

Execução:



Financiamento:



Projeto **EMMA**

**Metodologia de Revestimento Robótico de turbinas in situ**

Título **Relatório Final do Projeto EMMA**

PD 6631-0003/2015

Contrato Jirau 09/15

Coordenador Ramon Romankevicius Costa

Gerente Breno Bellinati de Carvalho

# Sumário

<b>1 Resumo gerencial</b>	<b>15</b>
1.1 Descrição da Inovação . . . . .	16
1.2 Motivação . . . . .	17
1.3 Objetivo . . . . .	18
1.4 Originalidade . . . . .	18
1.5 Aplicabilidade . . . . .	19
1.6 Relevância . . . . .	19
1.7 Capacitação . . . . .	19
1.8 Razoabilidade dos Custos . . . . .	21
1.9 Metodologia adotada . . . . .	21
1.10 Estratégia de difusão . . . . .	22
1.11 Melhorias de processo, equipamento e sistema . . . . .	22
1.12 Pesquisa Correlatas . . . . .	23
1.13 Instituição e Equipe . . . . .	23
<b>2 Plano de Projeto</b>	<b>26</b>
2.1 Etapa 1 . . . . .	27
2.2 Etapa 02 . . . . .	29
2.3 Etapa 03 . . . . .	33
2.4 Etapa 04 . . . . .	35
<b>3 Estudo do conceito</b>	<b>37</b>
3.1 Introdução . . . . .	38
3.2 Descrição do problema . . . . .	40
3.2.1 Descrição do processo HVOF . . . . .	41

3.2.2	Descrição dos requisitos de operação de HVOF . . . . .	43
3.2.2.1	Jateamento da superfície da pá . . . . .	43
3.2.2.2	Reparo de danos existentes . . . . .	44
3.2.3	Contextualização do Ambiente . . . . .	45
3.2.3.1	Hélice e pás . . . . .	47
3.2.3.2	Aro Câmara e regiões adjacentes . . . . .	48
3.2.3.3	Escotilhas de acesso . . . . .	49
3.2.3.4	Tubo de sucção . . . . .	51
3.2.3.5	Infraestrutura disponível . . . . .	51
3.2.4	Descrição das tarefas do robô . . . . .	52
3.3	Estado da arte . . . . .	54
3.3.1	Robôs sobre trilhos . . . . .	54
3.3.2	Robôs escaladores . . . . .	56
3.3.3	Robôs cabeados . . . . .	61
3.3.4	Manipulador com base esférica . . . . .	63
3.4	Projeto de robô autônomo para HVOF . . . . .	66
3.4.1	Acesso pela escotilha superior . . . . .	66
3.4.2	Acesso pela escotilha inferior . . . . .	68
3.4.2.1	Projeto de robôs em trilhos . . . . .	69
3.4.2.2	Projeto de robôs escaladores . . . . .	70
3.4.2.3	Projetos com manipuladores industriais fixos . . . . .	72
3.4.3	Qualificação do processo HVOF . . . . .	74
3.4.3.1	Movimentação e acessibilidade . . . . .	75
3.4.3.2	Jateamento abrasivo . . . . .	75
3.4.3.3	Tipos de revestimentos . . . . .	79
3.5	Estudo de bases para manipuladores industriais . . . . .	82
3.5.1	Modelagem 3D das soluções conceituais . . . . .	82
3.5.1.1	Dimensionamento da base . . . . .	86
<b>4</b>	<b>Estudo de viabilidade técnica</b> . . . . .	<b>93</b>
4.1	Introdução . . . . .	94
4.2	Estudo de viabilidade técnica detalhada . . . . .	96
4.2.1	Pesquisa de mercado . . . . .	97

4.2.2	Estudo puramente geométrico . . . . .	98
4.2.3	Espaço de trabalho e cinemática do manipulador . . . . .	101
4.2.4	Dinâmica do manipulador . . . . .	112
4.2.5	Detalhamento da Base Mecânica . . . . .	116
4.2.5.1	Conceitos de base mecânica . . . . .	117
4.2.5.2	Sistemas de elevação, fixação e ancoragem . . . . .	120
4.2.6	Shutter . . . . .	122
4.3	Calibração . . . . .	123
4.3.1	Estudo de sensores . . . . .	124
4.3.1.1	3D scanners . . . . .	125
4.3.1.2	ToF Cameras . . . . .	127
4.3.1.3	Câmeras de Luz Estruturada . . . . .	130
4.3.2	Conclusão . . . . .	130
4.3.2.1	Medidor de distância a Laser . . . . .	132
<b>5</b>	<b>Estudo da Metodologia</b>	<b>135</b>
5.1	Introdução . . . . .	136
5.2	Metodologia do sistema de controle . . . . .	138
5.2.1	Construção do ambiente de simulação . . . . .	138
5.2.2	Análises cinemática, dinâmica e controle do manipulador . . . . .	138
5.2.2.1	Avaliação dos extremos da pá . . . . .	139
5.2.2.2	Teste de revestimento completo e novas soluções de base	145
5.2.3	Planejamento de trajetória . . . . .	151
5.2.3.1	Modelagem da superfície . . . . .	152
5.2.3.2	Cálculo dos paralelos . . . . .	153
5.2.3.3	Cálculo dos meridianos . . . . .	158
5.2.4	Conclusão . . . . .	159
5.3	Solução mecânica . . . . .	160
5.3.1	Conceito . . . . .	161
5.3.2	Construção . . . . .	162
5.3.2.1	Trilho e carrinho . . . . .	162
5.3.2.2	Perfil de alumínio estrutural . . . . .	163
5.3.2.3	Pés de apoio . . . . .	165

5.3.2.4	Ancoragem . . . . .	166
5.3.2.5	Bases magnéticas . . . . .	166
5.3.2.6	Junta de rotação . . . . .	167
5.3.2.7	Junta de elevação . . . . .	168
5.3.2.8	Montagem . . . . .	168
5.3.3	Dimensionamento . . . . .	170
5.3.3.1	Trilho . . . . .	170
5.3.3.2	Estrutura . . . . .	171
5.3.3.3	Base Magnética . . . . .	177
5.3.4	Conclusão . . . . .	177
5.4	Solução da calibração . . . . .	177
5.4.1	Reconhecimento do Robô . . . . .	178
5.4.1.1	RANSAC . . . . .	180
5.4.1.2	Transformada de Hough 3D . . . . .	181
5.4.2	Calibração da pá . . . . .	181
5.4.2.1	<i>Correspondence Grouping</i> . . . . .	184
5.4.3	Simulação de nuvem de Pontos . . . . .	184
5.4.3.1	Dados genéricos . . . . .	185
5.4.3.2	Blensor . . . . .	186
5.4.4	Análise de resultados . . . . .	190
5.4.5	Conclusão . . . . .	192
5.5	Solução HVOF . . . . .	193
5.5.1	Análise da aplicação de revestimento . . . . .	193
5.5.2	Análise do jateamento . . . . .	198
5.5.3	Combustível GLP . . . . .	200
5.5.4	Reaplicação de revestimento sobre superfície desgastada . . . . .	201
5.5.5	Seleção dos revestimentos . . . . .	202
5.5.5.1	Análise dos substratos à corrosão . . . . .	203
5.5.5.2	Análise dos substratos à cavitação . . . . .	206
5.5.6	Seleção dos revestimentos . . . . .	213
5.5.7	Conclusão . . . . .	221

<b>A Pesquisa de Mercado Manipuladores</b>	<b>229</b>
A.1 Acesso pela escotilha inferior - estudo de mercado . . . . .	230
<b>B Dimensionamento Trilho</b>	<b>235</b>
<b>C Relatório de Testes</b>	<b>240</b>
<b>D Relatórios de Viagem</b>	<b>249</b>
<b>E Capacitação</b>	<b>258</b>
<b>F Artigos</b>	<b>262</b>
<b>G Certificação em segurança</b>	<b>279</b>

# **Lista de Figuras**

1.2 Influência do coating na eficiência durante a operação com presença de alta erosão abrasiva. . . . .	21
2.1 Pesquisadores analisando o ambiente. . . . .	27
2.2 Solução conceito. . . . .	28
2.3 Possíveis modelos de manipuladores que atendem os requisitos. . . . .	29
2.4 Possível base para o manipulador dentro do ambiente do circuito hidráulico. . . . .	30
2.5 Posição relativa entre duas nuvens de pontos. . . . .	31
2.6 Maquete utilizada no desenvolvimento do conceito. . . . .	32
2.7 Reunião de acompanhamento em Jirau. . . . .	33
2.8 Teste de campo com a base magnética . . . . .	34
2.9 Estimando posição relativa usando um simulador para análise dos resultados. . . . .	35
3.1 Ilustração de uma pá de turbina que sofreu erosão por cavitação. . . . .	38
3.2 Ilustração de uma turbina do tipo bulbo. . . . .	46
3.3 Pá do rotor recém metalizada. . . . .	48
3.4 Exemplo de limites de rotação das pás do rotor. . . . .	48
3.5 Andaime montado no interior da turbina e ancorado por cordas . . . . .	49
3.6 Vista da escotilha superior pelo exterior do aro câmara . . . . .	50
3.7 Vista da escotilha superior pelo interior do aro câmara . . . . .	50
3.8 Abertura do tubo de sucção para o leito do rio, em fase de construção. . . . .	51
3.9 Pórtico rolante com acesso ao exterior do aro câmara . . . . .	52
3.10 Roboturb [7] - Manipulador robótico sobre trilho flexível . . . . .	55
3.11 SCOMPI [6] - Manipulador robótico sobre trilhos rígidos . . . . .	55

3.12	Translação horizontal do robô RRX3 . . . . .	58
3.13	Climbing robot for Grit Blasting . . . . .	59
3.14	Robô The Climber da ICM Robotics . . . . .	60
3.15	ROMA II . . . . .	61
3.16	Robô CROMSCI . . . . .	62
3.17	Robô TRIPILLAR . . . . .	63
3.18	Robô TorboMate "Crawler", [42] . . . . .	64
3.19	Robô RIWEA, sua cinemática adaptável ao formato da pá, [15] . . . . .	65
3.20	Ilustração do projeto do manipulador com base esférica . . . . .	66
3.21	Desenho esquema com acessos ao circuito hidráulico . . . . .	76
3.22	Acesso pela escotilha superior do aro câmara . . . . .	77
3.23	Acesso pela escotilha inferior . . . . .	78
3.24	Sistemas de movimentação do Jato e equipamentos acesórios à pistola de Coating . . . . .	78
3.25	Mapeamento do desgaste das pás da UHE Jirau através de inspeção em campo . . . . .	80
3.26	Cabeçote do accura spray para monitoramento da chama de aspersão térmica . . . . .	82
3.27	Ambiente 3D da Turbina, em SolidWorks . . . . .	83
3.28	Detalhes em corte da base na configuração inicial recolhida . . . . .	84
3.29	Base na configuração totalmente extendida . . . . .	85
3.30	Base na configuração inicial no ambiente da turbina . . . . .	86
3.31	Base em uma geral configuração de operação . . . . .	86
3.32	Exemplo de posicionamento de um manipulador robótico em frente à pá . . . . .	87
3.33	Visão frontal do aro câmara e raio máximo da base . . . . .	88
3.34	Visão lateral do aro câmara e raio máximo da base nessa direção . . . . .	89
3.35	Exemplo de posicionamento de um manipulador robótico entre as pás . . . . .	89
3.36	Forças e torques máximos entre o robô e sua base . . . . .	91
3.37	Tipos de bases magnéticas comerciais . . . . .	92
4.1	Ilustração das projeções da pá em planos . . . . .	99
4.2	Ilustração do modelo 2D da pá . . . . .	99
4.3	Ilustração da interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Kuka KR10 e a projeção da pá . . . . .	100

4.4	Posições do manipulador Kuka KR10 para o processo de revestimento ser realizado em toda a pá . . . . .	100
4.5	Ilustração da interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Motoman MH12 e a projeção da pá. . . . .	101
4.6	Posições do manipulador MH12 para o processo de revestimento ser realizado em toda a pá. . . . .	102
4.7	Pontos amostrados da pá - vista lateral . . . . .	103
4.8	Pontos amostrados da pá - vista frontal . . . . .	103
4.9	Espaço de trabalho do manipulador Kuka KR10 - vista lateral . . . . .	105
4.10	Espaço de trabalho do manipulador Kuka KR10 - vista superior . . . . .	105
4.11	Melhor posição para o revestimento - robô KR10 da Kuka. . . . .	106
4.12	Espaço de trabalho do manipulador MH12 - vista lateral . . . . .	106
4.13	Espaço de trabalho do manipulador MH12 - vista superior . . . . .	107
4.14	Melhor posição para o revestimento - robô MH12 da Motoman. . . . .	107
4.15	Melhor posição para o revestimento - robô LBR da Kuka com base na posição vertical. . . . .	108
4.16	Melhor posição para o revestimento - robô LBR da Kuka com base na posição horizontal. . . . .	108
4.17	Melhor posição para o revestimento - robô SIA20D da Motoman com base na posição vertical. . . . .	109
4.18	Melhor posição para o revestimento - robô SIA20D da Motoman com base na posição horizontal. . . . .	110
4.19	Ponto D não revestido, deslocado 230 mm da superfície da pá. . . . .	111
4.20	Vetores v e w ortogonais ao vetor normal N. . . . .	111
4.21	Vetor N girado pelo ângulo de tolerância de revestimento. . . . .	112
4.22	Círculo $h$ representa todos os pontos equivalentes ao ponto D com ângulo de tolerância de revestimento $\theta$ . . . . .	112
4.23	Pontos exemplo amostrados da pá. . . . .	113
4.24	Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem puramente geométrica. . . . .	115
4.25	Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem puramente cinemática. . . . .	115

4.26	Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem dinâmica. . . . .	116
4.27	Base Primático-Rotacional-Rotacional . . . . .	118
4.28	Base Prismática . . . . .	119
4.29	Base Primática-Rotacional-Prismática . . . . .	120
4.30	Sistema de elevação dos equipamentos . . . . .	121
4.31	Visão frontal da talha e trilho . . . . .	121
4.32	Conceitos de <i>shutter</i> avaliados . . . . .	123
4.33	Círculo do processo HVOF modificado . . . . .	124
4.34	Sensor Faro Focus X330 . . . . .	126
4.35	Velodyne Models . . . . .	128
4.36	Forecast 3D Laser System . . . . .	128
4.37	Mesa Imaging SwissRanger SR4000 . . . . .	129
4.38	Sensor Argos 3D - P100 . . . . .	129
4.39	Conjunto de esferas reflexivas e tripé . . . . .	131
4.40	Vista frontal da imagem gerada a partir dados adquiridos durante o teste. . . . .	132
4.41	Reconstrução em CAD da pá com os dados do teste. . . . .	132
4.42	Ilustração da posição do medidor de distância, em cinza, na pistola de metalização. . . . .	133
5.1	Extremidades da pá em preto. . . . .	140
5.2	Vetores normais (em preto) de pontos a serem revestidos (em vermelho). .	140
5.3	Possíveis posições da base do robô, em verde. . . . .	141
5.4	Estudo de revestimento para a extremidade inferior esquerda. . . . .	142
5.5	Estudo de revestimento para a extremidade inferior direita. . . . .	142
5.6	Estudo de revestimento para a extremidade superior esquerda. . . . .	143
5.7	Estudo de revestimento para a extremidade superior direita. . . . .	144
5.8	Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $0^\circ$ do rotor e $24^\circ$ da pá. . . . .	146
5.9	Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $-15^\circ$ do rotor e $24^\circ$ da pá. . . . .	147

5.10 Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $0^\circ$ do rotor e $24^\circ$ da pá, tolerância de $60^\circ$ de revestimento. . . . .	148
5.11 Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $0^\circ$ do rotor e $24^\circ$ da pá, $y + 500mm$ . . . . .	148
5.12 Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $15^\circ$ do rotor e $24^\circ$ da pá. . . . .	149
5.13 Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $0^\circ$ do rotor e $0^\circ$ da pá. . . . .	150
5.14 Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo $45^\circ$ do rotor e $24^\circ$ da pá, robô entre as pás. . . . .	151
5.15 Subregiões de uma superfície. . . . .	153
5.16 Interseção esfera-pá, vista frontal. . . . .	154
5.17 Interseção esfera-pá, vista isométrica. . . . .	155
5.18 Interseção esfera-modelo pá. . . . .	155
5.19 Vetores de interesse na interseção esfera-pá. . . . .	157
5.20 Vetores de interesse na interseção esfera-pá. . . . .	157
5.21 Vetores de interesse na interseção esfera-pá. . . . .	158
5.22 Simulação de trajetória no Openrave. . . . .	158
5.23 Meridianos da pá. . . . .	160
5.24 Conceito P-R-P-P da base mecânica . . . . .	162
5.25 Trilho para movimento linear . . . . .	163
5.26 Carrinho de esferas recirculantes . . . . .	163
5.27 Montagem com 2 trilhos e 4 carrinhos . . . . .	164
5.28 Perfis de alumínio estrutural . . . . .	164
5.29 Vista explodida de montagem com perfil de alumínio estrutural . . . . .	165
5.30 Pé com junta rotular entre a haste e a base . . . . .	166
5.31 Braços de ancoragem do trilho primário . . . . .	167
5.32 Base magnética para ancoragem . . . . .	167
5.33 Plataforma de rotação . . . . .	168
5.34 Macaco mecânico do tipo sanfona . . . . .	169
5.35 Montagem da base mecânica . . . . .	169
5.36 Montagem da base mecânica no interior da turbina . . . . .	170

5.37	Malha e condições de contorno . . . . .	173
5.38	Forças e torques na direção resultante . . . . .	174
5.39	Resultado de Tensões de Von Mises na estrutura, escala exagerada de deformação	174
5.40	Resultado de Deslocamento Resultante na estrutura, escala real de deformação	175
5.41	Referência dos braços de ancoragem para os resultados da tabela 5.3 . . .	176
5.42	Exemplo de esfera utilizada para reconhecimento. Fonte: <a href="http://shop.talwin.net/">http://shop.talwin.net/</a>	179
5.43	Exemplo de padrão de xadrez utilizado para renhecimento. Fonte: <a href="http://stereomorph.blogspot.com.br">http://stereomorph.blogspot.com.br</a>	
5.44	Exemplo de reconhecimento de uma linha em 2 dimensões usando RANSAC. (Fonte: [35]) . . . . .	180
5.45	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: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform">https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform</a> ) . . . . .	182
5.46	Nuvem de pontos da pá aquisitada pelo sensor Faro Focus X330. . . . .	185
5.47	Exemplo de localização do modelo da pá em uma cena genérica. . . . .	186
5.48	Visualização do Blensor com o modelo 3D da turbina importado. . . . .	187
5.49	Resposta simulada do sensor Faro Focus X330. . . . .	188
5.50	Criação de um modelo a partir de um arquivo descritivo da pá. . . . .	188
5.51	Visualização do Blensor com o modelo 3D da turbina importado. . . . .	189
5.52	Resposta do algoritmo de calibração, com destaque para as correspondências encontradas. . . . .	189
5.53	Representação dos sistemas de coordenadas de cada componente envolvido na calibração. . . . .	191
5.54	Processo de calibração com os sistemas de coordenadas destacados. . . . .	192
5.55	Monitoramento da temperatura e velocidade da chama de aspersão (janeiro/2016).	197
5.56	Posicionamento do robô e programação do movimentador, posicionamento dos corpos de prova e do Accura Spray para aplicação em 4 metros (janeiro/2016).	198
5.57	Propriedades do revestimento de Carboneto de Tungstênio-Cobalto-Cromo via HVOF com combustível GLP. . . . .	201

5.58 (A): Potencial de Circuito Aberto, com variação de parâmetros de aspersão térmica dos revestimentos de WC-10Co-4Cr com granulometria do pó 11/45; (B) Potencial de Circuito Aberto de diferentes sistemas comparando com o substrato Jateado; (C) Ensaio de Polarização com variação de parâmetros dos revestimentos de WC-10Co-4Cr com granulometria do pó 11/45; (D) Ensaio de polarização dos diferentes sistemas comparando com o substrato jateado. . . . .	205
5.59 Desenho esquemático do ensaio de cavitação pelo método direto. Retirado da Norma ASTM G32. . . . .	207
5.60 Resultados comparativos entre as amostras de materiais distintos. . . . .	211
5.61 Influência do acabamento na taxa de desgaste por cavitação. . . . .	212
5.62 Superfícies degastadas analisadas em Lupa com aumento de 8x após ensaios de cavitação. A) WCCoCr. B) AISI410. C)WCNi. . . . .	213
5.63 Ensaio de erosão: perda de volume acumulado por gasto de erodente. . . .	220
5.64 Ensaio de abrasão: perda de volume para cada sistema testado. . . . .	222

# **Lista de Tabelas**

3.1 Dados principais do processo HVOF . . . . .	43
3.2 Componentes principais de uma turbina tipo bulbo . . . . .	46
3.3 Materiais base para HVOF . . . . .	80
4.1 Dados principais da escotilha inferior . . . . .	97
4.2 Características principais dos robôs. . . . .	104
4.3 Resumo do estudo cinemático. . . . .	104
4.4 Comparativo Luz Estruturada vs ToF. Fonte: [29] . . . . .	130
5.1 Propriedades do EN AW-6060 . . . . .	172
5.2 Forças e torques na base do robô . . . . .	172
5.3 Forças de reação em cada ponto de ancoragem . . . . .	176
5.4 Resultados dos teste de metalização em longas distâncias . . . . .	194
5.5 Parâmetros . . . . .	194
5.6 Resultados observados durante teste de modificação de parâmetros no console de vazão de gases e distância de aspersão. . . . .	195
5.7 Valores registrados pelo sensor de chama Accura spray no teste de metalização em diferentes alturas do braço robótico. . . . .	196
5.8 Resultados dos testes de preparação de superfícies . . . . .	200
5.9 Parâmetros dos ensaios de cavitação conforme ASTM G32 . . . . .	206
5.10 Resumo das propriedades dos materiais utilizados para ensaios de Cavitação	209
5.11 Tabela com medições de massa e cálculo de perda de massa durante ensaio de cavitação. . . . .	210
5.12 Medições de perda de massa durante ensaio de cavitação das amostras 410P.	211

5.13 Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste por erosão e descrição das amostras . . . . .	219
5.14 Perda de volume em 30 e 60 minutos de ensaio para . . . . .	220
5.15 Lista de Materiais utilizados no ensaio de abrasão conforme ASTM G65-B. . . . .	221

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **CAPÍTULO 1**

---

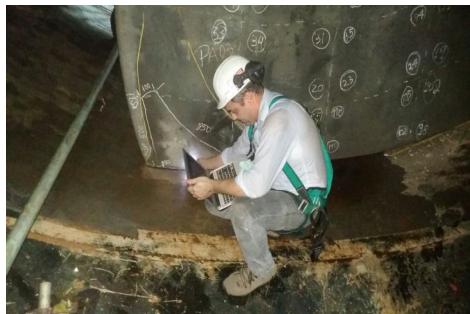
### **Resumo gerencial**

---

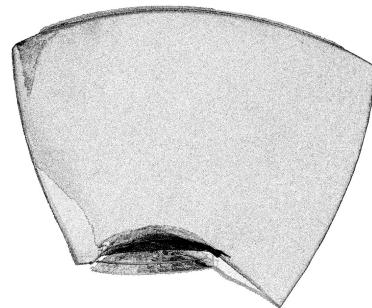


## 1.1 Descrição da Inovação

A inovação no projeto EMMA é utilizar a robótica para realizar reparo e revestimento in situ em pás de turbinas de hidroelétricas, ou seja, sem precisar desinstalar e remover as pás. A metodologia do processo é iniciada com o ensecamento e entrada do corpo técnico ao circuito hidráulico. A metodologia desenvolvida segue como explicado pelas imagens.



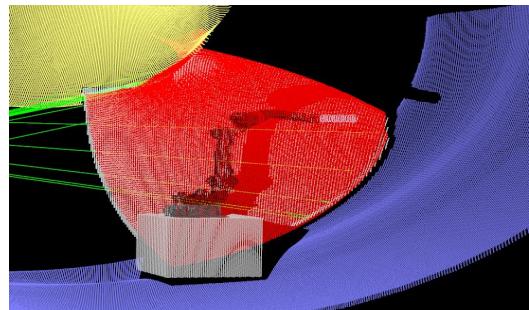
(a) A equipe técnica analisa a pá verificando o desgaste do coating existente e se existem danos a pá em si.



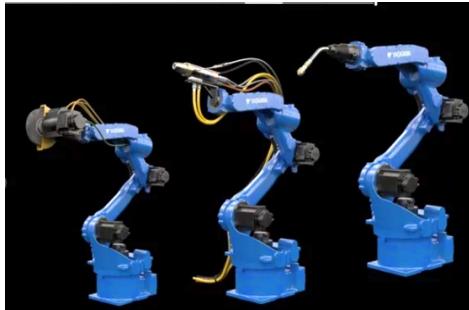
(b) Dado a necessidade de reparo um laser scanner de metrologia é utilizado para mapear o dano com uma precisão de 2mm.



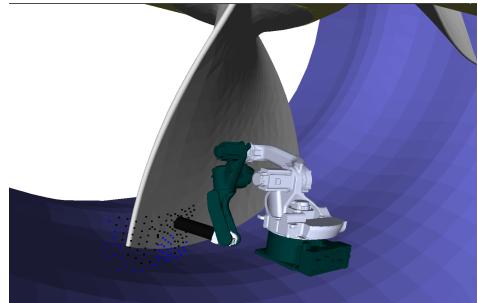
(c) Um trilho modular é instalado no ambiente e aconrado através de pinos magnéticos. O trilho é utilizado para levar o manipulador até a pá e movimentar o manipulador ao longo da área de trabalho.



(d) Algoritmo de processamento de nuvens de pontos analisam um scan laser do ambiente e estimam a posição relativa entre o manipulador e a pá.



(e) O equipamento necessário para a tarefa, seja soldagem, esmerilhamento ou coating é instalado no manipulador e o ambiente e superfície são preparados.



(f) O algoritmo estima e executa a trajetória para a tarefa planejada.

O resultado do processo é uma pá restaurada e protegida, aumentando a eficiência de geração e vida útil da mesma.

## 1.2 Motivação

Desgastes por corrosão, erosão e abrasão em pás de turbinas de hidroelétricas resultam em perda do perfil hidráulico, reduzindo assim a eficiência de geração. O desgaste reduz também a vida útil da turbina, o tempo de operação entre paradas de manutenção, assim como, aumentam os custos de manutenção e o tempo necessário de parada de máquina para a realização do reparo. Logo, significa uma perda da eficiência de geração, e por consequente um impacto econômico significativo na operação. A aplicação de revestimento aumenta a resistência do material contra os desgastes, custando em torno de 20% do valor de uma peça nova e representando um aumento da vida útil em mais de 300%. Entretanto, dados as limitações da tecnologia atual, só é possível aplicar o revestimento em bancada, logo, antes da instalação das pás. Logo, o desenvolvimento tecnológico que possibilite reaplicar a camada de revestimento dentro do circuito hidráulico resultaria em um ganho significativo na geração e redução dos custos de operação. Antes de aplicar o revestimento é necessário reparar a pá recuperando o perfil hidráulico da mesma, quanto maior a precisão da recuperação do perfil hidráulico maior a eficiência de geração. Logo, a robótica se torna a ferramenta ideal para a tarefa.

## 1.3 Objetivo

O objetivo geral do projeto é desenvolver e testar uma metodologia que permita utilizar a robótica para reparar e revestir pás instaladas em circuitos hidráulicos.

Os objetivos específicos são determinar as metodologias:

- definir o manipulador ótimo para cada hidroelétrica
- movimentar o manipulador dentro do circuito hidráulico
- estimar a posição do manipulador com relação ao meio
- material e técnica de coating e reparo
- preparar o meio e superfície
- logística para instalar um sistema robótico no circuito hidráulico
- determinar os riscos associados
- planejar e executar a manipulação
- representar as diferentes informações do processo para um operador
- verificar as perdas de carga do processo de revestimento
- integrar e utilizar as diversas ferramentas
- mapear o perfil hidráulico e medir os danos

## 1.4 Originalidade

Não existe nenhuma solução ou estudo realizado sobre a aplicação de revestimento dentro do circuito hidráulico sem desinstalar as pás da turbina. A aplicação de revestimento para proteção contra abrasão, cavitação, corrosão e erosão em peças de turbinas de hidrelétricas realizado atualmente é limitada a trabalho em bancada com a peça desinstalada. O desafio de realizar o trabalho de revestimento dentro do circuito hidráulico se dá pela dimensão da escotilha de acesso, que limita o tamanho do robô, pelo posicionamento do robô com relação a pá da turbina, que se encontra a alguns metros do solo, pelo processo de aplicação que requer velocidade constante utilizando uma pistola pesada e

pelo controle de temperatura e umidade necessários. Esta pesquisa é inovadora no setor elétrico brasileiro e é um avanço com relação ao estado da arte.

## **1.5 Aplicabilidade**

A metodologia desenvolvida no projeto poderá ser aplicada na maioria das hidroelétricas de médio ou grande porte. A metodologia determina o tamanho e modelo de manipulador ótimo para o circuito hidráulico em questão, assim como, qual material de coating a ser aplicado. A restrição para aplicação da tecnologia é apenas dada pelo espaço entre as pás, em hidroelétricas de pequeno porte a arma de coating não cabe entre as pás. Logo, a abrangência é nacional, entretanto com restrição de uso em pequenas unidades geradoras.

## **1.6 Relevância**

A matriz geradora Brasileira é constituída em sua maioria por geração hidráulica, com um grande número de centrais em rios tipos corredeiras que possuem reservatórios pequenos. Neste tipo de rio não há tempo de sedimentação das partículas sólidas na água, essas partículas sólidas, mesmo em quantidades pequenas, geram um elevado nível de desgaste por erosão e cavitação. Logo, o projeto é de relevância para o setor elétrico e para a nação, pois aumenta a eficiência da matriz energética Brasileira, aumenta a disponibilidade da máquina para geração e reduz os custos de manutenção, representando uma melhora econômica e social.

## **1.7 Capacitação**

A pesquisa e o desenvolvimento (P&D) tem como propósito fomentar o avanço tecnológico e novas maneiras de desenvolver um tipos específicos de conhecimento no país. O desenvolvimento do EMMA, no âmbito P&D é um exemplo de como a parceria entre agências do governo, empresa e universidades podem colaborar para a capacitação tecnológica e o desenvolvimento de novas tecnologias.

O projeto EMMA possui 2 pesquisadores inscritos no mestrado. Os temas são todos no campo da robótica, sendo a previsão de conclusão das dissertações esperada

para a fase 2 e fase 3 do EMMA. Os alunos de mestrado e seus respectivos cursos são:

- Estevão Fróes Ferrão, Programa de Engenharia Mecânica/COPPE, Rio de Janeiro
- Julia Ramos Campana, Departamento de Artes e Design, PUC, Rio de Janeiro

O projeto também proporcionou a elaboração e submissão de dois artigos acadêmicos:

- State of the art and conceptual design of robotic solutions for in situ hard coating of hydraulic turbines, Journal of Control, Automation and Electrical Systems (JCAE). Autores: Renan S. Freitas, Gabriel Alcantara C. S., Eduardo Elael M. S., Estevão Fróes F., Ramon R. Costa.
- A Robotic System for in situ Hydropower Turbine Hard Coating, Congresso Brasileiro de Automática (CBA). Autores: Renan S. Freitas, Estevao F. Ferrão, Gabriel Alcantara C. S., Eduardo Elael M. S., Ramon R. Costa.

Os artigos se encontram, na íntegra, anexados a este relatório no apêndice E.

Para o cumprimento dos requisitos de segurança do Ministério do Trabalho e Emprego, a equipe do projeto foi submetida à capacitação em segurança, nas normas relevantes às situações encontradas no interior do circuito hidráulico. As certificações foram nas seguintes normas:

- NR10 - Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade
- NR33 - Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados
- NR35 - Trabalho em Altura

Os seguintes pesquisadores foram capacitados no curso:

- Estevão Fróes Ferrão, Programa de Engenharia Mecânica/COPPE
- Gabriel Alcantara Costa Silva, Programa de Engenharia Elétrica/COPPE
- Renan Sales de Freitas, Programa de Engenharia Elétrica/COPPE
- Eduardo Elael de Melo Soares, Programa de Engenharia Elétrica/COPPE
- Julia Ramos Campana, , Departamento de Artes e Design, PUC, Rio de Janeiro
- Gabriel Cogo, Rijeza Indústria Metalúrgica;

A pesquisa no projeto EMMA proporcionou a elaboração de dois artigos, cujos temas serão informados em uma próxima atualização desse documento.

## 1.8 Razoabilidade dos Custos

Atualmente, após a instalação da unidade geradora, não existe método disponível para proteger a ogiva geradora contra os desgastes de sua utilização. Sendo, infelizmente, a recuperação sempre o caminho e isso pode ser estimado entre 90 e 120 dias de UG parada. A frequência de paradas de recuperação variam dependendo da idade da unidade geradora, material, tipo de bacia e etc. A única certeza é que um dia será necessário. A aplicação de revestimento pode ser realizada durante as paradas planejadas, sem perda de tempo de geração. De acordo com a tabela de situação de cavitação em turbina hidráulica no Brasil (Out/97), em média 5 unidades geradoras apresentaram cavitação a cada 24.071 horas de operação (2,7 anos), das 36 instalações analisadas. Logo, em Jirau a aplicação do revestimento in situ significaria em um aumento da disponibilidade de geração de 600 dias a cada 2,7 anos, considerando turbinas de 75 MW de potencia, seria equivalente a 1.080.000 MW a cada 2,7 anos.

Além do ganho de disponibilidade, estudos da Andritz, <https://www.andritz.com/hy-hn19-en.pdf> demonstram que turbinas revestidas possuem um ganho na eficiência de geração, aproximadamente em média de 2% a cada 30.000 horas, como ilustrado na figura 1.2. Em Jirau, isso significaria um ganho por turbina de 45.000 MW por turbina a cada 3,5 anos. Considerando a capacidade instalada de 50 turbinas, isso significaria 2.250.000 MW a cada 3,5 anos.

## 1.9 Metodologia adotada

O projeto EMMA foi dividido em 3 fases, sendo cada fase um projeto distinto. Cada fase avançando a tecnologia ao longo da cadeia de inovação. Na primeira fase foi desenvolvido a metodologia/conceito. Na segunda fase será feito o desenvolvimento experimental testando o sistema de coating. Na terceira fase será expando a solução para incluir reparo e validar a tecnologia em outras centrais hidroelétricas.

Ao início da primeira fase não se sabia se existiria uma solução para o problema. Os requisitos de acesso, operação e coating são extremamente limitantes. A metodologia adotada na fase 1 para desenvolver o conceito da solução foi:

**Etapa 1:** Levantamento dos requisitos do ambiente, tarefas e procedimentos. Estudo do estado da arte e bibliografias existente no tópico. Baseado nos requisito e estado

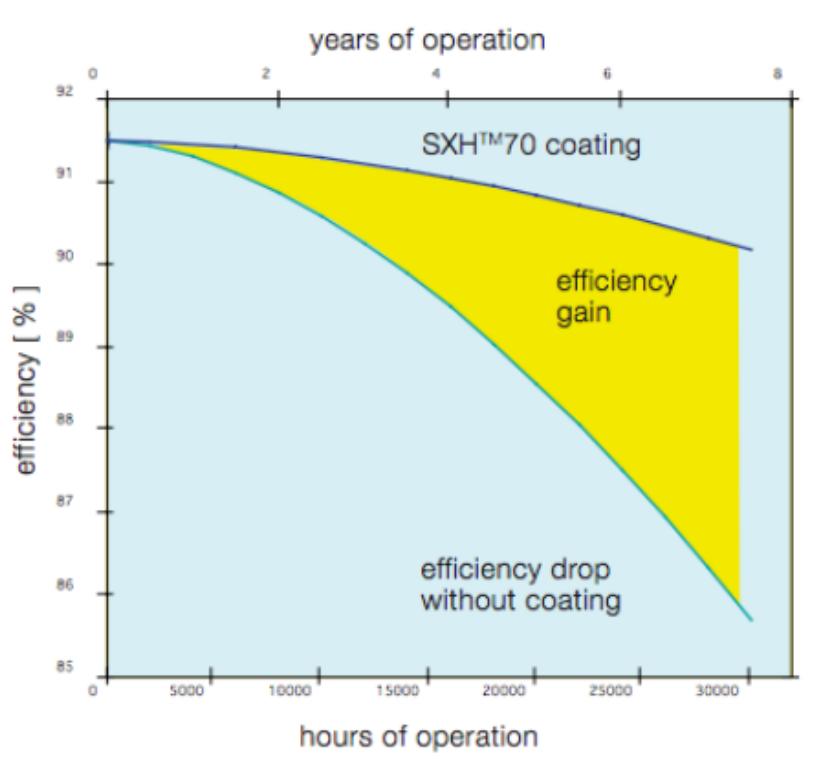


Figura 1.2: Influência do coating na eficiência durante a operação com presença de alta erosão abrasiva.

da arte foi definido uma solução conceito que atende ao problema.

**Etapa 2:** A solução conceito foi detalhada. Neste detalhamento foi determinando os equipamentos e fornecedores que seriam adequados a serem utilizados na solução. Assim como foi realizado pesquisa bibliográfica para determinar quais os algoritmos e técnicas mais adequadas a serem implementadas como parte da solução.

**Etapa 3:** A solução conceito detalhada foi validada através de simulações e experimentos em laboratório de alguns conceitos chaves. Um exemplo foi utilizar o openrave para simular o processo de movimento do manipulador e experimentos de campos da fixação por pino magnético.

## 1.10 Estratégia de difusão

A estratégia de difusão adotada no projeto foi realizar um workshop de transferência de conhecimento junto à equipe de operação da ESBR, no qual a metodologia e conclusões finais do projeto foram apresentados. O conhecimento também foi transferido para a comunidade acadêmica através da publicação de dois artigos acadêmicos dos resultados do projeto.

## 1.11 Melhorias de processo, equipamento e sistema

O projeto representa uma melhoria no processo de reparo das pás de turbina hidroelétricas que atualmente são feitas manualmente. Espera-se que o processo robótico consiga recuperar o perfil hidráulico para uma margem de 2-5 mm do perfil original.

O fato de o EMMA também realizar o revestimento das turbinas instaladas, algo antes impossível, o projeto representa uma melhoria no equipamento (pás das turbinas), pois as mesmas se tornam mais resistentes aos danos corrosão, erosão e abrasão.

Por fim, o projeto também representa uma melhoria a todo sistema de geração de energia elétrica. Pois, aumenta a vida útil das turbinas e mantém o perfil hidráulico original, logo um impacto direto no aumento da geração.

## 1.12 Pesquisa Correlatas

**Google Scholar, IEEE, Field Robotics, ... :** nenhum resultado foi encontrado na revisão bibliográfica para uma solução robótica de aplicação de revestimento em turbinas hidroelétricas já instaladas no Brasil e no exterior. A pesquisa revela apenas o desenvolvimento de robôs para reparos *in situ* da turbina, capazes de realizar soldagem, em exemplo RoboTurb da UFSC e Scompi da Hydro-Quebec. Ambos não aplicáveis ao problema de revestimento devido as limitações do manipulador robótico nos sistemas.

**INPI:** Nenhuma patente foi encontrada que se enquadre como o produto objeto da pesquisa e desenvolvimento aqui proposta.

**ANEEL:** nenhum resultado foi encontrado na base de dados da ANEEL relevante a um robô para revestimento. Os resultados encontrados referiam-se a um Robô que inspeciona e corrige problemas em linhas de transmissão; Sistema Multi-robôs Aéreos para Inspeção de Linhas e Robô para Inspeção Visual de caldeiras.

## 1.13 Instituição e Equipe

O LEAD (Laboratório de Controle e Automação, Engenharia de Aplicação e Desenvolvimento) é fruto de uma parceria entre a Petrobras e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) que visa ao desenvolvimento de novas tecnologias na área de Automação e Controle. Na avaliação da estatal brasileira de petróleo, “o laboratório reforça a estratégia de desenvolvimento em conjunto de novas tecnologias, o que traz benefícios tanto para as universidades, que realizam suas pesquisas acadêmicas em laboratórios de ponta, quanto para a Petrobras que, ao compartilhar conhecimentos, cria competências para superar seus desafios tecnológicos e empresariais”.

A equipe técnica alocada para a realização do projeto EMMA:

- Renan Salles de Freitas, Engenheiro de Controle e Automação pela UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, e Candidato a Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pelo Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. No projeto EMMA, Renan é membro da equipe de Controle e Robótica, e responsável pelas seguintes atividades: Manipuladores industriais: pesquisa de mercado, análise cinemática, dinâmica e controle; Desenvolvimento do ambiente de simulação para análise de soluções; Análise de viabilidade técnica do EMMA pela visão da robótica

e do controle; Desenvolvimento e simulação de algoritmos de planejamento de trajetória.

