esquerdo

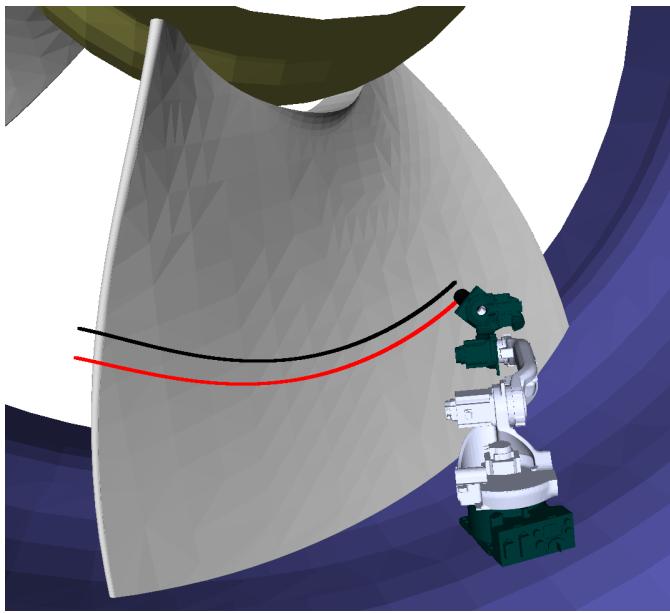


Figura 22. Simulação de trajetória no Openrave.

ou direito. A partir deste ponto extremo (borda), o manipulador deverá “descer” ou “subir” pelo meridiano, até encontrar outro paralelo, isto é, encontrar outra curva que satisfaça $f(x, y, z) = g(x, y, z)$.

O método será explicado a partir de um exemplo genérico: suponha que o efetuador do manipulador se encontra como na figura 22 (borda direita), isto é, na extremidade direita de um paralelo c_1 . Caminhar em um meridiano significa integrar o vetor tangente perpendicular ao encontrado por $\mathbf{BD} = \mathbf{OB} \times \nabla f$, logo o caminho pelo meridiano pode ser calculado como:

$$m_{12} = \int (\mathbf{OB} \times \nabla f) \times \nabla f dt$$

o que irá gerar um caminho de descida pelo meridiano. Em cada passo de integração numérica, o novo ponto $B' = B + \int_0^t (\mathbf{OB} \times \nabla f) \times \nabla f dt$ deve ser projetado na superfície, como em na subseção 2.3.2, pela otimização:

$$\begin{aligned} \min \|B - B'\|^2 \\ \text{s.t. } f(B') = 0 \end{aligned}$$

Além disso, em cada passo deverá ser verificado se o caminho já alcançou o próximo paralelo c_2 , isto é, se o ponto pertence à esfera de raio $R_2 = R_1 + 0.003$ (em milímetros). Observe que se o caminho passar do próximo paralelo, o caminho deve ser feito no sentido contrário com passo menor, isto é:

$$m_{21} = \int -(\mathbf{OB} \times \nabla f) \times \nabla f dt$$

Na figura 23, os meridianos estão representados em verde.

2.4 Conclusão

No âmbito do controle e planejamento de trajetória, o método desenvolvido já se mostrou capaz de analisar a superfície da pá, segmenta-la em regiões e definir caminhos para serem percorridos, tanto pelo efetuador

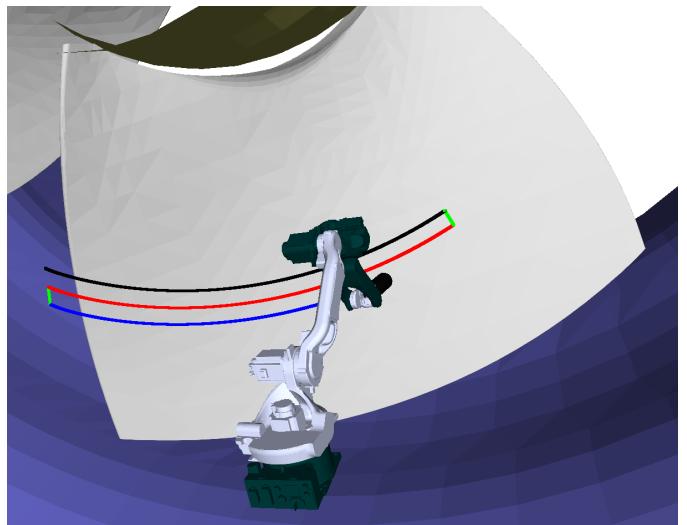


Figura 23. Meridianos da pá.

(no espaço de trabalho) quanto pelas juntas (no espaço de juntas).

Porém, validações da precisão do resultado e análise de colisão devem ser mais exploradas. Também devem ser julgadas pequenas modificações do método como aplicação de minímos quadrados móveis na definição da superfície, técnica que possibilitaria um maior controle do erro localmente.

3. SOLUÇÃO MECÂNICA

A solução de revestimento de uma pá de turbina *in situ* requer um robô de pequeno a médio porte, capaz de passar pelo limitado acesso da turbina. No entanto, a pá da turbina é uma peça com uma grande área a ser coberta e nenhum manipulador comercial que atenda ao requisitos citados é capaz de alcançar, de uma só posição, toda a sua extensão. Assim, é necessário prover ao robô liberdade de posicionamento para realizar o revestimento em pequenas regiões da pá, por posição de base.

Devido ao peso do manipulador e por questões de segurança, a sua movimentação no interior da turbina não pode ser uma tarefa manual. Logo, uma base mecânica deve ser capaz de levar o robô desde a escotilha até a posição ideal para o revestimento, de forma segura e precisa. O dimensionamento desta base deve levar em consideração todos os esforços de operação, como: o peso do sistema; as cargas dinâmicas de movimentação do robô e o empuxo da pistola.

Foram estudados diversos conceitos para os graus de liberdade providos pela base mecânica. O estudo destes conceitos estão detalhados no EMMA-DETAIL.

3.1 Conceito

A escolha do conceito da solução foi baseada nos graus de liberdade da base mecânica para permitir ao robô movimentação e alcance necessários para realizar o revestimento.

O conceito aqui aprofundado é denominado P-R-P-P, ou Prismático-Rotacional-Prismático-Prismático. A seguir estão descritas cada junta que compõe a base.

- **Prismática 1:** A primeira junta prismática é formada por um trilho, sobre uma estrutura modular. Este trilho é denominado "trilho primário" e está paralelo ao eixo da turbina, indo desde a escotilha de entrada até a região posterior da pá, próxima ao distribuidor.
- **Rotacional:** A segunda junta, rotacional, é formada por um eixo apoiado sobre mancais de rolamento e une o trilhos "primário" à segunda junta prismática, denominada trilho "secundário".
- **Prismática 2:** A terceira junta, prismática, é formada por um trilho (secundário), também sobre uma estrutura modular. Este trilho é posicionado paralelo ao plano transversal da pá, e permitirá ao robô os deslocamentos laterais ao longo de toda a extensão da largura da pá.
- **Prismática 3:** A última junta, prismática, é formada por um macaco mecânico tipo sanfona, com curso mínimo de 200 mm, permitindo ao robô maior alcance em altura.

A figura 24 apresenta o conceito descrito.

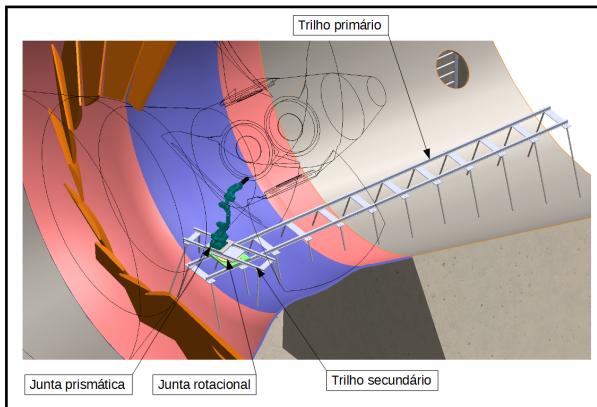


Figura 24. Conceito P-R-P-P da base mecânica

Neste conceito, o manipulador é movimentado pelo trilho primário até a região próxima a pá. Em seguida é montado o trilho secundário a partir da base onde o manipulador está fixado. A orientação do trilho secundário é definida pela movimentação da junta rotacional entre os trilhos primário e secundário. A partir daí, o manipulador pode ser movimentado ao longo do trilho secundário e posicionado para o revestimento. Para as regiões de difícil alcance será utilizada a junta de elevação.