- Estevão Fróes Ferrão possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), atualmente cursando o mestrado no Programa de Engenharia Mecânica (PEM-COPPE/UFRJ). Faz parte da equipe do Projeto EMMA, como Pesquisador/Engenheiro contratado pelo LEAD. Atua na área de Projeto Mecânico, sendo responsável pela pesquisa, projeto e desenvolvimento de uma solução mecânica para uma base com graus de liberdade que permitem o posicionamento do robô utilizado.
- Julia Ramos Campana é formada em Comunicação Técnica e Mídia pelo Instituto de Tecnologia e Illinois, pós graduada em Design Digital pela Vancouver Film School e em Gerenciamento de Projeto pela Universidade da Columbia Britânica, é atualmente aluna do Mestrado em Design pela PUC-RJ. Julia exerce a função de Designer de interface e Usabilidade no projeto EMMA, trabalhando no desenvolvimento do software de controle do sistema EMMA e em todas as questões relacionadas aos usuários, testes e interações humano-automação da pesquisa.
- Eduardo Elael de Melo Soares, Engenheiro de Controle e Automação pela UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, e mestrando em Ciências em Engenharia Elétrica pelo Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. No projeto EMMA, Eduardo é membro da equipe de Controle e Robótica, e responsável pelas seguintes atividades: Manipuladores de pequeno porte: Pesquisa e análise geométrica; Realimentação de segurança: Pesquisa de laser 1D para uso em tempo real; Reconhecimento de ambiente: Escolha e adaptação de técnicas para reconhecimento da posição do Robô no ambiente; Desenvolvimento e simulação de algoritmos de planejamento de trajetória.
- Gabriel Alcantara Costa Silva, Engenheiro de Controle e Automação pela UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, e mestrando em Ciências em Engenharia Elétrica pelo Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. No projeto EMMA, Eduardo é membro da equipe de desenvolvimento de software para sistemas robóticos, e responsável pelas seguintes atividades: Desenvolvimento de técnicas em visualização, localização e mapeamento 3D; Identificação e Localização de objetos; Integração do sistema.

A Rijeza é uma empresa especializada no desenvolvimento e aplicação de revestimentos contra desgastes em máquinas e equipamentos nos diferentes segmentos da indústria como alimentação, energia eólica, hidrelétrica e termelétrica, mineração, papel e celulose, petróleo e gás, petroquímica e siderurgia. A equipe técnica da Rijeza alocada para a realização do projeto EMMA:

- Filipe Guerin – Pesquisa, projeto e desenvolvimento de dispositivos e equipamentos para adequação e alocação de equipamentos de coating no circuito e para a realização de testes e ensaios;
- Gabriel Cogo – Análise de dados para estudo do desgaste das pás, desenvolvimento de materiais e técnicas de revestimentos e planejamento e realização de testes e ensaios destrutivos;
- Jeferson Porto - Levantamento de dados de desgaste e de acessos e programação do manipulador;
- Silvio Da Silva - Operação dos equipamentos de coating e montagem dos dispositivos para produção de amostras de testes;

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **CAPÍTULO 2**

---

### **Plano de Projeto**

---



## 2.1 Etapa 1

Etapa	Descrição	Início	Duracao	2015						
				Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
				1	2	3	4	5	6	7
<b>1000</b> <b>Conceito</b>		<b>1</b>	<b>5</b>			1	2	3	4	5
1100	Viagem Inaugural	1	2			□	□			
1200	Requisito	1	2			□	□			
1300	Contextualização	1	2			□	□			
1400	Definição do conceito	2	3			□	□	□	□	
1500	Estudo dos fornecedores	4	1						□	
1600	Visita a campo para inspeção 1	5	1							□

**1000 Conceito:** A etapa 1000 do projeto foi executada como prevista. O objetivo da etapa foi a determinação dos requisitos do problema e concepção de possíveis soluções. As seguintes trabalhos foram executados dentro desta etapa

**1100 Viagem Inaugural:** Assinatura do termo inaugural do projeto e análise em campo da problemática

Etapa executada como previsto.



Figura 2.1: Pesquisadores analisando o ambiente.

**1200 Requisito:** Fazer levantamento dos requisitos que afetam a instalação e utilização de um robô dentro circuito hidráulico.

Etapa executada como previsto. Foram levantados todos os requisitos de acesso, ambiente e processo de coating.

**1300 Contextualização:** Levantamento das tecnologias existentes no para aplicações de revestimento em ambientes confinados.



Figura 2.2: Solução conceito.

Etapa executada como previsto. Diversas tecnologias foram pesquisadas, como o robô scompi da hidroquebec. Nenhuma das soluções atuais atendiam os requisitos de operação do projeto.

**1400 Definição do conceito:** Definição de uma solução de um robô capaz de operar no ambiente e realizar tarefas de revestimento.

Etapa executada como previsto. Foram levantados 3 conceitos viáveis, os quais foram analisados chegando ao conceito proposto dentro do projeto. Utilizar um manipulador industrial, acessando o circuito hidráulico pela escotilha de acesso, com movimentação através de trilhos modulares e alinhamento, mapeamento e planejamento de trajetória baseado em scan 3D a laser do ambiente.

**1500 Estudo dos fornecedores:** Definição dos fornecedores do equipamento necessário para a pesquisa

Etapa executada como previsto. Foram analisados mais de 50 modelos de manipuladores distintos, sendo que 5 atendiam os requisitos do problema como possíveis soluções.

**1600 Visita a campo para inspeção 1:** foi realizada uma visita inicial a campo para juntamente com revisão bibliográfica sobre o tema “desgaste” coletar dados de campo através de inspeção nas pás das turbinas. Essas inspeções foram realizadas ao longo do projeto para confrontar com o que existe na bibliografia.

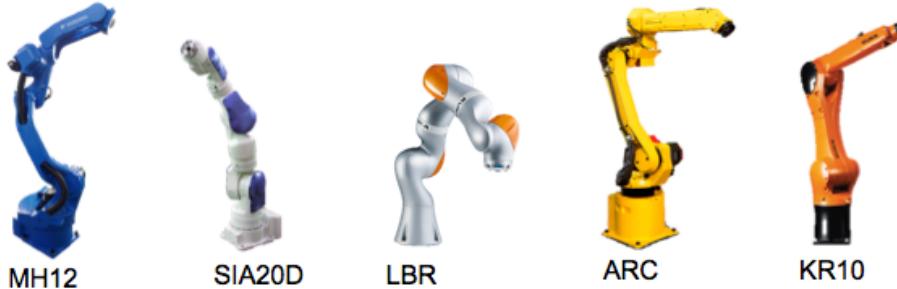


Figura 2.3: Possíveis modelos de manipuladores que atendem os requisitos.

## 2.2 Etapa 02

Etapa	Descrição	Início	Duracao	2015				
				Jul	Aug	Sep	Out	Nov
				7	8	9	10	11
				5	6	7	8	9
<b>2000 Detalhamento</b>		<b>5</b>	<b>5</b>	-	-	-	-	-
2100	Video promocional solução conceito	5	3	□	□	□		
2200	Design mock up robô conceito	5	3	□	□	□		
2300	Design dos testes de revestimento	5	2	□	□			
2400	Algoritmo localização	5	4	□	□	□	□	□
2500	Algoritmo sensor NDT	5	4	□	□	□	□	□
2600	Desenvolvimento Interface sistema	5	4	□	□	□	□	□
2700	Construção mock up robô conceito	6	3		□	□	□	
2800	Detalhamento Rijeza	6	2		□	□		
2900	Reunião de Acompanhamento 1 - Jirau	7	1			□		
21000	Construção dispositivos revestimento	7	2			□	□	
22000	Visita a campo para inspeção 2	8	1				□	
23000	Visita a campo para inspeção 3	9	1					□

**2000 Detalhamento:** A etapa 2000 do projeto foi executada existindo variações entre previsto e executado. O objetivo da etapa foi a análise das proposições mediante estudos teóricos e design detalhado da possível solução e sistema

**2100 Video promocional solução conceito:** Animação 3D da solução conceito

Houve atraso no processo de contratação e aprovação do script. A tarefa foi executada com 3 meses de atraso. Entretanto, o mesmo não impactou no projeto, pois não era uma tarefa de pré-requisito.

**2200 Design mock up robô conceito:** Design em CAD / Solidworks do conceito do robô

Tarefa executada como prevista. Foram realizados diversos designs para possíveis bases para a solução conceito, assim como análises geométricas, cinemática, dinâmica e

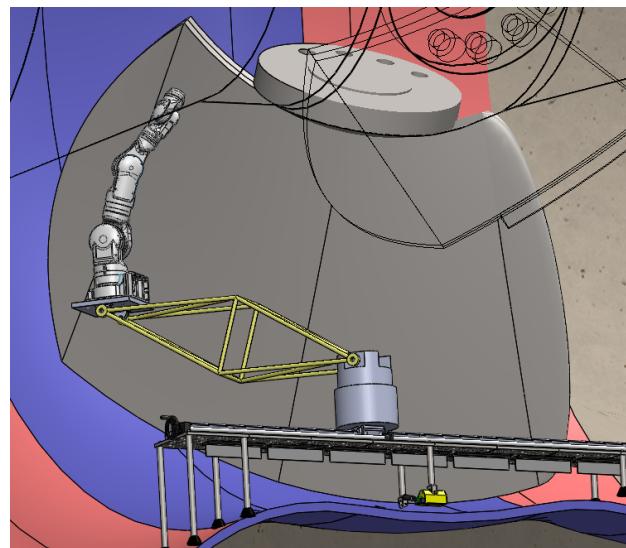


Figura 2.4: Possível base para o manipulador dentro do ambiente do circuito hidráulico.

de manipulabilidade para definir o manipulador.

**2300 Design dos testes de revestimento:** Foram definidos os testes e a sequência de testes a serem realizados para cada modificação de equipamento e cada material de coating utilizado.

**2400 Algoritmo de localização:** definir o algoritmo/técnica que irá localizar o robô com relação a turbina.

Tarefa executada como prevista. Foi determinado que o melhor e mais preciso método é escanear o robô e a pá com um laser de metrologia e a estimar posição relativa das nuvens de pontos resultantes.

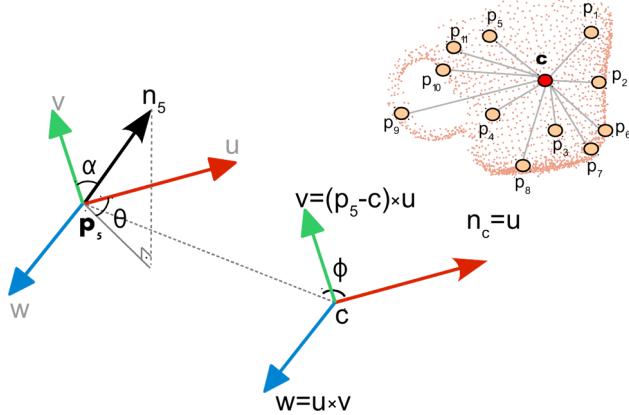


Figura 2.5: Posição relativa entre duas nuvens de pontos.

**2500 Algoritmo sensor NDT:** Algoritmo que irá avaliar e mapear a qualidade do revestimento.

Tarefa executada como prevista. Foi determinado que o método mais eficiente é utilizar um humano para rapidamente realizar uma amostragem de alguns pontos com sensor ultra-som manual. A solução robótica seria em uma alusão “matar um mosquito com basuca”.

**2600 Desenvolvimento Interface sistema:** Interface gráfica de controle e utilização do sistema

Essa tarefa foi estendida para 8 meses, se tornando uma teses de mestrado dada sua complexidade. A solução conceito possui um volume muito grande de interação e informação para o usuário. Logo, adotou-se um estudo metódico, estabelecendo-se toda a metodologia para determinar a interface e como cada informação será representada.

**2700 Construção mock up robô conceito:** Construção do mock up do robô que aplica o revestimento

Tarefa executada como previsto. Foi construído todo o ambiente do circuito hidráulico e manipulador através de impressão 3D em uma escala 1:20.

**2800 Detalhamento Rijeza:** Foram realizados projetos e detalhamento de dispositivos necessários para realização dos testes definidos na etapa de design dos testes baseando-se nas modificações necessárias para adequação do equipamento de jateamento e coating no ambiente definido e no uso dos materiais selecionados para revestimento.

**2900 Reunião de acompanhamento:** Reunião de acompanhamento do projeto. Tarefa executada como prevista.



Figura 2.6: Maquete utilizada no desenvolvimento do conceito.

**21000 Construção dispositivos revestimento:** Etapa de dedicada para a fabricação de peças e montagem dos dispositivos projetados na etapa de detalhamento dos dispositivos (etapa 2300).

**22000 Visita a campo para inspeção 2:** Visita realizada na UHE Jirau para verificação de acessos ao circuito hidráulico realizada com o fim de complementar o estudo de definição das modificações que seriam necessárias para serem realizadas nos equipamentos e prever movimentos e alocações dos equipamentos dentro do circuito.

**23000 Visita a campo para inspeção 3:** Visita realizada na UHE Jirau, nas máquinas 29 e 39, com a finalidade de inspecionar o desgaste das pás, complementando o estudo de definições de testes necessários para qualificação dos revestimentos.

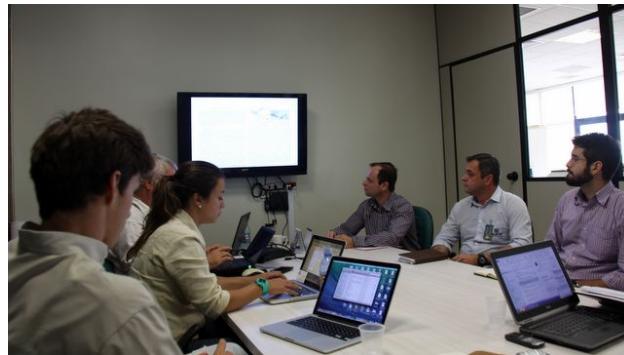


Figura 2.7: Reunião de acompanhamento em Jirau.

### 2.3 Etapa 03

Etapa	Descrição	Início	Duracao	2015			2016		
				Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	
				11	12	1	2	3	
<b>3000 Validação</b>		<b>9</b>	<b>5</b>	-	-	-	-	-	-
3100 Simulação movimento Robô	9	3		□	□	□			
3200 Simulação preparação da superfície	9	1		□	□	□			
3300 Simulação aplicação de revestimento	9	3		□	□	□			
3400 Teste Campo Jirau - 1	9	1		□					
3500 Realização de testes destrutivos 1	9	3		□	□	□			
3600 Aperfeiçoamento solução	10	3			□	□			
3700 Visita a campo para inspeção 4	11	1				□			
3800 Realização de testes destrutivos 2	12	2					□	□	
3900 Teste Campo Jirau - 2	12	1					□		

**3000 Validação:** A etapa 3000 do projeto foi executada existindo variações entre previsto e executado. O objetivo da etapa é validação da solução detalhada através de simulação e experimentos.

**3100 Simulação movimento robô:** Simulação dos movimentos do robô sobre a turbina, verificando limites e singularidades

Tarefa executada como prevista. Foi utilizado o simulador Openrave.

**3200 Simulação preparação de superfície:** Testes para avaliar a modificação do procedimento de jateamento para a sua adequação ao ambiente proposto no projeto;

**3300 Simulação aplicação revestimento:**

Aplicação em amostras de testes para qualificação de materiais e procedimento de aspersão para posterior avaliação comparativa do desempenho dos sistemas de revestimentos.

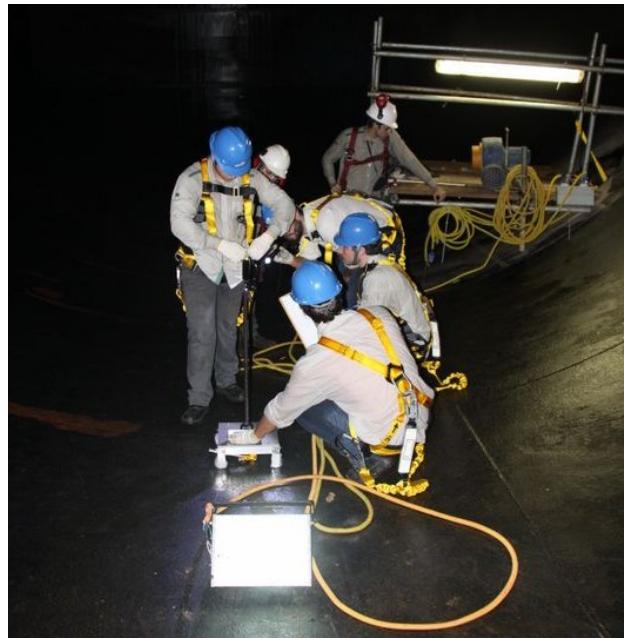


Figura 2.8: Teste de campo com a base magnética

**3400 Teste de Campo Jirau 01:** Teste da solução em Jirau sobre condições reais de operação

Tarefa executada antes do previsto. Os testes de campo foram executados durante a viagem de acompanhamento que ocorreu na etapa 2900. Foram testados os conceitos de acoplamento magnético e mapeamento 3D com laser scanner.

**3500 Realização dos testes destrutivos – 1** Realização dos testes para verificar se o revestimento mantém as características técnicas exigidas para a aplicação após mudanças de parâmetros. Nessa etapa foram realizados os testes de qualificação dos revestimentos antes e após mudanças de parâmetros e realização de ensaios destrutivos comparativos normatizados.

**3600 Aperfeiçoamento da solução:** Aperfeiçoamento da solução baseado nos resultados dos testes de campo

Tarefa atrasada em 1 mês com impacto de atraso de 1 mês no projeto. O cálculo da posição relativa entre o robô e a pá, baseado em dados reais do sensor de metrologia testado em campo, está com um erro de 0,1-0,2 graus o que resulta em um erro de posição da extremidade do manipulador na ordem de centímetros. A ordem de grandeza desejada para poder fazer reparo do perfil hidráulico é em milímetros. Logo, as técnicas de alinhamento continuando sendo aprimoradas.

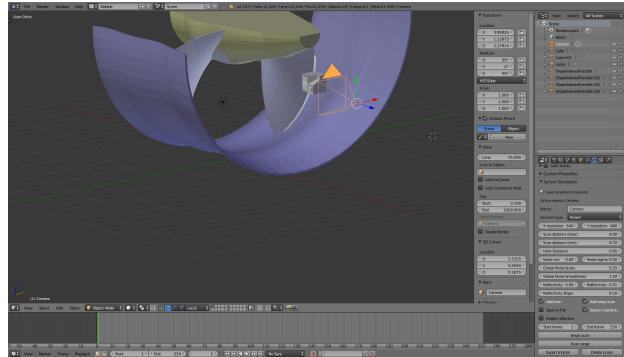


Figura 2.9: Estimando posição relativa usando um simulador para análise dos resultados.

### 3700 – Visita a campo para Inspeção 4

A inspeção nas pás é realizada com o fim de avaliar o progresso do desgate nas superfícies das pás e também determinar o tipo e a severidade em cada região da pá.

**3800 Visita a campo para Inspeção 4:** A inspeção nas pás é realizada com o fim de avaliar o progresso do desgate nas superfícies das pás e também determinar o tipo e a severidade em cada região da pá.

### 3900 Realização dos testes destrutivos 2:

Continuação da realização dos testes destrutivos após análise dos resultados prévio. As amostras que estavam em atraso na entrega dos resultados de cavitação foram realizadas nessa etapa. Também foram testes de aplicação de revestimento orgânico para melhoria das características do revestimento.

**3900 Teste de Campo Jirau 02:** Teste da solução em Jirau sobre condições reais de operação.

Tarefa cancelada. As informações necessárias para esta fase do projeto foram coletadas durante o teste de campo 01.

## 2.4 Etapa 04

Etapa	Descrição	Início	Duracão	2016	
				Abr	Mai
				4	5
				14	15
<b>4000 Encerramento</b>		<b>14</b>	<b>2</b>	-	-
4100 Relatório Final		14	2	□	□
4200 Apresentação de Resultados		14	1	□	□

**4000 Encerramento:** A etapa 4000 do projeto foi executada existindo variações entre previsto e executado. Inicialmente esta etapa era para ser iniciada em março e encerrada em abril. Entretanto a mesma sofreu um atraso de 1 mês devido a necessidade de mais tempo para encerrar a etapa de aperfeiçoamento da solução. O objetivo da etapa é preparar os relatórios finais e artigos acadêmicos do projeto.

**4100 Relatório Final:** Relatório de encerramento do projeto no formato P&D Aneel e artigos acadêmicos.

Etapa executada como prevista.

**4200 Apresentação dos resultados:** Difusão dos conhecimentos.

Etapa executada como prevista. Foi realizado um evento na faculdade de Porto Velho, onde os pesquisadores do projeto EMMA realizaram uma aula de pesquisa aplicada explicando as pesquisas desenvolvidas, seus conceitos e resultados.

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **CAPÍTULO 3**

---

### **Estudo do conceito**

---



### 3.1 Introdução

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

Estima-se que a reforma e melhoria das grandes usinas construídas resultariam em um aumento potencial de 32.000 MW [19], número que pode ser alcançado, em grande parte, pela manutenção das turbinas geradoras da energia elétrica. As turbinas estão constantemente expostas aos fenômenos de abrasão e cavitação, os quais determinam sua vida útil.

O fenômeno de cavitação está muito bem estudado e detalhado em [16], onde são apresentadas seus tipos, ocorrências e os efeitos nas diferentes turbinas. Esse fenômeno físico pode causar erosões na máquina hidráulica (figura 3.1), gerando instabilidade de fluxo de água, vibrações excessivas e redução da eficiência da turbina.



Figura 3.1: Ilustração de uma pá de turbina que sofreu erosão por cavitação.

A fim de reduzir o desgaste da pá contra cavitação ou abrasão e aumentar a sua vida útil, utiliza-se a técnica de revestimento por asperção térmica, que pode ser comparada com uma tinta que protege à exposição com o ambiente. O procedimento é re-

alizado antes da instalação das pás na turbina por um robô, pois exige alta precisão e velocidade, além de expelir substâncias nocivas à saúde. Apesar de suficiente para a proteção da pá, o revestimento também tem vida útil e precisa ser refeito de tempos em tempos para garantir a proteção da pá contra os fenômenos físicos.

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

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

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

### 3.2 Descrição do problema

O fenômeno de cavitação e abrasão em hidroturbinas provoca desgaste superficial por erosão e alteração do perfil hidráulico da pá, gerando redução da eficiência na geração de energia. Uma solução preventiva é o revestimento por metalização das pás, o qual aumenta a eficiência na geração de energia por gerar uma estrutura mais lamelar, e fornece maior resistência a desgastes. No caso da usina hidrelétrica de Jirau, o revestimento das pás é realizado antes da montagem e instalação da turbina, porém devido ao grande número de partículas e sedimentos que o rio madeira carrega e à cavitação, o revestimento deve ser aplicado novamente em intervalos curtos de tempo [37]. A desmontagem da turbina, aplicação de novo revestimento nas pás e remontagem são um processo muito custoso e deverá ser feito regularmente. Portanto, há a necessidade de o procedimento ser executado dentro do aro câmara, *in situ*, onde as pás são instaladas.

A cavitação é a formação de cavidades de vapor (bolhas), em um líquido, devido a quedas repentinhas de pressão. Quando o líquido é sujeito ao aumento de pressão, as bolhas implodem, ocasionando ondas de choque [8].

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

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

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

Os principais problemas encontrados durante o desenvolvimento da solução são: acesso e transporte do robô para dentro da turbina; movimentação e posicionamento do

robô no ambiente escorregadio, inclinado e curvo; calibração, e localização do robô e da pá; planejamento de trajetórias; controle do manipulador; monitoramento do processo, em tempo real; selecionar o equipamento adequado para realizar a metalização; definir as regiões das pás mais afetadas pelo desgaste; e selecionar o material adequado para retardar o desgaste da superfície. Nesta seção, são apresentadas as formas de reduzir os danos da cavitação pela tecnologia de revestimento por metalização, a contextualização do problema no caso da usina hidrelétrica de Jirau e as tarefas que um sistema robótico deve realizar para solucionar o problema.

### **3.2.1 Descrição do processo HVOF**

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

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

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

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

O manipulador robótico deve possuir precisão de 5 mm, a pistola no efetuador

deve permanecer a uma distância que varia entre 230 e 240 mm, e ângulo de  $90^\circ \pm 60^\circ$ , em relação à superfície. O manipulador deve ser capaz de mover a pistola a velocidade constante de 40 m/min, e não pode permanecer uma posição da pá por muito tempo (parada), pois há acúmulo de material, deformando a superfície. Trocas de direção ou sentido na movimentação do manipulador são considerados como parada, logo as trocas deverão ser realizadas em áreas exteriores à superfície da pá ou chapas de sacrifício são utilizadas.

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

Em relação às condições de operação: o espaço da aplicação HVOF é confinado, com excesso (100 a 140 dB), gases nocivos e com risco de explosão podem ser exalados; a pá pode atingir temperaturas de até  $110^\circ\text{C}$ ; as condições de umidade e temperatura devem ser ideais para o processo; e há perda de 40% das partículas pulverizadas [44], que são espalhadas pelo ambiente. Portanto, algumas medidas devem ser tomadas para a execução do processo: a operação deve ser remota, não há presença de pessoas *in loco*; os gases presentes e umidade/temperatura devem ser constantemente monitorados; o robô manipulador é selado; as partículas desperdiçadas devem ser removidas (limpeza); e o desligamento do sistema deve ser acompanhado por corte de gás.

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

A tabela 3.1 resume as restrições e especificações do projeto:

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

Tabela 3.1: Dados principais do processo HVOF

### 3.2.2 Descrição dos requisitos de operação de HVOF

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

#### 3.2.2.1 Jateamento da superfície da pá

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

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

O processo de jateamento para o tratamento específico da superfície das pás da

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

### 3.2.2.2 Reparo de danos existentes

Danos existentes na superfície da pá ou em sua estrutura podem reduzir a sua eficiência e até mesmo a própria integridade da pá, prejudicando a segurança da operação. O processo de metalização não tem a capacidade de reparar danos severos na superfície ou danos estruturais como rachaduras. A inspeção para procura desses defeitos deve ser realizada antes da realização do processo de metalização, uma vez que a superfície jateada, ou seja, em metal cru sem camada de proteção, facilita a visualização de danos.

Os danos causados por cavitação, como explicado na seção 3.2, pode alterar o perfil hidráulico da pá e deve ser reparado sempre que possível. O procedimento de reparo varia de acordo com a severidade dos danos causados. À medida que a profundidade das cavidades geradas na pá e a extensão dos danos vão aumentando, medidas mais extremas se tornam necessárias e, por isso, a estratégia de reparo para esse tipo de dano deve estar alinhada com o tipo de processo que se deseja utilizar. Inspeções e reparos mais frequentes significam processos mais simples, enquanto que reparos mais espaçados podem resultar até na inutilização da pá. Os procedimentos mais utilizados para o reparo de danos causados por cavitação são:

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

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

- Epoxy;
- Cerâmica;

- Revestimento por metalização;
- Neoprene;
- Urethane.

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

**Reparo por solda** O preenchimento dos danos causados devido à cavitação por solda é o procedimento mais comum, pois possibilita uma maior deposição de material e não obriga a realização de reparos com uma frequência elevada. Esse processo consiste na deposição de solda em camadas, até o completo preenchimento. A superfície deve ser, então, esmerilhada até entrar em conformidade com as medidas padrão de qualidade para o perfil hidráulico da pá a ser reparada. Essa tarefa é normalmente realizada por mão de obra altamente qualificada e existe, também, na literatura a presença de soluções automatizadas, como os robôs Roboturb e Scompi [6, 7]

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

### 3.2.3 Contextualização do Ambiente

A usina hidrelétrica de Jirau é do tipo fio d'água, na qual são utilizadas turbinas do tipo bulbo de eixo horizontal. Como a geração de energia depende da altura da queda d'água e da vazão do rio, as turbinas do tipo bulbo utilizam uma grande vazão de água para produzirem energia elétrica suficiente. A figura 3.2 e a tabela 3.2 ilustram uma turbina do tipo bulbo e os grandes dutos necessários para comportar o grande volume de água que passa através da turbina.

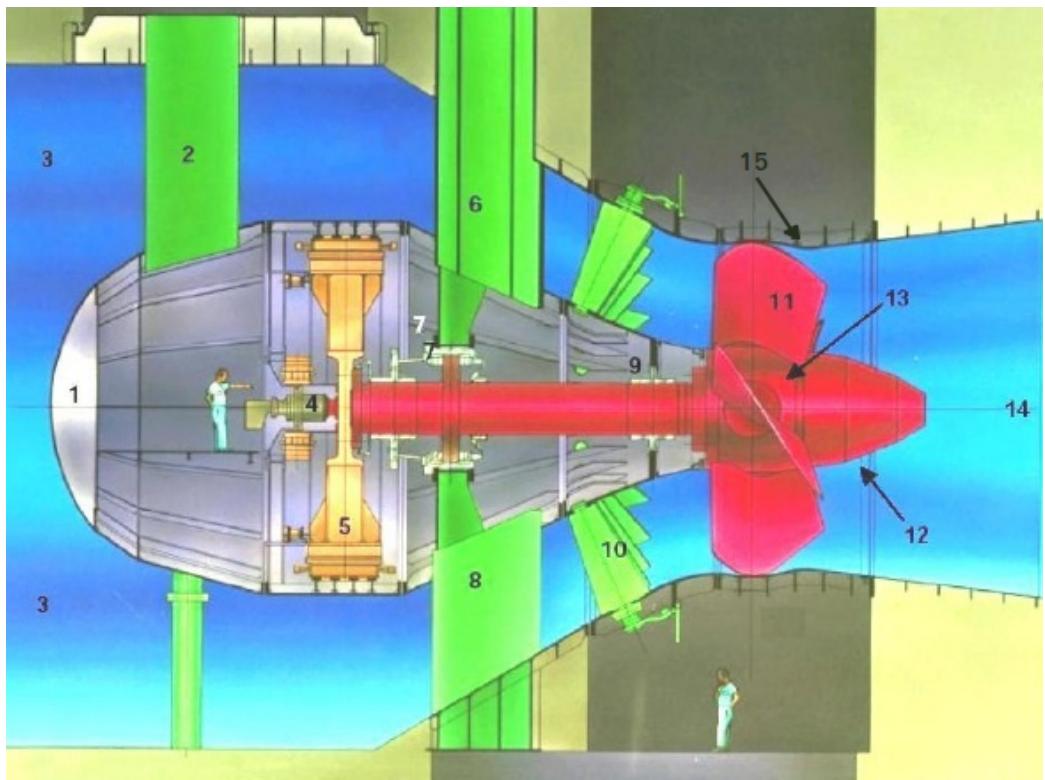


Figura 3.2: Ilustração de uma turbina do tipo bulbo.

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

Tabela 3.2: Componentes principais de uma turbina tipo bulbo

Atualmente, caso seja necessário algum reparo ou inspeção na turbina, é necessário que se interrompa o fluxo de água e que toda a água em seu interior seja drenada. Para manutenção do rotor, existe uma escotilha de acesso de diâmetro limitado. Entretanto, caso deseje-se realizar a metalização de pás já instaladas, utilizando-se os processos atuais, é necessária a retirada de todo o aro câmara, desmontagem completa do rotor e logística de transporte das pás até o local onde a metalização será realizada. Essa operação, caso necessite ser realizada, demandaria a mobilização de diversas equipes de manutenção, operação de pórtico rolante e transporte, além de impossibilitar a utilização da turbina durante várias semanas. No contexto da solução proposta, os pontos de interesse da turbina são:

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

### 3.2.3.1 Hélice e pás

O rotor ou hélice da turbina é constituído do cubo, as pás e o cone. Nas turbinas da usina de Jirau, cada pá mede, aproximadamente, 2,5m de altura e 3m de largura. A partir do interior da turbina, todas as superfícies da pá são alcançáveis, com exceção da borda e do lip da pá. O único ponto de acesso à essa região é por meio da escotilha superior de acesso. A figura 3.3 exemplifica uma pá do rotor presente na usina de Jirau recém metalizada no galpão da Rijeza.

A angulação de cada pá em relação ao fluxo d'água pode ser alterado em  $29^\circ$ ,  $14.5^\circ$  para cada lado a partir da posição inicial, não havendo sobreposição entre as pás, como ilustrado na figura 3.4. Essa angulação pode ser explorada para otimizar o espaço de trabalho necessário para o processamento da pá e também influencia o acesso à região entre o distribuidor e o rotor, uma vez que não existe acesso pela montante da turbina. Entretanto, vale observar que esta angulação não pode ser alterada manualmente e só pode ser



Figura 3.3: Pá do rotor recém metalizada.

realizada uma vez, antes do desligamento da turbina. A posição do rotor também pode ser manualmente alterada, possibilitando que o mesmo seja girado em ambas as direções e sem limite de revoluções. Entretanto, essa operação é uma tarefa imprecisa e envolve um certo risco às pessoas que a realizam. Sendo assim, a solução proposta deve otimizar o número de rotações necessárias para o processamento de todas as pás.

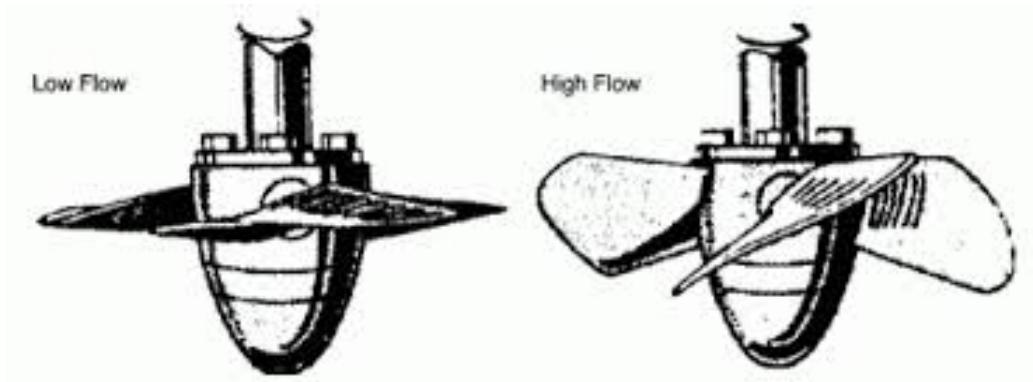


Figura 3.4: Exemplo de limites de rotação das pás do rotor.

### 3.2.3.2 Aro Câmara e regiões adjacentes

O aro câmara, assim como o a região próxima ao distribuidor e também ao tubo de sucção possuem superfícies metálicas. Essa característica possibilita a exploração de soluções de

fixação magnética.

Somente a região compreendida pelo aro câmara é plana e tendo como agravante a presença do distribuidor na região à montante ao rotor. É necessário que a inclinação presente nessas superfícies seja contabilizada e uma solução eficiente de apoio ou plano elevado seja desenvolvida caso haja necessidade de fixação de alguma parte do sistema. Atualmente todo o trabalho é realizado por meio da montagem de andaimes ancorados por cordas. A figura 3.5 ilustra uma estrutura utilizada no modo de inspeção e manutenção atuais.



Figura 3.5: Andaime montado no interior da turbina e ancorado por cordas

### 3.2.3.3 Escotilhas de acesso

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

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

A escotilha superior é utilizada, principalmente, para a inspeção visual do estado dos Lips das pás. O diâmetro do acesso superior é de aproximadamente 35.7cm, limi-

tando as dimensões dos equipamentos que podem ser transportados através da escotilha. As figuras 3.6 e 3.7 ilustram o acesso à escotilha superior pelo exterior ao aro câmara e a visão pelo interior da turbina, respectivamente.

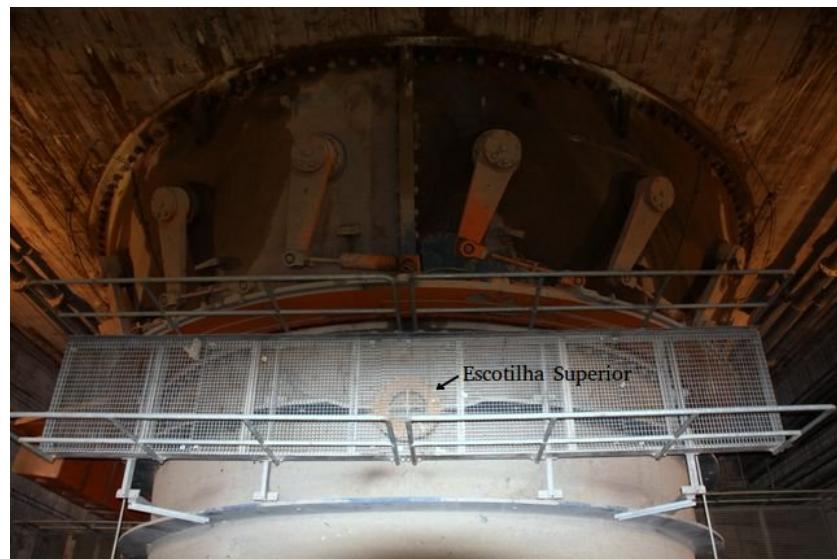


Figura 3.6: Vista da escotilha superior pelo exterior do aro câmara

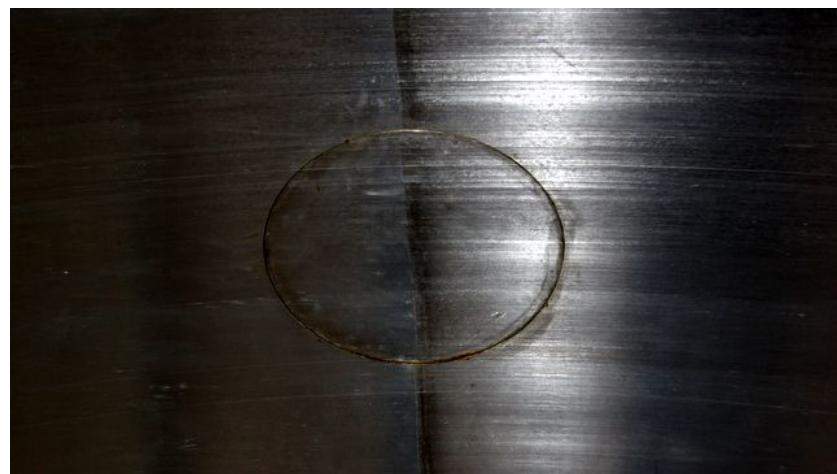


Figura 3.7: Vista da escotilha superior pelo interior do aro câmara

### **3.2.3.4 Tubo de sucção**

Ao final do tubo de descarga está localizado o vão dos stoplogs de jusante ou da comporta vagão e, em seguida, o leito do rio. Caso os stoplogs não estejam inseridos, existe um vão de, pelo menos, 10 m de largura. Porém, não é válida a utilização deste vão como acesso à turbina, pois há grande fluxo de água devido à abertura do distribuidor. O distribuidor não é fechado imediatamente por questões ambientais, já que este é o escoamento de peixes.



Figura 3.8: Abertura do tubo de sucção para o leito do rio, em fase de construção.

### **3.2.3.5 Infraestrutura disponível**

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

superior.

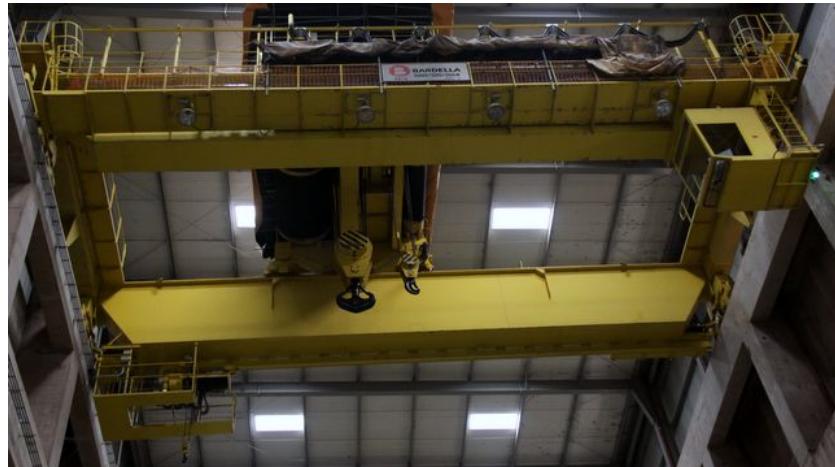


Figura 3.9: Pórtico rolante com acesso ao exterior do aro câmara

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

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

### 3.2.4 Descrição das tarefas do robô

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

robô é realizar o mapeamento do perfil hidráulico, construir um modelo 3D e analisar imperfeições.

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

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

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

Por fim, o robô deverá aplicar o revestimento como forma de prevenir o dano causado pelos fenômenos abrasivos. O robô projetado para fazer o revestimento precisa preencher todos os requisitos discutidos na subseção 3.2.1 e ser adaptável ao ambiente, cujos as restrições são discutidos na subseção 3.2.3.