3.2 Construção

3.2.1. Trilho e carrinho Para movimentação e posicionamento precisos do manipulador foi selecionado o sistema de trilho perfilado e carrinho de rolamento de esferas recirculantes. O trilho selecionado tem o perfil segundo a norma ISO 12090-1 e o carrinho segue a norma DIN 645-1. Estes componentes são próprios para aplicações nas quais se requer grande capacidade de carga e precisão de posicionamento.



Figura 25. Trilho para movimento linear



Figura 26. Carrinho de esferas recirculantes

Estes componentes permitem algumas opções de montagens que variam de acordo com a aplicação. Estas opções vão desde a utilização de um único trilho e único carrinho, montagens com 1 trilho e 2 carrinhos, e até 2 trilhos e 4 carrinhos, como mostrado na figura 27.

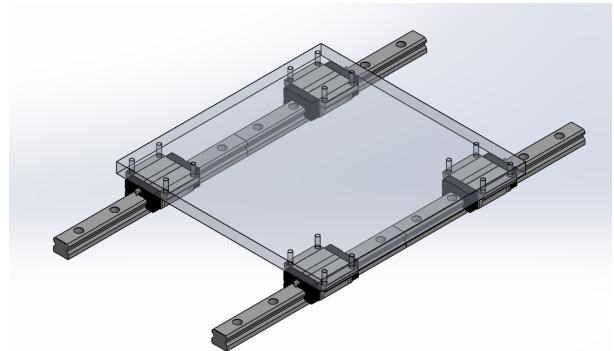


Figura 27. Montagem com 2 trilhos e 4 carrinhos

As cargas promovidas pelo manipulador são elevadas, sobretudo na base, que reage às cargas distantes do ponto de fixação, causando momentos elevados. A vantagem da utilização de mais de um carrinho por trilho é a possibilidade de anular-se os momentos de reação nos carrinhos, na direção ortogonal ao eixo do trilho. No caso da solução proposta, as cargas são variáveis em sua magnitude e direção. Por esta razão, a configuração que utiliza 2 trilhos e 4 carrinhos é a mais indicada, já que os carrinhos ficam livres de reagirem a momentos e as cargas ficam divididas em mais componentes.

3.2.2. Perfil de alumínio estrutural A estrutura que servirá de base para o trilho deve ter como principal característica a modularidade. Devido à geometria variável do ambiente no interior da turbina, é necessário também que esta estrutura permita flexibilidade de

montagem dos apoios e ancoragens ao longo do trilho. Cada módulo da estrutura será composto pelo perfil de alumínio estrutural, a partir de onde serão fixados o trilho e os acessórios de apoio e ancoragem da estrutura no ambiente. Tais módulos devem permitir transporte e montagem manuais, de forma fácil e rápida. Por isso, optou-se pelo perfil de alumínio estrutural. Este perfil possui ranhuras para fixação de componentes padronizados e permite a construção de uma grande variedade de estruturas funcionais de geometrias simples ou complexas.



Figura 28. Perfis de alumínio estrutural

A figura 29 apresenta um exemplo de um dos módulos do trilho primário, a partir da montagem deste no perfil de alumínio estrutural. Este módulo pode ser repetido ao longo do eixo longitudinal do trilho, formando assim a estrutura completa. Para se ajustar ao ambiente da turbina, há variação apenas do comprimento dos pés de apoio e dos braços de ancoragem, mantendo-se as mesmas dimensões de todos os outros componentes.



Figura 29. Vista explodida de montagem com perfil de alumínio estrutural

3.2.3. Pés de apoio Os pés de apoio da estrutura primária têm o objetivo de nivelar o trilho no ambiente, permitindo que a estrutura possa formar um plano horizontal e paralelo ao eixo da turbina. Devido às inclinações da superfície do túnel e do aro-câmara, os pés de apoio devem permitir graus de liberdade que compensem algum desvio. Além disto, o comprimento de cada "perna" da base varia ao longo da estrutura, sendo

necessário permitir uma margem de erro de montagem a partir de uma regulagem de seu comprimento.

Foi verificado que o maior ângulo formado entre o eixo horizontal e a superfície da turbina é de aproximadamente 9° . Optou-se portanto por pés com interface do tipo rótula, exemplificado na figura 30, que permitem até 10° de inclinação entre a haste e à base, além de 75 mm de regulagem do comprimento, por meio da rosca da haste.

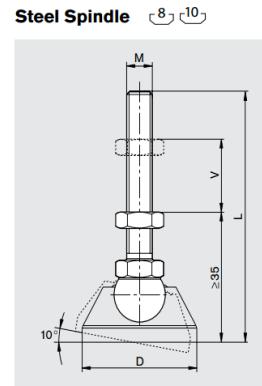


Figura 30. Pé com junta rotular entre a haste e a base

3.2.4. Ancoragem A ancoragem da estrutura é importante para prevenir movimento da base quando o robô estiver em movimento. Sua principal função é tornar a base rígida o suficiente para que as deformações elásticas e vibrações da estrutura não interfiram na precisão requisitada para o processo de revestimento.

Os braços de ancoragem são constituídos de duas juntas rotacionais em cada extremidade. Estas juntas permitem que o braço se ajuste à superfície da turbina, posicionando as bases magnéticas na orientação ideal para o acoplamento magnético. A figura 31 apresenta os braços de ancoragem ao longo da estrutura.

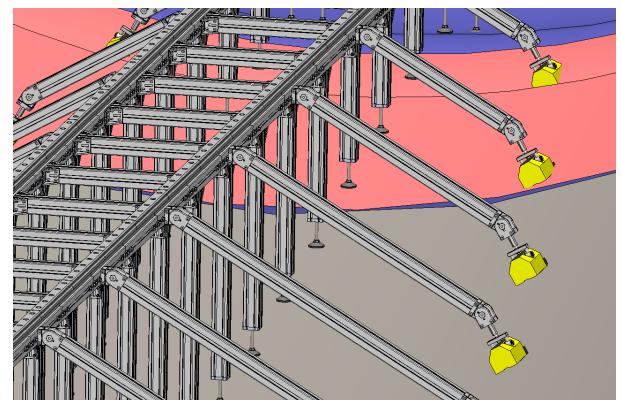


Figura 31. Braços de ancoragem do trilho primário

3.2.5. Bases magnéticas As bases magnéticas são equipamentos comerciais cuja principal aplicação na indústria é o içamento e movimentação de peças metálicas. Este equipamento é composto por imãs permanentes que são alinhados através de uma alavanca em sua carcaça. Desta forma, é possível controlar as

linhas de campo magnético, tornando a base atrativa magneticamente somente quando se desejar.

As bases magnéticas são os elementos de fixação não-permanentes que serão utilizados para ancoragem da estrutura no ambiente da turbina. Foram realizados testes para verificação da carga máxima suportada e o resultado foi satisfatório e apresentado na seção de Apêndice B do EMMA-DETAIL.



Figura 32. Base magnética para ancoragem

3.2.6. Junta de rotação A junta de rotação é composta por uma plataforma de posicionamento angular horizontal. O princípio de funcionamento é através de um par de engrenagens sem-fim e coroa, em que o acionamento do sem-fim pode ser feito por um volante com marcação de ângulo. Este equipamento é muito utilizado em máquinas fresadoras verticais, sendo denominado "mesa divisora" nesta aplicação. Este equipamento atende às exigências de robustez, rigidez e precisão destas máquinas operatrizes, portanto mostra-se ideal para a aplicação na base mecânica da solução robótica de revestimento. A figura 33 apresenta uma mesa divisora com acionamento manual e sistema sem-fim e coroa.