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

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

Tarefas que poderão ser executadas pelo robô:

- Modelar o perfil hidráulico.

- Calibração.
- Jateamento.
- Reparo (soldagem e esmerilhamento).
- Revestimento por metalização.

### 3.3 Estado da arte

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

#### 3.3.1 Robôs sobre trilhos

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

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

Na literatura foram encontradas duas soluções para aplicações de manutenção e inspeção, como solda, específicas para o contexto de turbinas hidráulicas. As aplicações diferem, principalmente, na estratégia de fixação do sistema de trilhos. O Roboturb [7] realiza a fixação diretamente na pá do rotor, enquanto o robô Scompi [6] utiliza um trilho fixado em estruturas adjacentes à pá ou peça a ser reparada.

O Roboturb consiste em um manipulador robótico com seis juntas de revolução e uma junta prismática acoplada a um trilho flexível, como pode ser observado na figura

3.10, utilizado para o preenchimento de cavidades geradas por cavitação. O trilho pode ser conformado e, então, fixado à superfície da pá por meio de um sistema passivo de ventosas ou ímãs. O robô tem a possibilidade de utilizar dois efetuadores distintos, o primeiro consiste em um sensor ótico para inspeção do estado de erosão da pá e o segundo consiste em uma ferramenta de solda do tipo tocha plasma PWH-4A com alimentador automático de arame, responsável pelo depósito de solda para o preenchimento das cavidades identificadas pelo sistema.

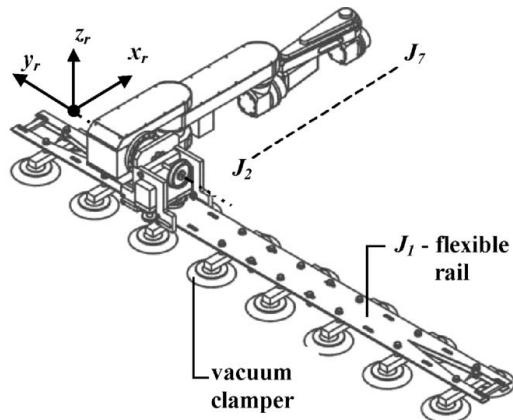


Figura 3.10: Roboturb [7] - Manipulador robótico sobre trilho flexível

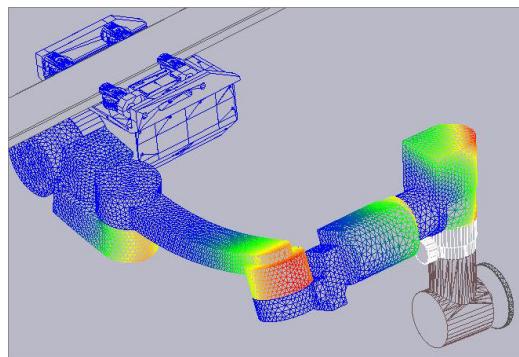


Figura 3.11: SCOMPI [6] - Manipulador robótico sobre trilhos rígidos

Por sua vez, o robô Scompi, fig 3.11, é um manipulador multipropósito projetado para realizar reparos em turbinas do tipo *Francis*, como solda e esmerilhamento das pás. O sistema possui seis graus de liberdade, sendo constituído por um braço robótico com cinco juntas de revolução, e o último grau de liberdade proveniente de uma junta

prismática que percorre um sistema de trilhos retos ou curvos que são projetados para cada aplicação especificamente.

Sistemas baseados em trilhos tem como maior benefício a redução do tamanho e, consequentemente, do peso do manipulador necessário para a execução de tarefas em um espaço de trabalho que englobe toda a superfície da pá. Essa redução proporciona facilidade de transporte do robô até o interior da turbina e também possibilita o projeto de manipuladores que tenham a rigidez necessária para a realização das tarefas desejadas.

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

**Vantagens:**

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

**Desvantagens:**

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

### **3.3.2 Robôs escaladores**

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

de armazenamento em plantas nucleares, solda e manutenção de cascos de navios e palhetas de turbinas [3].

Os grandes desafios nos projetos de sistemas escaladores são mobilidade e aderência, além de consumo de energia, capacidade de carga e peso. Em [25] e [4], os robôs escaladores são divididos em tipos de locomoção: pernas; como andador; utilizando segmentos deslizantes; rodas; esteiras; avanço pendurado por braços; por cabos; e biomimética. E categorias de adesão: sucção ou pneumática; magnética; eletrostática; química; preensão; e híbrida.

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

- *Navios e turbinas*: RRX3 para soldagem [24], *Climbing Robot for Grit Blasting* para limpeza [1] e ICM Robot para inspeção [30];
- *Industrial*: ROMA II [9] e CROMSCI [10], ambos para inspeção;
- *Planta petroquímica*: TRIPILLAR [36] para inspeção.

O RRX3 (figura 3.12), Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, é um robô para a soldagem de casco de navios. Possui adesão por preensão, locomoção transversal utilizando segmentos deslizantes e locomoção longitudinal por rodas. Possui um manipulador de 1.5 m com três juntas prismáticas e três juntas de revolução (3P3R) para a operação de soldagem.

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

O *Climbing robot for Grit Blasting* (figura 3.13), University of Coruna, é um robô para jateamento abrasivo em navios. O robô utiliza duas plataformas deslizantes com sistema de adesão por ímã magnético. Os módulos apresentam movimentação relativa entre si e pode rotar para compensar as curvaturas do casco do navio ou desviar de objetos.

As características principais do robô são: base com capacidade de carga de sistema abrasivo semelhante a HVOF; base com locomoção de precisão milimétrica; locomoção ampla, mas não aplicável a estruturas complexas; e não possui manipulador, sendo necessário percorrer todo o casco.

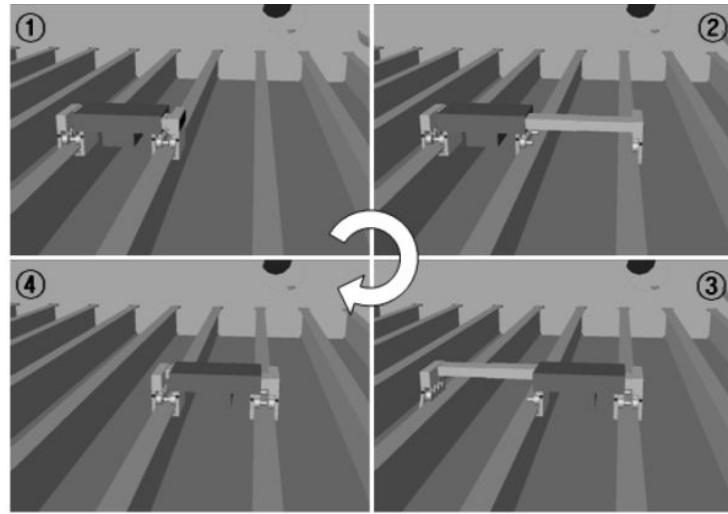


Figura 3.12: Translação horizontal do robô RRX3.

*The Climber* (figura 3.14), ICM Robotics, é um robô para inspeção de turbinas eólicas, remoção de revestimento, limpeza de superfície, e aplicação de revestimento. Possui adesão pneumática (sucção) e locomoção por esteiras.

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

O ROMA II (figura 3.15), Universidade Carlos II de Madrid, é um robô para inspeção de ambientes complexos. A sua tecnologia de adesão é pneumática (sucção) e locomove-se como uma lagarta (biomimética). Sua movimentação e planejamento de trajetória são realizados de maneira ótima de forma a garantir estabilidade e evitar obstáculos.

As características principais do robô são: base com grande capacidade de carga; base com locomoção de precisão milimétrica; não possui manipulador; locomoção em ambientes de grande complexidade.

CROMSCI (figura 3.16), Kaiserslautern University of Technology, é um robô autônomo para inspeção de grandes paredes de concreto, como pilares de pontes, barragens. Seu sistema de adesão é composto por sete câmaras de vácuo (sucção), com um sistema de controle por válvulas e sensores de pressão para reagir rapidamente a condições adversas. Locomove-se com rodas omnidirecionais para locomoção.

As características principais do robô são: base com pouca capacidade de carga;



Figura 3.13: Climbing robot for Grit Blasting

base com locomoção de precisão milimétrica; não possui manipulador; e apresenta baixa velocidade.

TRIPILLAR (figura 3.17), École polytechnique fédérale de Lausanne, é um robô escalador de pequeno porte (96 x 46 x 64 mm) desenvolvido para a inspeção de plantas petroquímicas. Utiliza um sistema como pernas de lagarta magnéticas em um formato triangular. Locomove-se por esteiras.

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

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

As vantagens e desvantagens para solução de robôs escaladores são:

**Vantagens:**

- Facilidade de instalação;

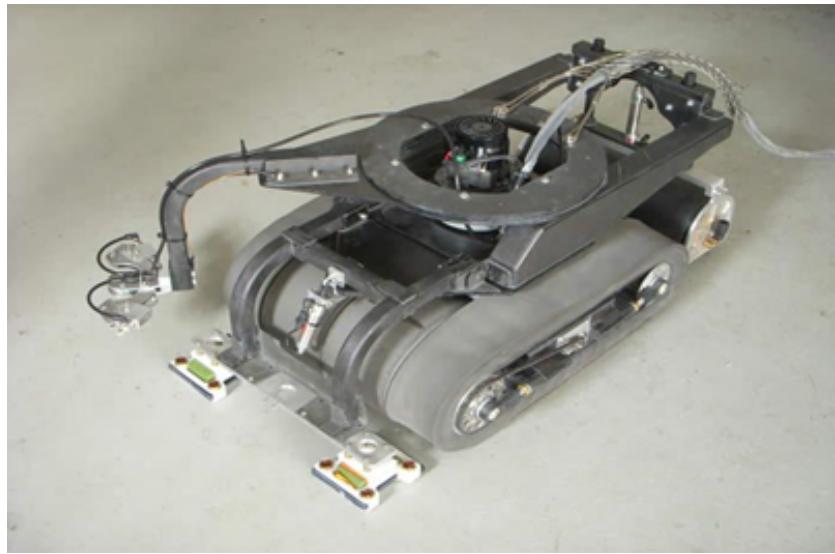


Figura 3.14: Robô The Climber da ICM Robotics

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

**Desvantagens:**

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

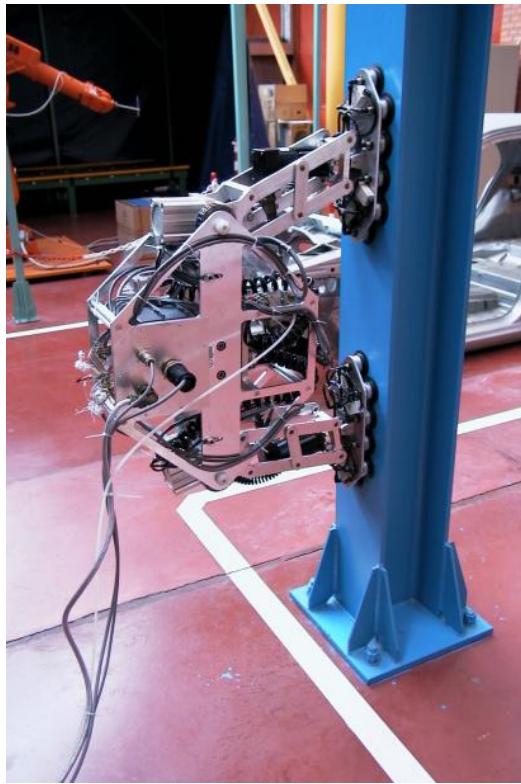


Figura 3.15: ROMA II.

### 3.3.3 Robôs cabeados

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

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

Para exemplificar essa categoria foram selecionados dois robôs. O *torboMate* é um escalador que possui adesão magnética que o permite caminhar livremente. Pode ter dois ou um emissor de jatos com capacidade para abastecimento em até 4000 bar. Possui 45



Figura 3.16: Robô CROMSCI.

kg e atinge uma velocidade de até 20 m/min [42].

RIWEA é um robô puramente cabead, no sentido em que ele não possui nenhum outro tipo de forma de ajuste de posição além do sistema de cabos. É um conceito de robô de estrutura aberta que faz uso de quatro cordas para se deslocar verticalmente [26]. Seu maior diferencial reside na capacidade de se adaptar a curvatura da pá mantendo sempre um ponto de apoio sobre ela, sendo também menos suceptivel a vibrações [15].

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

**Vantagens:**

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

**Desvantagens:**

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

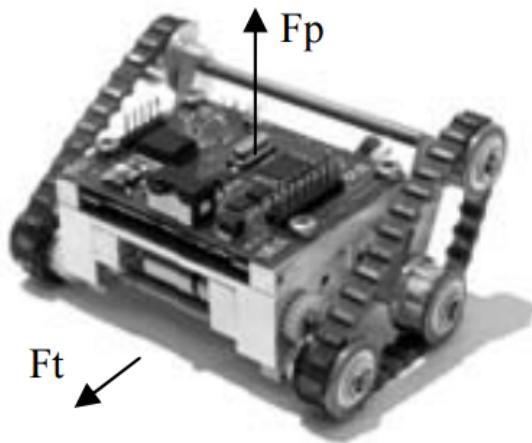


Figura 3.17: Robô TRIPILLAR.

### 3.3.4 Manipulador com base esférica

Um projeto de pesquisa e desenvolvimento foi apresentado em [32] com o objetivo de propor metodologia, simulação e os passos para construção de um sistema robótico para recuperar danos materiais em pás de turbinas hidráulicas. O sistema robótico faz reparo utilizando a tecnologia de soldagem a arco elétrico, antes realizada manualmente em ambientes de alta periculosidade com temperaturas que variam entre 40°C e 99°C, e operações que duram em torno de 10 horas.

O robô deve atender aos seguintes requisitos:

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



Figura 3.18: Robô TorboMate "Crawler", [42]

A solução para o sistema robótico apresenta topologia esférica, como pode ser visto na figura 3.20 e características:

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

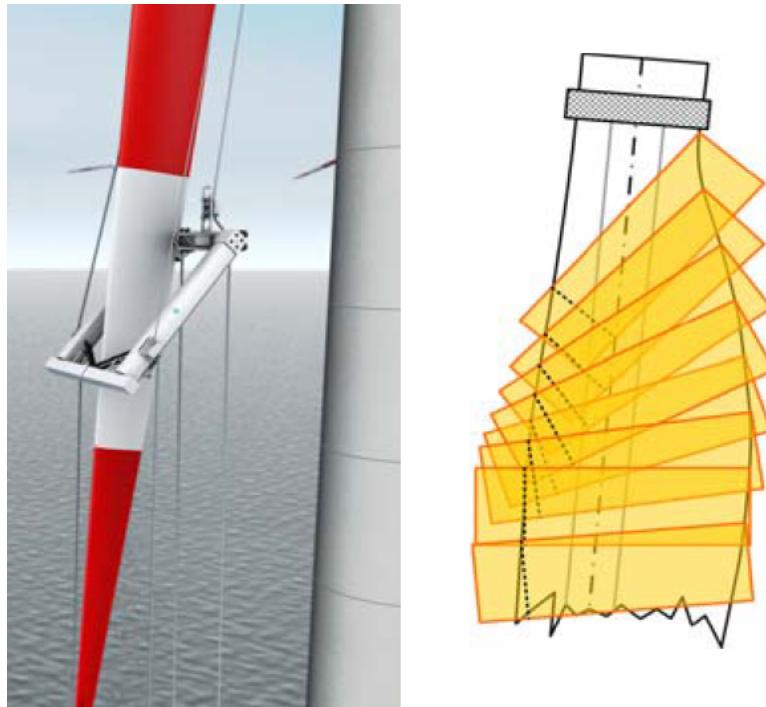


Figura 3.19: Robô RIWEA, sua cinemática adaptável ao formato da pá, [15]

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

**Desvantagens:**

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



Figura 3.20: Ilustração do projeto do manipulador com base esférica.

### 3.4 Projeto de robô autônomo para HVOF

O projeto de robôs autônomos para HVOF em pás de turbinas hidráulicas contempla as soluções que atendem a **todos** os requisitos da aplicação. Dessa forma, serão idealizados sistemas robóticos com a fusão das tecnologias expostas na seção 3.3 e no contexto da usina hidrelétrica de Jirau. Também serão desenvolvidos conceitos para movimentação e adequação dos equipamentos para HVOF, como pistola, aspirador para recolhimento abrasivo, compressor e outros elementos da solução.

Na seção 3.2, os acessos ao aro câmara foram descritos e suas restrições são fundamentais para a elaboração da solução. Esta seção é dividida em soluções de sistemas robóticos para os dois tipos de acessos, já que estes são o fator que mais restringe o desenvolvimento do sistema robótico por limitar suas dimensões, funcionalidades, e exigir a idealização conjunta de uma logística de acesso e movimentação do robô pelo aro câmara.

#### 3.4.1 Acesso pela escotilha superior

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

criam possibilidades interessantes para seu uso.

### Vantagens

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

### Desvantagens

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

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

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

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

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

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

### **3.4.2 Acesso pela escotilha inferior**

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

#### **Vantagens:**

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

#### **Desvantagens**

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

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

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

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

### **3.4.2.1 Projeto de robôs em trilhos**

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

No contexto da aplicação proposta, foram concebidas duas possibilidades para a fixação do sistema de trilhos. A primeira solução consiste em um sistema semelhante ao Roboturb, apresentado na seção 3.3.1. O sistema proposto se trata de um manipulador robótico com fixação diretamente na pá da turbina. O trilho deverá ser flexível para ser capaz de acompanhar a curvatura da pá e possibilitar diversas opções de posicionamento. Como o material da pá não possui alta permeabilidade magnética (Inox 420), a solução de fixação seria por ventosas ativas e com material específico para suportar as grandes variações de temperatura que a pá pode alcançar (temperatura ambiente a 100°C durante a metalização).

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

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

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

de sentido de movimento deverá ocorrer fora da pá ou devem ser utilizadas placas de sacrifício. A

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

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

#### **Conclusão da solução por robôs em trilhos**

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

##### **3.4.2.2 Projeto de robôs escaladores**

Nesta subseção, consideram-se soluções para HVOF de pás de turbinas robôs escaladores com fusão das tecnologias documentadas na seção 3.3, subseção 3.3.2. Será abordada uma versão adaptada do robô *The Climber*, ICM, dado sua possibilidade de reconfiguração.

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

O sistema desenvolvido em [28] tem mecanismo de locomoção por esteiras e adesão por sucção. O sistema é composto por polias, correias de borracha, ventosas, válvulas para cada ventosa, motores DC para as polias, sistemas de controle para as válvulas e para os motores. *The Climber* utiliza apenas uma câmara de vácuo, em vez de ven-

tosas, e esteiras flexíveis que permitem maior suavidade e continuidade ao movimento. A solução por uma única câmara parece mais vantajosa, já que o robô consegue se locomover em curvaturas de até 30 cm de raio.

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

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

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

A solução de robôs escaladores exige planejamento de trajetórias tanto da base móvel, quanto ao controle de manipuladores. A literatura sobre manipuladores é bastante consolidada, sendo muitos dos problemas citados já resolvidos e disponíveis no mercado, como o desenvolvido em [31]. Os menores manipuladores industriais que sustentam a carga do sistema de metalização possuem em torno de 30 a 50 kg. Portanto, o conjunto manipulador, pistola e cabos pode possuir de 50 a 80 kg de massa.

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

funcionamento e gerenciamento de potência do robô.

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

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

#### 3.4.2.3 Projetos com manipuladores industriais fixos

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

##### Posicionamento entre pás

A figura 3.5 mostra o espaço entre as pás da turbina, dentro do aro câmara. Um robô manipulador de médio porte pode ser fixado em uma base magnética, na posição que se encontra a escada da figura 3.5. Essa posição é vantajosa por possibilitar a execução da tarefa em duas pás (frente de uma e verso da outra), sem desmontar ou fazer grandes alterações no posicionamento da base do robô, diminuindo as intervenções e tempo de tarefa.

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

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

**Posicionamento à frente e atrás da pá** Posicionar de maneira fixa um manipulador com base magnética à frente e atrás da pá para a metalização é uma solução natural, já que é semelhante à utilizada pela empresa Rijeza atualmente. Um estudo puramente geométrico, utilizando as dimensões da pá, mostra que o manipulador deve possuir alcance de 1.7 m e ser posicionado a uma altura de 1.1 m em relação ao solo. Estudos de espaço de trabalho, manipulabilidade e colisões devem ser realizados para confirmar o estudo geométrico.

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

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

envolvem o HVOF, planejamento de trajetórias e UI.

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

### 3.4.3 Qualificação do processo HVOF

O método de revestimento HVOF foi descrito na Seção 3.2.1. É um processo de aplicação de revestimento onde partículas metálicas (com ou sem carbonetos) de aproximadamente 5 a 60 microns são projetadas através de uma chama supersônica até a superfície que se deseja metalizar, a fim de aumentar a vida útil dessa superfície contra os desgastes de corrosão, abrasão, erosão e cavitação. Utilizando propano como combustível, obtém-se uma aplicação com as seguintes características: temperatura de chama 2700° C; velocidade da chama de até 2100 m/s; velocidade de partícula 700 m/s; pressão de combustão 80 PSI.

Com este processo é possível aplicar ligas metálicas com carbonetos produzindo revestimentos densos, com baixo volume de óxidos, alta adesão ao substrato e dureza de até 1400 HV. O processo de HVOF possui os seguintes elementos:

- Uma pistola de aplicação, onde é realizada a combustão e projeção do revestimento contra a superfície das pás. Esta deverá estar montada no robô;
- *Flowmeter* para controle das pressões e vazões dos gases, onde é regulada a pressão e vazão do O<sub>2</sub>, Propano e ar comprimido. Deve ser montado fora do circuito hidráulico, porém o mais próximo possível da escotilha;
- Alimentador de pó para a pistola, onde é regulado a vazão de pó que é alimentado para a pistola de aplicação. Deve ser montado fora do circuito hidráulico, porém o mais próximo possível da escotilha;
- Cilindros de propano (estudar necessidade de vaporizador). Combustível do processo;
- Cilindros de O<sub>2</sub>: combustível do processo;
- Cilindros de N<sub>2</sub>: gás de arraste do pó para a pistola;
- Compressor e secador de ar para a refrigeração da pistola, próximo ao *Flowmeter*;

- Chiller água gelada para refrigeração da pistola. Deve estar próxima ao *Flowmeter*;
- Estufa para armazenamento da matéria prima;
- Transformadores de energia 110V;
- Bomba para compensar queda de pressão da água;
- Base com rodízio para movimentação dos equipamentos até a escotilha;
- Exaustor para controle da umidade, temperatura e concentração de gases;

O projeto de HVOF *in situ* para UHE Jirau busca solucionar os problemas descritos na seção 3.2. Dessa forma, as subseções seguintes abrangem a acessibilidade e movimentação dos equipamentos ao ambiente da turbina; os principais tipos de revestimentos que resistam a esses desgastes; e a forma de preparo da superfície por jateamento.

#### 3.4.3.1 Movimentação e acessibilidade

A Fig. 3.21 detalha o circuito hidráulico da turbina de Jirau. O caminho às escotilhas são superior e inferior são distintos. A escotilha superior pode ser alcançada por uma plataforma de acesso às unidades geradoras (1), e uma descida por meio de ponte rolante (2). O caminho à escotilha inferior é complexo: há uma escada (3) de aproximadamente 23 metros até a área de descarga (4); do ponto (4) até o corredor (5) que leva à escotilha são mais 4.77 metros pelo corredor (6), o qual possui 2.3 metros de altura; por fim, é preciso subir uma escada (7) com aproximadamente 6 metros de altura por 1,7 de largura.

A Fig. 3.22 mostra o acesso pela escotilha superior do aro câmara, e a posição onde os equipamentos podem ficar alocados. A Fig. 3.23 apresenta o conceito de posicionamento dos equipamentos levando em consideração o acesso pela escotilha inferior. Os conceitos de movimentação dos equipamentos são gaiolas para alocação através de olhais para movimentação vertical e espaço para encaixe de paleteira para movimentação horizontal dos acesórios para metalização, representados na Fig. 3.24.

#### 3.4.3.2 Jateamento abrasivo

Na Seção 3.2.2.1, o jateamento abrasivo foi introduzido como requisito para a preparação da superfície a ser revestida. Foram investigados duas alternativas para posicionamento e a forma de execução do equipamento para preparação superficial com óxido de alumínio. Em ambos os casos, a

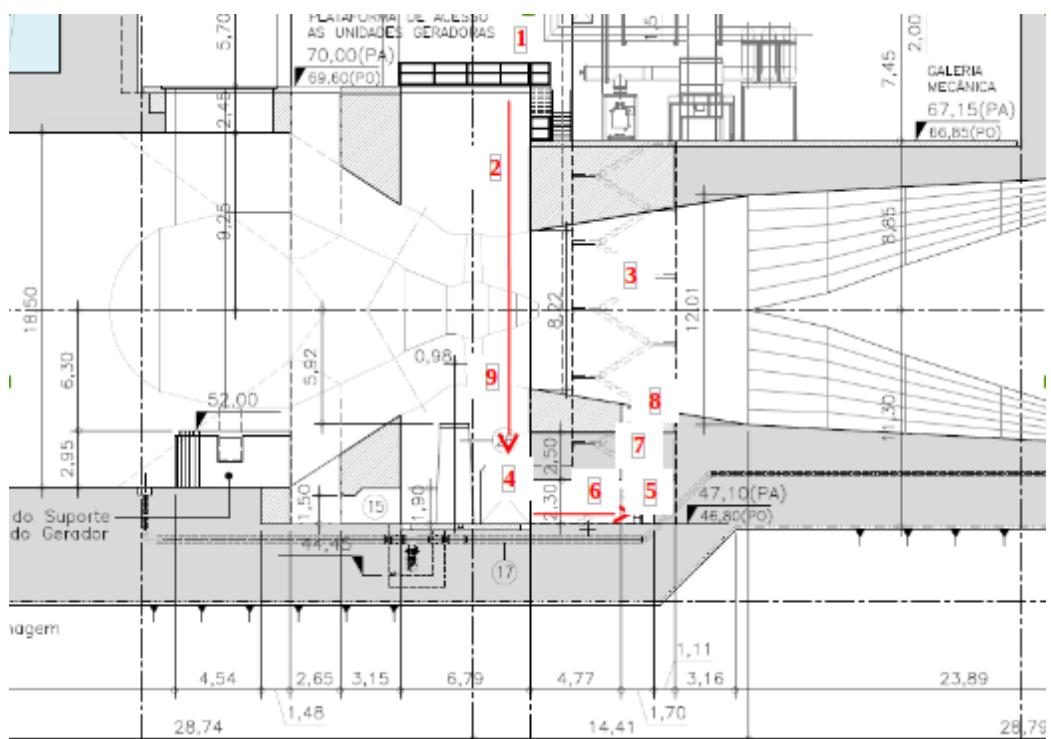


Figura 3.21: Desenho esquema com acessos ao circuito hidráulico.



Figura 3.22: Acesso pela escotilha superior do aro câmara.

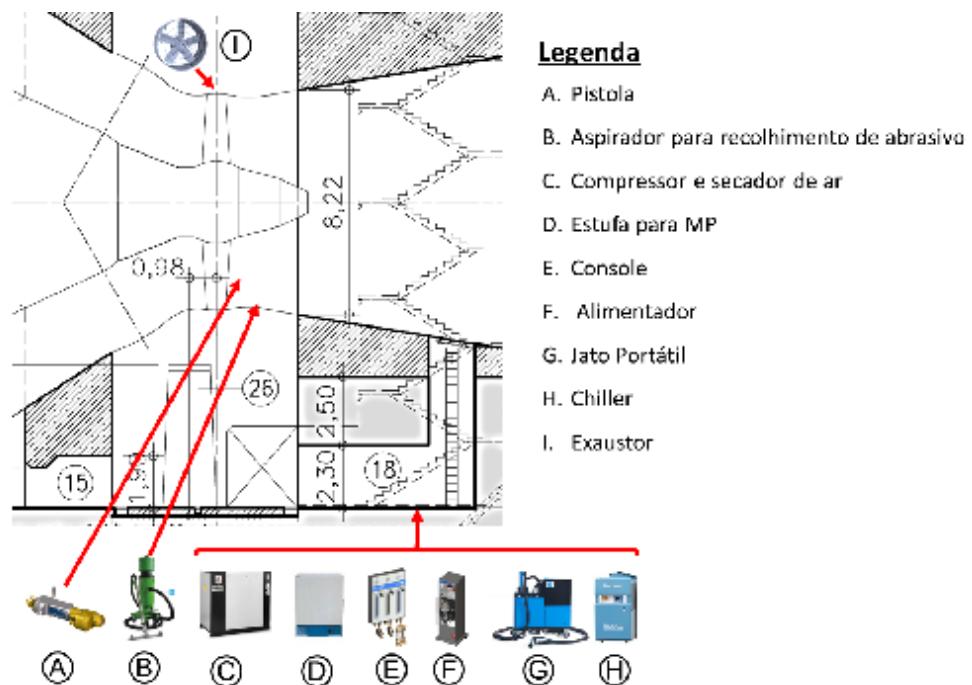


Figura 3.23: Acesso pela escotilha inferior.



Figura 3.24: Sistemas de movimentação do Jato e equipamentos acesórios à pistola de Coating.

1. Máquina de jato com reservatório deverá permanecer fora do circuito hidráulico, porém o mais próximo possível da escotilha. A pistola de jateamento com recirculação do abrasivo; Compressor de ar com secador: secador de ar deve estar próximo a máquina de jato; Sistema de filtragem de ar mandado ao operador para abastecer ar filtrado para respiração do operador, fora do circuito hidráulico.
2. Máquina de jato com reservatório do abrasivo deverá permanecer fora do circuito hidráulico, porém o mais próximo possível da escotilha. Pistola sem sistema de recirculação de abrasivo; Aspirador para recolhimento do abrasivo; Compressor de ar com secador ar próximo à máquina de jato; Sistema de filtragem de ar mandado ao operador para abastecer ar filtrado para respiração, fora do circuito hidráulico.

O jato com sistema recirculante é uma alternativa interessante, porém pode possuir menor produtividade.

#### **3.4.3.3 Tipos de revestimentos**

Para se determinar a solução ideal de revestimento para as pás Kaplan, primeiramente foram mapeados os principais tipos de desgastes que sofrem os equipamentos de hidrogeração. Esse mapeamento foi realizado através de estudo teórico em materiais de fabricantes de equipamentos hidrelétricos, artigos em revistas científicas e inspeção própria nas unidades geradoras de Jirau. Na Fig. 3.25, está apresentada uma das principais regiões desgastadas pelas pás e os tipos de danos por abrasão, cavitação, erosão e corrosão.

A partir desse mapeamento prévio foram selecionados três tipos de materiais para o revestimento das pás, Tabela 3.3.

Para qualificar os materiais e as modificações nos equipamentos foram realizados ensaios baseando-se em procedimentos normatizados. Abaixo é feita a listagem dos testes realizados bem como a norma a qual aquele teste se relaciona. Os testes estão classificados em duas categorias: testes para qualificação do processo, e testes para a seleção do revestimento.

Os testes para qualificação do processo são:

1. **Ensaio de adesão:** Norma Relacionada: ASTM C633; Equipamento utilizado: Máquina de ensaios universal; Corpos de prova: 3 corpos de prova cilíndricos de 1 polegada de diâmetro para cada conjunto de testes;



Figura 3.25: Mapeamento do desgaste das pás da UHE Jirau através de inspeção em campo.

Tabela 3.3: Materiais base para HVOF

Sistema	Material	Principal aplicação do revestimento
WCNiCr	Material base em AISI 410 e revestimento de Carboneto de Tungstênio em matriz de Níquel Cromo	Desgaste Erosivo e Cavitação
WCCoCr	Material base em AISI 410 e revestimento de Carboneto de Tungstênio em matriz de Cobalto-Cromo	Desgaste Abrasivo e Erosão
AISI 410	Material base em aço inoxidável AISI 410	—

2. **Microdureza:** Norma Relacionada: ASTM E384; Equipamento utilizado: Micro-durômetro Vickers com carga de 0,1 à 1 kgf Corpos de prova: Retangulares com 25,4 mm x 10 mm x 5 mm. 1 por teste;
3. **Medição de Porosidade e Óxidos:** Norma Relacionada: ASTM E2109 Equipamento utilizado: Microscópio óptico com lentes objetivas de 50 até 1000 x de aumento. Corpos de prova: Retangulares, os mesmos utilizados para o ensaio de microdureza.
4. **Rugosidade:** Norma Relacionada: ISO 4287-1997; Equipamento utilizado: rugosímetro portátil para medição dos parâmetros Ra, Rz. Corpos de prova: serão utilizados os mesmo corpos de prova para o ensaio de microdureza.

Os testes para a seleção do revestimento são:

1. **Ensaio de Erosão:** Norma Relacionada: ASTM G76; Equipamento utilizado: equipamento de erosão por partículas sólidas; Corpos de prova: retangulares com 25,4x15 mm por 5 mm de espessura. Ou 30 mm de diâmetro. 3 por teste.
2. **Ensaio de Abrasão:** Norma Relacionada: ASTM G65; Equipamento utilizado: abrasômetro do tipo roda de borracha; Corpos de prova: retangulares de 25,4 x 76 x 5 mm mínimo;
3. **Ensaio de Cavitação:** Norma Relacionada: ASTM G32; Equipamento utilizado: equipamento de vibração ultrasônico.
4. **Ensaio de Imersão – Corrosão:** Norma Relacionada: -/- Equipamento utilizado: cuba de imersão e potenciómetro; Corpos de prova: retangulares com 25,4x20 mm por 5 mm de espessura. 3 por teste.
5. **Adesão por dobramento:** Norma Relacionada: ASTM B571; Equipamento utilizado: Dispositiva para dobramento em máquina de ensaio universal Corpos de prova: 50 x 75 x 3 mm;

**Demais equipamentos utilizados para controle do processo de Jateamento e Metalização:** Termo-higrômetro para medição do ponto de orvalho e controle da umidade relativa do ar; Pirômetro para controle da temperatura da peça/corpo de prova; Rugosímetro para medição da rugosidade da superfície jateada e metalizada; Medidor de camada indutivo para controle da espessura de camada;



Figura 3.26: Cabeçote do accura spray para monitoramento da chama de aspersão témica.

#### **Accura-Spray para controle da temperatura e velocidade da chama hipersônica:**

Este ensaio é de grande importância para a qualificação dos procedimentos de HVOF na medida que ele monitora os parâmetros de saída da chama de aspersão como a temperatura e a velocidade média das partículas. A Fig. 3.26 mostra o cabeçote do equipamento accura spray montado próximo à pistola de aspersão para monitoramento de chama.

### **3.5 Estudo de bases para manipuladores industriais**

#### **3.5.1 Modelagem 3D das soluções conceituais**

Os estudos das possíveis soluções exigiu uma visualização mais detalhada do volume livre no interior da turbina. Para isso, foi recriado o ambiente da turbina em CAD 3D no SolidWorks, a partir dos desenhos 2D de seção da turbina fornecidos pelo cliente. O modelo tridimensional do aro câmara permite o estudo e o dimensionamento geométrico

de alcance do manipulador para cada solução. Não foram necessários detalhamentos de todos os componentes, podendo ser apenas considerados, e representados com maior precisão, os perfis externos do túnel à montante, o estator, o rotor e uma pequena região à jusante, além dos acessos por escotilha superior e inferior. A figura 3.27 apresenta o ambiente da turbina em CAD e os possíveis acessos para realização das intervenções.

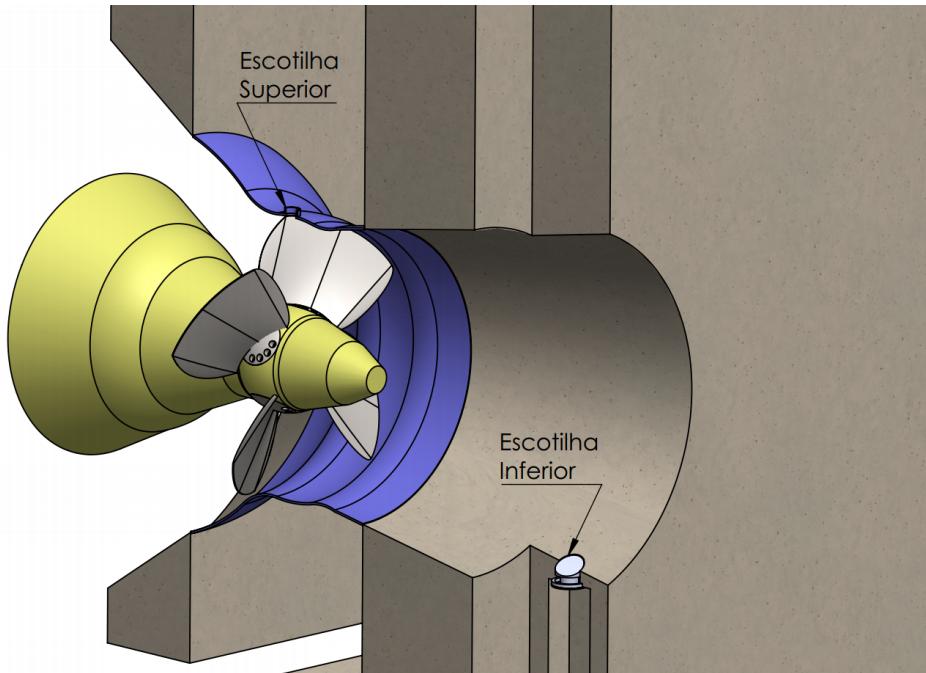


Figura 3.27: Ambiente 3D da Turbina, em SolidWorks

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

acesso do manipulador à toda ar superfície da pá.

Os atuadores da base são acionados eletricamente e possuem sensores de posicionamento. Atuadores de esferas recirculantes foram escolhidos devido à baixa folga e precisão elevada. A estrutura da base é composta por cilindros de diâmetro maximizado e pequena espessura, o que oferece um momento de inércia polar elevado e baixo peso, fornecendo grande rigidez à flexão e minimizando erros de posicionamento e vibração excessiva. A figura 3.28 e a figura 3.29 apresentam o conceito da base do manipulador em duas configurações: recolhida (configuração de entrada) e estendida (configuração de operação).

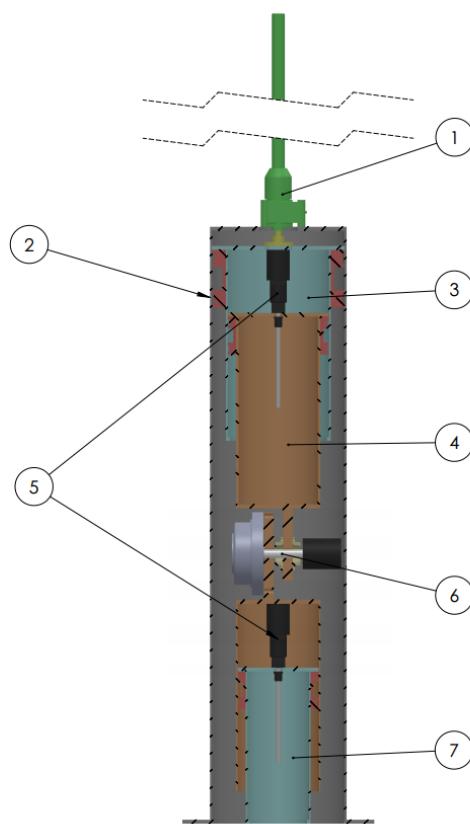


Figura 3.28: Detalhes em corte da base na configuração inicial recolhida

Os componentes principais da base estão representados nas figuras 3.28 e 3.29, são: 1) atuador linear por sem-fim coroa; 2) base fixa; 3) braço prismático #1; 4) braço prismático #2; 5) atuadores lineares; 6) junta rotativa; 7) braço prismático #3.

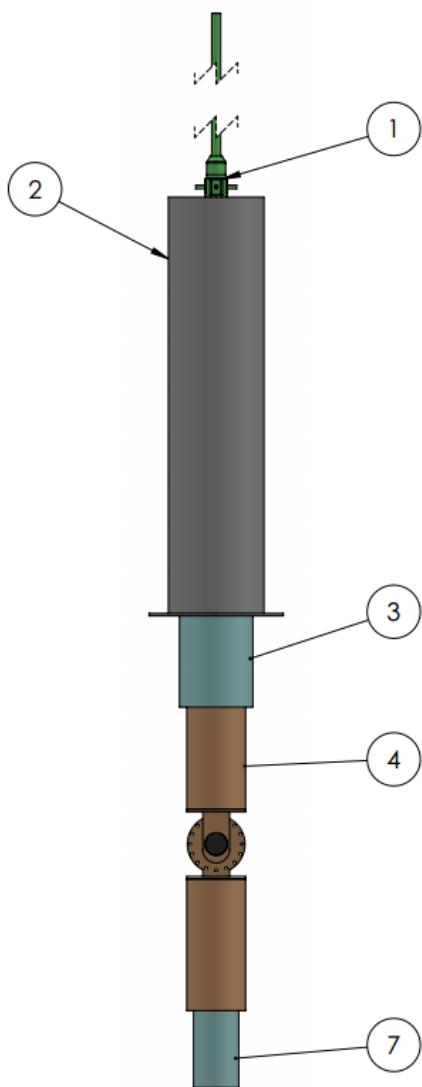


Figura 3.29: Base na configuração totalmente estendida

A figura 3.30 demonstra a base com o manipulador KUKA LBR 820 e as dimensões extremas, em milímetros, estimadas para o interior e para fora da turbina, na configuração inicial de entrada no aro câmara pela escotilha superior. A figura 3.31 apresenta a base com o manipulador em uma configuração qualquer de operação, demonstrando o ganho de alcance e generalidade de posicionamento fornecidos pela base.

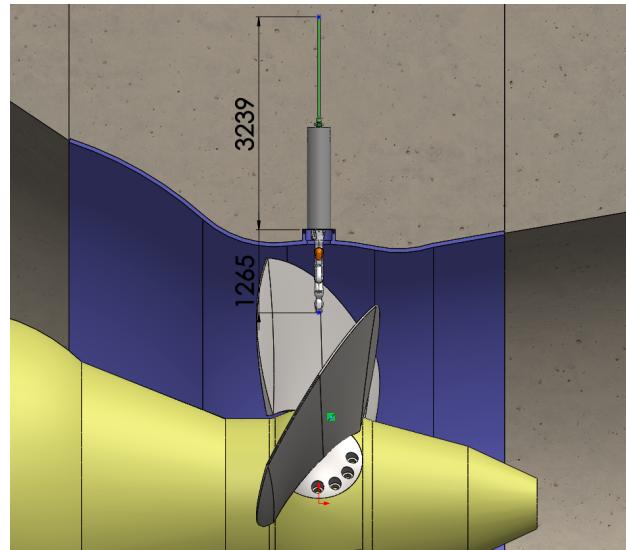


Figura 3.30: Base na configuração inicial no ambiente da turbina

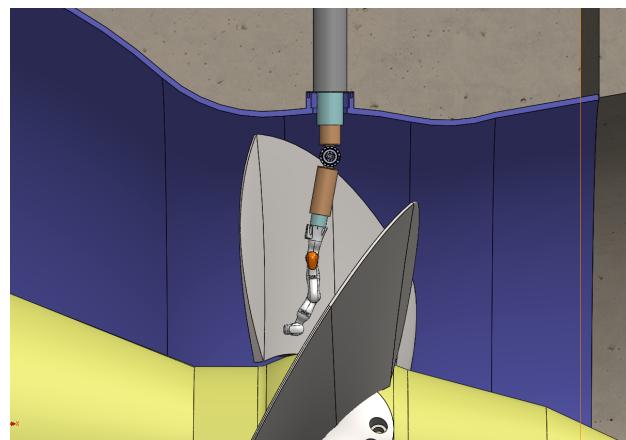


Figura 3.31: Base em uma geral configuração de operação

### 3.5.1.1 Dimensionamento da base

Para manipuladores com longo alcance, as forças e torques envolvidos requerem uma estrutura de fixação do robô de forma que o sistema como um todo não se movimente e, no caso extremo, tombe. Normalmente, os manipuladores robóticos são fixados no chão e as características da superfície e tamanho dos parafusos necessários são estipulados pelo fornecedor a partir dos valores máximos de torque e força que o manipulador

pode exercer em seu ponto de apoio. Considerando um manipulador centrado em uma base circular apoiada no chão, dois fatores influenciam capacidade de estabilização da estrutura: o raio da base e o seu peso.

O raio da base  $r_b$  é limitado pelo ambiente da turbina e para cada escolha de posicionamento existem restrições específicas. Para a realização dos cálculos de dimensionamento foi considerado, primeiramente, o manipulador posicionado em frente a pá, como ilustrado na figura 3.32.

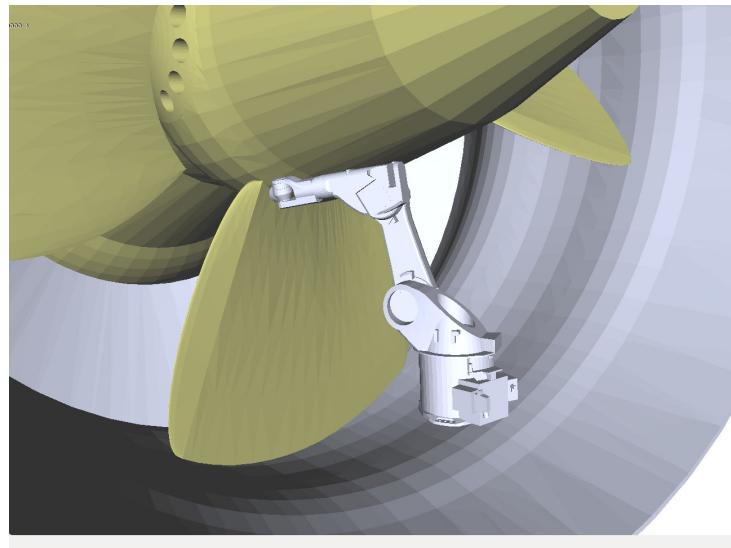


Figura 3.32: Exemplo de posicionamento de um manipulador robótico em frente à pá.

Nessa posição é possível processar uma face por vez, a uma altura de 1000mm do chão, desde que o manipulador tenha um alcance mínimo de 1800mm, como especificado na seção ???. Para essa configuração, a tamanho máximo no sentido perpendicular ao fluxo d'água que a base pode assumir é de aproximadamente 1600mm. Existe ainda a curvatura do aro câmara e a estrutura deve ser projetada de forma a seguir os contornos impostos pelo ambiente. A figura 3.33 representa um esboço da vista frontal do aro câmara e a largura máxima que a base pode assumir. A análise da dimensão máxima da base no sentido paralelo ao fluxo d'água pode ser realizada com o auxílio do desenho técnico fornecido pela ESBR, ilustrado na figura 3.34.

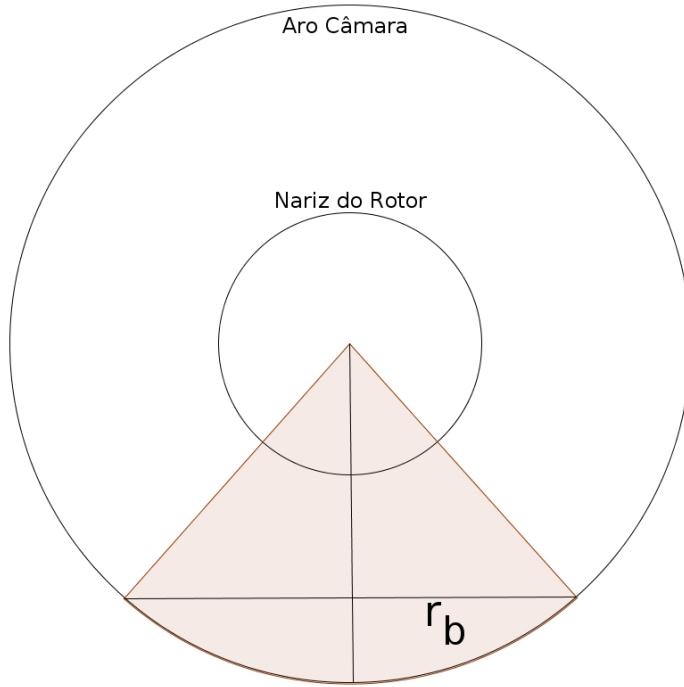


Figura 3.33: Visão frontal do aro câmara e raio máximo da base.

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

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

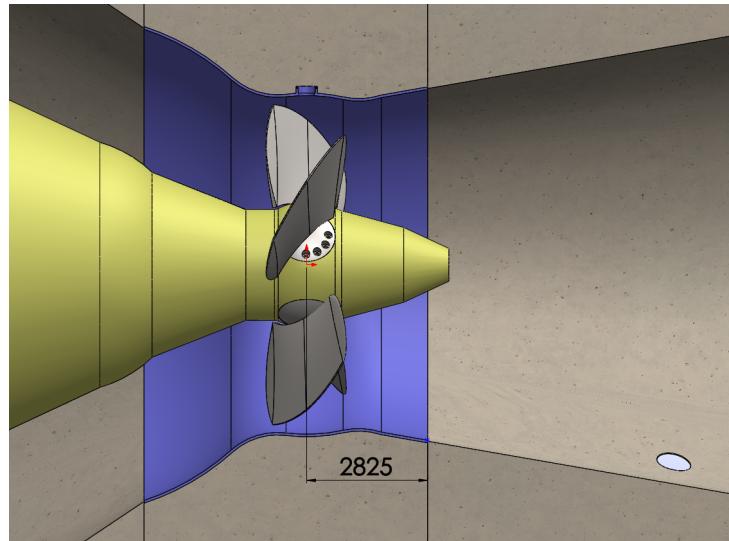


Figura 3.34: Visão lateral do aro câmara e raio máximo da base nessa direção.

O cálculo das dimensões da base com o robô posicionado dentro do aro câmara e entre as pás, como ilustrado na figura 3.35, depende do ângulo de ataque das pás.

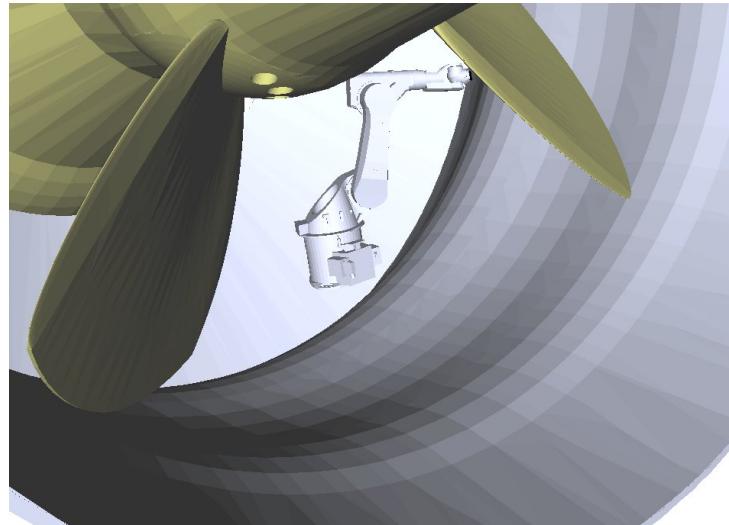


Figura 3.35: Exemplo de posicionamento de um manipulador robótico entre as pás.

A distância entre as pás pode ser calculada por meio do cálculo do ângulo diédrico entre elas. A amplitude do movimento de rotação *alpha* das pás é de  $14,5^\circ$  para cada lado a partir da posição zero, entretanto **essa posição não pode ser informada no momento**

**da viagem de reconhecimento e ainda não foi disponibilizada.** Para critério de cálculos foi utilizado um ângulo de  $45^\circ$  como a posição de maior abertura das pás e o zero foi considerado como a reta perpendicular ao fluxo de água. O ângulo diédrico  $\theta$  entre as pás depende do ângulo de ataque das pás e obedece a relação  $\cos \theta = \sin^2 \alpha$ .

O a distância entre as pás, considerada como o arco de circunferência no aro câmara descrito pelo ângulo diédrico calculado, pode ser obtido a partir da relação  $arc = R\alpha$ . Considerando o raio do aro do câmara como  $R=3850\text{mm}$ , o raio máximo da base pode ser calculado como

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

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

O peso mínimo que a base do robô deve possuir está diretamente relacionada com o tamanho de seu raio. A figura 3.36 faz uma representação simplificada da forma que o torque de capotamento máximo atua no robô e em sua base. Na situação limite, considerando um torque com sentido horário, a força normal entre a base e a superfície de apoio,  $N_2$ , teria módulo igual a zero. No pior caso, podemos considerar que a força vertical exercida pelo robô em sua base é composta apenas pelo seu peso  $W$  e, para que a base não se mova, o somatório das forças e torques devem ser iguais a zero.

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

$$M_k = Wr_b.$$

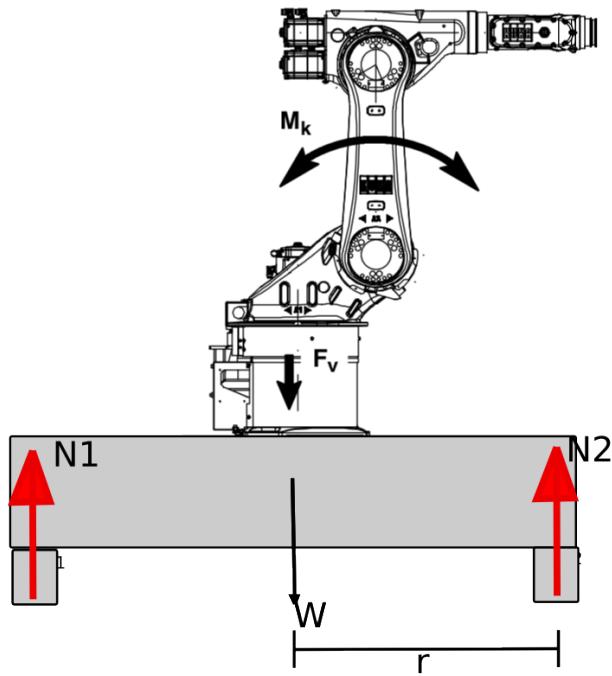


Figura 3.36: Forças e torques máximos entre o robô e sua base.

Uma vez que a superfície do aro câmara e a região adjacente no tubo de sucção são **ferromagnéticas**, é possível a utilização de bases magnéticas para uma compensação do peso e raio necessários para a estabilização do robô. Os dispositivos magnéticos se dispõem de duas em duas principais categorias para essa aplicação: dispositivos eletrromagnéticos e de imãs permanentes. O primeiro caso tem como principal vantagem a possibilidade de acionamento remoto, entretanto para situações de falha em que haja perda de fornecimento de energia, a força de atração também é perdida. O segundo caso consiste em imãs permanentes arrumados de maneira que seja possível organizar o seu fluxo magnético e, assim, controlar por meio de uma alavanca a presença ou ausência de força magnética. A figura 3.37 ilustra os dois tipos de bases magnéticas citados.

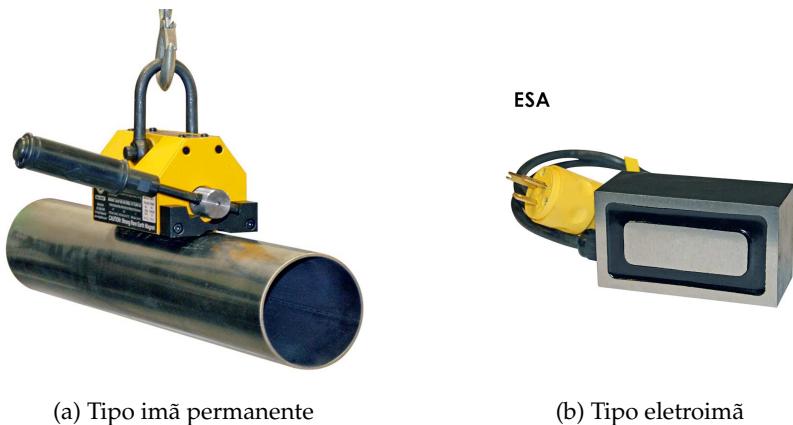


Figura 3.37: Tipos de bases magnéticas comerciais.

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

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **CAPÍTULO 4**

---

### **Estudo de viabilidade técnica**

---



## 4.1 Introdução

No capítulo 3, é apresentada a importância da manutenção regular das turbinas em uma usina hidrelétrica, já que, em sua operação ideal e de máxima eficiência, sua potência tem aumento de quase 46% após manutenção. Aumento significativo, principalmente para países dependentes desta forma de energia, como o Brasil e Noruega.

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

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

Apesar de o projeto visar uma solução genérica para turbinas bulbo, as instalações são diferentes em cada usina. Desta forma, o ambiente de testes deste projeto é a Usina Hidrelétrica de Jirau, localizada no Rio Madeira. O Rio Madeira carrega muitos sedimentos provocando maior abrasão nas pás, se comparado com outros usinas, além disso, a queda d'água de 2 a 20 metros intensifica o fenômeno de cavitação. As principais características das instalações da turbina em análise estão descritas em 3, mas vale ressaltar a particularidade dos dois acessos principais ao aro câmara, relevantes para a busca de uma solução: acesso superior (35.7 cm de diâmetro) e acesso inferior (80 cm de diâmetro).

O projeto EMMA busca uma solução para o processo de metalização *in situ*, isto é, revestimento das pás no ambiente da turbina, diminuindo o tempo de manutenção e, consequentemente, de máquina parada. A solução conceitual desenvolvida no capítulo 3 é a utilização de um manipulador industrial sobre uma base. As características do manipulador e da base variam de acordo com o acesso: no caso da escotilha superior, a solução é um manipulador industrial de pequeno porte e base customizada operada eletronicamente; no caso da escotilha inferior, a solução é um manipulador industrial de porte médio e base tipo trilho com acopladores magnéticos.

A análise das instalações da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, em Porto Velho, vizinha à Jirau, mostrou que as turbinas não possuem um acesso superior. A fim de

tentar construir uma solução mais geral, o presente documento visa dar continuidade ao projeto, detalhando o estudo de viabilidade técnica para a solução da escotilha inferior.

## 4.2 Estudo de viabilidade técnica detalhada

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

A pesquisa de mercado é uma busca abrangente de soluções comerciais dentro do escopo da solução conceitual desenvolvida em 3. A pesquisa envolve manipuladores comerciais que preencham os requisitos do processo de HVOF e estejam de acordo com as restrições impostas pelo ambiente e o acesso. Dessa forma, diversos fabricantes de manipuladores, Motoman, Kuka, ABB, Fanuc, Adept e Kinova, foram avaliados e suas principais características como carga, peso, dimensões, velocidade, temperatura e umidade de operação, são analisadas. A pesquisa de mercado tem como objetivo retornar o objeto para os outros estudos, ou seja, o manipulador a ser utilizado na solução.

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

O espaço de trabalho e cinemática do manipulador é uma abordagem detalhada e de simulação. Ela considera: o meio estruturado, em um ambiente de simulação; o manipulador com suas dimensões e limites de juntas reais; possibilidade de colisões; real espaço de trabalho do manipulador; modelos de bases para o manipulador; e possíveis sensores. Para a simulação é utilizada a plataforma Openrave, uma arquitetura de planejamento para robôs autônomos, sendo possivelmente integrada para controle em tempo real e monitoramento. Ela provê funcionalidades para operações de cinemática direta e inversa, e simulações físicas, e apresenta ferramentas e interfaces para planejamento de manipuladores e um protocolo que interpreta scripts na linguagem MatLab, Octave e Python [13].

Na seção de estudo da dinâmica de manipuladores robóticos, serão realizadas análises numéricas e analíticas, em um ambiente de simulação, de cinemática diferencial

e torques das juntas de manipuladores, utilizando as características do processo de revestimento. O estudo tem por objetivo tornar a simulação mais realista, analisar a execução do processo para algumas distâncias da pá e verificar a manipulabilidade do robô.

A base mecânica é definida como a estrutura de suporte e transporte do robô. Esta deve permitir ao manipulador alcançar os posicionamentos necessários, definidos nos estudos cinemáticos e dinâmicos. Para que estes posicionamentos sejam alcançados, a base mecânica oferece graus de liberdade ao sistema base e robô, adequados para levar a base do robô aos pontos ótimos para o revestimento de uma região da pá. Como principais diretrizes para o projeto da base mecânica, são considerados: a resistência aos esforços dinâmicos do manipulador; baixas vibrações; modularidade; e facilidade de transporte, montagem e ajuste. O estudo dos conceitos analisados para a base mecânica serão demonstrados em detalhe na seção 4.2.5.

As características e desafios logísticos da escotilha inferior já foram previamente apresentados em 3, sendo aqui apontadas, na tabela 4.1, apenas as suas principais características para o desenvolvimento de uma solução detalhada.

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

Tabela 4.1: Dados principais da escotilha inferior

#### 4.2.1 Pesquisa de mercado

A pesquisa de mercado está detalhadamente explicada na tabela A.1, no apêndice. Os seguintes robôs satisfazem os requerimentos e restrições principais, de acordo com as tabelas 4.1 e 3.1, e os requisitos abordados em 3.2.3: Viper s1300 (Adept), ARC Mate 100iC/12 (Fanuc), M-10iA/12S (Fanuc), LBR iiwa 14 R820 (Kuka), KR 10 R1100 sixx WP (Kuka), MH6F-10 (Motoman), SIA10F (Motoman), MH12 (Motoman), SIA20D (Motoman). Destes, os manipuladores LBR iiwa 14 R820 (Kuka) e Viper s1300 (Adept) deverão passar por adaptações para operar em temperaturas até 40°C e umidade relativa no ar de 91%; e os manipuladores KR 10 R1100 sixx WP (Kuka), MH6F-10 (Motoman) e SIA10F (Motoman) têm carga máxima de 10 Kg, que é o limite para o processo.

Dessa forma, os manipuladores comerciais prontos para o uso e que trabalha com folga em carga são: ARC Mate 100iC/12 (Fanuc), M-10iA/12S (Fanuc), MH12 (Motoman) e SIA20D (Motoman).

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

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

#### 4.2.2 Estudo puramente geométrico

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

Primeiramente, o espaço de trabalho do manipulador é aproximado como uma esfera, delimitada pelo espaço de trabalho real do manipulador. A pá é projetada em planos, como mostra a figura 4.1, e, conforme o manipulador se aproxima da pá, o plano direito corta a esfera (espaço de trabalho do manipulador), FIGURA. A interseção entre o plano e a esfera é um círculo de raio  $\overline{CB^i}$ , que pode ser calculado e estimado como a área revestida da pá. A distância ótima entre o manipulador e a pá é calculada no limite em que o ângulo  $\overline{OB^iC} = 30^\circ$ . Finalmente, podem ser calculadas quantas posições distintas o manipulador deve assumir para que toda a pá seja revestida, a partir do modelo planar da pá e da turbina, figura 4.2.

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

**KR 10 R1100 sixx WP (Kuka)** A figura 4.3 ilustra a interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Kuka KR10 e a projeção da pá. No caso do Kuka KR 10 R1100, o raio da esfera é aproximado a  $\overline{OB^i} =$  alcance do manipulador + comprimento

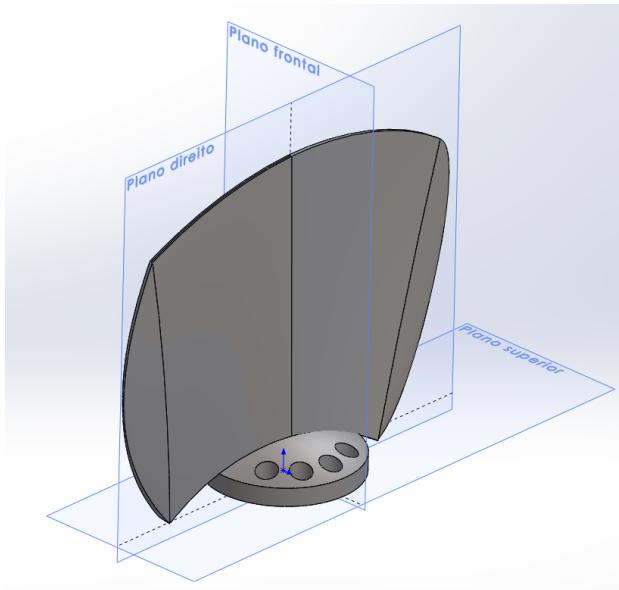


Figura 4.1: Ilustração das projeções da pá em planos.

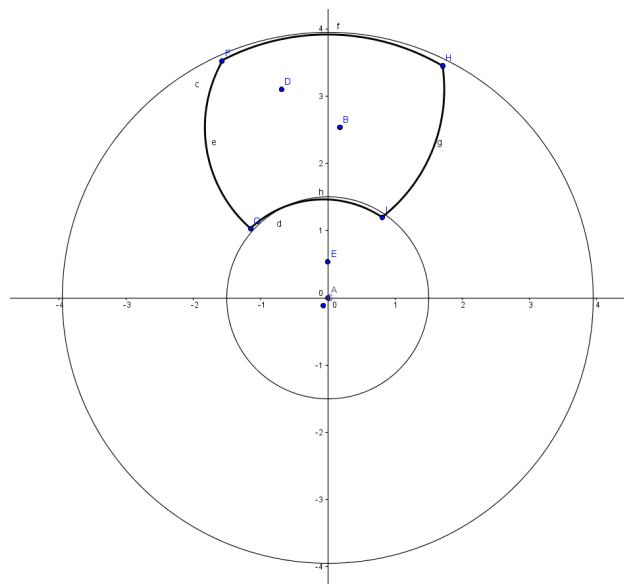


Figura 4.2: Ilustração do modelo 2D da pá.

da pistola + 230 mm =.

Para este manipulador, obtemos área revestida de  $1.41^2 \pi m^2$  e distância ótima manipulador-pá de 0.82m. Dessa forma, são necessárias, pelo menos, quatro posições distintas do manipulador a fim de toda a pá ser revestida. A figura 4.4 ilustra os pontos que o manip-

ulador deve assumir para revestir toda a pás.

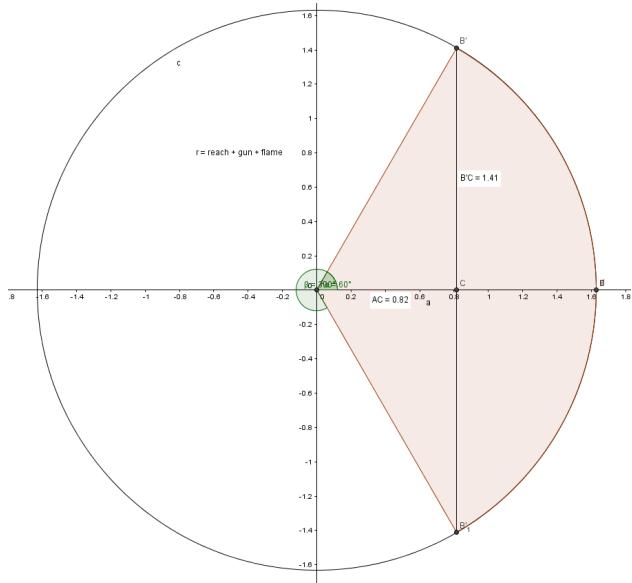


Figura 4.3: Ilustração da interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Kuka KR10 e a projeção da pá.

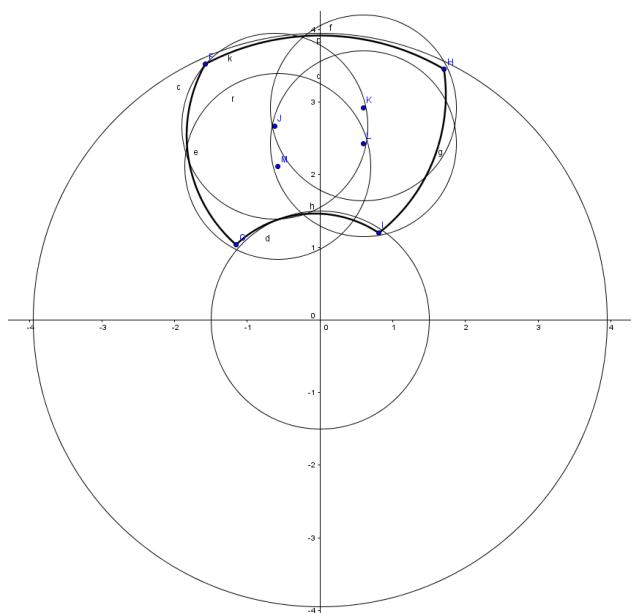


Figura 4.4: Posições do manipulador Kuka KR10 para o processo de revestimento ser realizado em toda a pá.

**MH12 (Motoman)** A figura 4.5 ilustra a interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador MH12 e a projeção da pá. No caso do MH12, o raio da esfera é aproximado a  $\overline{OB^i} = \text{alcance do manipulador} + \text{comprimento da pistola} + 230 \text{ mm} =$ .

Para este manipulador, obtemos área revestida de  $1.54^2 \pi m^2$  e distância ótima manipulador-pá de  $0.89m$ . Dessa forma, são necessárias, pelo menos, duas posições distintas do manipulador a fim de toda a pá ser revestida. A figura 4.6 ilustra os pontos que o manipulador deve assumir para revestir toda a pá.

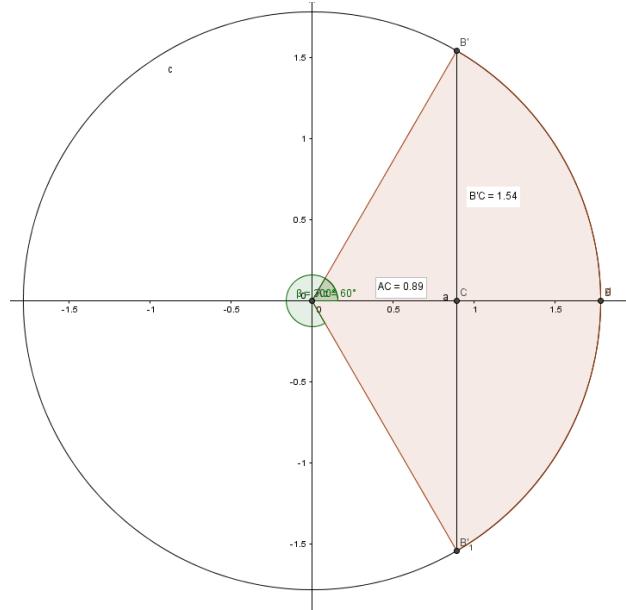


Figura 4.5: Ilustração da interseção do espaço de trabalho simplificado do manipulador Motoman MH12 e a projeção da pá.

### 4.2.3 Espaço de trabalho e cinemática do manipulador

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

Para gerar o espaço de trabalho, o Openrave utiliza um método de força bruta, onde são executadas iterações sob iterações de todas as juntas, por seus ângulos limites e com o passo de ângulo dependendo da resolução do manipulador. O grau de manipula-

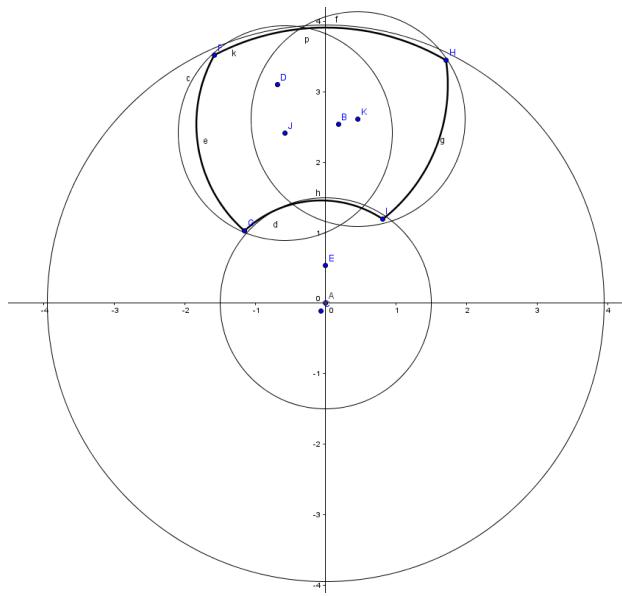


Figura 4.6: Posições do manipulador MH12 para o processo de revestimento ser realizado em toda a pá.

bilidade do robô é representado por um gradiente de cores, cujo grau varia do azul claro (menor manipulabilidade) ao vermelho escuro (maior manipulabilidade). Entende-se por manipulabilidade a capacidade que o robô possui de manipular objetos em direções específicas, isto é, para uma posição específica é possível alcançar variadas orientações. Em todas as simulações, a pistola foi representada como um cilindro de comprimento 300 mm e raio 50 mm, e o efetuador está no extremo do cilindro.

A superfície da pá é amostrada, formando uma grade de tamanho fixo. A técnica *axis-aligned bounding box* (*AABB*) é utilizada para obter os pontos e suas respectivas normais, na superfície da pá. Nesta técnica, a superfície alvo é inscrita em um bloco, que é uniformemente amostrado. É, então, realizada uma verificação de colisão entre os pontos amostrados no bloco e a superfície alvo e, caso haja interseção, o ponto é armazenado junto com sua normal à superfície. Dessa forma, podemos amostrar a pá e deslocar estes pontos 230 mm em relação à sua normal com a superfície, garantindo a requerimento do revestimento. A representação dos pontos amostrados e deslocados em relação às normais da pá podem estar nas figuras 4.7 e 4.8.

Utilizando as informações dos pontos amostrados e o espaço de trabalho do manipulador, foram gerados scripts para calcular a melhor distância do manipulador em

relação a pá, de forma que o maior número de pontos revestidos com angulação de  $90^{\circ}$  fossem cobertos. Essa distância é calculada em relação à normal da pá. Com esse dado, é possível estimar quantas posições da base do manipulador serão necessários para o revestimento de toda a pá.

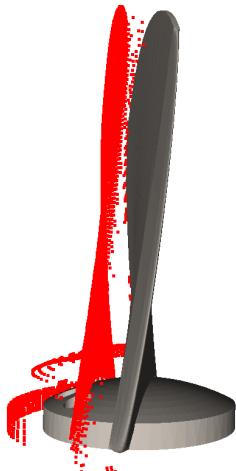


Figura 4.7: Pontos amostrados da pá - vista lateral

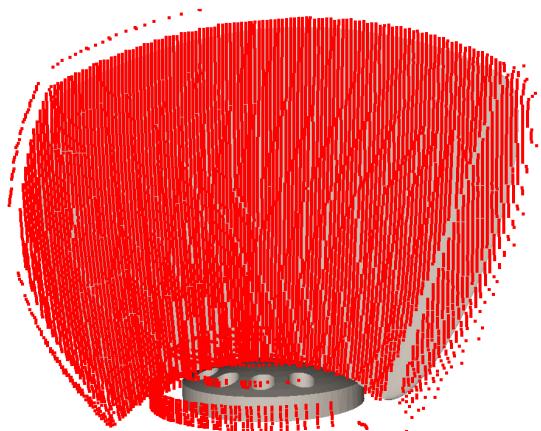


Figura 4.8: Pontos amostrados da pá - vista frontal

As tabelas 4.2 e 4.2 abaixo resumem as características de cada robô e o estudo cinemático realizado, respectivamente:

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

Tabela 4.2: Características principais dos robôs.

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

Tabela 4.3: Resumo do estudo cinemático.

**KR 10 R1100 sixx WP (Kuka)** A figura 4.9 e figura 4.10 mostram as vistas lateral e superior do espaço de trabalho do manipulador, respectivamente. Em vermelho, estão representados os pontos a serem revestidos e em preto os pontos que o manipulador foi capaz de revestir.

O script que calcula a melhor posição da base em relação à pá retornou a posição 870 mm, sendo que 3825 pontos foram revestidos, representando 24.33% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 13 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 4.11.

**MH12 (Motoman)** A figura 4.12 e figura 4.13 mostram as vistas lateral e superior do espaço de trabalho do manipulador, respectivamente.

O script que calcula a melhor posição da base em relação à pá retornou a posição 950 mm, sendo que 8379 pontos foram revestidos, representando 53.30% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 4 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 4.14.



Figura 4.9: Espaço de trabalho do manipulador Kuka KR10 - vista lateral

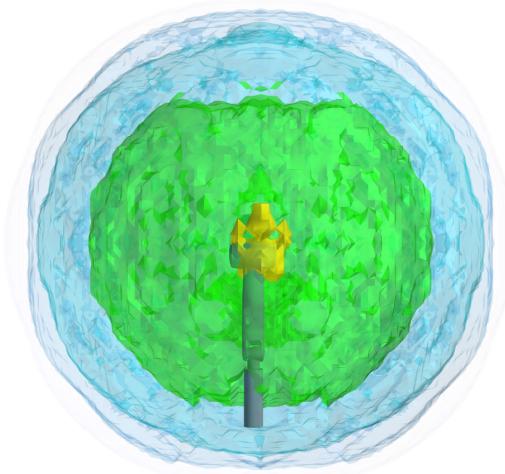


Figura 4.10: Espaço de trabalho do manipulador Kuka KR10 - vista superior

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

O script que calcula a melhor posição da base na posição vertical em relação à p

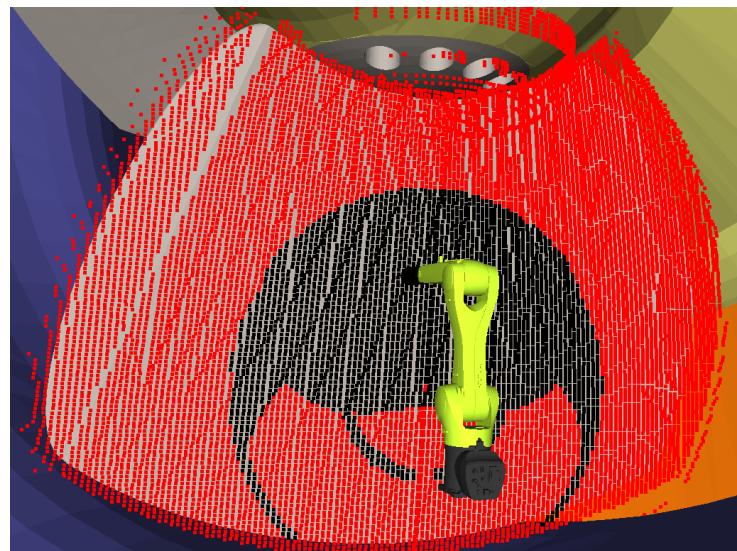


Figura 4.11: Melhor posição para o revestimento - robô KR10 da Kuka.

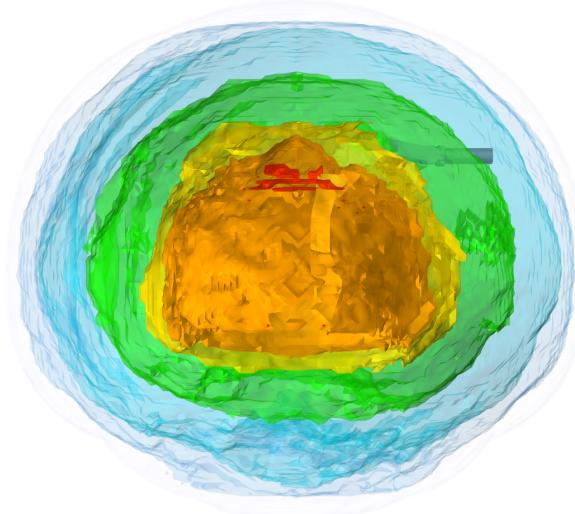


Figura 4.12: Espaço de trabalho do manipulador MH12 - vista lateral

retornou a posição 1.06, sendo que 2648 pontos foram revestidos, representando 17.20% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 13 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 4.15.

O script que calcula a melhor posição da base na posição vertical em relação à pá retornou a posição 1400 mm, sendo que 2730 pontos foram revestidos, representando

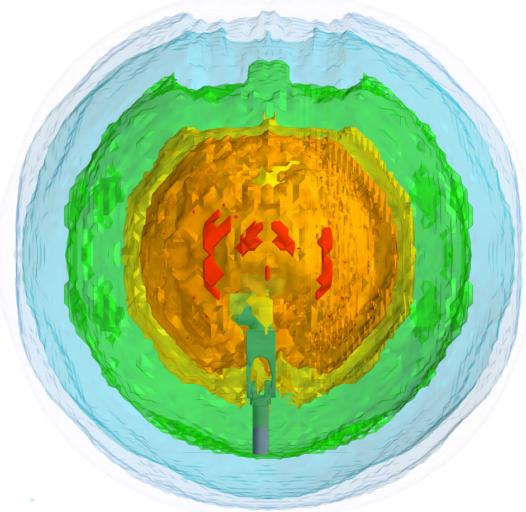


Figura 4.13: Espaço de trabalho do manipulador MH12 - vista superior

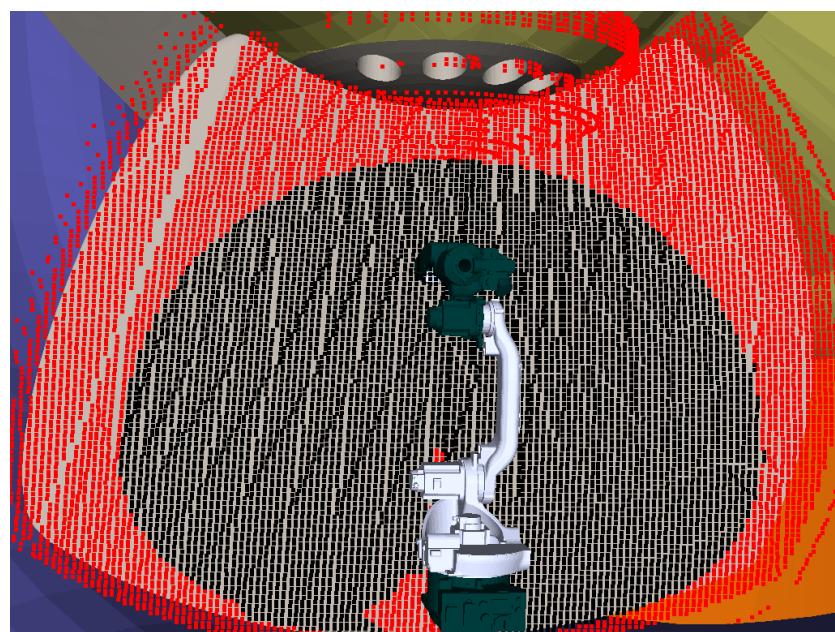


Figura 4.14: Melhor posição para o revestimento - robô MH12 da Motoman.