Figura 33. Plataforma de rotação

3.2.7. Junta de elevação Estudo apresentado no EMMA-DETAIL mostrou que para alcançar as regiões da pá mais próximas ao rotor, e garantir a qualidade ideal de revestimento, é necessária a elevação da base do manipulador em pelo menos 200 mm. Para realizar esta tarefa será utilizado um macaco mecânico do tipo sanfona. Este equipamento foi escolhido devido ao seu tamanho compacto quando retraído, 85 mm, e um curso grande de elevação, 245 mm. Seu acionamento é manual a partir da rotação de uma alavanca conectada a uma barra rosada. Para facilitar a manipulação desta junta, será adaptado um volante no acionamento. Um conjunto de cilindros e guias garantem o movimento preciso da junta e robustez, transmitindo os esforços diretamente para a estrutura e prevenindo que estes atuem no macaco mecânico.

3.2.8. Montagem A montagem da base mecânica no interior da turbina é feita a partir de módulos (ou submontagens que formam elementos básicos de uma



Figura 34. Macaco mecânico do tipo sanfona

montagem maior). O exemplo de um módulo da estrutura primária foi apresentado na figura 29, na seção 3.2.2.

A ideia neste conceito é que a estrutura possa ser montada a partir de um módulo inicial que se repete ao longo de uma mesma direção até formar-se a estrutura completa. A montagem deve ser prática e rápida, assim como a desmontagem e deve permitir a correção de pequenos erros de posicionamento no ambiente a partir de ajustes simples. Por exemplo, se a posição do módulo inicial estiver errada, pode-se ajustar o comprimento dos pés de apoio e a posição dos braços de amarração facilmente. Isto é importante principalmente devido a dificuldade de se estabelecer uma referência precisa no interior da turbina e também devido a pequenas diferenças de projeto ou construção entre uma turbina e outra.

Neste conceito, primeiro monta-se a estrutura e trilho primário, e então, monta-se a base do manipulador no trilho primário. Esta base contém os elementos que permitem os graus de liberdade de rotação e prismático (elevação) e também serve de origem para a montagem da estrutura e trilho secundário.

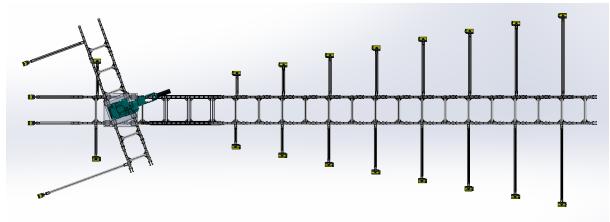


Figura 35. Montagem da base mecânica

A figura 35 apresenta uma vista superior da montagem da base mecânica e a figura 36 apresenta a montagem no interior da turbina, em uma configuração de operação na face posterior da pá. Nota-se que é necessária a desmontagem de parte do trilho primário para posicionar a pá no melhor ângulo em relação à base. Esta é mais uma vantagem de se ter um conceito modular para a estrutura.

3.3 Dimensionamento

O dimensionamento dos equipamentos é a etapa que define diversos parâmetros, tal que se destacam: a escolha de materiais; dimensões e geometria do projeto. É a etapa compreendida entre o conceito ou projeto



Figura 36. Montagem da base mecânica no interior da turbina

básico e o detalhamento que permitirá a compra dos materiais e construção do protótipo. Nesta etapa são verificados e calculados esforços estruturais, a integridade dos equipamentos e avaliados, por exemplo tensão, Fator de Segurança (FS), deslocamentos e deformações resultantes. A seguir são apresentados os cálculos de dimensionamento dos equipamentos estruturais da base mecânica.

3.3.1. Trilho Para o conjunto trilho-carrinho, foi utilizada a ferramenta de cálculo *SKF Linear Guide Calculator* da fabricante SKF (disponível em: <http://www.skf.com/us/knowledge-centre/engineering-tools/skflinearguidescalculator.html>), que permite o dimensionamento considerando os piores cenários de carregamento, com forças e momentos máximos aplicados ao trilho. O programa analisa toda a gama de dimensões dos trilhos do tipo LLT, fornecendo o Fator de Segurança obtido para cada opção de tamanho.

O critério escolhido para seleção do trilho baseia-se no Fator de Segurança, que deve ser maior ou igual a 2 ($FS \geq 2$).

Um relatório com o resultado de saída do programa encontra-se no Apêndice A. Neste relatório estão apresentados os resultados de força resultante em cada carrinho e o Fator de Segurança para algumas opções de montagem trilho-carrinho, nos tamanhos 30 a 45. Dentre as opções, as que apresentaram resultado dentro do critério de Fator de Segurança foram LLTHS 45 com sufixos U, A, R, LU, LA e LR. Esta designação refere-se apenas ao carrinho que pode ter algumas variações de tamanho e configuração de montagem. O conjunto trilho-carrinho selecionado foi portanto o LLTHS 45 A, que apresenta FS igual a 2,1 além de ser a opção padrão do fabricante, tendo vantagens de disponibilidade e custo.

3.3.2. Estrutura Com o objetivo de verificar as tensões devido às cargas do manipulador e também verificar os deslocamentos por deformação elástica na base, foi feito um modelo para análise da estrutura. Este modelo foi resolvido pelo Método de Elementos Finitos utilizando o programa Autodesk® Nastran® In-CAD.

A partir dos resultados, pode-se determinar alterações de geometria ou seleção de materiais, que garantam maior

segurança e rigidez da estrutura. A seguir, são detalhados os parâmetros da simulação de Elementos Finitos.

Malha: A análise foi modelada com elementos unidimensionais de tamanho global de 25 mm, e ordem quadrática. E foram atribuídas propriedades de viga, relativas ao perfil de alumínio estrutural, tais como: momentos de inércia, momento de inércia polar e área de seção transversal.

Material: O material utilizado é o alumínio EN AW-6060 (norma DIN EN 573-3) e foi definido no modelo a partir de suas propriedades físicas e mecânicas.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica	2700	kg/m ³
Módulo de Elasticidade	70,0	GPa
Módulo de Cisalhamento	26,1	GPa
Coeficiente de Poisson	0,34	
Limite de Escoamento	200	MPa

TABELA 1: Propriedades do EN AW-6060

Condições de Contorno: Na extremidade onde está acoplada a base magnética dos braços de ancoragem, foram definidas restrições de translação em todas as direções e rotação livre. Para os pés de apoio, definiu-se restrição de translação apenas na direção do eixo *y*. A interface entre os trilhos primário e secundário foi modelada utilizando elementos unidimensionais rígidos, fixados na mesma posição dos carrinhos de rolamento.

A figura 37 apresenta o modelo de análise da estrutura para o robô posicionado na face posterior da pá. Estão representados o Sistema de Coordenadas do modelo, a malha, as condições de contorno e os conectores utilizados.

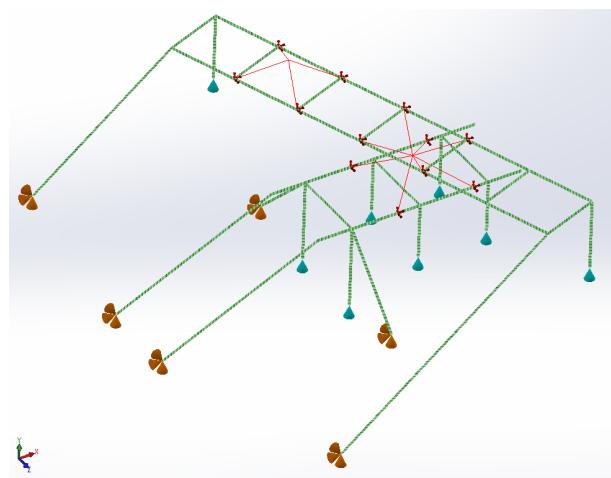


Figura 37. Malha e condições de contorno

Carregamento: O carregamento utilizado para simulação refere-se às forças e torques máximos atingidos pelo manipulador MOTOMAN modelo MH12, em sua base. Este carregamento está de acordo com o manual de instalação e manutenção do robô (HW1482347) como forças e torques de parada de emergência.