17.37% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 13 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 4.16.

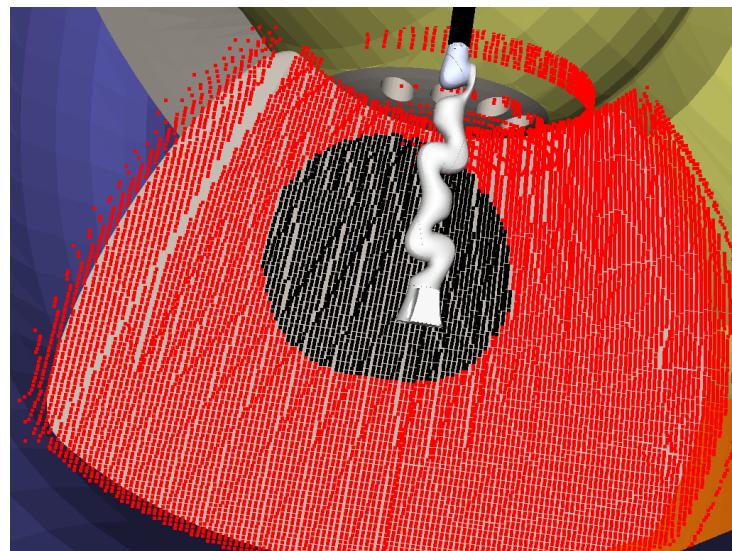


Figura 4.15: Melhor posição para o revestimento - robô LBR da Kuka com base na posição vertical.

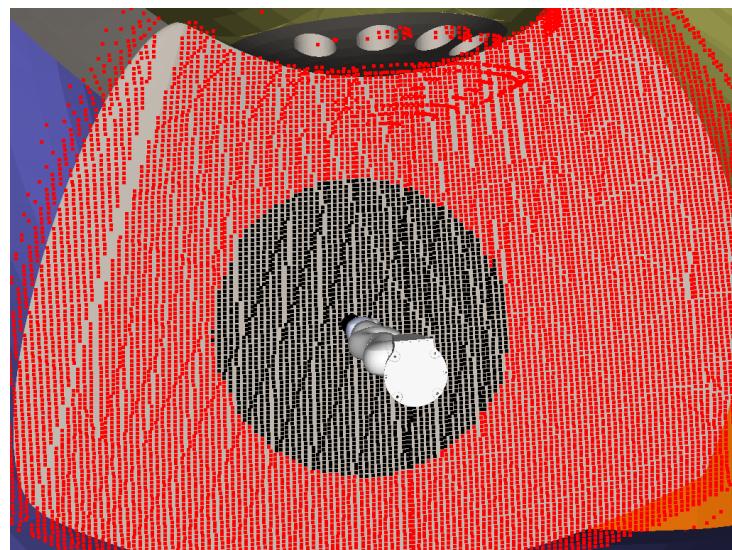


Figura 4.16: Melhor posição para o revestimento - robô LBR da Kuka com base na posição horizontal.

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

O script que calcula a melhor posição da base na posição vertical em relação à pá retornou a posição 1100 mm, sendo que 3638 pontos foram revestidos, representando 23.14% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 9 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 4.17.

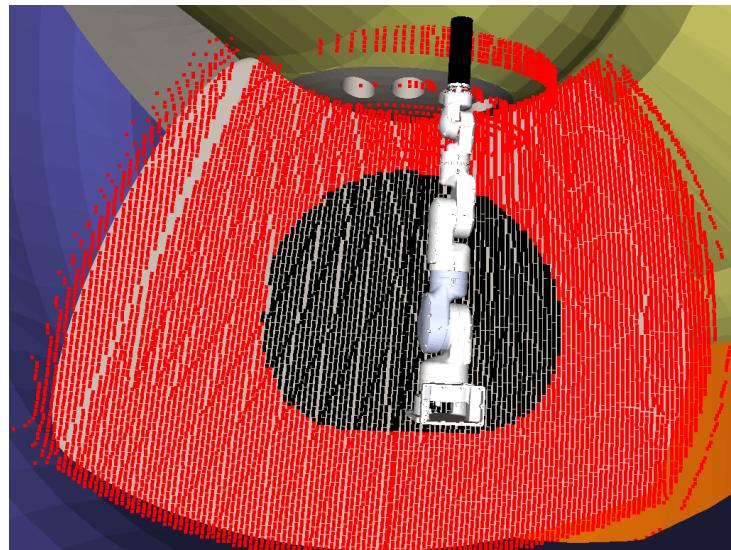


Figura 4.17: Melhor posição para o revestimento - robô SIA20D da Motoman com base na posição vertical.

O script que calcula a melhor posição da base na posição horizontal em relação à pá retornou a posição 1510 mm, sendo que 3892 pontos foram revestidos, representando 24.76% de toda a pá. Estima-se que serão necessários, pelo menos, 9 posições para o recobrimento de toda a pá, figura 4.18.

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

Primeiramente, são armazenados os pontos que o robô não foi capaz de revestir

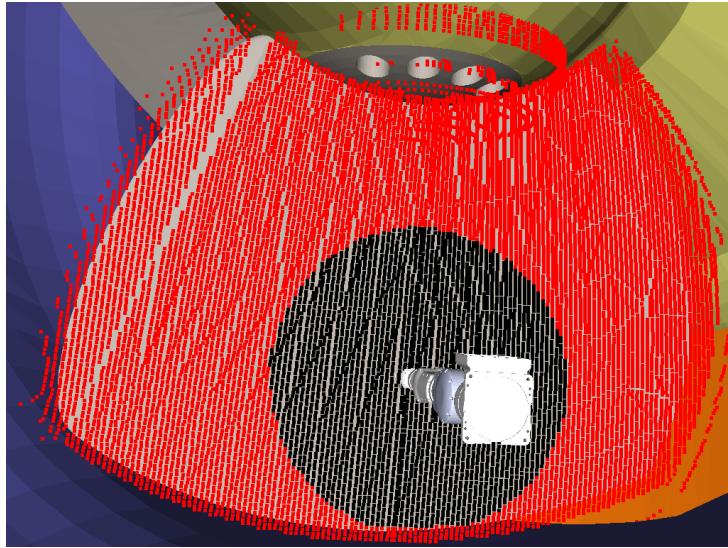


Figura 4.18: Melhor posição para o revestimento - robô SIA20D da Motoman com base na posição horizontal.

(pontos em vermelho, nas figuras de espaço de trabalho dos manipuladores) e suas respectivas normais aos planos tangentes à superfície da pá. Os pontos são deslocados 230 mm na mesma direção e sentido oposto às suas respectivas normais, de forma que pertençam à superfície da pá, ponto  $D$  é deslocado até ponto  $C$  na figura 4.19. Para cada ponto não revestido, são gerados dois vetores unitários  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  ortogonais entre si e ao vetor normal  $\vec{N}$ , no plano tangente à superfície da pá, conforme ilustrado na figura 4.20. O vetor  $\vec{N}$  é girado pelo ângulo de tolerância de revestimento  $\theta$  (entre  $0^\circ$  e  $60^\circ$ ) em relação ao vetor  $\vec{w}$ , gerando o vetor  $\vec{P}_1$ , figura 4.21.

Finalmente, o vetor  $\vec{P}_1$  pode ser girado em relação a  $\vec{N}$  e todos os vetores que pertencem à tolerância de revestimento  $\theta$  saem do ponto  $C$  até um ponto do círculo  $h$ , como o vetor exemplo  $\vec{P}_2$ , na figura 4.22. Observe que este círculo deve ser discretizado, e cada ponto pertencente ao círculo e sua respectiva normal (vetor de origem  $C$  ao ponto do círculo) devem ser reavaliados, isto é, verifica-se se o robô alcança o ponto pertencente a  $h$  com pistola de revestimento apontada a sua respectiva normal. Se algum ponto do círculo puder ser revestido, o ponto  $D$  pode ser considerado como revestido. No exemplo da figura 4.22, o círculo  $h$  foi discretizado em dois pontos  $G$  e  $H$ , e suas normais são  $\vec{P}_1$  e  $\vec{P}_2$ , respectivamente.

Foram realizadas análises de tolerância para dois robôs: MH12, que apresentou o

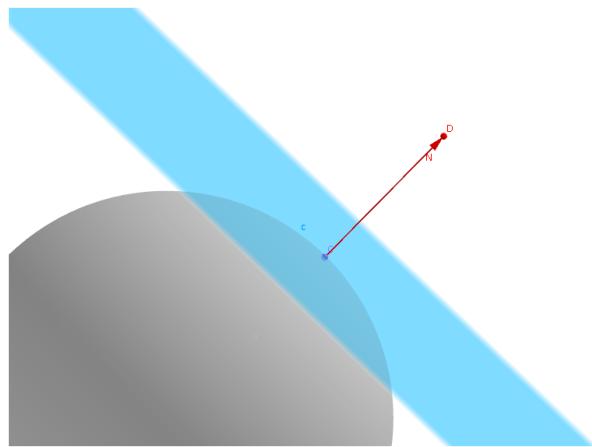


Figura 4.19: Ponto D não revestido, deslocado 230 mm da superfície da pá.

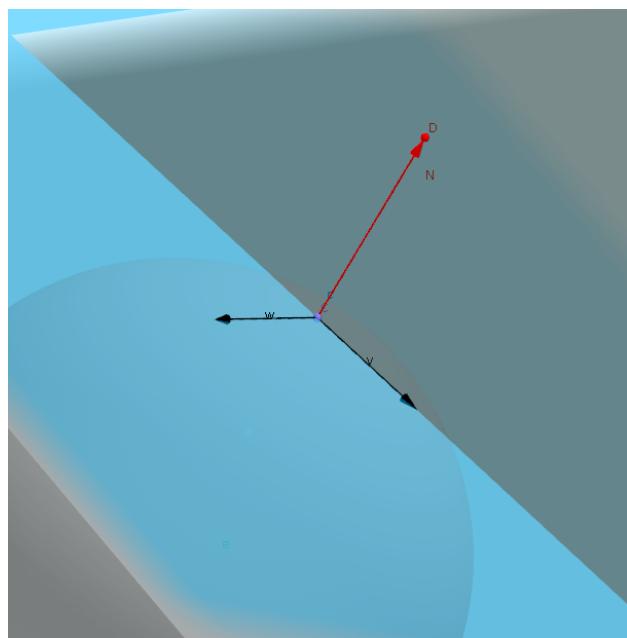


Figura 4.20: Vetores  $v$  e  $w$  ortogonais ao vetor normal  $N$ .

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

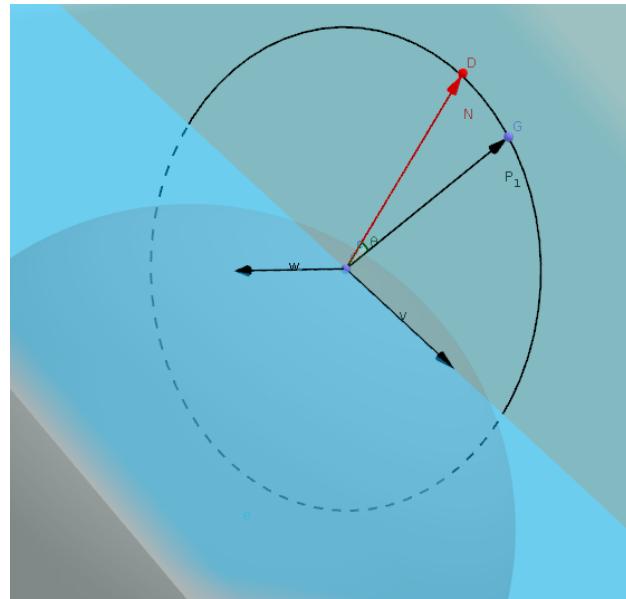


Figura 4.21: Vettor  $N$  girado pelo ângulo de tolerância de revestimento.

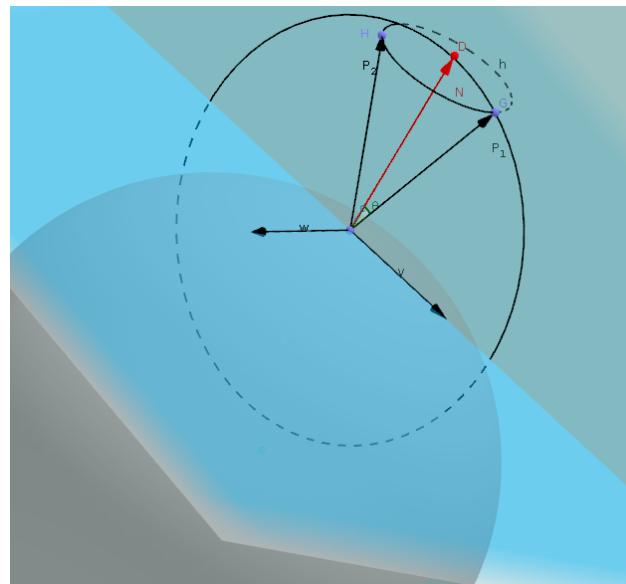


Figura 4.22: Circulo  $h$  representa todos os pontos equivalentes ao ponto  $D$  com ângulo de tolerância de revestimento  $\theta$ .

#### 4.2.4 Dinâmica do manipulador

A dinâmica de um manipulador robótico é a análise de velocidades, acelerações e torques das juntas. Para esta análise, assume-se que o efetuador, pistola de revestimento, pos-

sui velocidade 40m/min constante em todos os pontos amostrados da pá. Como velocidades e acelerações exigem a computação de derivadas, é realizada uma melhor discretização da pá da turbina, na qual o passo de amostragem é menor e um filtro garante espaçamento uniforme dos pontos de 10 mm. Para um lado da pá, são amostrados, portanto, 130 mil pontos.

Para cada ponto amostrado da pá, faz-se a análise cinemática e são armazenados os pontos que são possíveis de serem revestidos, como na seção 4.2.3, isto é, são armazenados os pontos que possuem solução de cinemática inversa. Posteriormente, para cada ponto revestido, é criado um conjunto contendo seus 8 pontos vizinhos através de um algoritmo k-d tree, como na figura 4.23, onde  $p_r$  é o ponto de referência a ser analisado dinamicamente e os pontos  $p_1, p_2, q_1, q_2, r_1, r_2, s_1, s_2$  são auxiliares para o estudo.

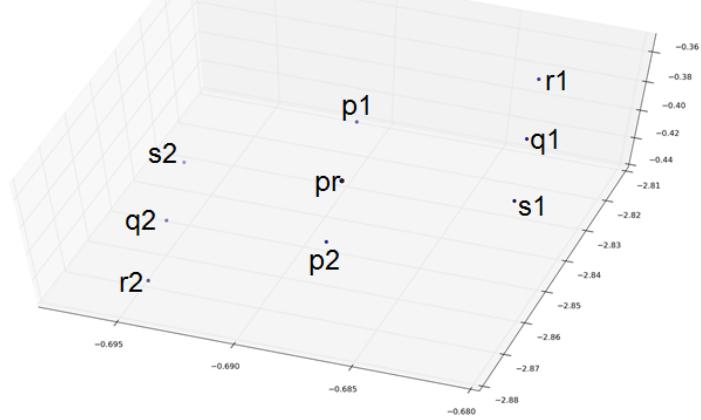


Figura 4.23: Pontos exemplo amostrados da pá.

As velocidades angulares das juntas são calculadas a partir da cinemática diferencial. Para isso, usa-se o cálculo da matriz jacobiana ( $J$ ), que é a diferenciação (derivadas parciais) da matriz de cinemática direta em função das variáveis de junta [38]. A velocidade linear do efetuador ( $\dot{X}$ ) e o jacobiano são conhecidos em cada ponto de referência, logo podem-se calcular as velocidades das juntas do manipulador entre o ponto de referência e cada ponto auxiliar:  $\dot{X} = J\dot{q} \Rightarrow J^+ \dot{X} = \dot{q}$ , onde  $J^+$  é a pseudo inversa Moore-Penrose de  $J$ .

As velocidades angulares são  $\Omega_r = \{\omega_{pr,p_1}, \omega_{pr,p_2}, \omega_{pr,q_1}, \omega_{pr,q_2}, \omega_{pr,r_1}, \omega_{pr,r_2}, \omega_{pr,s_1}, \omega_{pr,s_2}\}$ , onde  $\omega, \dot{\omega} \in \Omega_r$ , é um vetor  $n \times 1$ , e  $n$  é o número de juntas do robô. As velocidades dos ângulos das juntas é uma informação importate para a verificação da viabilidade das tra-

jetórias do robô. Para o caso do robô MH12, onde  $\omega_{\max} = \{220, 200, 220, 410, 410, 610\}^{\circ}/s$ , por exemplo, caso não haja  $\omega \in \Omega_r$ , tal que  $\omega \leq \omega_{\max}$ , não é possível realizar o revestimento do ponto de referência  $p_r$ . Se  $\exists \omega \in \Omega_r$ , tal que  $\omega \leq \omega_{\max}$ , o ponto de referência é viável pela cinemática inversa e pela cinemática diferencial, mas pode ser inviável ainda pela análise dinâmica, que considera as acelerações, massas e forças do conjunto.

As equações dinâmicas de um manipulador são também abordados em [38] e possuem duas abordagens bem conhecidas na literatura: equações de Newton-Euler e equações de Lagrange. O ambiente OpenRave utiliza o método de Newton-Euler para computar os torques das juntas (dinâmica inversa):  $\tau = M(q)\alpha + C(q, \omega)\omega + G(q)$ , onde  $\tau$  é o vetor de torques das juntas,  $M$  matriz de massas e momentos de inércia,  $\alpha$  é acelerações das juntas,  $C$  matriz de Coriolis,  $\omega$  é as velocidades das juntas e  $G$  o vetor de gravidade.

Para a formação da matriz  $M$ , é necessária a estimativa de parâmetros do manipulador. A estimativa dos parâmetros pode ser realizada de maneira iterativa, isto é, aplicam-se torques nas juntas e, pela resposta do manipulador, estima-se a matriz [39]; ou pelo CAD do manipulador, por exemplo, pela utilização da ferramenta SolidWorks. Foi utilizado o método de estimativa pelo CAD do manipulador, visto que os manipuladores ainda estavam em estudo e não foram adquiridos, além disso houve facilidade de aproximar os parâmetros já que o CAD fornecido pelo fabricante é bem detalhado.

A aceleração angular,  $\alpha$ , é necessária para a computação dos torques,  $\tau$ . O método analítico para cálculo da aceleração angular das juntas é através da derivada da equação da cinemática diferencial:  $\ddot{X} = \dot{q}^T H \dot{q} + J \ddot{q} \Rightarrow \ddot{q} = J^+ (\ddot{X} - \dot{q}^T H \dot{q})$  ou  $\alpha = J^+ (a - \omega^T H \omega)$ , onde  $H$  é a matriz Hessiana, isto é, derivada parcial da matriz jacobiana  $J$  [22].

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

As figuras 4.24, 4.25 e 4.26 representam a evolução das análises do manipulador,

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

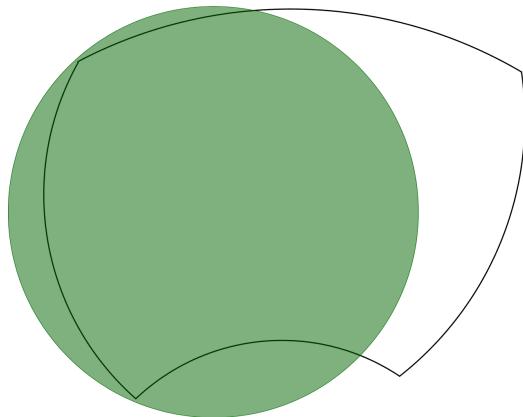


Figura 4.24: Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem puramente geométrica.

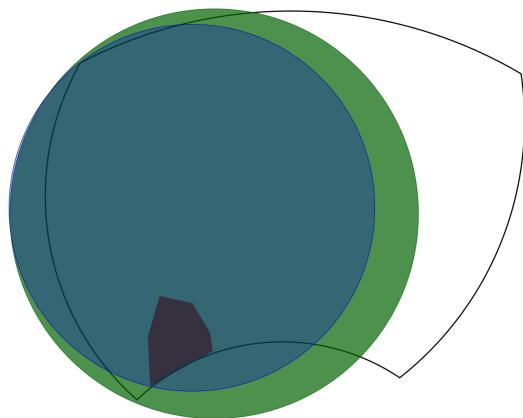


Figura 4.25: Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem puramente cinemática.

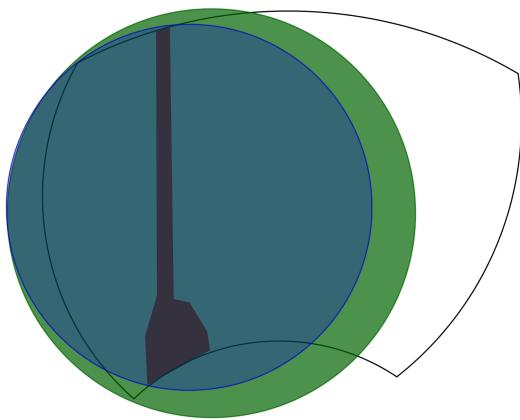


Figura 4.26: Área em verde representa a cobertura do revestimento executada pelo manipulador, utilizando a abordagem dinâmica.

#### 4.2.5 Detalhamento da Base Mecânica

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

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

Os graus de liberdade são fornecidos através de combinações de juntas prismáticas e rotacionais, que no nosso caso irão permitir o movimento do robô desde a escotilha

inferior até o ponto de interesse, tanto para o início do processo de revestimento em uma região da peça, como para a movimentação de precisão para a região seguinte. Investigou-se primeiramente alguns conceitos baseados nos graus de liberdade necessários para fornecer à base do robô todos os posicionamentos necessários, de acordo com os estudos cinemáticos e dinâmicos descritos nas seções 4.2.3 e 4.2.4. Estes conceitos serão apresentados em detalhe na seção 4.2.5.1.

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

#### 4.2.5.1 Conceitos de base mecânica

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

- **Base Prismática-Rotacional-Rotacional (P-R-R):**

Neste conceito estudou-se a possibilidade de utilizar uma base com 3 graus de liberdade: um prismático e dois rotacionais. O prismático seria composto por um trilho alinhado e paralelo ao eixo da turbina que transportaria o robô até a região próxima a pá. Uma junta rotacional e com eixo vertical orientaria a base nesta direção e uma junta perpendicular à primeira faria o posicionamento da base do robô para então iniciar o processo de revestimento. A figura 4.27 ilustra este conceito.

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

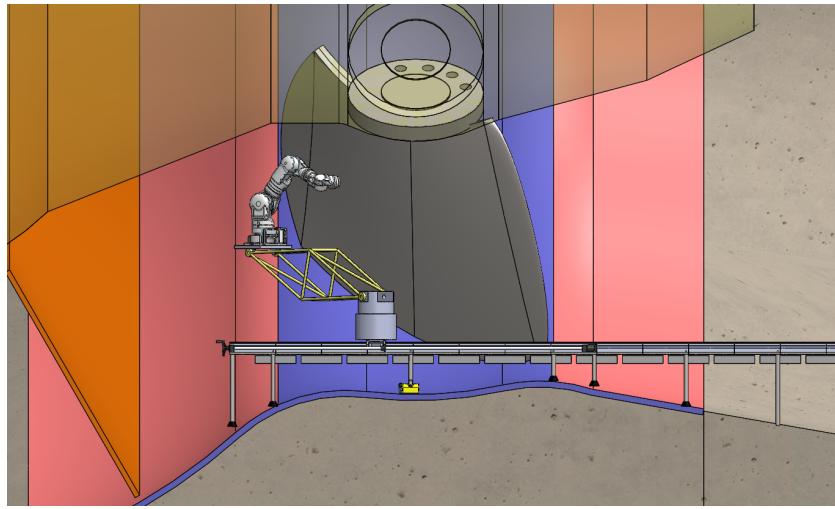


Figura 4.27: Base Primático-Rotacional-Rotacional

nipulador escolhido.

- **Base Prismática (P):**

Este conceito consiste de um trilho (junta prismática) para o transporte do manipulador desde a escotilha até o ponto de interesse para revestimento na face anterior ou posterior da pá. Quando posicionado, remove-se a seção do trilho na direção que obstrui a rotação do rotor. Neste conceito, adiciona-se um grau de liberdade ao sistema utilizando a própria rotação do rotor, posicionando a pá em relação ao robô. A base mecânica então forneceria apenas movimento no trilho na direção do eixo da turbina, deixando fixas as outras direções. O procedimento para o revestimento seria o posicionamento do rotor, deixando a região a ser processada ao alcance do manipulador; o posicionamento do robô no trilho, em relação a pá; a ancoragem do robô no ambiente; e o revestimento da região possível para aquela posição. Repete-se então este procedimento até ter toda a face processada e posicionase a próxima pá para revestimento, sem necessidade de mover ou desmontar a base do robô até todas as faces daquele lado estarem completas. A figura 4.28 ilustra este conceito.

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

A análise cinemática também demonstrou que seriam necessárias muitas posições

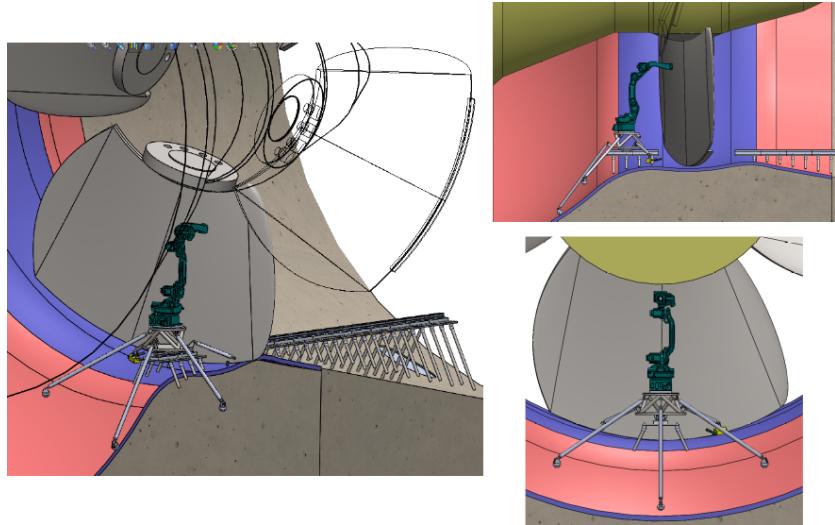


Figura 4.28: Base Prismática

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

- **Base Prismática-Rotacional-Prismática (P-R-P):**

Este conceito consiste de uma base composta por um trilho primário (junta prismática 1), uma plataforma de base pivotada por mancal e rolamentos entre o trilho primário e secundário (junta rotacional) e um trilho secundário (junta prismática 2). Montado o trilho primário alinhado ao eixo da turbina a base rotacional sobre o trilho primário, fixa-se o robô sobre a base rotacional. Esta base permitirá a montagem do trilho secundário apenas quando o robô atingir a região de interesse para revestimento. Quando posicionado o manipulador, monta-se então o trilho secundário alinhado ao plano paralelo a face da pá e ancora-se a base no ambiente. Desta forma, o robô pode-se movimentar ao longo de toda a extensão da pá por meio do trilho secundário e também se aproximar e se afastar da superfície da pá, por meio do trilho primário. A figura 4.29 ilustra este conceito.

Desta forma, o rotor deve estar girado em, no mínimo  $30^\circ$  para não haver contato com o trilho primário. A análise cinemática será realizada para encontrar a melhor

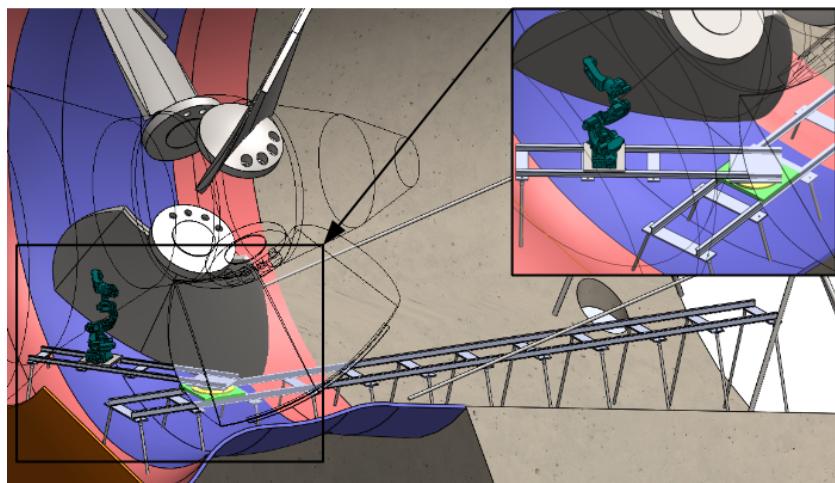


Figura 4.29: Base Primática-Rotacional-Prismática

configuração de juntas da base que permite ao robô se movimentar nos graus de liberdade da base, sem alterar o posicionamento do rotor e, assim, cobrir uma face inteira da pás. Para a repetição do processo nas outras pás do lado da sucção da turbina, é necessária a desmontagem do trilho secundário, o recuo do robô e desmontagem de parte do trilho primário, permitindo o giro do rotor para a pás seguinte. Para as faces do lado de adução, não é necessária a desmontagem parcial do trilho primário.

#### 4.2.5.2 Sistemas de elevação, fixação e ancoragem

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

A entrada de pessoal através da escotilha é feita por uma escada vertical com guarda-corpo. Equipamentos de segurança como cinto e talabarte devem ser usados

para qualquer um que deseja entrar no ambiente confinado da turbina através da escada e isso impossibilita o transporte manual dos equipamentos. Por este motivo, deve ser instalada uma estrutura com talha que permita a elevação até o interior da turbina e movimentação para a áera de montagem adequada. As figuras 4.30 e 4.31 ilustram a estrutura de elevação com talha e carro trole.

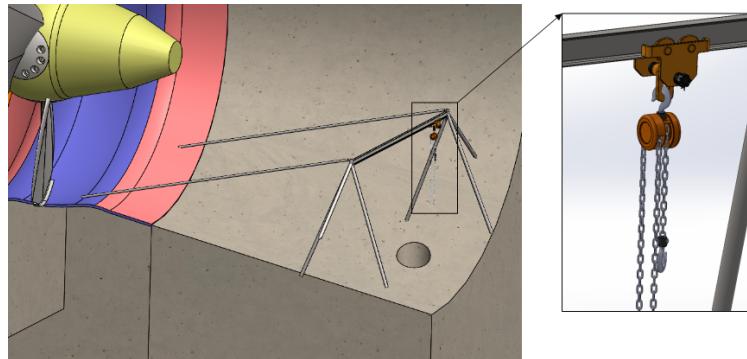


Figura 4.30: Sistema de elevação dos equipamentos

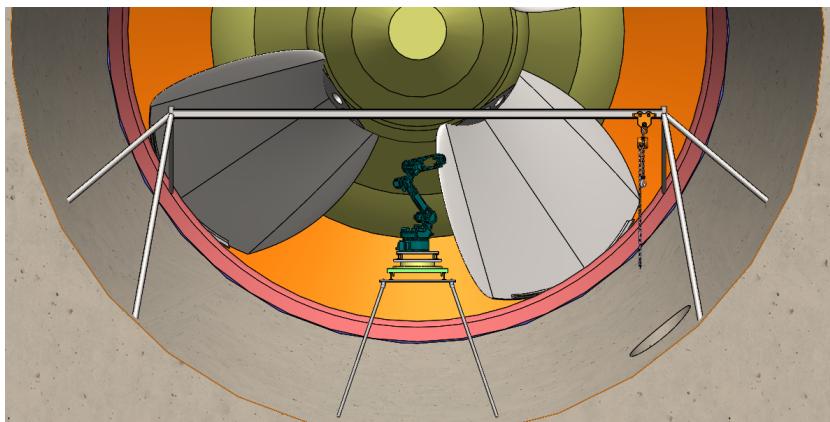


Figura 4.31: Visão frontal da talha e trilho

Devido aos esforços dinâmicos de operação do robô, a fixação da estrutura da base mecânica no ambiente deve ser dimensionada com cuidado. Por se tratar de um ambiente de escoamento de fluido sob pressão, não são admitidas modificações permanentes de infra-estrutura no interior da turbina, logo, qualquer método de fixação utilizado deve ser removível, sem causar nenhum dano à qualquer superfície. Em visita técnica realizada em Outubro de 2015 foi testada a viabilidade de utilização de bases magnéticas para

o sistema de ancoragem e fixação. Este teste teve o objetivo de verificar a real carga limite de tração do imã, considerando o ambiente (geometria), materiais e acabamentos superficiais reais a que estará submetido na solução final. O resultado detalhado do teste encontra-se no Apêndice ??.

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

#### 4.2.6 Shutter

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

A ideia inicialmente estudada foi de uma barreira (*shutter*) ao fluxo na saída da pistola. A figura 4.32 ilustra a ideia para dois conceitos nas configurações aberta e fechada. Nestes conceitos, uma barreira é movimentada automaticamente sempre que houver mudança de direção da pistola, impedindo que o fluxo de material atinja a pistola.

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

Outra proposta que está sendo estudada é a de modificar o fluxo da linha de revestimento. A ideia é a inclusão de uma válvula direcional com atuação por solenóide para desviar o fluxo do material de revestimento para um tanque ou cilindro de retorno. Esta atuação deve ser autônoma e coordenada com a trajetória do manipulador. A válvula se-

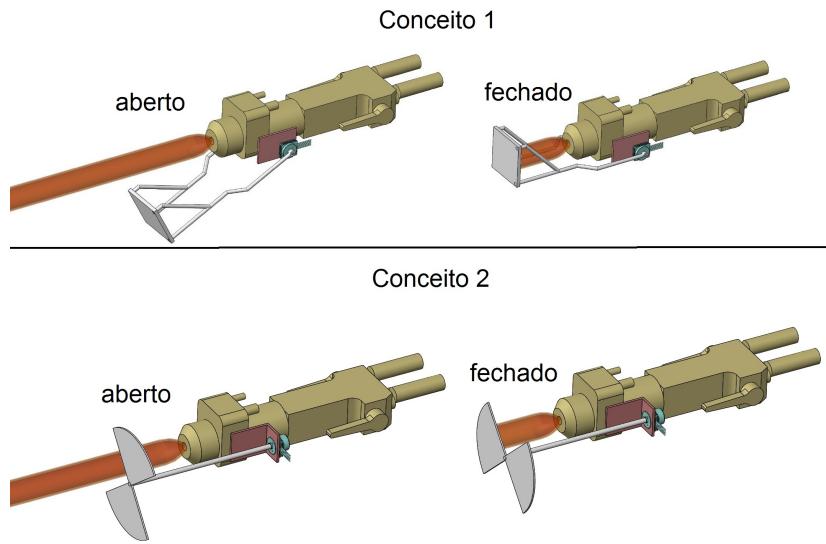


Figura 4.32: Conceitos de *shutter* avaliados

ria de três vias e duas posições (3/2) tal que, no repouso, direciona-se o fluxo diretamente para a pistola e, quando atuada, bloqueia-se o fluxo para a pistola e abre-se o fluxo para exaustão. Uma válvula limitadora de pressão regulável seria utilizada na linha de exaustão para igualar as diferenças de pressão entre as duas vias, minimizando efeitos transitórios. Outra característica opcional importante para redução dos efeitos transitórios, como pico de pressão, é a de sobreposição aberta, ou seja, o fluxo só seria fechado da posição inicial quando o movimento de troca estivesse completo. A figura 4.33 apresenta o circuito do processo HVOF de forma simplificada.

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

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

### 4.3 Calibração

O processo de metalização utilizado atualmente considera que a posição e orientação da pá é fixa em relação ao robô e, uma vez, que corretamente posicionado, o processo

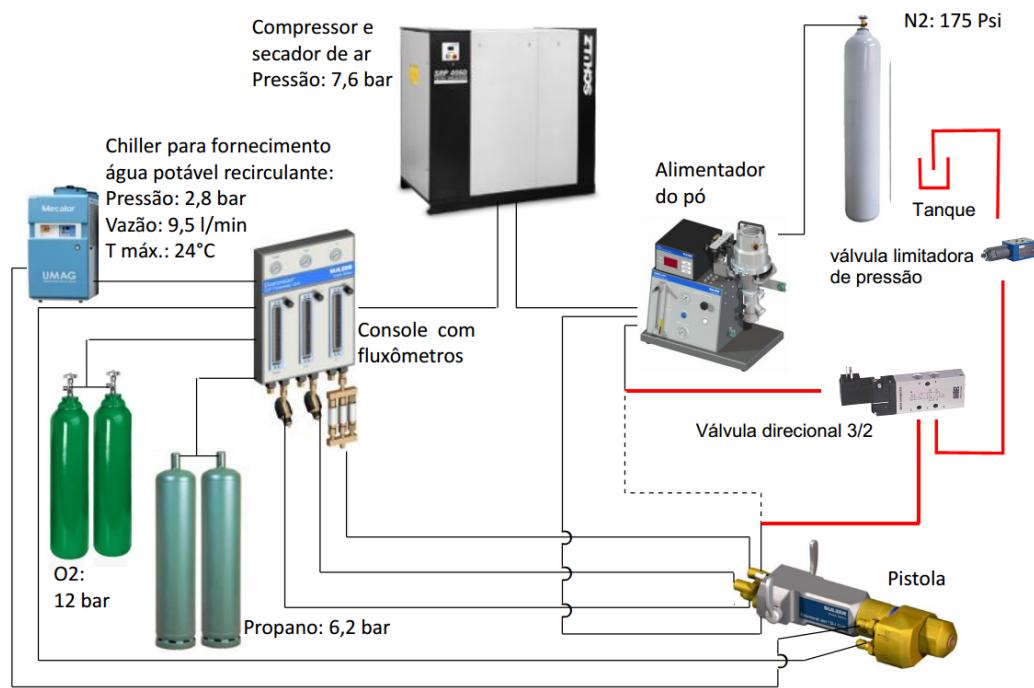


Figura 4.33: Circuito do processo HVOF modificado

é executado em malha aberta. Entretanto, para qualquer uma das soluções propostas por esse documento, não é possível assumir que nem a posição nem a orientação do manipulador, em relação a pá a ser processada, se manterão fixas.

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

### 4.3.1 Estudo de sensores

A utilização de um sensor de aquisição de dados espaciais não se limita somente a localização, mas, dependendo do sistema a ser escolhido, pode também ser útil na reconstrução do modelo do perfil hidráulico da pá, tanto do perfil ideal quanto do estado atual da pá a ser processada (Tarefas descritas em 4.1).

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

#### **4.3.1.1 3D scanners**

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

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

- **Faro Focus X 330**

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

- **Leica P16**

- Campo de visão (vertical/horizontal): 270º /360º
- Alcance: 40m
- Velocidade máx. de escaneamento: 1.000.000pts/s
- Precisão: ±3mm
- Peso: 12,25 kg

- Tamanho: 238 x 358 x 395 mm
  - Vida da bateria: 5,5 horas
  - Temperatura ambiente:  $-20^{\circ}$  -  $50^{\circ}$  C
  - Preço: U\$80.000,00
- **Nikon MV330**
    - Campo de visão (vertical/horizontal):  $45^{\circ} / 360^{\circ}$
    - Alcance: 30m
    - Velocidade máx. de escaneamento: 2000pts/s
    - Precisão:  $\pm 0.5\text{mm}$
    - Peso: *não informado*
    - Tamanho: *não informado*
    - Vida da bateria: *não informado*
    - Temperatura ambiente: *não informado*
    - Preço: U\$355.000,00



Figura 4.34: Sensor Faro Focus X330

**Velodyne** A empresa Velodyne possui, atualmente, 3 modelos de 3D Lidar. Os modelos variam basicamente no número de pares de emissores e receptores e, consequentemente, na resolução final. Os modelos são o VLP-16, o HDL-32E e HDL-64E, com 16,32 e 64 canais respectivamente. Esse tipo de sensor possui uma alta taxa de atualização, entretanto não possui uma alta densidade de dados. O modelo mais utilizado é o intermediário HDL-32E.