Carga	Valor	Unidade
Força em X	9025	N
Força em Y	-5885	N
Força em Z	9025	N
Momento em X	4120	Nm
Momento em Y	4120	Nm
Momento em Z	4120	Nm

TABELA 2: Forças e torques na base do robô

As forças foram aplicadas através de um conjunto de conectores rígidos a partir do ponto que representa o ponto de origem da base do robô. São 4 conectores representando a posição de cada carrinho no trilho secundário. Foram testadas algumas posições do carrinho sobre o trilho para definir o pior caso. Verificou-se que este ocorre quando o carrinho está a uma distância de 817,5 mm a partir do eixo de rotação entre os trilhos. A figura 38 mostra a representação do carregamento na direção resultante.

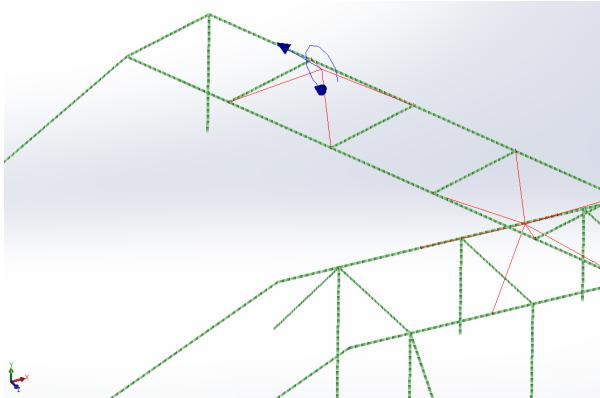


Figura 38. Forças e torques na direção resultante

Resultados:

Abaixo são apresentados os resultados das simulações realizadas para a configuração de revestimento da face posterior da pá. A figura 39, apresenta o resultado das tensões de Von Mises, demonstrando que o maior encontrado é 5,78 MPa.

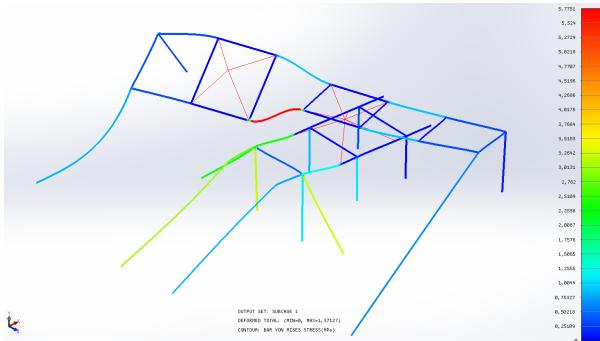


Figura 39. Resultado de Tensões de Von Mises na estrutura, escala exagerada de deformação

O Fator de Segurança pode ser calculado a partir da equação:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

onde σ_y é o Limite de Escoamento do material e σ_{max} é a tensão máxima encontrada. Assim, o Fator de Segurança é 34,6.

O deslocamento máximo na estrutura está demonstrado na figura 40 e verifica-se que o valor da translação resultante da base do manipulador foi de 0,47 mm.

A rotação da base também causa erros de posicionamento do efetuador. Para o cálculo deste desvio foram criados 3 pontos, tais que estes formam dois vetores perpendiculares e um terceiro que é resultado do produto vetorial entre eles. Estes pontos são unidos por conectores rígidos, tal que mantém-se o ângulo e a distância entre eles após a deformação da estrutura. Desta forma, permite-se calcular a matriz de rotação que leva o conjunto de vetores que formam a base ortonormal inicial (a_1, a_2, a_3) para o conjunto de vetores da base ortonormal resultante (b_1, b_2, b_3) das deformações elásticas da estrutura. A matriz rotação é calculada da seguinte forma:

$$R = \begin{bmatrix} | & | & | \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | & | & | \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ | & | & | \end{bmatrix}^{-1}$$

Pode-se então obter o ângulo de rotação pela seguinte relação:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{tr(R) - 1}{2} \right)$$

O resultado, para o caso de forças máximas do manipulador, é uma variação angular de 0,0149° em sua base, o que causaria, para efeito de escala, um erro de 0,522 mm em uma distância de 2 m de sua origem.

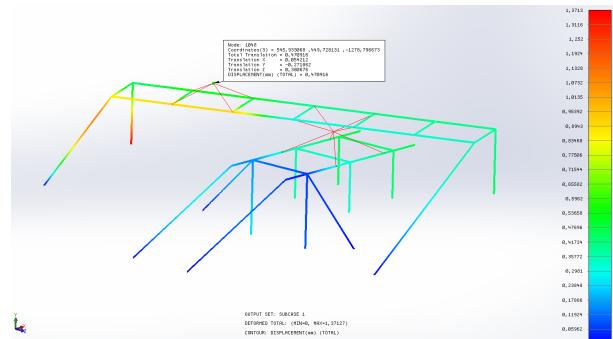


Figura 40. Resultado de Deslocamento Resultante na estrutura, escala real de deformação

As forças de reação nos braços de ancoragem são importantes para o dimensionamento da base magnética. A tabela 3 apresenta os resultados encontrados em cada braço. A figura 41 apresenta a referência de cada braço de ancoragem, de acordo com a tabela 3.

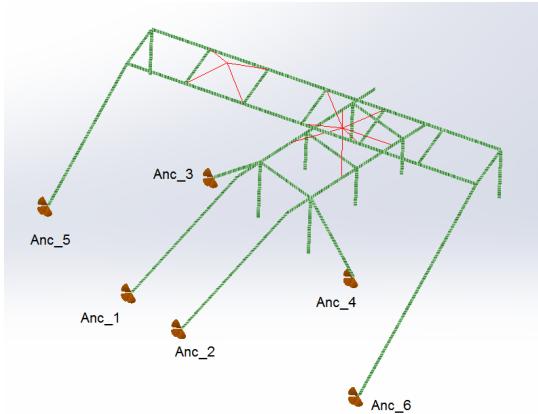


Figura 41. Referência dos braços de ancoragem para os resultados da tabela 3

Braço	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]
Anc_1	-1678	-1966	39
Anc_2	-3433	-4076	40
Anc_3	131	206	-569
Anc_4	-9556	6621	6037
Anc_5	-1566	-1436	1461
Anc_6	651	160	-254

TABELA 3: Forças de reação em cada ponto de ancoragem

Os resultados F_x , F_y e F_z referem-se às forças resultantes nas direções x, y, z do sistema de coordenadas local de cada braço de ancoragem. Neste sistema de coordenadas, a direção x está alinhada com o eixo longitudinal de cada braço de ancoragem e as direções y, z são as direções ortogonais a x . Desta forma, os resultados negativos em x indicam tração do braço de ancoragem e os positivos, compressão.

3.3.3. Base Magnética O dimensionamento das bases magnéticas está diretamente relacionado ao resultado das forças resultantes em cada braço de ancoragem, já que são estes os elementos que representam as restrições no modelo de Elementos Finitos.

Assim, deve-se comparar o resultado da tabela 3 com a capacidade máxima de carga da base magnética comercial. Para aceitar a base magnética escolhida, deve-se respeitar as seguintes relações:

$$|F_x| \leq \frac{2}{3} * F_{max}$$

$$|F_y|, |F_z| \leq \frac{2}{3} * \mu * F_{max}$$

Onde F_x , F_y , F_z referem-se aos valores obtidos na simulação de Elementos Finitos apresentado na tabela 3; F_{max} é a capacidade de carga máxima da base magnética; e μ é o coeficiente de atrito entre a base magnética e a superfície da turbina que será considerado igual a 0,12.