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

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

#### 4.3.1.2 ToF Cameras

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



Figura 4.35: Velodyne Models



Figura 4.36: Forecast 3D Laser System

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

#### Mesa Imaging SwissRanger SR4000

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



Figura 4.37: Mesa Imaging SwissRanger SR4000

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

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



Figura 4.38: Sensor Argos 3D - P100

#### 4.3.1.3 Câmeras de Luz Estruturada

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

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

Tabela 4.4: Comparativo Luz Estruturada vs ToF. Fonte: [29]

#### 4.3.2 Conclusão

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

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

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

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

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

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

O teste realizado constituiu na utilização de quatro esferas reflexivas, representadas na figura 4.39, distribuídas pelo ambiente da turbina. Em seguida, foram realizadas 4 coletas de dados, sendo 3 delas à jusante do rotor e uma entre as pás do rotor e o distribuidor. Com a nuvem de pontos coletada, foi possível utilizar a assinatura única gerada pelas esferas para alinhar todos os conjuntos de dados em uma única imagem 3D.



Figura 4.39: Conjunto de esferas reflexivas e tripé

A figura 4.40 representa a vista frontal da imagem gerada e, por sua vez, a figura 4.41 representa uma reconstrução 3D gerada a partir da nuvem de pontos coletas e utilizando o software proprietário do fornecedor do sensor.



Figura 4.40: Vista frontal da imagem gerada a partir dados adquiridos durante o teste.

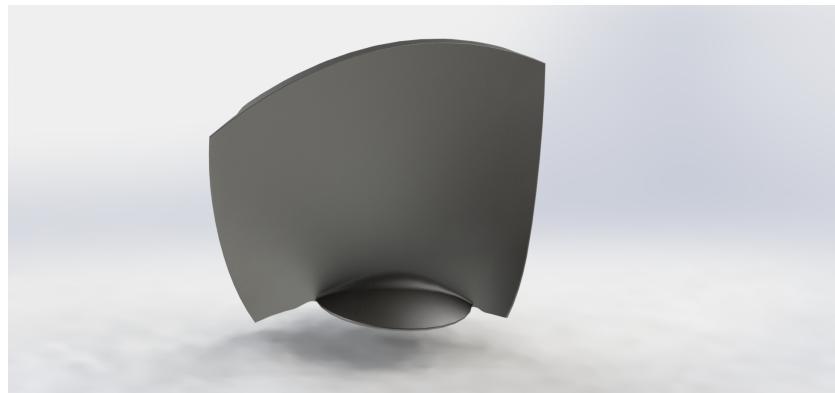


Figura 4.41: Reconstrução em CAD da pá com os dados do teste.

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

#### 4.3.2.1 Medidor de distância a Laser

Durante o processo de metalização o 3D scanner estará desligado, pois o tempo de varredura não o torna prático para obter informações em tempo real. Assim o sistema estaria

funcionando em *loop* aberto, o que gera receios com relação à segurança. A fim de evitar tais riscos é desejável alguma realimentação para o sistema sobre sua posição. Essa realimentação será realizada pelo uso de um medidor de distância a Laser, a ser posicionado próximo à pistola de metalização, com o intuito de aferir a distância da pistola até a pá em tempo real.

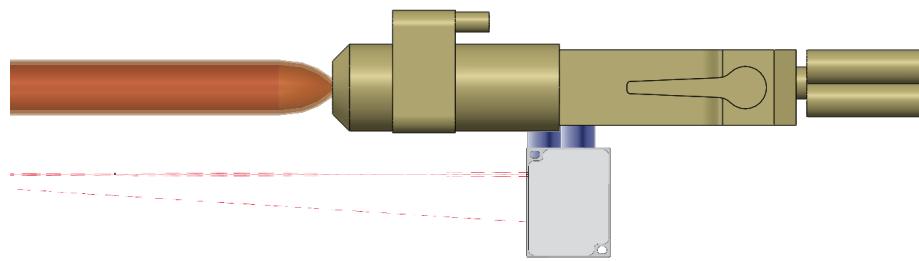


Figura 4.42: Ilustração da posição do medidor de distância, em cinza, na pistola de metalização.

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

**Temperatura** A temperatura da superfície pode influenciar na precisão do sensor devido à radiação de corpo negro. Caso essa radiação térmica atinja níveis relevantes na faixa de frequência do Laser utilizado ocorre degradação da qualidade de resposta do sensor. Análises de campo identificaram que, apesar da alta temperatura da chama de metalização, a pá da turbina não chega a emitir níveis preocupantes de radiação na faixa do vermelho ( $670nm$ ), onde operam os Lasers padrões. Para casos de exceção existem Laser que trabalham em regiões do azul/violeta.

Por outro lado a temperatura do ambiente também influencia o sensor, que não costuma ter alta resistência à temperatura, ficando algo em torno de  $50^{\circ}C$ . Para evitar que o calor da chama seja recebido diretamente pelo sensor, aumentando a temperatura ambiente na região, ele deve ser posicionado na pistola com uma distância de segurança da chama (figura 4.42).

**Distância de operação** A metalização ocorre com a pistola entre 23cm e 24cm de distância da pá. Somado a isso temos a distância do sensor à chama para então sabermos a distância

da pá ao sensor. Considerando que a pistola possui em torno de 30cm de comprimento, a faixa de operação de distâncias do sensor deverá incluir 40-50cm. Para termos essa região no centro da faixa de operação, ela deverá iniciar em 20-25cm e trabalhar até 80-100cm.

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

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

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

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **CAPÍTULO 5**

---

### **Estudo da Metodologia**

---



## 5.1 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, em 3 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 4, 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 em 4, 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 reproduutíveis 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.

Por fim, são apresentadas modificações necessárias nos equipamentos que compõem o processo HVOF e os testes de validação.

## 5.2 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. 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 [13].

### 5.2.1 Construção do ambiente de simulação

Os componentes de interesse da turbina e o manipulador foram modelados no software de projeto *Computer Aided Desing* (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.

### 5.2.2 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 [4](#).

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  $0^\circ$  a  $29^\circ$ ; 3) o rotor da turbina pode girar de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ ; 4) a distância entre extremidade da pistola e pá deve ser mantida em  $235 \pm 5$  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  $30^\circ$ .

Além disso, vale observar algumas conclusões feitas no capítulo [4](#): 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.

#### 5.2.2.1 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 [5.1](#), 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 [5.2](#), o vetor  $\vec{P}$  é um exemplo de vetor normal pertencente a um ponto da pá de difícil revestimento, tanto pela posição quanto pelo vetor normal.

A simulação de teste de revestimento das extremidades considerou as seguintes variáveis: 1) os ângulos das pás da turbina foram fixados em  $24^\circ$ , ângulo natural de uso; 2) avaliou-se o giro do rotor de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  com passo de  $3^\circ$ ; 3) a distância entre extremidade da pistola e pá pode variar  $235 \pm 5$  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  $-2970 \pm 250$  mm (posição global) com passo de 50 mm; 6) a posição em  $x$  do robô pode variar  $715 \pm 485$  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 [5.3](#) mostra todas as posições simuladas para a base do robô. As restrições

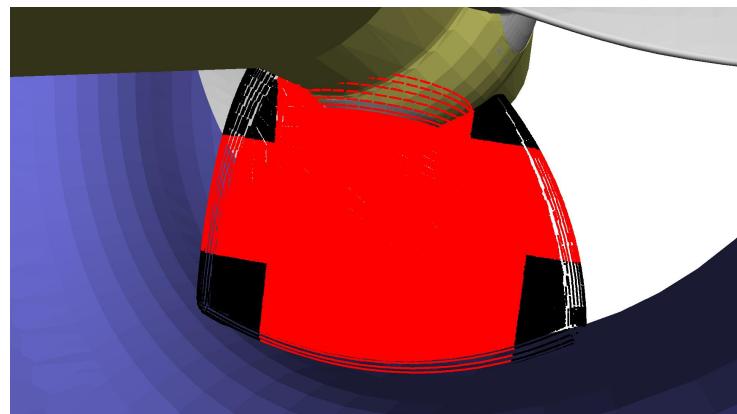


Figura 5.1: Extremidades da pá em preto.

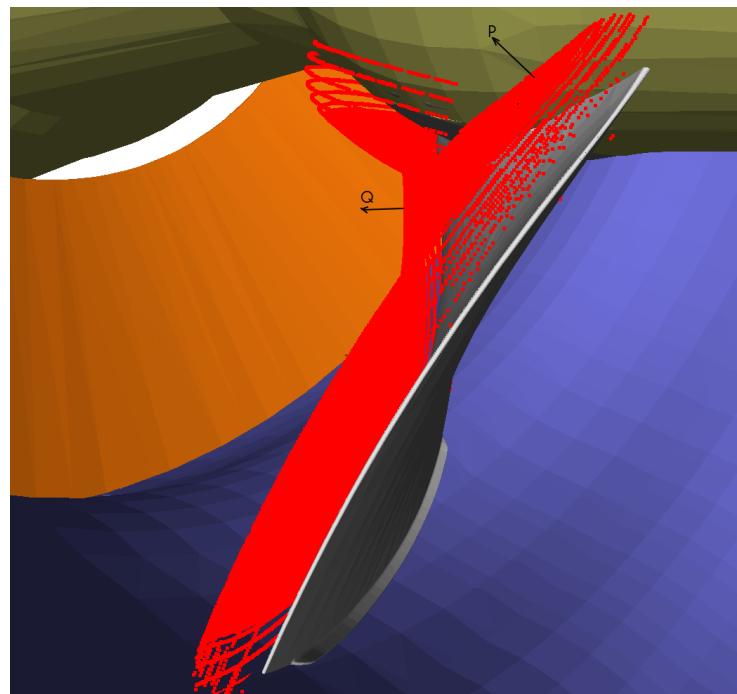


Figura 5.2: Vetores normais (em preto) de pontos a serem revestidos (em vermelho).

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.

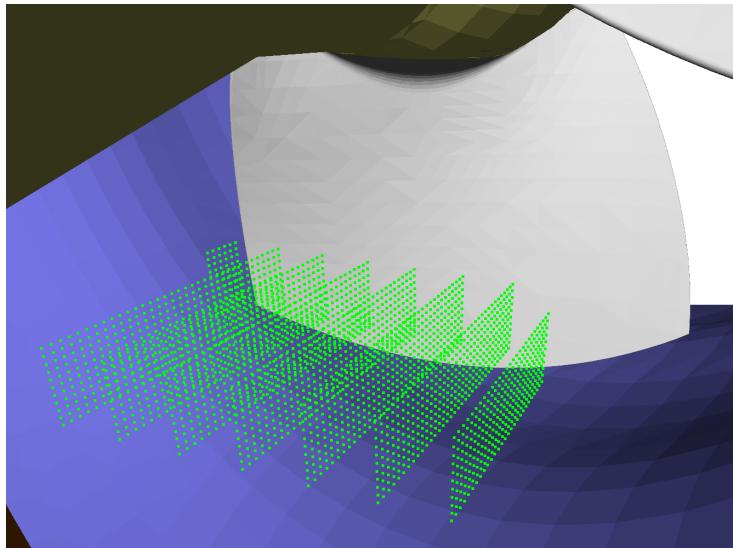


Figura 5.3: Possíveis posições da base do robô, em verde.

**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 5.4 mostra a discretização da pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de  $30^\circ$ ; 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. 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.

**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  $20^\circ$  (base mais próxima do solo). A figura 5.5 mostra a discretização da pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de  $30^\circ$ ; em preto, pontos revesti-

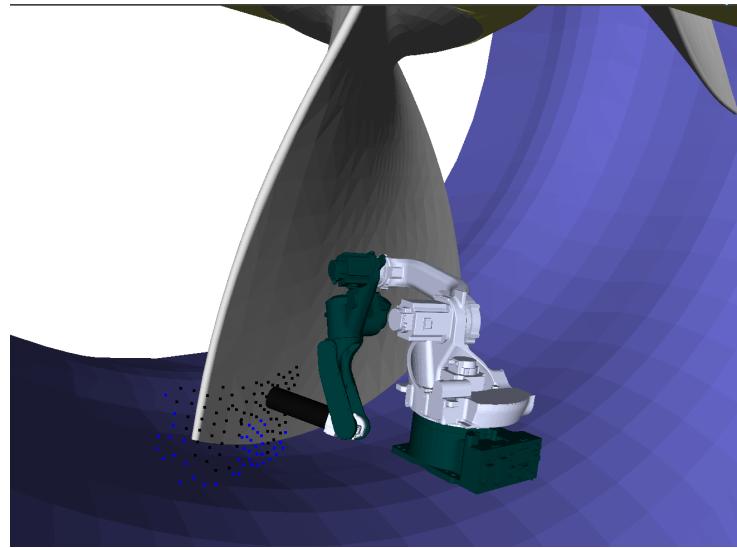


Figura 5.4: Estudo de revestimento para a extremidade inferior esquerda.

dos sem tolerância; e em vermelho, pontos que não foram revestidos para esta posição do robô.

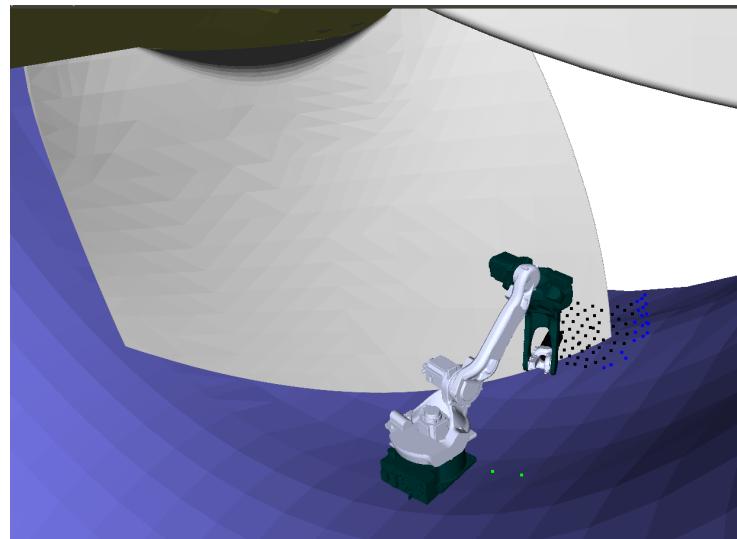


Figura 5.5: Estudo de revestimento para a extremidade inferior direita.

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.

**Extremidade superior esquerda** A extremidade superior esquerda possui complexidade de posição do ponto a ser revestido devido à altura do robô. A figura 5.6 mostra a discretização da pá na extremidade esquerda: pontos azuis são pontos revestidos na tolerância de  $30^\circ$ ; em preto, pontos revestidos sem tolerância; e em vermelho, pontos que não foram revestidos para esta posição do robô.

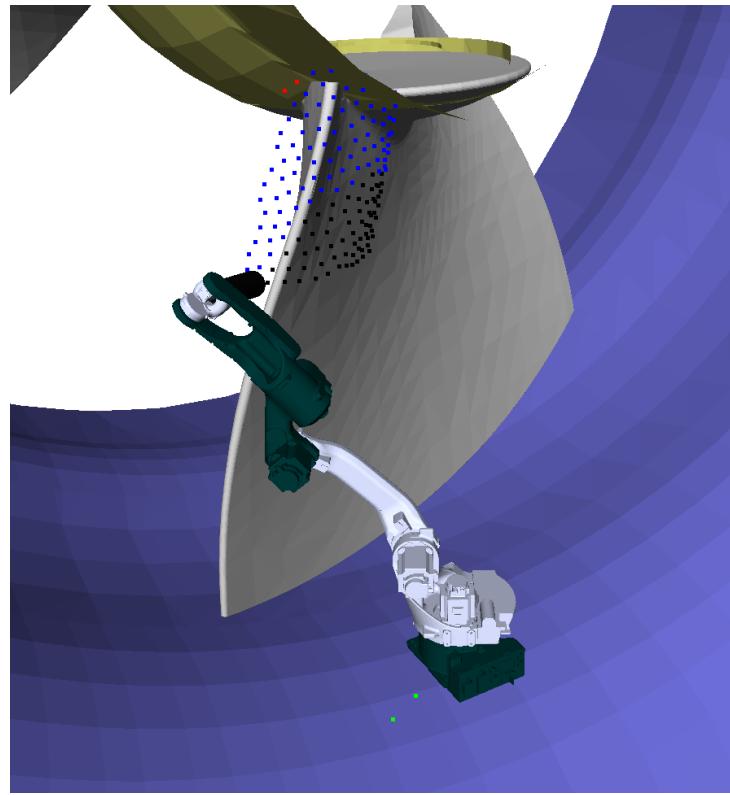


Figura 5.6: Estudo de revestimento para a extremidade superior esquerda.

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.

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

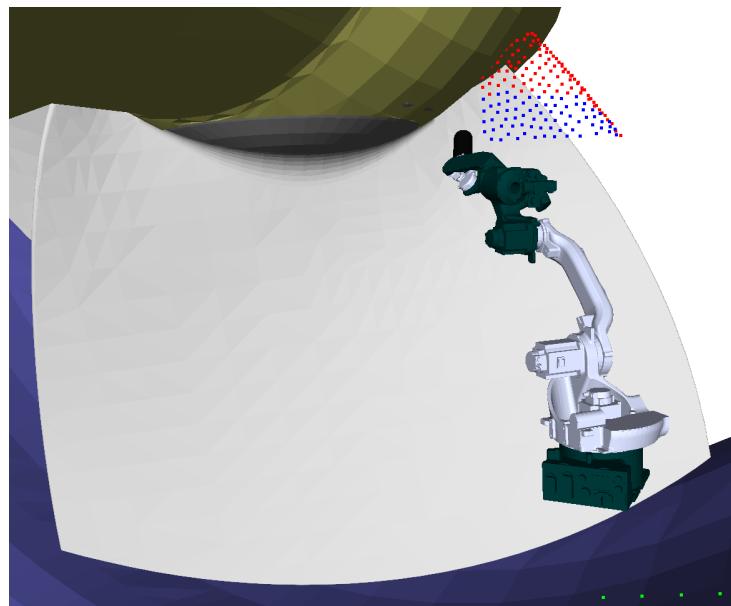


Figura 5.7: Estudo de revestimento para a extremidade superior direita.

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 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.

**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  $0^\circ$  a  $30^\circ$ . Entretanto, como em  $0^\circ$  as três extremidades foram revestidas sem alteração de dois graus de liberdade  $x$  e  $y$ , escolheu-se manter o rotor em  $0^\circ$  para esta aplicação.

#### 5.2.2.2 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  $0^\circ$  a  $29^\circ$ . O acréscimo deste grau de liberdade buscou solucionar o problema da extremidade direita.
- O rotor da turbina foi girado de  $0^\circ$  a  $30^\circ$  com passo de  $3^\circ$ . 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  $235 \pm 5$  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  $60^\circ$  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  $-1240 \text{ mm} < z < 1240 \text{ mm}$  prejudica o revestimento na lateral direita da pá, região em que o aro câmara está próximo de  $20^\circ$ . A figura 5.8 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está  $0^\circ$  e a pá  $24^\circ$ : 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.

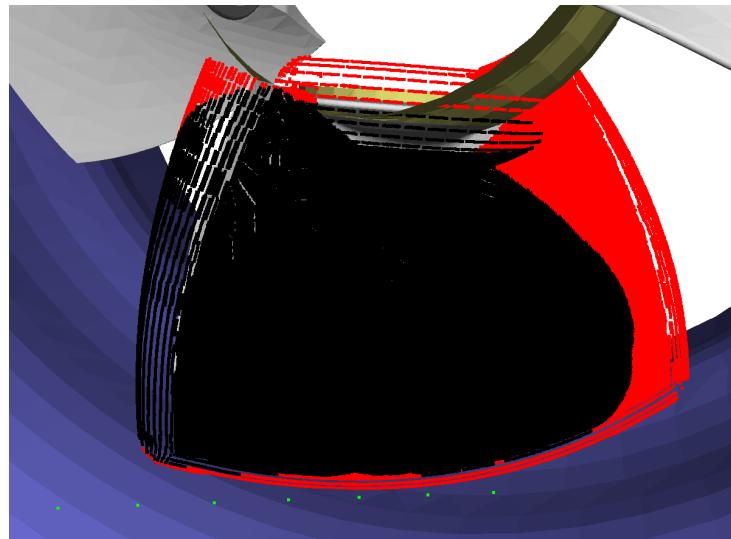


Figura 5.8: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $0^\circ$  do rotor e  $24^\circ$  da pá.

**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  $60^\circ$ ; e rotação da turbina para  $-15^\circ$ . Como esta região da pá tem inclinação projetada para o robô, alterar o ângulo da pá de  $24^\circ$  para  $0^\circ$  não favorece o revestimento (figura 5.13). 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 5.9 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está  $-15^\circ$  e a pá  $24^\circ$ . 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.

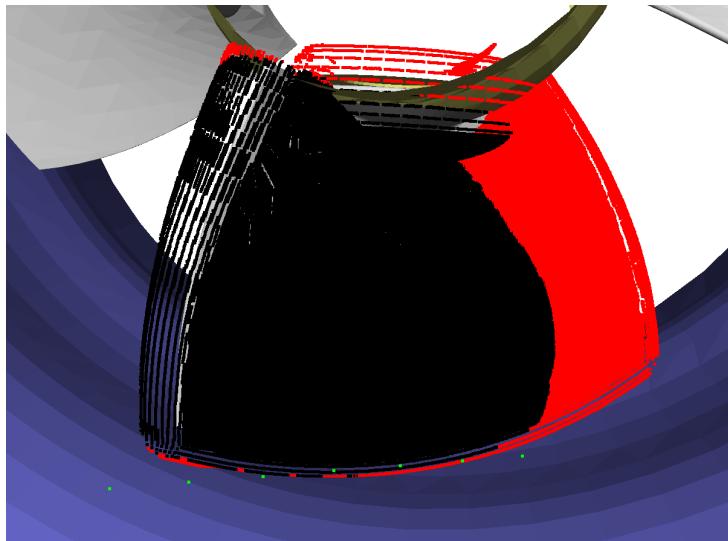


Figura 5.9: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $-15^\circ$  do rotor e  $24^\circ$  da pá.

Quando aumentamos a tolerância de ângulo de revestimento para  $60^\circ$ , obtemos a figura 5.10. A figura mostra que foi possível revestir toda a extremidade superior esquerda, salvo pontos de colisão com o rotor. Entretanto, é importante a base ter o grau de liberdade em  $y$  para suprir eventuais problemas de modelagem.

Ao elevarmos a base  $y + 500mm$ , obtemos a figura 5.11. 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.

**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  $0^\circ$ , em vez de  $24^\circ$ . 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

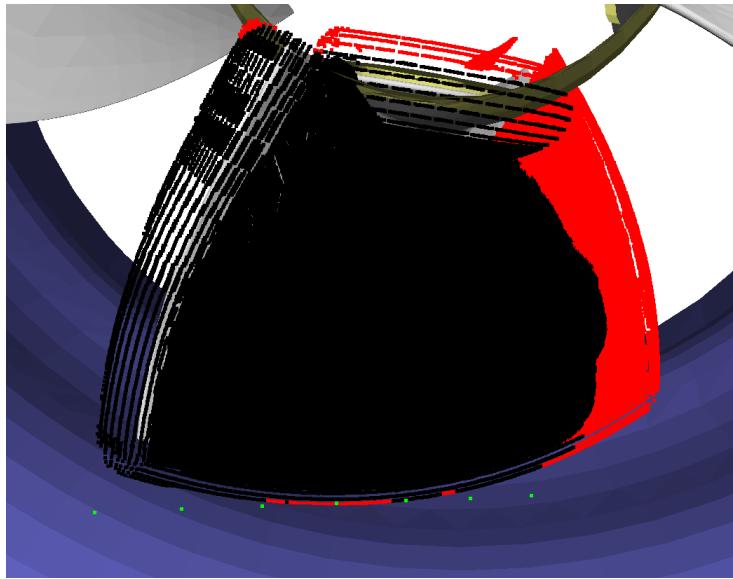


Figura 5.10: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $0^\circ$  do rotor e  $24^\circ$  da pá, tolerância de  $60^\circ$  de revestimento.

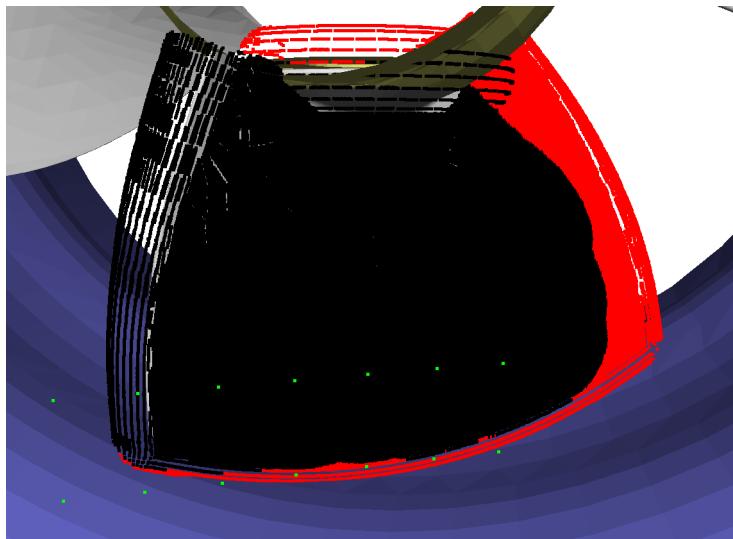


Figura 5.11: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $0^\circ$  do rotor e  $24^\circ$  da pá,  $y + 500mm$ .

hidráulico e talvez não seja possível após início da operação.

A figura 5.12 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está  $15^\circ$  e a pá  $24^\circ$ . Conforme o rotor é girado no sentido anti-horário (positivo), embora

o revestimento aumenta 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 5.2.2.1.

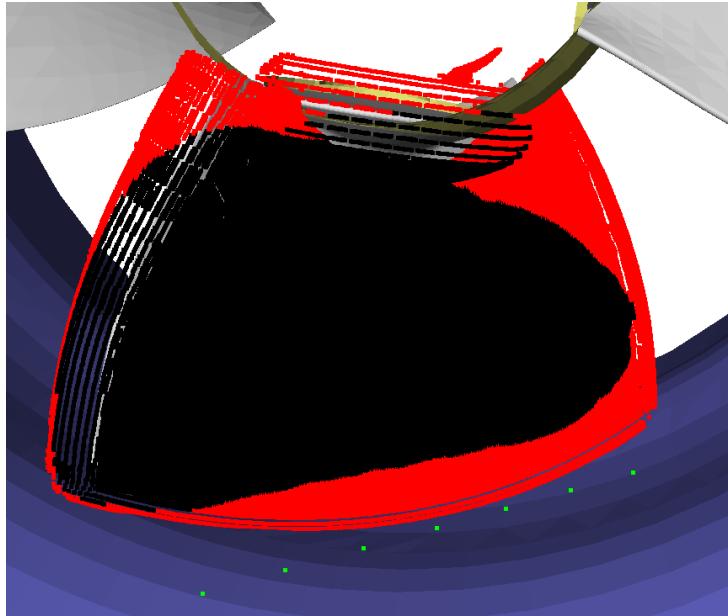


Figura 5.12: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $15^\circ$  do rotor e  $24^\circ$  da pá.

A figura 5.13 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está  $0^\circ$  e a pá  $0^\circ$ . 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  $20^\circ$ . 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.

**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 turbinha  $45^\circ$ , manter a pá em  $24^\circ$  e posicionar o robô entre as pás, no trilho 1 (transporte). A desvan-

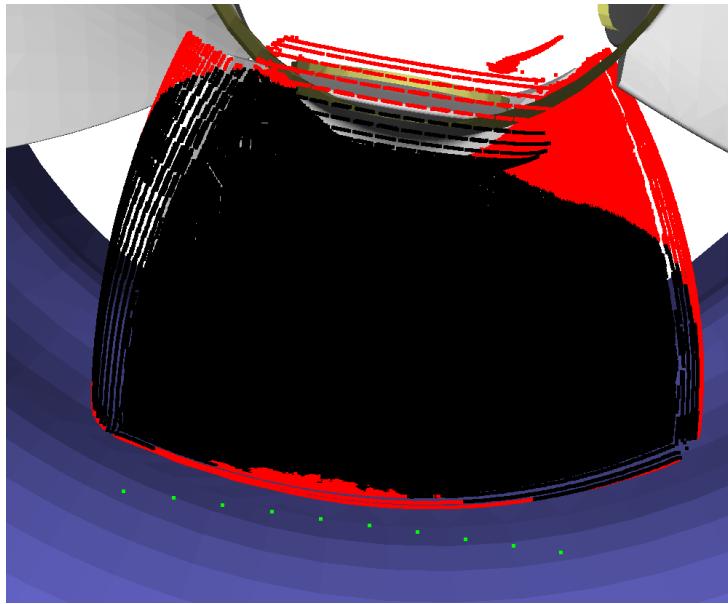


Figura 5.13: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $0^\circ$  do rotor e  $0^\circ$  da pá.

tagem 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 5.14 mostra a discretização completa da pá, nas condições em que o rotor está  $45^\circ$  e a pá  $24^\circ$ . 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.

**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.

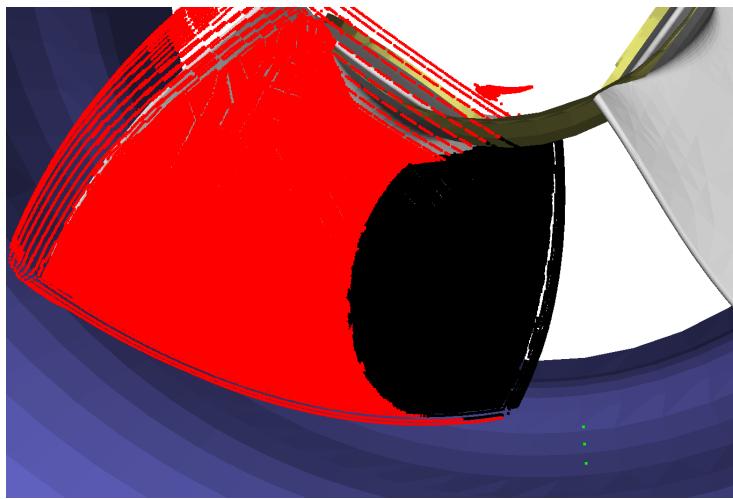


Figura 5.14: Simulação de revestimento completo da pá, considerando as restrições mecânicas da base, ângulo  $45^{\circ}$  do rotor e  $24^{\circ}$  da pá, robô entre as pás.

### 5.2.3 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 exigência 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.

### 5.2.3.1 Modelagem da superfície

Existem diversas abordagens matemáticas para descrição de superfícies como: Parametrização Polinomial; Polinômios em três variáveis; Superfícies de Bézier ([17]); Splines e NURBS (*Non-uniform rational B-spline*); Subdivisão de superfícies ([34]); Malhas poligonais.

Todas essas formas de representar uma superfície, com excessão das malhas, recorrem 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 [27], 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 mínimo quadrados(*curve fitting* [2]), foi construído 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.

### 5.2.3.2 Cálculo dos paralelos

Na literatura, há diversas formas de dividir a superfície a ser revestida em subregiões. Em [18], por exemplo, um manipulador realiza a pintura de uma superfície (*spray gun*) cobrindo subregiões de um plano, projeção da superfície (figura 5.15). Outra possibilidade é, em funções paramétricas, realizar uma trajetória semelhante à figura 5.15 no espaço dos parâmetros, cuja transformação (jacobiano) mapeará nos ‘cortes’ curvos da superfície.

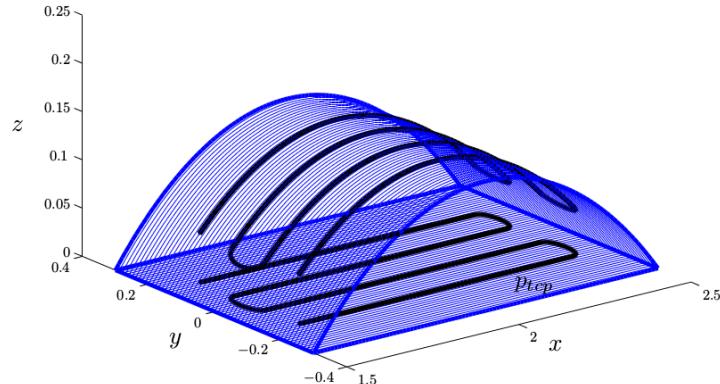


Figura 5.15: Subregiões de uma superfície.

A superfície descrita na seção 5.2.3.1 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 5.16 e 5.17 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 5.18, na qual a pá está representada em vermelho, as esferas estão em cinza claro, e as interseções são as curvas sombreadas em cinza na pá.

A superfície descrita na seção 5.2.3.1 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 5.16 e 5.17 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 5.18.

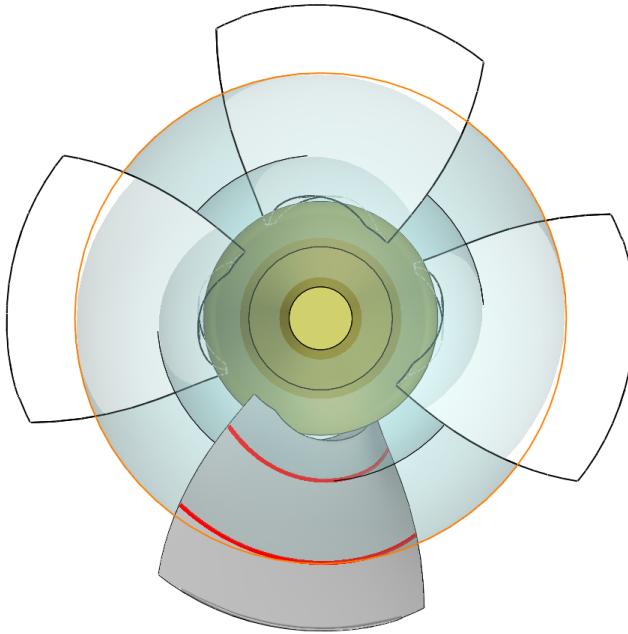


Figura 5.16: Interseção esfera-pá, vista frontal.

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  $f(x, y, z) = g(x, y, z)$  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.

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

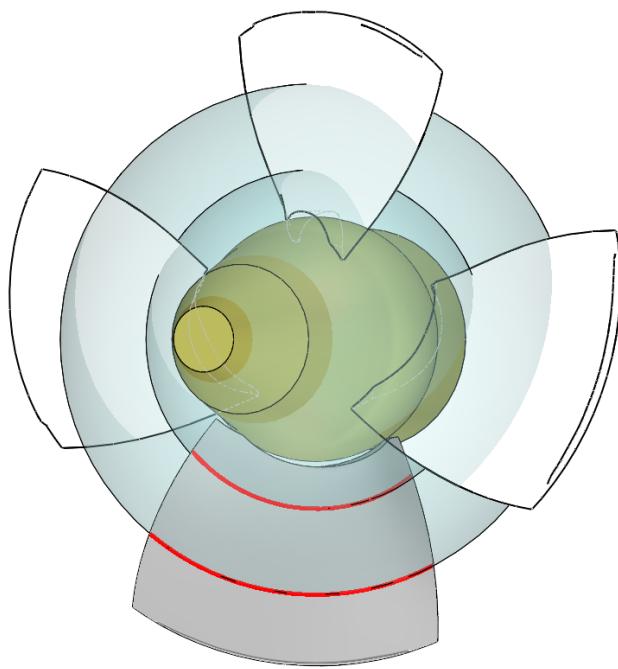


Figura 5.17: Interseção esfera-pá, vista isométrica.

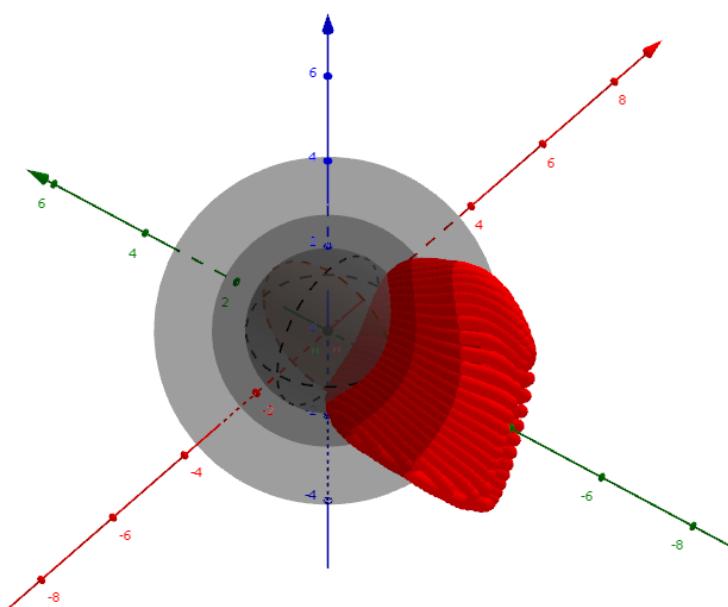


Figura 5.18: Interseção esfera-modelo pá.

uma base do robô em amarelo, na figura 5.19. 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 5.20.  $\vec{AB}$  é o vetor normal à esfera, igual a  $\vec{OB}$  (origem ao ponto  $B$ ), e  $\vec{BC}$  é o vetor normal à superfície algébrica da pá, calculado como  $\nabla f = f_x, \vec{f}_y, f_z$ . O vetor tangente  $\vec{BD}$ , figura 5.21, pode ser calculado como produto vetorial entre o vetor normal à superfície da pá com o vetor normal à esfera, no ponto  $B$ :  $\vec{BD} = \vec{BC} \times \vec{AB} = \vec{OB} \times \nabla f$ . A integral do vetor tangente irá fornecer a trajetória (região cinza sombreada, ou em vermelho, como na figura 5.17), logo o caminho (ou trajetória) é calculado por:

$$c = \int \vec{OB} \times \nabla f dt.$$

Em integrações numéricas, deve-se garantir que o novo ponto de cada iteração pertença à superfície, logo  $B' = B + \int_0^t \vec{OB} \times \nabla f dt$ , 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:

$$\min \|B - B'\|^2$$

$$s.t. f(B') = 0$$

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  $30^\circ$ , 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:

$$\min -\nabla f \cdot x_T$$

$$s.t. \|p_T - B\|^2 = 0$$

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 5.22 mostra duas curvas computadas pelo algoritmo descrito acima. Os caminhos tem espaçamento exagerado, maior que 3 mm, para facilitar a visualização. A

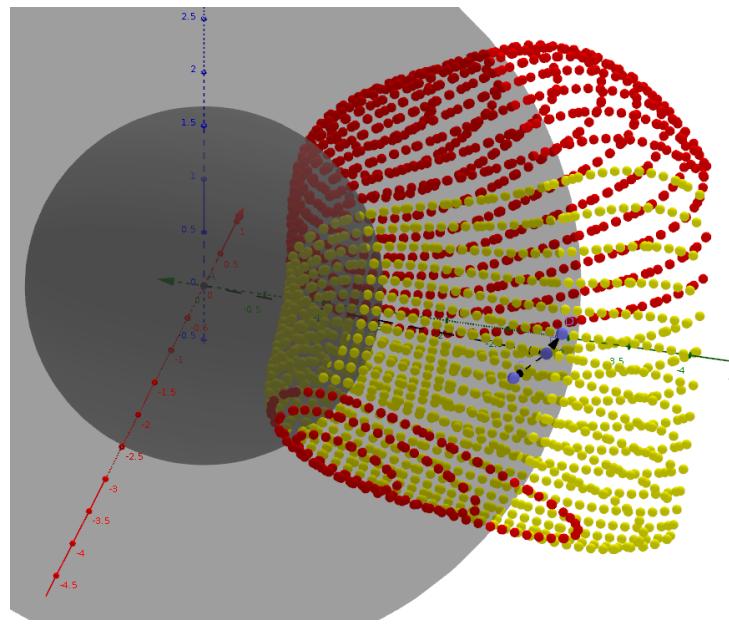


Figura 5.19: Vetores de interesse na interseção esfera-pá.

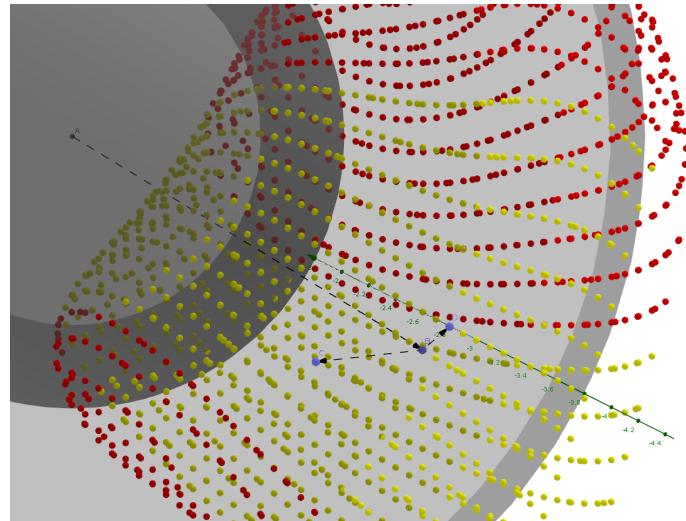


Figura 5.20: Vetores de interesse na interseção esfera-pá.

transição entre os paralelos, no entanto, é executada por outro algoritmo, que calcula os meridianos do planejamento de trajetória.