3.4 Conclusão

As simulações pelo Método de Elementos Finitos verificaram a rigidez da estrutura dada, a geometria imposta pelo conceito P-R-P-P e para as opções comerciais disponíveis de material, perfil de alumínio estrutural, trilho e bases magnéticas. Os resultados se mostraram satisfatórios para os componentes selecionados, ressaltando que foram considerados casos extremos de operação. A flexibilidade da estrutura causa erros com ordem de grandeza de 1 mm, o que não interfere na qualidade do processo. As forças resultantes nos pontos de ancoragem permitem dimensionamento e seleção das bases mecânicas para cada região de ancoragem, não limitando o mesmo tamanho de base para todos os pontos. Os resultados de integridade do componentes conferiram Fatores de Segurança aceitáveis e dentro dos valores recomendados para projetos mecânicos em geral.

4. SOLUÇÃO DA CALIBRAÇÃO

Como especificado em EMMA-DETAILED, o sensor a ser adquirido pelo projeto é o Faro Focus X330. Esse dispositivo consiste em um *laser scanner* e aquisita a medida da distância percorrida pelo feixe *laser* emitido pelo sensor até o obstáculo mais próximo. A partir de um espelho rotativo e um motor acoplado a sua base, o Focus X330 é capaz de aquisitar pontos em 360° na horizontal e 300° na vertical. O ambiente e modelo de cada pá serão, então, 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 y 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 entre o sistema de coordenadas de 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 transformada 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.

4.1 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 42 e 43), pois a introdução de alterações na base do robô podem ser realizadas de maneira estruturada e controlada, na etapa de construção do sistema, assegurando assim uma

calibração entre o posicionamento dos marcadores e o manipulador.



Figura 42. Exemplo de esfera utilizada para reconhecimento. Fonte: <http://shop.talwin.net/>

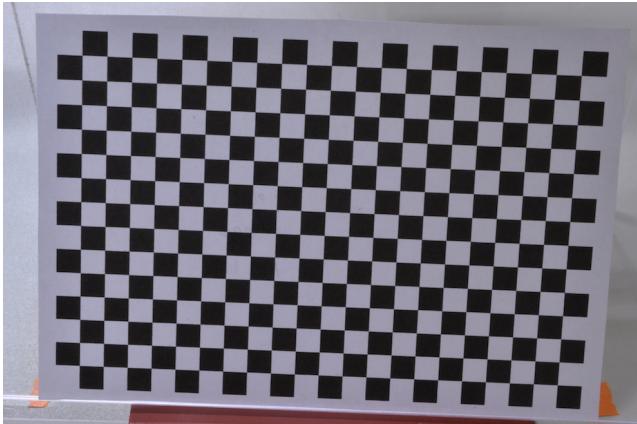


Figura 43. Exemplo de padrão de xadrez utilizado para renhecimento.
Fonte: <http://stereomorph.blogspot.com.br/>

Devido à baixa iluminação ambiente dentro do circuito hidráulico, 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.

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.

4.1.1. 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). Dado um subconjunto inicial de pontos, são calculados os parâmetros da esfera (coordenadas do centro da esfera e seu raio). A cada iteração do algoritmo, os demais pontos do conjunto original são julgados como pertencentes ou não à esfera estimada e novos parâmetros são calculados para a esfera que represente o novo subconjunto de pontos. 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.

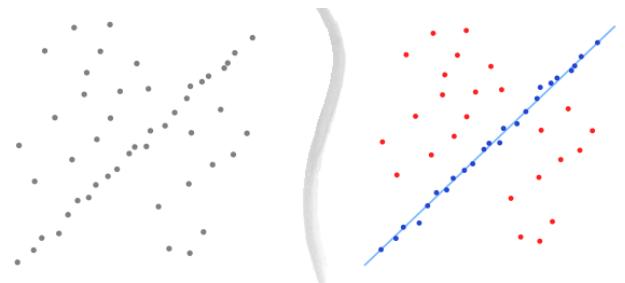


Figura 44. Exemplo de reconhecimento de uma linha em 2 dimensões usando RANSAC. (Fonte: PLC (2015))

4.1.2. 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”. Essas técnicas têm sido recentemente adaptadas para o universo de três dimensões (ver Camurri et al. (2014)) e adequadamente chamada 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 contêm 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 algoritmo 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 algoritmo 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 45).

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

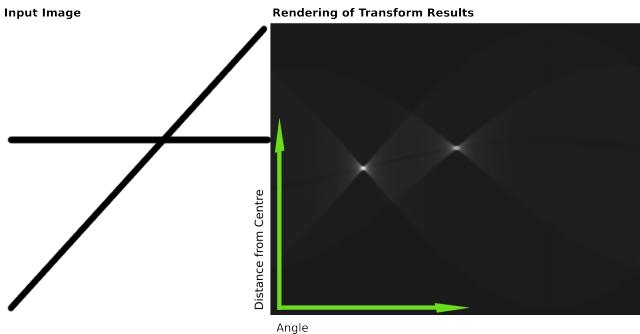


Figura 45. Exemplo de reconhecimento de duas linhas em 2 dimensões usando Transformada de Hough. Na esquerda estão pontos que compõem as duas retas, na direita uma sobreposição das variedades referentes a cada ponto das retas (mergulhadas em um espaço paramétrico bidimensional). Os pontos mais brilhantes refletem os picos referentes aos parâmetros que melhor descrevem as duas retas. (Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform)

Tendo conhecimento da posição de quatro esferas, é possível identificar unicamente a posição de um corpo preso rigidamente ao conjunto de esferas. 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.

4.2 Calibração 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. A instalação de qualquer um desses aparelhos não pode ter precisão garantida nas operações de campo, pois necessitaria também de calibração a cada utilização, retirando assim o propósito do método.

Portanto, para a localização das pás 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 um esforço computacional elevado.

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 descriptors;
- **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, utilizando 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 solução proposta. Aplicações semelhantes envolvendo identificação de objetos no ambiente tridimensional, mas sem localizá-los, e utilizando diferentes descritores podem ser encontradas em Bayramoglu and a.a. Alatan (2010); Hetzel et al. (2001); Chen and Bhanu (2007). Uma comparação dos descritores utilizados para reconhecimento de objetos 2D e 3D pode ser encontrado em Zaharia and Prêteux (2004); Weber and Hellwich (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.

Entretanto, no contexto da solução proposta, o formato original da pá do rotor é fixo para cada turbina, ou seja, uma vez que definida em qual turbina será realizada a manutenção, é possível fornecer *a priori* qual tipo de pá será metalizada e suas características. Essa característica possibilita descartar a necessidade de comparação e busca de diversos modelos, reduzindo assim a complexidade computacional final do algoritmo. Portanto, é possível armazenar uma representação de diferentes pás e fornecer, como entrada do sistema, o modelo correto de acordo com o tipo de turbina que está sendo inspecionada. O processo final consiste, então, no correto posicionamento e alinhamento entre o modelo armazenado e a instância real do objeto, ou mais especificamente a pá.

Os desenhos técnicos das pás, não fornecem informações suficientes sobre o seu perfil hidráulico e, para fins

práticos, os modelos serão adquiridos a partir da inspeção *in situ* de uma turbina em condições de conservação que não apresente danos. Esse procedimento necessita ser realizado apenas uma vez para cada modelo.

A partir da suposição que a pá se encontra dentro do campo de visão do sensor *laser*, determinar a posição da pá consiste em posicionar a nuvem de pontos do modelo de forma que ocorra uma sobreposição entre os pontos do modelo e da cena e ambos conjuntos de pontos tenham as mesmas características, ou seja, representem o mesmo objeto. A técnica a ser utilizada é denominada *correspondence grouping*.

4.2.1. Correspondence Grouping O método proposto por Tombari and Di Stefano (2010), se baseia na extração de *features* ou características tridimensionais locais para pontos de interesse e identificar um conjunto de correspondências entre o modelo 3D e o a cena analisada, no caso da aplicação do projeto EMMA as correspondências entre a o modelo da pá e a turbina.