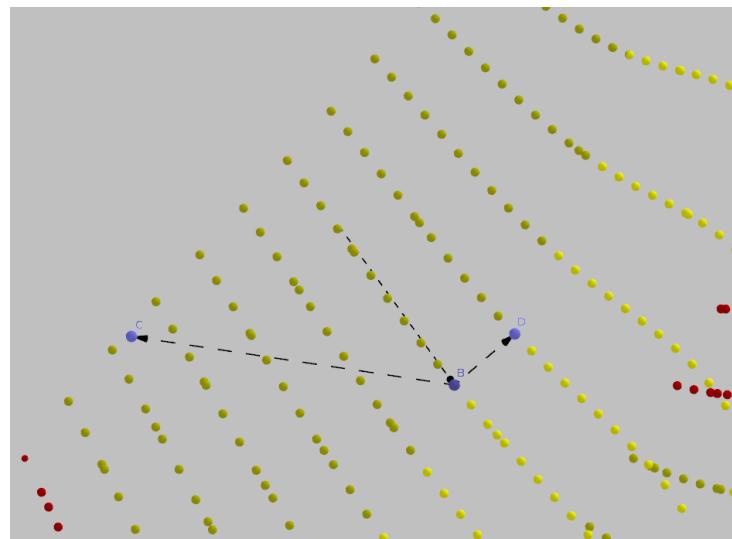


Figura 5.21: Vetores de interesse na interseção esfera-pá.

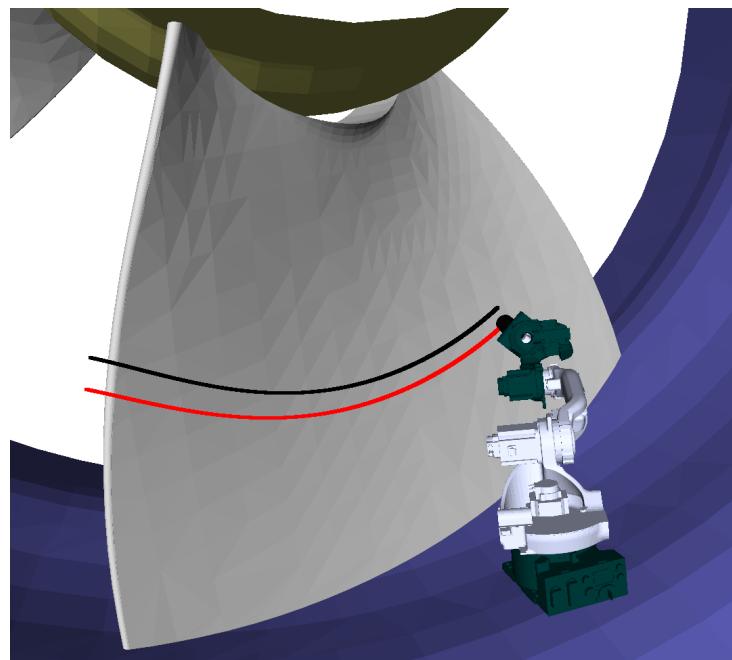


Figura 5.22: Simulação de trajetória no Openrave.

### 5.2.3.3 Cálculo dos meridianos

Os paralelos, ou caminhos “horizontais”, são computados pelo algoritmo descrito na subseção 5.2.3.2. Entretanto, o algoritmo não descreve as transições entre linhas horizontais.

tais, 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 5.17), o efetuador estará apontando para o último ponto com solução viável neste paralelo, dentro das restrições de ângulo de revestimento, no lado esquerdo 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 5.22 (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  $\vec{BD} = \vec{OB} \times \nabla f$ , logo o caminho pelo meridiano pode ser calculado como:

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

o que irá gerar um caminho de descida pelo meridiano. Em cada passo de integração numérica, o novo ponto  $B' = B + \int_0^t (\vec{OB} \times \nabla f) \times \nabla f dt$  deve ser projetado na superfície, como em na subseção 5.2.3.2, pela otimização:

$$\min \|B - B'\|^2$$

$$s.t. f(B') = 0$$

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:

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

Na figura 5.23, os meridianos estão representados em verde.

#### 5.2.4 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

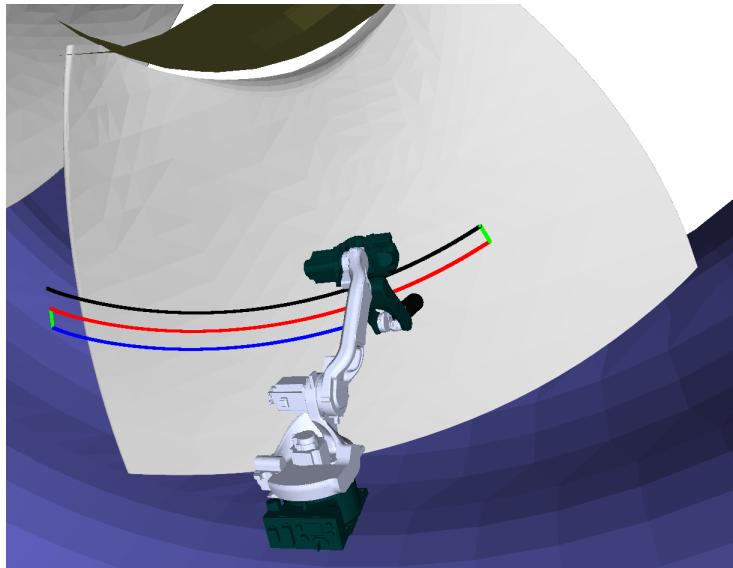


Figura 5.23: Meridianos da pá.

serem percorridos, tanto pelo efetuador (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 mínimos quadrados móveis na definição da superfície, técnica que possibilitaria um maior controle do erro localmente.

### 5.3 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 em [4](#).

### 5.3.1 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 [5.24](#) apresenta o conceito descrito.

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.

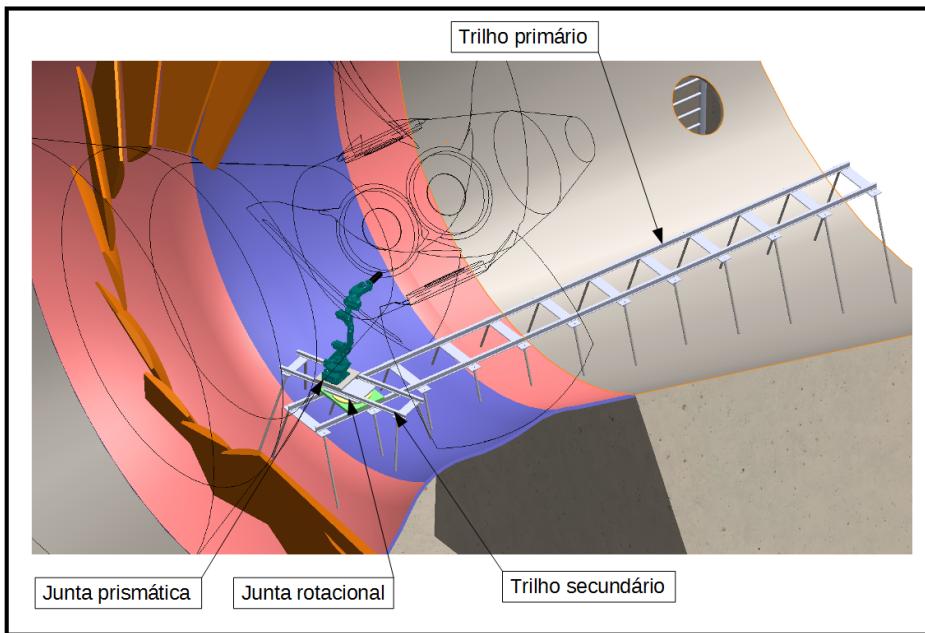


Figura 5.24: Conceito P-R-P-P da base mecânica

### 5.3.2 Construção

#### 5.3.2.1 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.

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 5.27.

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,



Figura 5.25: Trilho para movimento linear



Figura 5.26: Carrinho de esferas recirculantes

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.

#### 5.3.2.2 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

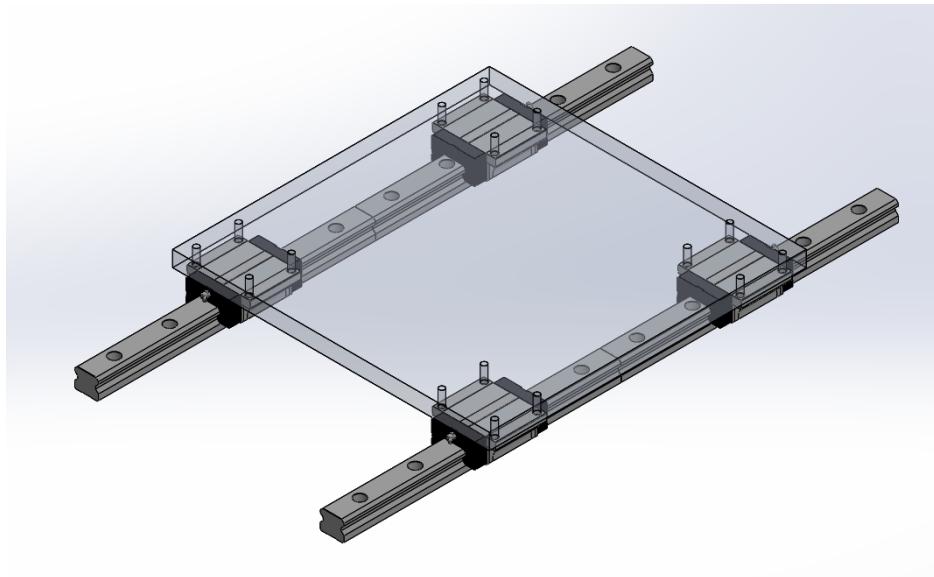


Figura 5.27: Montagem com 2 trilhos e 4 carrinhos

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 5.28: Perfis de alumínio estrutural

A figura 5.29 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.

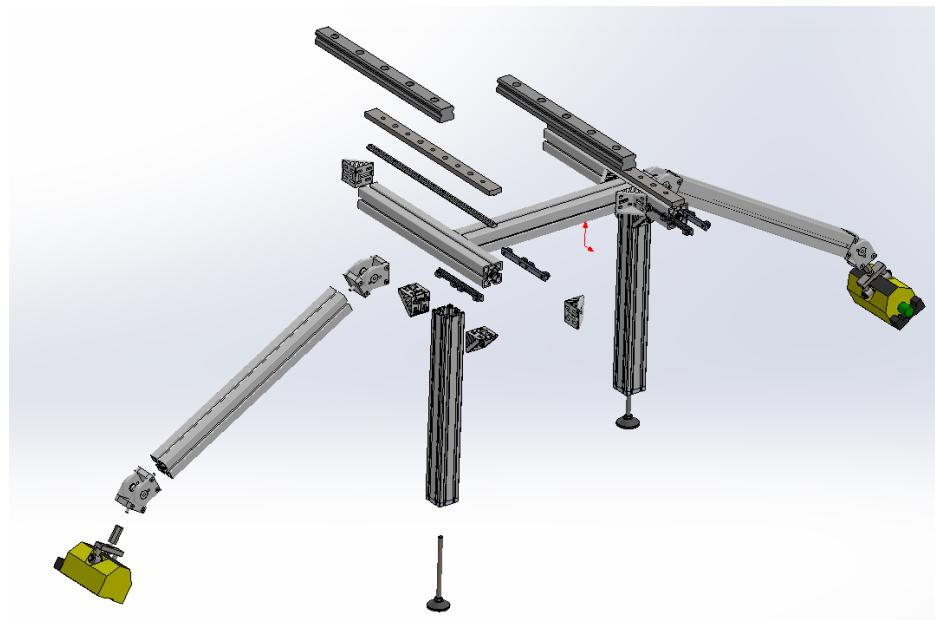


Figura 5.29: Vista explodida de montagem com perfil de alumínio estrutural

### 5.3.2.3 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  $9^\circ$ . Optou-se portanto por pés com interface do tipo rótula, exemplificado na figura 5.30, que permitem até  $10^\circ$  de inclinação entre a haste e à

base, além de 75 mm de regulagem do comprimento, por meio da rosca da haste.

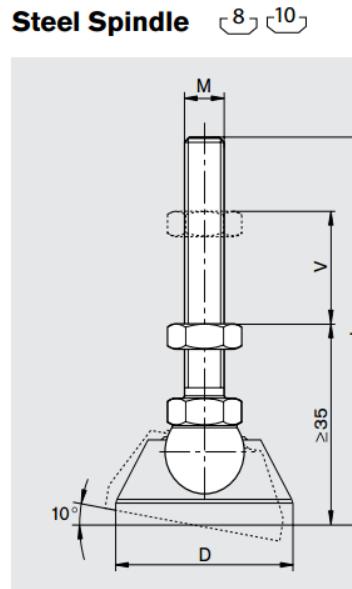


Figura 5.30: Pé com junta rotular entre a haste e a base

#### 5.3.2.4 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 5.31 apresenta os braços de ancoragem ao longo da estrutura.

#### 5.3.2.5 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 magnética-

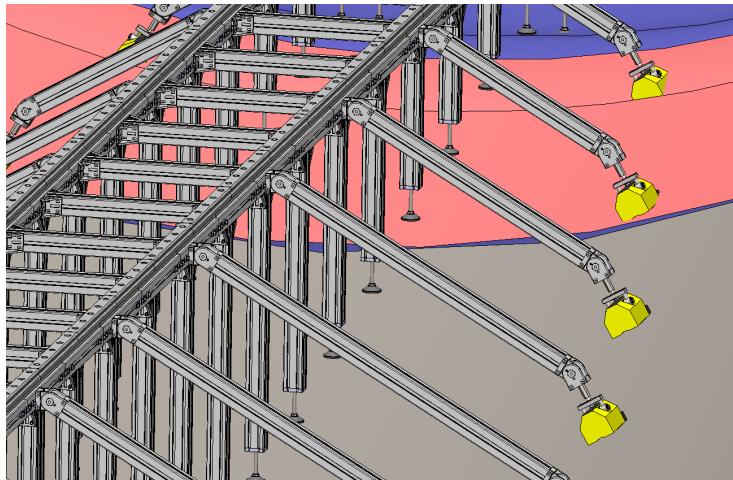


Figura 5.31: Braços de ancoragem do trilho primário

mente 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 no apêndice C.



Figura 5.32: Base magnética para ancoragem

#### 5.3.2.6 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 5.33 apresenta uma mesa divisora com acionamento manual e sistema sem-fim e coroa.



Figura 5.33: Plataforma de rotação

#### 5.3.2.7 Junta de elevação

Estudo apresentado em 4 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.

#### 5.3.2.8 Montagem

A montagem da base mecânica no interior da turbina é feita a partir de módulos (ou submontagens que formam elementos básicos de uma montagem maior). O exemplo de um módulo da estrutura primária foi apresentado na figura 5.29, na seção 5.3.2.2.

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.



Figura 5.34: Macaco mecânico do tipo sanfona

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.

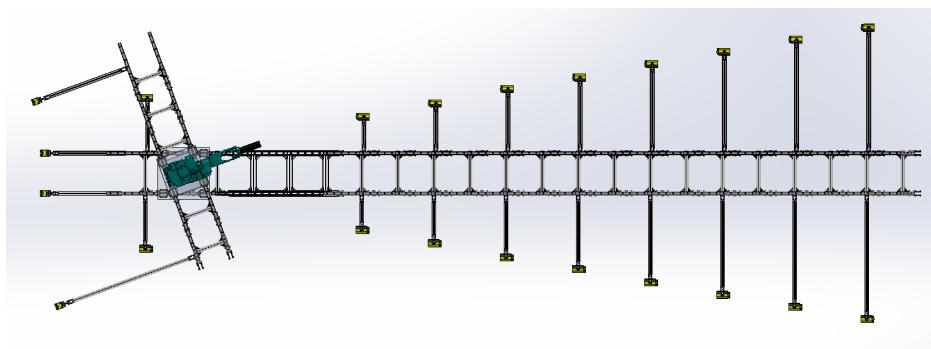


Figura 5.35: Montagem da base mecânica

A figura 5.35 apresenta uma vista superior da montagem da base mecânica e a figura 5.36 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.

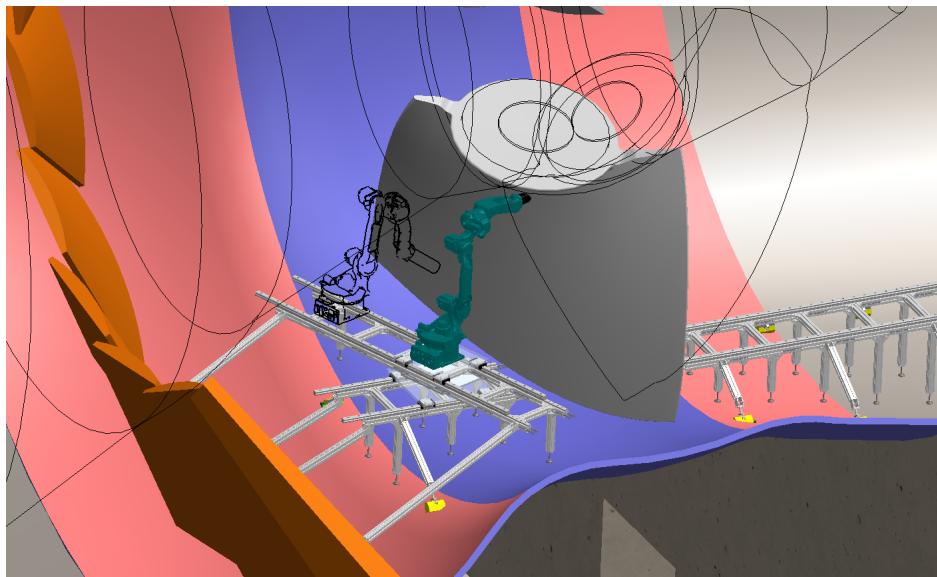


Figura 5.36: Montagem da base mecânica no interior da turbina

### 5.3.3 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 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.

#### 5.3.3.1 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 B. 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.

### 5.3.3.2 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 [14]) e foi definido no modelo a partir de suas propriedades físicas e mecânicas.

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

Tabela 5.1: 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 5.37 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.

*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 ([23]) 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 5.2: 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

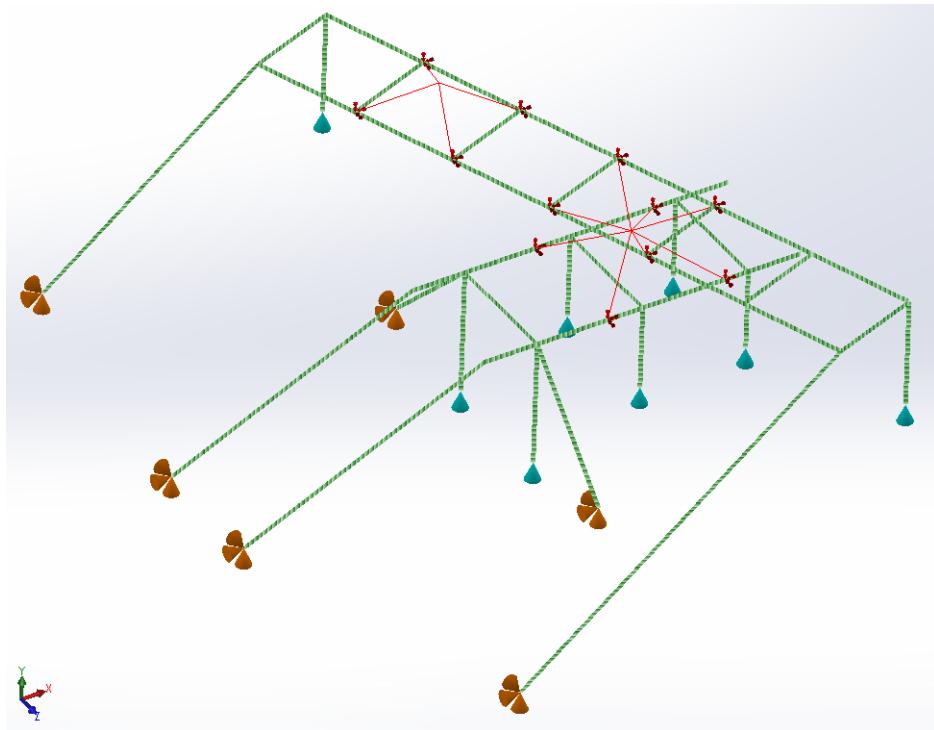


Figura 5.37: Malha e condições de contorno

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 5.38 mostra a representação do carregamento na direção resultante.

#### Resultados:

Abaixo são apresentados os resultados das simulações realizadas para a configuração de revestimento da face posterior da pá. A figura 5.39, apresenta o resultado das tensões de Von Mises, demonstrando que o maior encontrado é 5,78 MPa.

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

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

onde  $\sigma_y$  é o Limite de Escoamento do material e  $\sigma_{max}$  é a tensão máxima encontrada. Assim, o Fator de Segurança é 34,6.

O deslocamento máximo na estrutura está demonstrado na figura 5.40 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

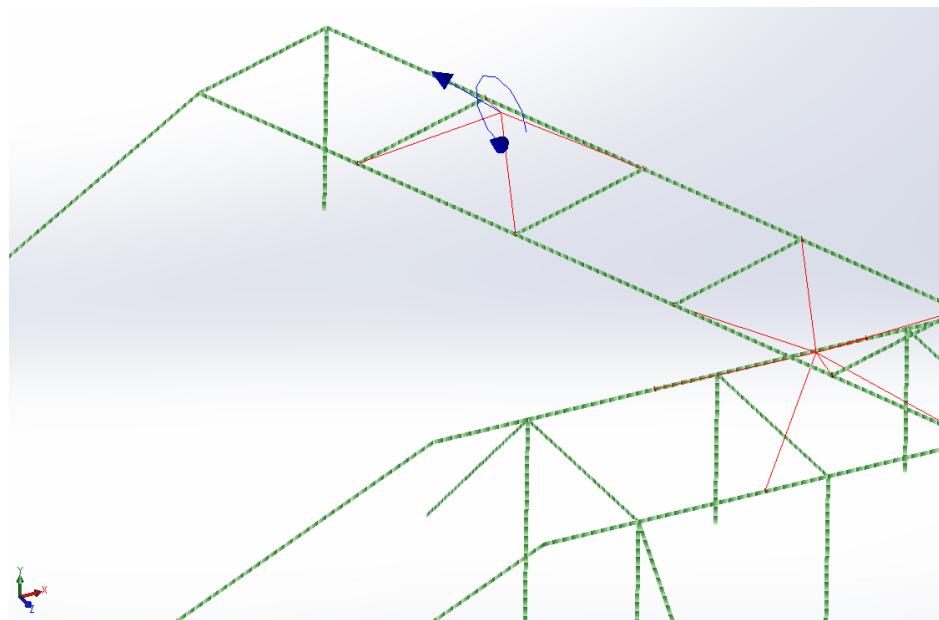


Figura 5.38: Forças e torques na direção resultante

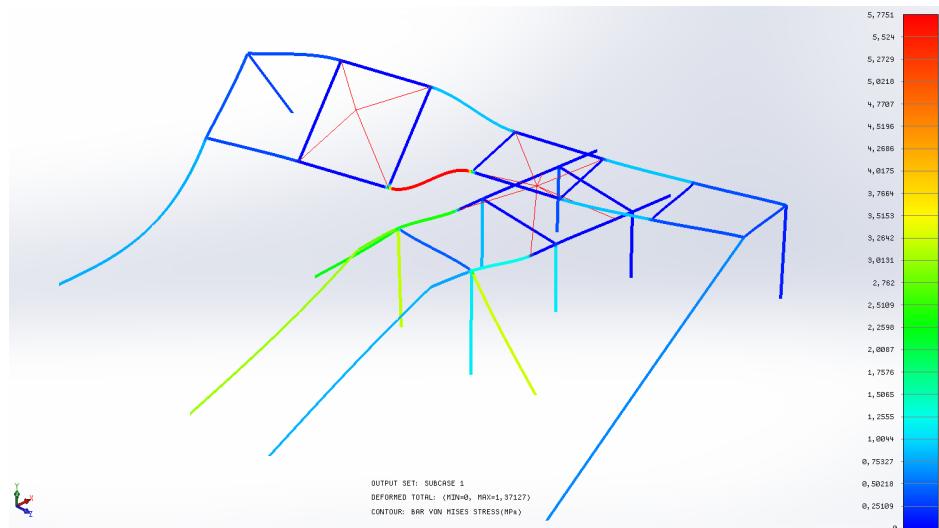


Figura 5.39: Resultado de Tensões de Von Mises na estrutura, escala exagerada de deformação

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 ( $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ ) para o conjunto de vetores da base ortonormal resultante ( $\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3$ ) das deformações elásticas da estrutura. A matriz rotação é calculada da seguinte forma:

$$R = \begin{bmatrix} | & | & | \\ \vec{b}_1 & \vec{b}_2 & \vec{b}_3 \\ | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} | & | & | \\ \vec{a}_1 & \vec{a}_2 & \vec{a}_3 \\ | & | & | \end{bmatrix}^{-1}$$

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

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

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

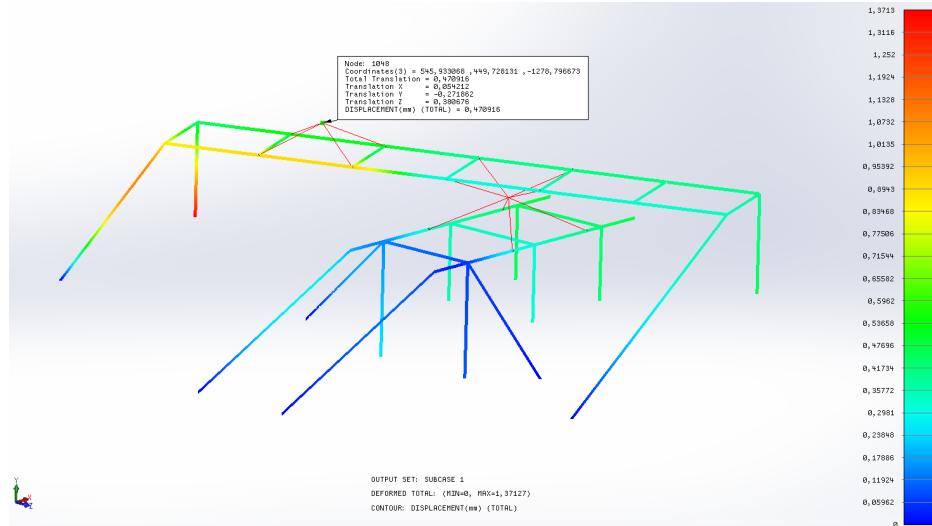


Figura 5.40: Resultado de Deslocamento Resultante na estrutura, escala real de deformação

As forças de reação nos braços de ancoragem são importantes para o dimensionamento da base magnética. A tabela 5.3 apresenta os resultados encontrados em cada braço. A figura 5.41 apresenta a referência de cada braço de ancoragem, de acordo com a tabela 5.3.

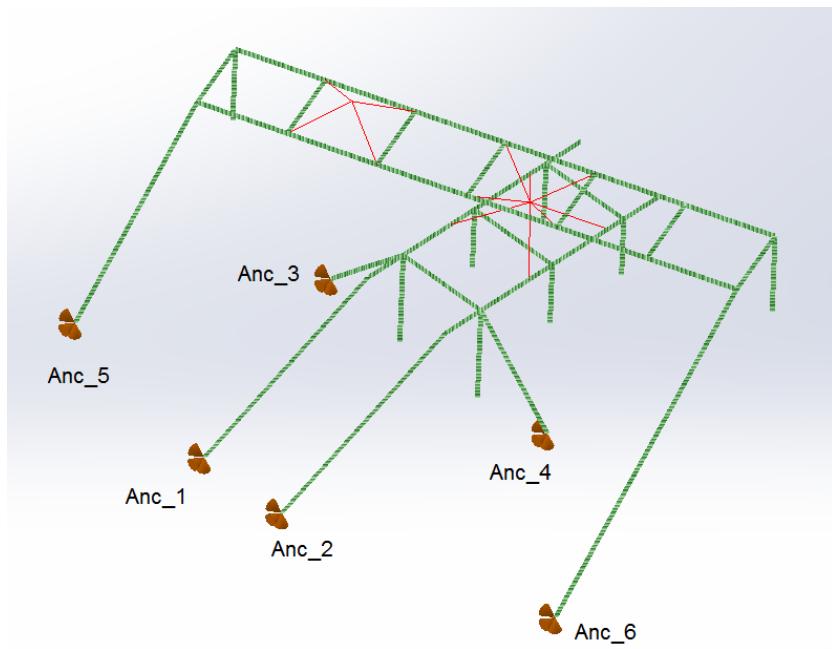


Figura 5.41: Referência dos braços de ancoragem para os resultados da tabela 5.3

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

Tabela 5.3: 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.

### 5.3.3.3 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 5.3 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 5.3;  $F_{max}$  é a capacidade de carga máxima da base magnética; e  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre a base magnética e a superfície da turbina que será considerado igual a 0,12.

### 5.3.4 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 dos componentes conferiram Fatores de Segurança aceitáveis e dentro dos valores recomendados para projetos mecânicos em geral.

## 5.4 Solução da calibração

Como especificado em 4, 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  $360^{\circ}$  na horizontal e  $300^{\circ}$  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.

#### 5.4.1 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 5.42 e 5.43), 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.

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:



Figura 5.42: Exemplo de esfera utilizada para reconhecimento. Fonte: <http://shop.talwin.net/>

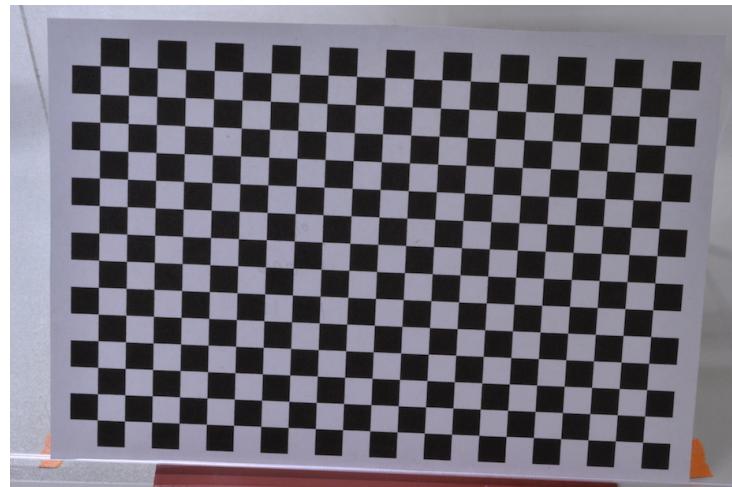


Figura 5.43: Exemplo de padrão de xadrez utilizado para renhecimento. Fonte: <http://stereomorph.blogspot.com.br/>

*RANSAC e Hough Transform.*

#### 5.4.1.1 RANSAC

O método RANSAC (acrônimo para “*RAN*dom *S*ample *C*onsensus”, *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 [35]. 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 artrário 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.

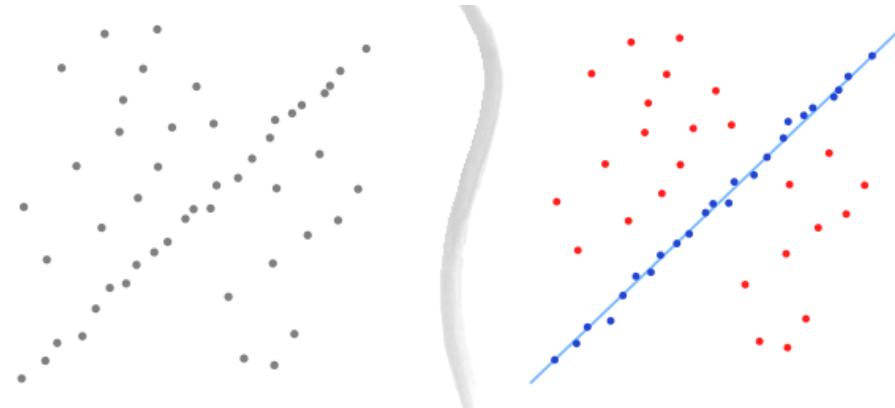


Figura 5.44: Exemplo de reconhecimento de uma linha em 2 dimensões usando RANSAC. (Fonte: [35])

#### 5.4.1.2 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 tem sido recentemente adaptadas para o universo de três dimensões (ver [11]) 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 contém aquele ponto. O espaço de parâmetros é então restrito dentro de certos limites e quantizado por razões de implementação (os recursos computacionais são finitos). É definido então um acumulador, basicamente uma função que conta quantas variedades interceptam determinada região discretizada do espaço de parâmetros. Um 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 5.45).

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

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.

#### 5.4.2 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.

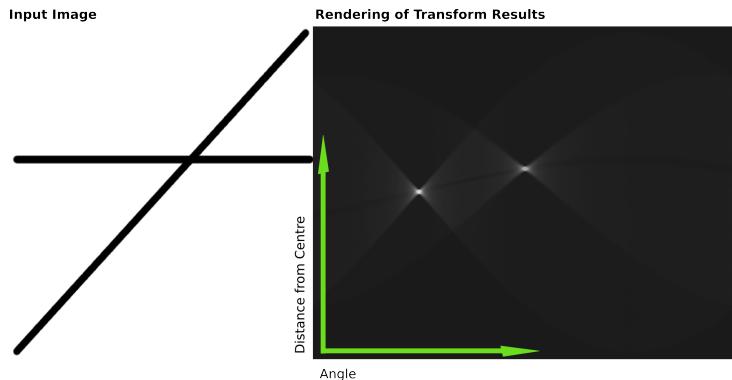


Figura 5.45: Exemplo de reconhecimento de duas linhas em 2 dimensões usando Transformada de Hough. Na esquerda estão pontos que compõem as duas retas, na direita uma sobreposição das variedades referentes a cada ponto das retas (mergulhadas em um espaço paramétrico bidimensional). Os pontos mais brilhantes refletem os picos referentes aos parâmetros que melhor descrevem as duas retas. (Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hough\\_transform](https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform))

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 [5, 12, 21]. Uma comparação dos descritores utilizados para reconhecimento de objetos 2D e 3D pode ser encontrado em [43, 46].

Após o reconhecimento do objeto, é necessário identificar a sua posição. Em [40], o alinhamento é realizado utilizando-se a própria *Range Image* e a informação de profundidade presente na mesma. Por outro lado, em [33] 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 cara 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*.

#### 5.4.2.1 Correspondence Grouping

O método proposto por [41], 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.

#### 5.4.3 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.

#### 5.4.3.1 Dados genéricos

Para um primeiro contato com o funcionamento do método *Correspondence Grouping* foram utilizados dados genéricos disponíveis na literatura<sup>1</sup> 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 5.46 ilustra o modelo da pá em nuvem de pontos, esse modelo é uma representação de 360º da superfície da pá e foi aquisitado em campo, sendo assim representa a real leitura final do sensor na aplicação do algoritmo de calibração.

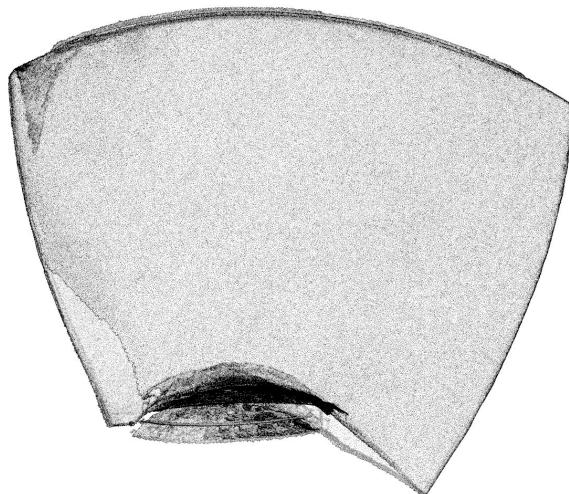


Figura 5.46: Nuvem de pontos da pá aquisitada pelo sensor Faro Focus X330.

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 5.47. 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

---

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

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.

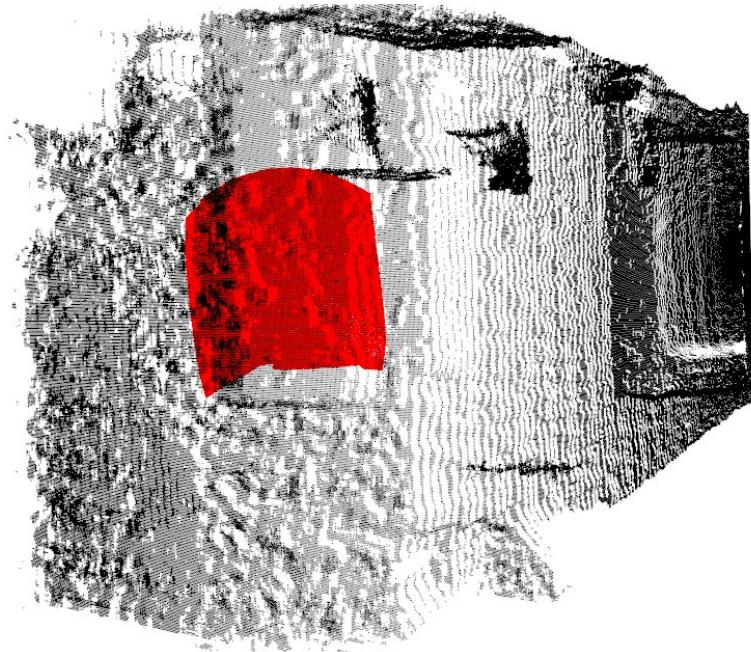


Figura 5.47: Exemplo de localização do modelo da pá em uma cena genérica.

#### 5.4.3.2 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*<sup>2</sup> baseada no *software* de criação 3D *Blender*<sup>3</sup>, 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 5.48 ilustra a utilização do software, assim como o modelo 3D importado da turbina. A simulação leva

<sup>2</sup><http://www.blensor.org>

<sup>3</sup><http://www.blender.org>

em consideração a distância percorrida pelo pulso emitido, a intensidade luminosa retornada ao sensor e o tempo decorrido durante o sensoriamento [20], 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.

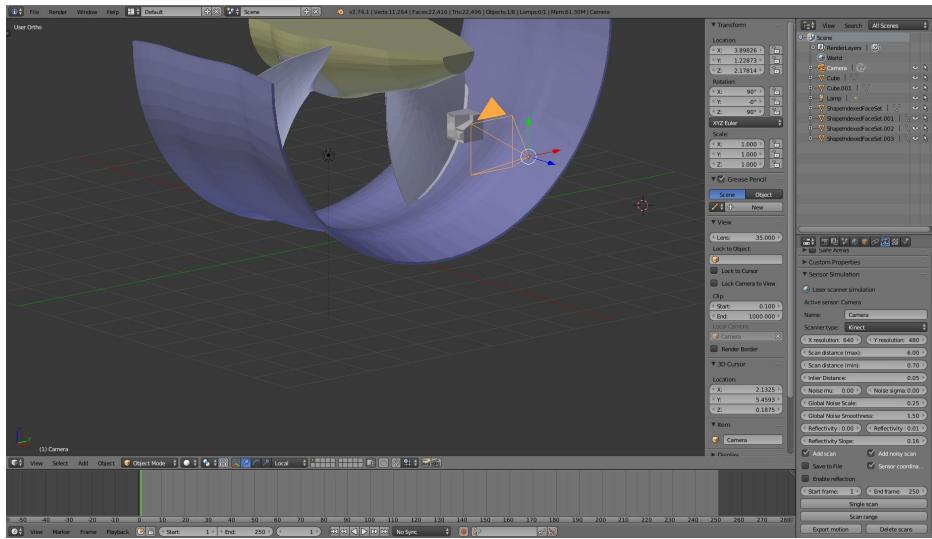


Figura 5.48: Visualização do *Blensor* com o modelo 3D da turbina importado.

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 5.49 ilustra a resposta simulada do sensor implementado dentro do ambiente de simulação com a presença do modelo CAD da turbina.