Para reduzir os cálculos necessários, é possível realizar uma amostragem na nuvem de pontos e computar os descritores de cada característica apenas para pontos de interesse, tanto no modelo quanto na cena. Uma vez que ambos os conjuntos de descritores foi calculado, deve-se então determinar as correspondências entre os dois conjuntos. Pode-se utilizar, por exemplo, a distância euclidiana entre os seus descritores correspondentes como medida limite. Cada correspondência é uma evidência que o modelo se encontra na cena. Um acumulador é responsável por contabilizar os votos e um objeto é detectado caso haja um número suficiente de votos. É importante ressaltar mesmo sendo robusta a oclusões e ambientes com muita densidade de objetos, devido à presença de ruído, e a particularidades de cada aplicação, como densidade e resolução das nuvem de pontos fornecidas pelo sensor e pelo modelo, é possível a detecção de falsos positivos. Para se tratar esse problema é necessário o correto ajuste de diversos parâmetros e também a implementação de uma forma eficiente de avaliação das hipóteses encontradas pelo algoritmo.

4.3 Simulação de nuvem de Pontos

Devido a grande complexidade logística e a necessidade de disponibilidade de acesso seco a uma turbina, é indispensável a possibilidade da sintetização de dados consistentes e que representem de maneira eficaz as características que serão encontradas no cenário real de operação.

4.3.1. Dados genéricos Para um primeiro contato com o funcionamento do método *Correspondence Grouping* foram utilizados dados genéricos disponíveis na literatura¹ e o modelo da pá gerado pelo sensor Faro Focus X330 , durante a viagem de campo à Usina Hidrelétrica de Jirau para o teste de viabilidade técnica desse sensor.

A figura 46 ilustra o modelo da pá em nuvem de pontos, esse modelo é uma representação de 360° da superfície

da pá e foi aquisitado em campo, sendo assim representa a real leitura final do sensor na aplicação do algoritmo de calibração.

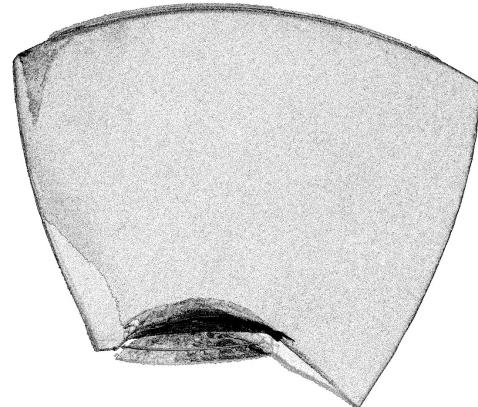


Figura 46. Nuvem de pontos da pá aquisitada pelo sensor Faro Focus X330.

A identificação do objeto na cena e a estimativa da sua posição foi testada em uma cena de um escritório, como pode ser visualizado na figura 47. O modelo foi sobreposto em vermelho e não houve uma discrepância visível entre a instância presente na cena e o modelo sobreposto. Mesmo com uma diferença de densidade de pontos presente em cada parte da nuvem de pontos resultante (modelo é muito mais denso que a cena), foi possível realizar a correta localização do modelo. O ajuste dos parâmetros de subamostragem necessitaram de maior atenção nesse cenário. Vale ressaltar que o algoritmo identificou corretamente uma cópia exata do modelo que foi introduzido na cena, não há presença de ruídos ou oclusões no instância da pá presente na cena.

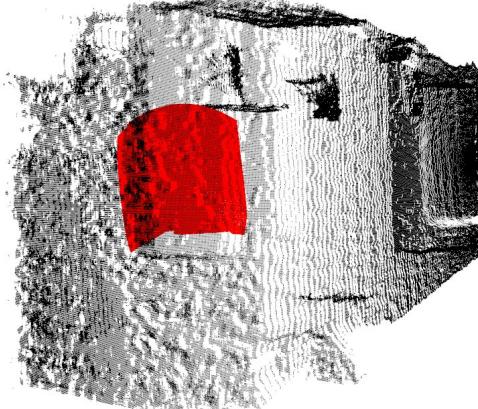


Figura 47. Exemplo de localização do modelo da pá em uma cena genérica.

4.3.2. Blensor A utilização de dados genéricos é útil para a implementação e testes do algoritmo, entretanto não representa as condições reais que serão encontradas durante o processo de metalização. A geometria da turbina, da pá, do manipulador e também as oclusões geradas pelos elementos presentes necessitam ser simulados para um perfeito ajuste do sistema. Para a simulação desses cenários, foi utilizado a toolbox *Blensor*²

¹ <http://kos.informatik.uni-osnabrueck.de/3Dscans/>

² <http://www.blensor.org>

baseada no *software* de criação 3D *Blender*³, a qual permite a simulação da nuvem de pontos resultante de um sensor em um ambiente tridimensional. Os objetos inseridos na cena são sólidos 3D, que podem ser projetados utilizando-se as ferramentas do próprio programa ou importados em outros formatos suportados, como a partir do Solidworks®. A Figura 48 ilustra a utilização do software, assim como o modelo 3D importado da turbina. A simulação leva em consideração a distância percorrida pelo pulso emitido, a intensidade luminosa retornada ao sensor e o tempo decorrido durante o sensoriamento Gschwandtner et al. (2011), o que fornece uma melhor aproximação da resposta do sensor para um ambiente simulado do que simplesmente a utilização de uma técnica de *raycast* pura.

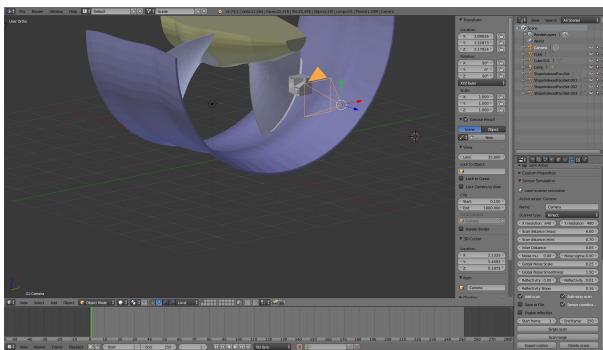


Figura 48. Visualização do *Blensor* com o modelo 3D da turbina importado.

Dentro do ambiente de simulação, é possível a sintetização de dados provenientes de diversos tipos de sensores laser, como um laserscanner 2D, o sensor Velodyne e sensores do tipo Kinect. Os parâmetros de configuração dos sensores também estão disponíveis para ajuste, assim como o seu respectivo nível de ruído. Sensores que não estão nativamente disponíveis podem ser introduzidos. O sensor Faro Focus X330 não pertence a lista de sensores previamente carregados pela ferramenta e teve que ser implementado. As especificações técnicas utilizadas estão de acordo com as fornecidas pelo fabricante, com exceção do ângulo de visão que foi reduzido para diminuir o esforço computacional, sem perda de informação. A figura 49 ilustra a resposta simulada do sensor implementado dentro do ambiente de simulação com a presença do modelo CAD da turbina.

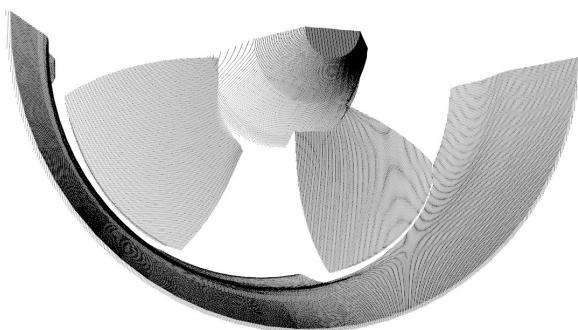


Figura 49. Resposta simulada do sensor Faro Focus X330.

³ <http://www.blender.org>

Caso seja disponibilizado uma descrição do perfil hidráulico da pá, é possível também a geração de modelos sem a necessidade de uma inspeção prévia em uma unidade geradora, para a aquisição de dados sobre a turbina. A figura 50 ilustra o ambiente de simulação e a nuvem de pontos final para a criação de um modelo a partir de um arquivo descritivo.

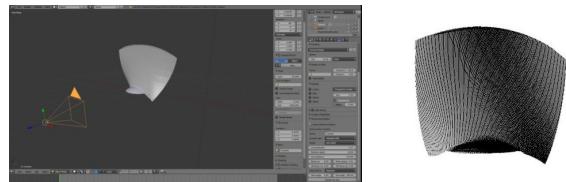


Figura 50. Criação de um modelo a partir de um arquivo descritivo da pá.

Para representar corretamente as oclusões geradas pelo próprio estrutura do rotor e das pás, é necessário que as cenas sintetizadas a partir da ferramenta tenham o sensor virtual posicionado em posições que representem os locais no qual é possível a fixação real do equipamento dentro da unidade geradora. As oclusões geradas pelo sistema de metalização também devem ser previstas e simuladas para um perfeito ajuste do algoritmo, uma vez que o conjunto do robô e trilhos deve estar previamente posicionado para que a calibração entre a pá e o efetuador do manipulador seja possível. Para isso, o modelo do manipulador MH12 foi importado para dentro do ambiente de simulação, como ilustrado na figura 51 e, em seguida, posicionado entre o sensor e a pá, para servir de obstáculos para parte dos feixes laser que atingiram a pá.

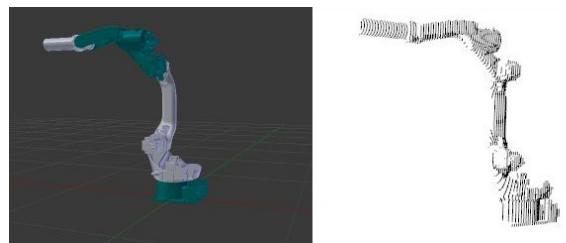


Figura 51. Visualização do *Blensor* com o modelo 3D da turbina importado.

A Figura 52 ilustra a pá sendo corretamente identificada com a presença do manipulador entre o sensor e a pá criando uma região de sombra. É possível observar o modelo que está sendo comparado à cena na parte esquerda da figura e as linhas verdes representam as correspondências encontradas entre os descritores do modelo da pá e os encontrados na cena.

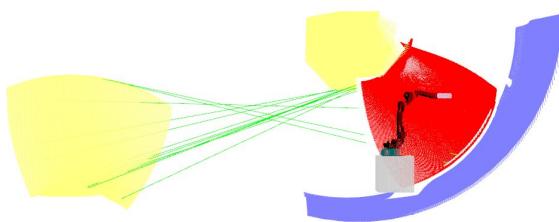


Figura 52. Resposta do algoritmo de calibração, com destaque para as correspondências encontradas.

4.4 Análise de resultados

Os resultados apresentados pelo algoritmo de calibração não fornecem informação da qualidade da transformada encontrada, apenas uma representação visual confirmando que o modelo foi aproximadamente posicionado de maneira correta. É necessário, então, uma análise mais estruturada dos resultados obtidos, afim de se ter uma medida da eficiência apresentada pelo processo de calibração e também avaliar se a precisão encontrada está em conformidade com a necessária para a realização do revestimento e dentro de uma margem de segurança.

A partir dos dados de simulação, foram sintetizados modelos com os elementos posicionados de maneira estruturada, a fim de ser possível medir a discrepância entre a transformação de coordenadas medida e a de referência.

O processo de criação das nuvem de pontos sintéticas consiste em importar um modelo CAD para o ambiente de simulação da ferramenta Blensor em uma posição específica relativa ao sistema de coordenadas do sensor simulado.

No teste padrão foram utilizados os seguintes elementos: modelo de um quarto da turbina contendo uma pás, chamado de cena e o modelo frontal da pás, chamado de modelo. O ponto de referência considerado no modelo da pás foi a origem de seu arquivo CAD, assim como no caso da cena, que foi considerado a origem do rotor como ponto de referência.

A comparação entre a transformada medida e a de referência se da por meio da comparação de dois caminhos que representam a transformação do sistema de coordenadas da origem do sensor presente na aquisição de dados da cena e a origem da pás T_{cp} . Para isso, são necessárias as seguintes transformadas:

- T_{mp} - Transformada entre o sensor do modelo e a origem do sistema de coordenadas da pás, proveniente de seu arquivo CAD.
- T_{cr} - Transformada entre o sensor da cena e a origem do rotor, que coincide com a origem do arquivo CAD da turbina.
- T_{rp} - Transformada entre a origem do rotor e a origem da pás, essa transformada é fixa e foi medida no próprio modelo CAD da turbina com o auxílio do SolidWorks.
- T_{cm} - Transformada entre a origem do sensor da cena e a origem do sensor do modelo. Essa transformada

é a medida pelo algoritmo de calibração, uma vez que a sobreposição do modelo leva em consideração um ponto de vista em que a nuvem de pontos foi gerada (origem do sistema de coordenadas do sensor do modelo).

As transformadas listadas se relacionam da seguinte maneira:

$$T_{cp} = T_{cr} * T_{rp} \sim T_{cm} * T_{mp}. \quad (1)$$

A figura 53 ilustra a relação entre as transformadas. O erro de medição da transformada pode ser calculado como a discrepância entre os dois termos da relação 1 pode ser calculada da seguinte maneira:

$$T_e = (T_{cr} * T_{rp})^{-1} * T_{cm} * T_{mp}$$

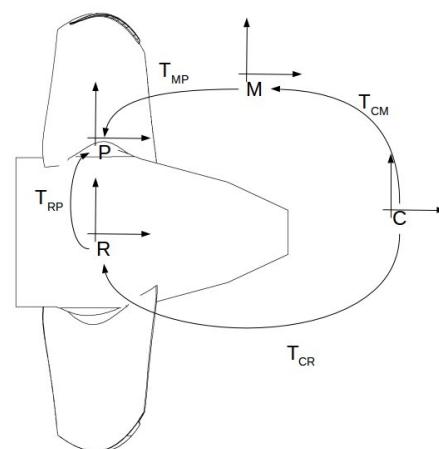


Figura 53. Representação dos sistemas de coordenadas de cada componente envolvido na calibração.

Para o teste simulado, ilustrado na figura 54 com os respectivos sistemas de coordenadas, o erro angular encontrado a partir de um eixo foi de aproximadamente 0.5° e o erro de translação foi de 15mm . O erro angular, entretanto, gera um desalinhamento de até 42mm a uma distância de 5 metros da origem da pás. Sendo assim, existe ainda uma necessidade de ajuste no processo de calibração, principalmente na etapa de alinhamento final das nuvens de pontos.

4.5 Conclusão

A exploração das características tridimensionais do ambiente, aquisitadas pelo sensor laser Faro Focus X330, se mostrou viável para a identificação da posição e orientação do robô e da pás a ser processada. Entretanto, devido às características da pás, com uma grande região sem contornos ou curvas acentuadas, existe a necessidade do desenvolvimento de um método de amostragem que favoreça as regiões com maior número de *features* e durante o alinhamento, penalize o alinhamento entre regiões planas. Outro quesito em aberto é o aprimoramento na medição do erro de estimativa do posicionamento da pás, uma vez que os erros de rotação e translação podem se somar ou se cancelar.

A utilização de marcadores será empregada sempre que possível, visando a redução da complexidade

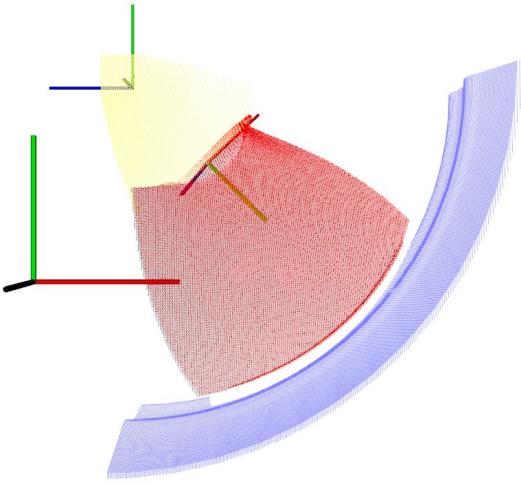


Figura 54. Processo de calibração com os sistemas de coordenadas destacados.

computacional, porém desenvolvimento da calibração do robô necessita da chegada dos marcadores para que seja iniciado.

REFERÊNCIAS

- Arlinghaus, S. (1994). *Practical handbook of curve fitting*. CRC press.
- 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.
- DIN EN 573-3 (2007). Aluminium und Aluminiumlegierungen Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeugen. Standard, Deutsches Institut für Normung.
- Farin, G.E. (2002). *Curves and surfaces for CAGD: a practical guide*. Morgan Kaufmann.
- From, P.J. (2010). Off-shore robotics: Robust and optimal solutions for autonomous operation.
- Gschwandtner, M., Kwitt, R., Ühl, A., and Pree, W. (2011). BlenSor: Blender sensor simulation toolbox. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6939 LNCS(PART 2), 199–208. doi:10.1007/978-3-642-24031-7-20.
- Hetzl, 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.
- HW1482347 (2015). MOTOMAN-MH12 Instructions. Manual, YASKAWA MOTOMAN ROBOTICS.
- Jüttler, B. and Felis, A. (2002). Least-squares fitting of algebraic spline surfaces. *Advances in Computational Mathematics*, 17(1-2), 135–152.
- 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.
- Peters, J. and Reif, U. (2008). *Subdivision surfaces*. Springer.
- PLC (2015). Random sample consensus. http://www.pointclouds.org/documentation/tutorials/random_sample_consensus.php. Acessado: 30-11-2015.
- 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. and Hellwich (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>.

Apêndice A. RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO DO TRILHO

Neste apêndice apresenta-se a íntegra do relatório de resultado gerado pelo programa *SKF Linear Guide Calculator* de análise de carregamentos e Fator de Segurança para os trilhos SKF.



General

Unit system: Metric

Title: Projeto EMMA

Comments: Cálculo de dimensionamento do trilho

Name: Estevão Ferrão

Company: LEAD | COPPE/UFRJ

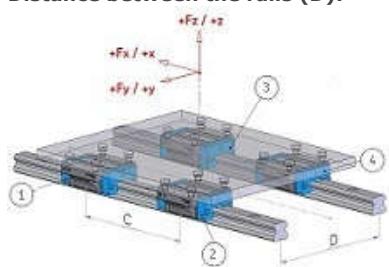
Configure carriage

Linear guide system type:

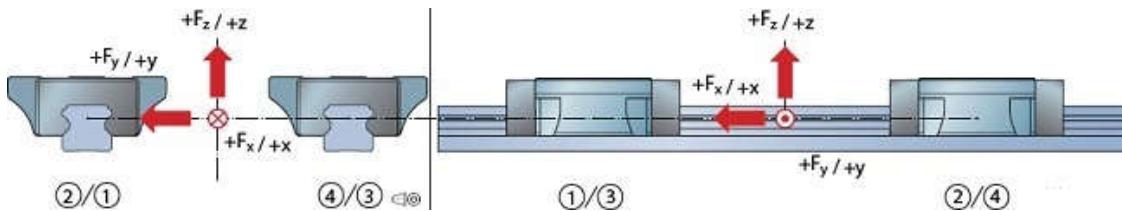
Two rail guides with four guide carriages

Distance between the carriages (C): 425 mm

Distance between the rails (D): 425 mm



Phase name	Stroke mm	% of stroke	f_d	Forces
Carregamento_Max	500.0	100.0	1.0	3



Load input for Carregamento_Max:

Name	Force X	Force Y	Force Z	Lever arm x	Lever arm y	Lever arm z
Load 1: Forcas	9025.0	9025.0	5885.0	0.0	0.0	1300.0
Load 2: Mv	4120.0	4120.0	0.0	0.0	0.0	1000.0
Load 3: Mh	4120.0	4120.0	0.0	1000.0	1000.0	0.0

Load result

Load result for Carregamento_Max:

	Carriage 1 N	Carriage 2 N	Carriage 3 N	Carriage 4 N
Resulting load in Y-direction:				
From X-direction:	-4 847,1	4 847,1	-4 847,1	4 847,1
From Y-direction:	9 163,3	-530,8	9 163,3	-530,8
Result in Y-direction:	4 316,3	4 316,2	4 316,3	4 316,2
Resulting load in Z-direction:				
From X-direction:	-18 650	18 650	-18 650	18 650
From Y-direction:	18 650	18 650	-18 650	-18 650
From Z-direction:	1 471,2	1 471,2	1 471,2	1 471,2
Result in Z-direction:	1 471,2	38 771,2	-35 828,8	1 471,2
Resulting carriage loads:				
Result load Y+Z:	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5

Life influence factors c_1 , c_2 and preload

Factor of reliability (c_1): 90%, $c_1 = 1.00$

Factor of operational conditions (c_2): 1.00

Preload class: T1

Life influence factors f_i and f_s

Designation	f_i	f_s
LLTHS 30 LU	1.0	1.0
LLTHS 30 LA	1.0	1.0
LLTHS 30 LR	1.0	1.0
LLTHS 35 U	1.0	1.0
LLTHS 35 A	1.0	1.0
LLTHS 35 R	1.0	1.0
LLTHS 35 LU	1.0	1.0
LLTHS 35 LA	1.0	1.0
LLTHS 35 LR	1.0	1.0
LLTHS 45 U	1.0	1.0
LLTHS 45 A	1.0	1.0
LLTHS 45 R	1.0	1.0
LLTHS 45 LU	1.0	1.0
LLTHS 45 LA	1.0	1.0
LLTHS 45 LR	1.0	1.0

F_{tot} per carriage

Designation		Carriage 1	Carriage 2	Carriage 3	Carriage 4
		N	N	N	N
LLTHS 30 LU	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 30 LA	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 30 LR	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 35 U	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 35 A	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 35 R	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 35 LU	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 35 LA	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 35 LR	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 45 U	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 45 A	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 45 R	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 45 LU	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 45 LA	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5
LLTHS 45 LR	T1	5 787,5	43 087,5	40 145	5 787,5

Result

Designation	Length	Width	Height	Rail width	L _{ns}	C	C ₀	Safety factor	
	mm	mm	mm	mm	km	N	N		
LLTHS 30 LU	T1	125.4	60	42	28	48.7	33900	60800	1,4
LLTHS 30 LA	T1	125.4	90	42	28	48.7	33900	60800	1,4
LLTHS 30 LR	T1	125.4	60	45	28	48.7	33900	60800	1,4
LLTHS 35 U	T1	114.4	70	48	34	52.2	34700	54650	1,3
LLTHS 35 A	T1	114.4	100	48	34	52.2	34700	54650	1,3
LLTHS 35 R	T1	114.4	70	55	34	52.2	34700	54650	1,3
LLTHS 35 LU	T1	142.9	70	48	34	113.9	45000	79400	1,8
LLTHS 35 LA	T1	142.9	100	48	34	113.9	45000	79400	1,8
LLTHS 35 LR	T1	142.9	70	55	34	113.9	45000	79400	1,8
LLTHS 45 U	T1	136.5	86	60	45	259.4	59200	91100	2,1
LLTHS 45 A	T1	136.5	120	60	45	259.4	59200	91100	2,1
LLTHS 45 R	T1	136.5	86	70	45	259.4	59200	91100	2,1
LLTHS 45 LU	T1	168.5	86	60	45	474.4	72400	121400	2,8
LLTHS 45 LA	T1	168.5	120	60	45	474.4	72400	121400	2,8
LLTHS 45 LR	T1	168.5	86	70	45	474.4	72400	121400	2,8

Prerequisites on the design of the linear system

- Adjacent support structure is rigid.
- Rail tracks and carriages are form-fit mounted at datum planes.
- Sliding of components is not possible.
- Strength of attachment screws should be checked separately.
- No system friction considered.
- Lubrication, temperature and vibration are to be considered by the user during calculation.

Disclaimer

Please refer to "TERMS & CONDITIONS" at this website.

Version 2.6.3 **Release Date** 2015-12-06