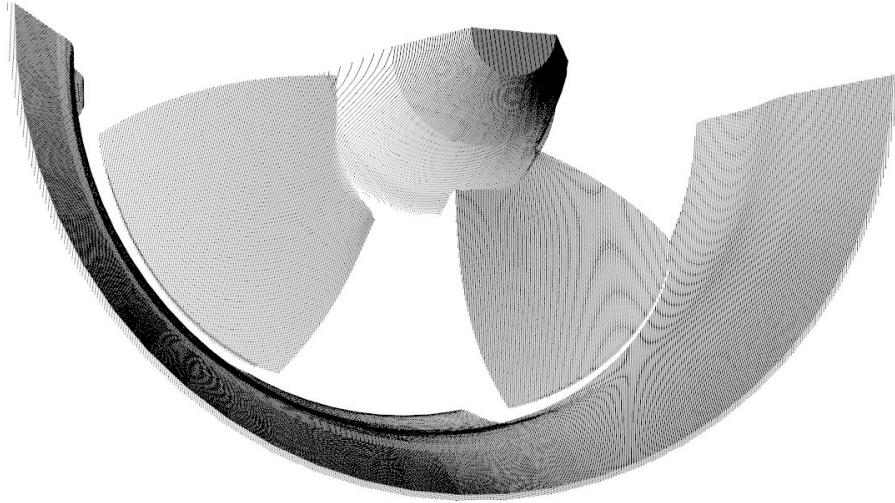


Figura 5.49: Resposta simulada do sensor Faro Focus X330.

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 5.50 ilustra o ambiente de simulação e a nuvem de pontos final para a criação de um modelo a partir de um arquivo descritivo.

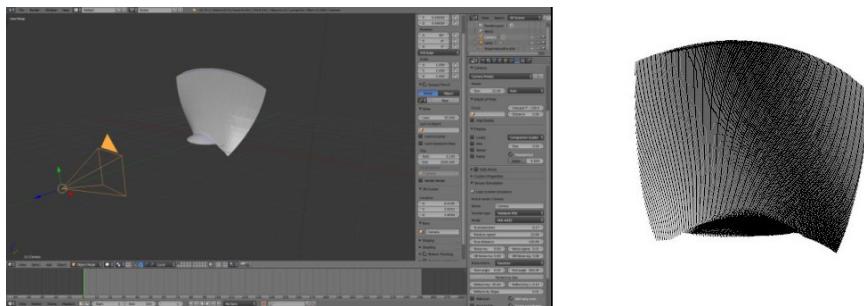


Figura 5.50: Criação de um modelo a partir de um arquivo descritivo da pá.

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 algo-

ritmo, 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 5.51 e, em seguida, posicionado entre o sensor e a pá, para servir de obstáculos para parte dos feixes laser que atingiriam a pá.

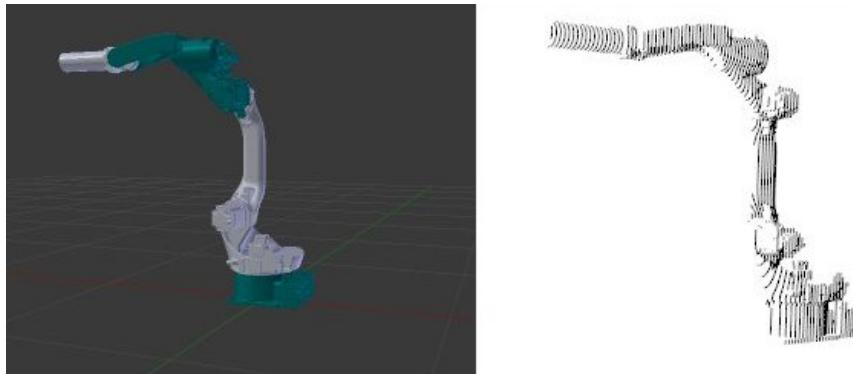


Figura 5.51: Visualização do *Blenso*r com o modelo 3D da turbina importado.

A Figura 5.52 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.

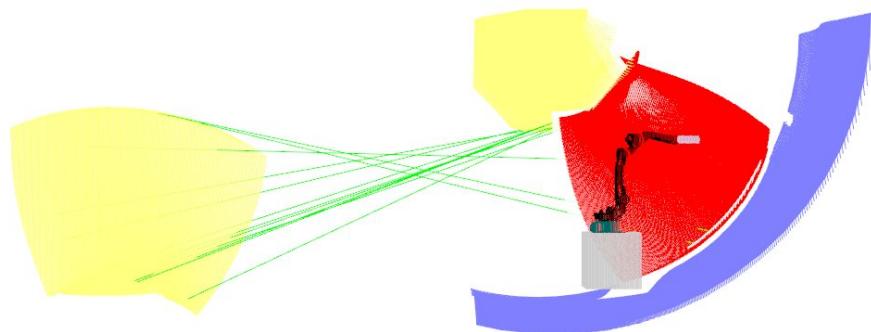


Figura 5.52: Resposta do algoritmo de calibração, com destaque para as correspondências encontradas.

#### 5.4.4 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 pá, chamado de cena e o modelo frontal da pá, chamado de modelo. O ponto de referência considerado no modelo da pá 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 pá  $T_{cp}$ . Para isso, são necessárias as seguintes transformadas:

- $T_{mp}$  - Transformada entre o sensor do modelo e a origem do sistema de coordenadas da pá, 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 pá, 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:

$$T_{cp} = T_{cr} * T_{rp} \sim T_{cm} * T_{mp}. \quad (5.1)$$

A figura 5.53 ilustra a relação entre as transformadas. O erro de medição da transformada pode ser calculado como a discrepância entre os dois termos da relação 5.1 pode ser calculada da seguinte maneira:

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

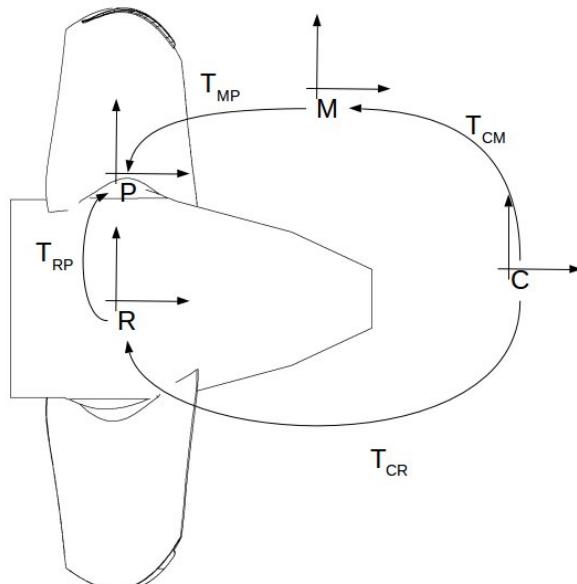


Figura 5.53: Representação dos sistemas de coordenadas de cada componente envolvido na calibração.

Para o teste simulado, ilustrado na figura 5.54 com os respectivos sistemas de coordenadas, o erro angular encontrado a partir de um eixo foi de aproximadamente  $0.5^\circ$  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 pá. Sendo assim, existe ainda uma necessidade de ajuste no processo de calibração, principalmente na etapa de alinhamento final das nuvens de pontos.

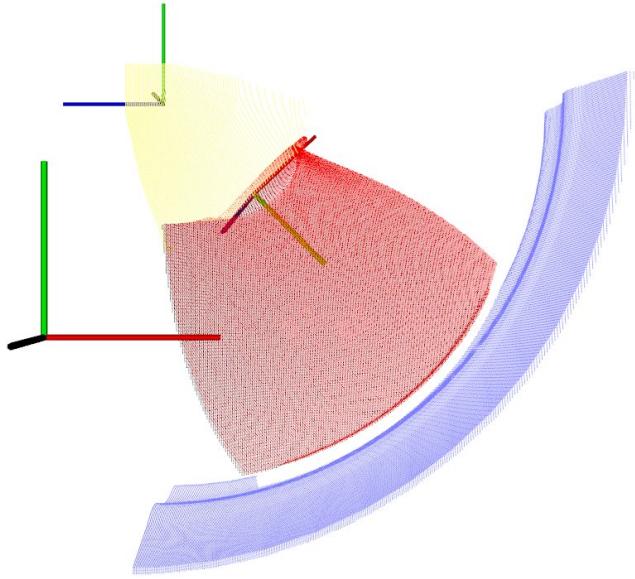


Figura 5.54: Processo de calibração com os sistemas de coordenadas destacados.

#### 5.4.5 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 pá a ser processada. Entretanto, devido às características da pá, 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 pá, 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 computacional, porém desenvolvimento da calibração do robô necessita da chegada dos marcadores para que seja iniciado.

## 5.5 Solução HVOF

Devido à necessidade de verificar o funcionamento dos equipamentos a partir das modificações necessárias para realizar o serviço de revestimento no ambiente do circuito hidráulico da UHE Jirau, foram conduzidos testes que representem a operação no ambiente proposto. A distância do reservatório à pistola pode gerar perda de eficiência no jateamento e na aplicação de revestimento. Também foi verificada a possibilidade de reaplicação de revestimento sobre uma pá com revestimento desgastado, sem jateamento, e análise de substratos para revestimento.

### 5.5.1 Análise da aplicação de revestimento

Atualmente, as mangueiras que conduzem o gás de arraste do pó até o reservatório (hooper) possui 5m. Nas condições de aplicação de revestimento *in situ*, o posicionamento do reservatório dentro da turbina pode chegar a 25m do painel alimentador, logo os comprimentos das mangueiras foram trocas para simular a aplicação. O objetivo foi avaliar a qualidade do revestimento aplicado nas condições *in situ*, e o equipamento Accura Spray através da produção de corpos de prova. Os testes de qualificação do revestimento são: dobramento, dureza, adesão e metalografia.

As atividades tiveram o intuito de simular a perda de carga dos gases combustíveis e de arraste da partícula quando *in situ*. As etapas realizadas foram: substituição das mangueiras que conduzem o gás de arraste (N<sub>2</sub>) até o reservatório de pó; substituição das mangueiras de propano e oxigênio; substituição das mangueiras de água de refrigeração da pistola de coating; acionamento da pistola, movimentação do manipulador e monitoramento com o sensor de chama (Accura Spray).

Os resultados estão apresentados na Tabela 5.4. Os parâmetros utilizados durante a execução dos testes estão na Tabela 5.5. Os mesmos parâmetros foram utilizados para os testes de altura. Outros três testes foram realizados a partir das condições apresentadas na Tabela 5.4. As modificações nos parâmetros no console foram monitoradas pelo sensor de chama Accura Spray. Os resultados observados estão resumidos na Tabela 5.6.

Após a modificação descrita acima, o comprimento da mangueira de água foi substituído por 30m, e a instalação de uma bomba hidráulica para a aplicação em 0 m até 4 m. A substituição das mangueiras do gás de arraste desde o console do alimentador até o reservatório de pó consiste na retirada das mangueiras em todas as conexões que

Tabela 5.4: Resultados dos teste de metalização em longas distâncias

Estabilização da chama	Etapa inicial foi normal em termos de tempo e fluxo de material, condizente com o utilizado atualmente.
Teste dinâmico	Não houve variação visual da chama durante movimentação do robô nos sentidos vertical e horizontal.
Teste estático	O teste de monitoramento com o sensor mostrou uma variação de velocidade da chama dentro dos limites aceitáveis para esse critério: de 550 a 750 m/s. A observação foi realizada durante 30 min com a pistola ligada.

Tabela 5.5: Parâmetros

Propano Vazão/Pressão	35 FMR/100 Psi
Oxigênio Vazão / Presão	35 FMR/150 Psi
Ar comprimido Vazão/Presão	42 FMR/100 Psi

Tabela 5.6: Resultados observados durante teste de modificação de parâmetros no console de vazão de gases e distância de aspersão.

Modificação	Resultado observado
Variação na taxa de aspersão: 40g/min para 15g/min	Foi aumentada a velocidade da chama.  Tanto o aumento como a diminuição da vazão de ar provocaram a diminuição
Variação na vazão de Ar no console: 45scfh para 30 scfh	da velocidade da chama, ficando evidente que existe um ponto ótimo que deve ser ajustado de acordo com a condição da instalação de todo equipamento.
Variação da distância de aspersão: 230 mm para 50 mm	A velocidade da chama variou de aproximadamente 700 m/s para 1056 m/s.  Enquanto que a temperatura subiu de 1600°C para 1700°C aprox.

vão do reservatório até o console, instalação das mangueiras novas, e avaliação do funcionamento da máquina nessa nova condição. Da mesma forma, o objetivo foi avaliar o funcionamento do equipamento através do uso do Accura Spray.

A aplicação em altura foi realizada da seguinte forma: após substituição das mangueiras, a pistola de revestimento foi posicionada no nível de zero metros; o sensor de chama foi posicionado perpendicularmente à pistola de coating e a uma distância de 230mm; a pistola foi acionada (ignição) e os ajustes de vazão dos gases foram realizados; o alimentador de pó foi acionado para inicialização do fluxo de pó e os ajustes da vazão foram realizados.

A etapa inicial de queima é a estabilização da chama, onde a variação de vazão de pó no console e o aspecto da chama é observado antes do início da aspersão propriamente (ou seja, antes da aplicação do pó na peça ou amostra). Após a estabilização, a aspersão foi observada pelo sensor de chama Accura Spray e o valor foi registrado. Após o registro da temperatura e velocidade da chama, os corpos de prova foram metalizados. Repetiu-se esse procedimento para as alturas de 1.3; 2.6 e 4 m.

O cabeçote do equipamento Accura Spray é montado em um tripé, perpendicular

Tabela 5.7: Valores registrados pelo sensor de chama Accura spray no teste de metalização em diferentes alturas do braço robótico.

Altura de aspersão (m)	Velocidade da chama (m/s)	Temperatura da chama (°C)
0	608	1592
1.3	682	1553
2.6	630	1632
4	588	1590

e distante 8 polegadas da linha da chama de aspersão e a 230 mm de distância (essa distância varia conforme o intuito do teste ou conforme o pó utilizado) do bocal da pistola de aspersão. O Accura Spray é operado por meio de software específico. A Fig. 5.55 apresenta o notebook contendo o programa para operação do equipamento fora da cabine com o cabeçote (ao fundo) no interior da cabine.

As vazões e pressões dos gases de combustão do processo durante o teste de operação da pistola em longas distâncias é regulado no console do equipamento enquanto que o resultado da medição dos parâmetros de chama durante o teste é visualizado no notebook com o software do Accura Spray.

A montagem e realização dos testes de operação com variação da altura de aspersão são realizadas juntamente com o ajuste do equipamento Accura Spray na condição de operação mais baixa possível, próximo a 0 m. Após o posicionamento do robô e do accura spray é realizado a avaliação inicial da chama para a altura de 0 m. Da mesma forma anterior, os parâmetros de chama medidos nessas condições são visualizados na interface do accura spray.

Para a execução dos testes utilizando o manipulador com a pistola em posições mais elevadas foi realizada a instalação de uma bomba para evitar a queda da pressão de água de refrigeração da pistola. Após o posicionamento, teve de ser realizada uma aferição visual do paralelismo do cabeçote com a chama de aspersão, para evitar desvios na medição. Na ultima etapa desse teste foi realizada aspersão com o manipular posicionado em 4 m de altura, juntamente com instalação do cabeçote do Accura Spray conforme Fig. 5.56.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados registrados pelo sensor de chama.



Figura 5.55: Monitoramento da temperatura e velocidade da chama de aspersão (janeiro/2016).



Figura 5.56: Posicionamento do robô e programação do movimentador, posicionamento dos corpos de prova e do Accura Spray para aplicação em 4 metros (janeiro/2016).

### 5.5.2 Análise do jateamento

A preparação da superfície é uma etapa crítica da operação de aspersão térmica pois o grau de adesão do revestimento ao substrato está diretamente relacionado à limpeza e rugosidade da peça que deve ser metalizada. O jateamento abrasivo é realizado seguindo normas de preparação de superfície para garantir o sucesso na aplicação de revestimentos por aspersão térmica. Para a detecção de falhas no metal base, uma inspeção prévia à operação de revestimento é necessária, pois falhas estruturais no material serão copiadas pelo revestimento. Por exemplo, uma trinca no metal base não pode ser reparada pelo processo aspersão térmica. Os materiais depositados por essa técnica não adicionam resistência mecânica ao substrato.

Na primeira etapa da preparação da superfície deve ser feita limpeza de partículas, óleos e umidade. A umidade na superfície é minimizada através de pré-aquecimento, garantindo a efetividade do jateamento abrasivo. Ao longo de todo ciclo de metalização, a limpeza da superfície deve ser preservada, sem contaminação por partículas, umidade e oleosidade. O Jateamento é realizado a partir de um jato de ar comprimido contendo partículas abrasivas ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) direcionadas à superfície que deve ser limpa. Durante a

aspersão, as partículas semi-fundidas aderem à superfície pelo impacto e moldagem à rugosidade da superfície e posterior contração causando um ancoramento mecânico. Por este motivo, a criação de uma superfície rugosa aumenta a aderência e a coesão entre as partículas devido às tensões superficiais de contração, inter-travamento entre camadas, aumento da área exposta e descontaminação da superfície.

As condições de jateamento, como tipo de abrasivo, pressão do jato, fatores ambientais e contaminação da superfície, devem ser atentados no momento do procedimento. No ambiente da turbina hidrelétrica, deve ser observada a formação de orvalho na superfície da pá e, se necessário, realizar preaquecimento. A principal modificação existente no ambiente proposto está relacionada à perda de pressão do jato, devido ao grande comprimento de mangueiras utilizados: do reservatório ao bocal.

Testes comparativos de jateamento foram realizados com perda de carga em altura, comparando-se as rugosidades nos corpos de prova na medida em que a altura do bico do jato aumenta em relação ao reservatório de óxido. Foram utilizadas alturas de 0 m; 1.7 m; 3.3 m e 4.4 m. A análise de desempenho é realizada posteriormente com o rugosímetro. Duas pressões são também avaliadas para verificar a perda de rendimento na criação da rugosidade, a partir de um regulador de pressão.

A medição de rugosidade é realizada através de um dispositivo com sistema de apalpamento através de uma linha na superfície. O principal parâmetro de medição é a rugosidade Ra que é a média aritmética dos valores das ordenadas de afastamento dos pontos de perfil de rugosidade dentro do percurso de medição. A rugosidade ideal para o recebimento do material de coating deve ser criada a partir do jateamento com grãos angulares de alumina e deve ficar com valor final Ra mínimo de 3.2 microns.

A Tabela 5.8 apresenta os resultados obtidos para 5 e 8 bar de pressão de jateamento em corpos de prova com dureza de 40 HRC.

Houve decréscimo na rugosidade obtida com a redução da pressão de jateamento de 8 para 5 bar. Porém, para uma mesma pressão, o rendimento se manteve constante com o aumento da altura. Comparando os valores de 0 m com 4.4 m houve inclusive acréscimo da rugosidade, provavelmente pelo fato de a mangueira ser muito longa, a altura ajudou a reduzir o número de curvas do sistema.

Tabela 5.8: Resultados dos testes de preparação de superfícies

Pressão de Operação (Bar)	Altura de jateamento (m)	Média das Rugosidades Ra Medidas ( $\mu\text{m}$ )
5	0	3.11
5	1.7	3.07
5	3.3	2.63
5	4.4	3.34
8	0	3.61
8	1.3	4.15
8	3.3	4.44
8	4.4	4.62

### 5.5.3 Combustível GLP

O uso de combustível GLP foi investigado no processo de aspersão a partir de corpos de prova metálicos. A análise de desempenho é medida por ensaios de adesão, metalografia e microdureza. Os elementos do teste são: pó de carboneto de tungstênio com matriz de cobalto e cromo, GLP e oxigênio como gases da combustão, nitrogênio para arraste do pó, ar comprimido e água para refrigeração da pistola, e uma pistola de metalização Diamond Jet modelo DJ2700 (sulzer com refrigeração híbrida). O equipamento de metalização utilizado para realização do processo de aspersão produz a chama para a fusão do pó metálico a partir da combustão do propano. Neste estudo foram realizados testes prévios utilizando-se o GLP como gás combustível a fim de encontrar os parâmetros ideais de funcionamento do equipamento para a deposição de um revestimento sem perda de características técnicas.

Os resultados foram comparados com os critérios pré-definidos pelo fabricante da matéria prima e outros testes utilizando propano como combustível. Nessa perspectiva, não houve perda de características técnicas do revestimento a partir do uso do GLP como combustível. A importância desse teste está relacionada com a facilidade de fornecimento de GLP em relação ao propano, pois como se trata de uma solução abrangente e as usinas hidrelétricas situam-se muitas vezes em locais ermos com baixas opções de fornecimento de insumos. A distinção básica entre o GLP e o propano trata-se de que o GLP é uma

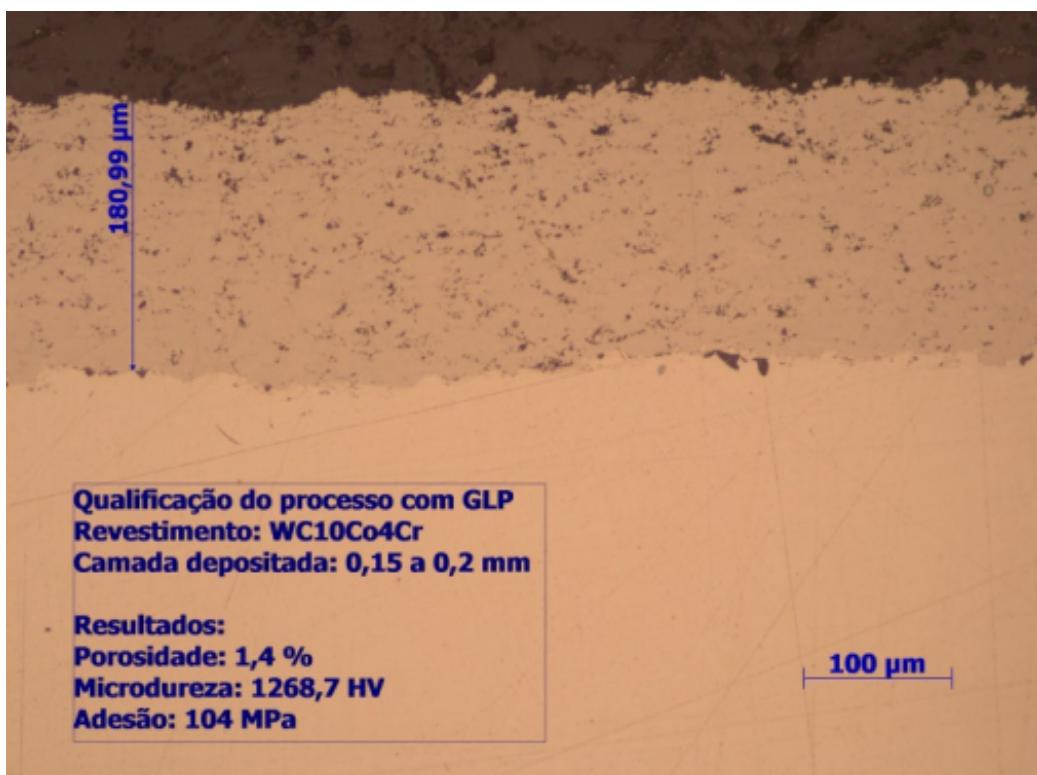


Figura 5.57: Propriedades do revestimento de Carboneto de Tungstênio-Cobalto-Cromo via HVOF com combustível GLP.

mistura de propano e butano e, além disso, possui custo reduzido ( R\$ 5,00/kg) de fornecimento em relação ao propano ( R\$16,00/kg). Deve ser feito uma observação para utilização do GLP em locais frios, pois a sua temperatura de vaporização é mais elevada tornando a vazão de fornecimento instável. Esse problema não se aplica, porém, para a região de Porto Velho – RO onde se encontra a UHE Jirau. A Fig. 5.57 apresenta uma imagem do ensaio de metalografia realizado em amostras de revestimento aspergido com GLP juntamente com os resultados dos ensaios citados anteriormente.

#### 5.5.4 Reaplicação de revestimento sobre superfície desgastada

Com o intuito de testar a metalização sobre o revestimento já desgastado da pá e o seu desempenho quanto à adesão, um teste de aplicação sobre revestimento desgastado foi conduzido. Foi utilizada a seguinte metodologia: jateamento dos corpos de prova metálicos; aplicação de 0.1 mm de camada de WC; medição da rugosidade; polimento do revesti-

mento com lixa 200; medição da rugosidade; jateamento sobre superfície revestida e polida; medição de rugosidade; metalização sobre revestimento polido e jateado; execução dos ensaios de adesão e dobramento e metalografia.

Para avaliação do desempenho de aspersão térmica aplicada sobre revestimento remanescente de uma peça, foi necessário realizar um teste de revestimento com desgaste, jateamento sobre o revestimento, e a avaliação da adesão do conjunto. Após as medições, foi realizado um polimento da superfície com lixa 300 para desgastar o revestimento de carboneto de Tungstênio. No momento em que a superfície ficou com desgaste na qual a rugosidade Ra ficasse abaixo de 1.0 micron, o polimento foi cessado e a medição de espessura foi realizada para garantir que ainda havia camada de revestimento duro para posterior jateamento e aspersão.

Os testes de dobramento são realizados de forma comparativa com a superfície somente jateado, sem revestimento prévio. No ensaio de dobramento, avaliou-se que há formação de trincas na superfície do revestimento a partir do dobramento em 90° de uma chapa com espessura de 4.0 mm em um mandril com diâmetro de 16 mm. Comparativamente com a amostra sem revestimento prévio poucas trincas apareceram e não houve destacamento do revestimento, com exceção das bordas, porém em nível aceitável. Para o teste de adesão conforme a norma ASTM C633 é considerado um resultado como garantia de adesão apropriada uma tensão mínima de destacamento de 70 Mpa. O resultado do ensaio de adesão atendeu a esse critério, com o rompimento se dando na cola utilizada para realizar o ensaio.

### **5.5.5 Seleção dos revestimentos**

A aplicação com uso de Accura Spray para ajuste de parâmetros é realizado para avaliar as modificações de vazão de gases no ajuste da chama de aspersão. Para cada configuração de mistura de gases é registrado a velocidade e temperatura da partícula aspergida a fim de se obter o melhor parâmetro de aspersão, melhorando o rendimento e as propriedades do revestimento. Foram utilizados 5 parâmetros de aspersão com o material de Carboneto de Tungstênio-Cobalto Cromo com tamanho de grão entre 11 microns e 45 microns (WCCoCr). O parâmetro que forneceu revestimento com menor nível de porosidade foi replicado para aspergir material com Carboneto de Tungstênio-Cobalto Cromo com tamanho de grão entre 15 microns e 45 microns (WS11) e material com Carboneto de Tungstênio-Niquel Cromo (WCNi). Para todos os materiais foram realizados ensaios

para avaliação de resistência à corrosão, além do material em aço inoxidável AISI 410 sem revestimento.

A aspersão com uma pistola de coating do tipo DJ2700 forneceu a melhor característica de chama com os seguintes parâmetros: vazão de 72 L/min a 100 Psi de Combustível; vazão de 260 L/min a 150 Psi de Oxigênio; vazão de 340 L/min a 100 Psi de Ar comprimido; taxa de alimentação de pó de 40 g/min; distância de trabalho de 230 mm; ângulo de aspersão de 90°; velocidade de deslocamento da pistola de 500 mm/s; velocidade de chama medida de 700 m/s; e temperatura de chama medida de 1780°C via Accura Spray. Os testes destrutivos em corpos de prova WCCoCr e WCNi são realizados nestas condições.

#### 5.5.5.1 Análise dos substratos à corrosão

As técnicas empregadas no estudo de resistência a corrosão dos sistemas (aço inox AISI 410 recoberto por HVOF por camadas a base de WC) são: registro do potencial do circuito aberto (OCP); e curvas de polarização eletroquímica.

O potencial de circuito aberto é uma das variáveis que pode indicar a suscetibilidade à corrosão. Em geral, quanto menor esse valor, maior será à corrosão do sistema em estudo. Há uma tendência de que o material corroa mais no sistema que apresente potenciais mais baixos em relação ao que apresente potenciais mais altos. O potencial de circuito aberto (OCP) é medido por 60 minutos e, em seguida, é realizado ensaio de polarização potenciodinâmica por um potenciómetro/galvanostato, e uma célula eletroquímica, onde a qual é disposta em uma gaiola de Faraday para diminuir as interferências elétrico-magnéticas externas. Este OCP pode ser observado também nas curvas de polarização quando a corrente tende a zero.

A curva de polarização eletroquímica é outra análise que permite avaliar o comportamento à corrosão de um determinado sistema metal-meio. Nessa técnica, pode-se modificar o potencial de repouso (potencial de circuito aberto) para valores mais positivos de potencial acelerando o processo corrosivo. A taxa de corrosão esperada será proporcional à densidade de corrente registrada. Esse ensaio permite determinar o potencial de pite, o qual será o potencial onde se observa um aumento brusco de corrente.

Para todos os ensaios foi utilizada uma célula convencional de três eletrodos, com eletrodo de calomelano saturado (ECS) como eletrodo de referência e eletrodo de platina como contra eletrodo. As medidas foram realizadas em solução aquosa de 3,5% de NaCl

em peso, não agitada, naturalmente aerado e à temperatura ambiente. O potencial de circuito aberto (OCP) foi monitorado durante a primeira hora de imersão no eletrólito antes do ensaio de polarização. O intervalo de varredura foi de -100 mV abaixo do potencial de circuito aberto até 300 mV acima do OCP, com uma velocidade de varredura de 1 mV/s.

Na Fig. 5.58, (A) mostra as curvas de potencial de circuito aberto das amostras que sofreram variações nos parâmetros de deposição, com o intuito de diminuir a porosidade dos revestimentos. Em todos os sistemas são observados uma redução no potencial de circuito aberto com o decorrer do tempo, podendo indicar um aumento de agressividade da solução presente nas irregularidades das camadas revestidas. Não é possível observar diferenças significantes entre as curvas OCP, no entanto, o sistema 4 apresentou potenciais mais ativos de corrosão comparado com os demais sistemas, possivelmente pelo alto nível de porosidade presentes no revestimento.

Para as curvas de OCP apresentadas na Fig. 5.58 (B), foi selecionado os dois revestimentos com menores porosidades nas medições anteriores assim como o substrato, o WS 11 o qual foi utilizado pó com granulometria diferente e o WCNi.

Conforme já comentado, os sistemas revestidos sofreram redução ao longo do tempo pela provável modificação da solução no interior dos poros, ao contrário do comportamento do substrato, que por ser maciço, não apresenta poros. Neste caso observa-se um aumento do potencial de corrosão com o tempo, indicando redução no processo corrosivo, possivelmente devido ao espessamento do filme protetor do óxido de cromo.

Na Fig. 5.58 (C), são apresentados os ensaios de polarização eletroquímica da variação de alguns parâmetros operacionais. Nota-se que os revestimentos com menores porosidades apresentam potencial de circuito aberto (quando a curva tende a zero) mais elevado (menos negativos) indicando menor taxa de corrosão. Além disso, à medida que a porosidade é reduzida, as curvas de polarização tendem a se deslocar a esquerda, no sentido das menores correntes, resultando em menores taxas de corrosão.

Na Fig. 5.58 (D), são apresentadas as curvas de polarização dos sistemas que tiveram menores porosidades e melhores desempenhos na Fig. 5.58 (C), o substrato de aço inoxidável AISI 410 jateado, a amostra WS 11 utilizando um pó com granulometria de 15/45 e a amostra WCNi com matriz de níquel. Analisando a Fig. 5.58 (D), pode-se dizer preliminarmente que os sistemas que apresentaram melhor desempenho frente a corrosão, protegendo efetivamente o substrato, são os sistemas 5 e o WCNi. Esse resultado é fruto de apenas uma técnica, necessitando de confirmação com outros tipos de

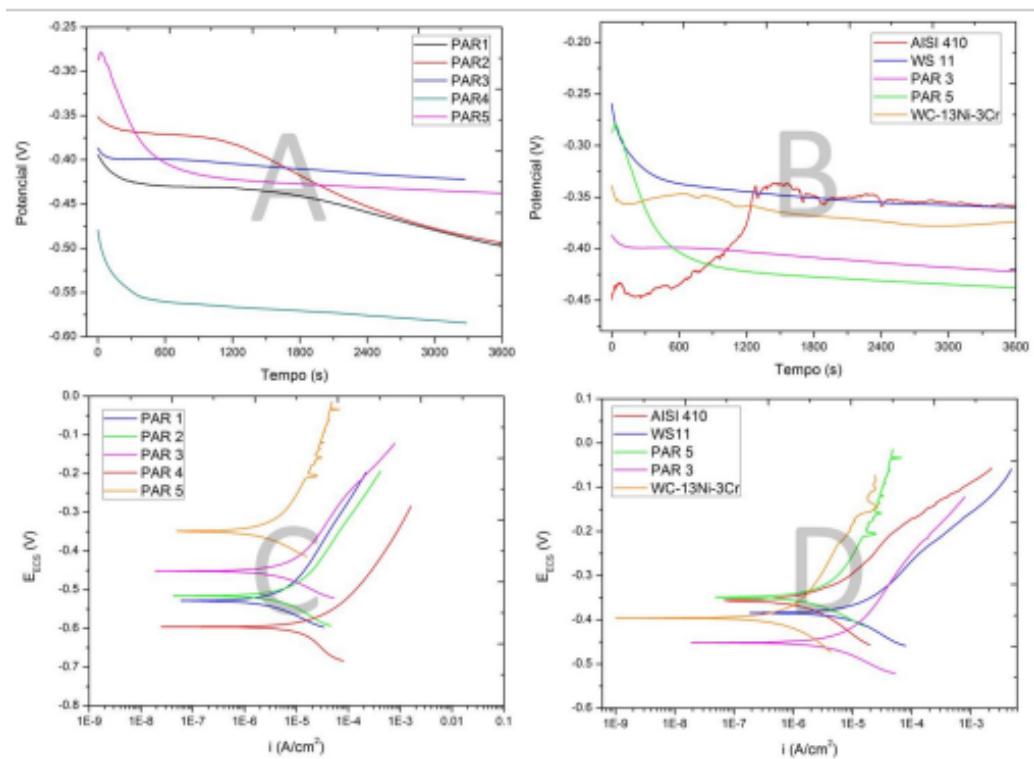


Figura 5.58: (A): Potencial de Circuito Aberto, com variação de parâmetros de aspersão térmica dos revestimentos de WC-10Co-4Cr com granulometria do pó 11/45; (B) Potencial de Circuito Aberto de diferentes sistemas comparando com o substrato Jateado; (C) Ensaio de Polarização com variação de parâmetros dos revestimentos de WC-10Co-4Cr com granulometria do pó 11/45; (D) Ensaio de polarização dos diferentes sistemas comparando com o substrato jateado.

Tabela 5.9: Parâmetros dos ensaios de cavitação conforme ASTM G32

Parâmetro	Valor
Frequência de Vibração	20 kHz $\pm$ 0.5kHz
Amplitude de Vibração	50 microns
Fluido de imersão	Água destilada
Temperatura da água	25°C $\pm$ 2°C
Profundidade de imersão	12 $\pm$ 4 mm
Diâmetro do sonotrodo	15.9 $\pm$ 0.05 mm
Distância entre amostra e sonotrodo	0.5 mm
Tempo para cada ciclo de medição	20 min
Tempo total de ensaio por amostra	10h

ensaços que considerem tempos mais longos de exposição das amostras ao meio. Como, por exemplo, ensaio de imersão ou impedância eletroquímica.

Pode-se concluir que os teores de porosidade crescentes pioram o desempenho da camada em proteger o substrato contra corrosão. Entre as camadas estudadas, as que apresentaram efetiva proteção ao substrato foram os sistemas 5 e WCNi. A presença de níquel no revestimento demonstra ser promissor em relação à proteção do substrato à corrosão.

#### 5.5.5.2 Análise dos substratos à cavitação

A metodologia dos ensaios de cavitação seguiu as recomendações da norma ASTM G32, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory, que prevê duas formas de realização dos testes: método direto e indireto. Um desenho esquemático do equipamento utilizado para o teste via método direto pode ser visualizado na Fig.5.59. O método indireto prevê que a amostra permaneça imersa no bequer de água e com a face que deverá ser ensaiada de frente para o sonotrodo a uma distância padrão. O sonotrodo é uma dispositivo que está acoplado ao transdutor e vibra na frequência definida, induzindo um dano por cavitação na superfície da amostra. Os parâmetros do ensaio estão apresentados na Tabela 5.9. A frequência de vibração do sonotrodo é ajustada através do módulo gerador de frequência utilizado pelo laboratório do departamento de engenharia metalúrgica e de materiais da Universidade Federal de São Paulo (USP).

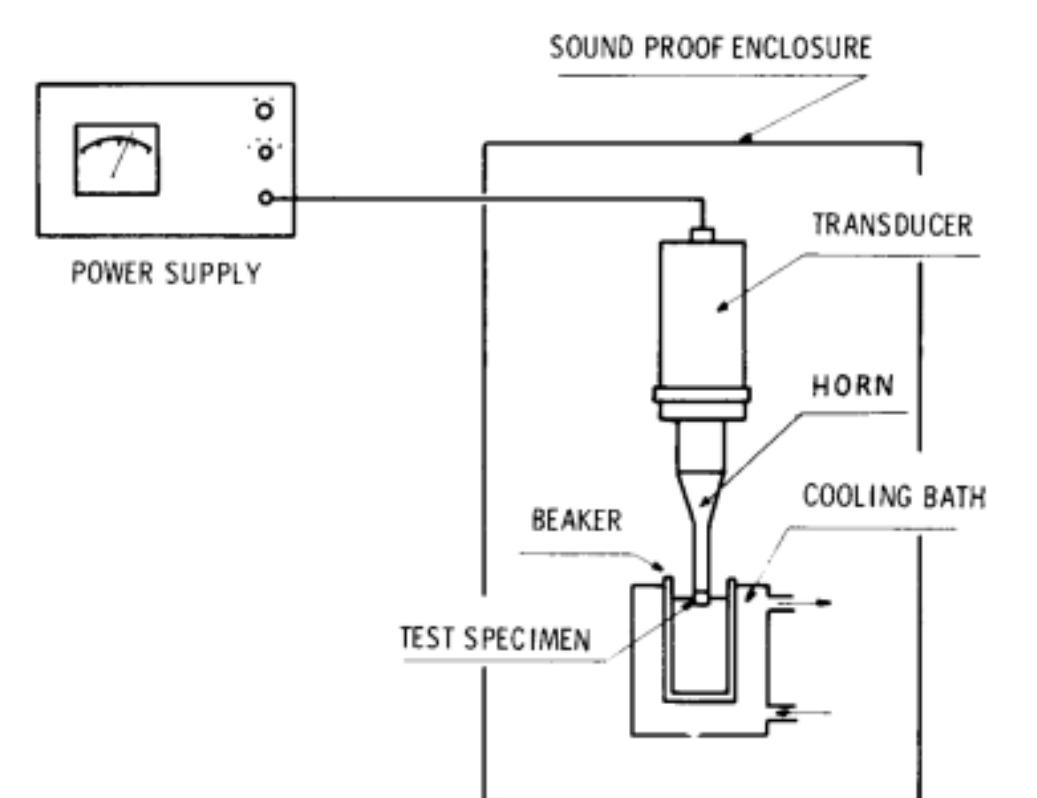


Figura 5.59: Desenho esquemático do ensaio de cavitação pelo método direto. Retirado da Norma ASTM G32.

Os corpos de prova foram fabricados em material AISI 410 temperado e revestidos de forma que a dureza final alcançada estivesse entre 34 e 37 HRC. As amostras foram usinadas com geometria que atendesse à norma ASTM G32, ao encaixe no porta amostra do equipamento de cavitação, e à facilidade de ser acoplada a um dispositivo de metalização. Elas foram jateados até uma rugosidade mínima de 3.2 microns, foram instaladas na cabine de metalização do equipamento DJ2700 para deposição dos recobrimentos. Para deixar a superfície mais adequada para realização dos ensaios, todas as superfícies receberam leve polimento manual de forma que todas as superfícies ficassem com rugosidade Ra normalizada abaixo de 2.5 microns.

A análise foi comparativa entre os dois revestimentos (WCCoCr e WCNiCr) em relação ao material base AISI 410. Após as amostras terem sido preparadas para que ficassem com a mesma rugosidade superficial e próximo a 2.5 microns, foram enviadas para a realização do ensaio, no qual o resultado será fornecido em perda de massa para um mesmo tempo de ensaios nos três sistemas realizados.

Para avaliar a influência do acabamento superficial também foi realizado ensaio em uma amostra de aço inox com polimento superior a fim de deixar a rugosidade abaixo de Ra 0.32. O procedimento de ensaio consiste nas seguintes etapas:

- Preparação superficial da amostra para ajuste da rugosidade através de lixamento e polimento;
- Limpeza da amostra com álcool;
- Limpeza da amostra em ultrassom e acetona;
- Limpeza com álcool e secagem com ar quente;
- Pesagem inicial em balança de 5 dígitos;
- Fixação da amostra no dispositivo;
- Execução do ensaio por 20 min;
- Limpeza conforme itens b, c, d;
- Nova pesagem;
- Nova execução de ensaio por mais vinte minutos e repetição de todo o procedimento até completar 10 horas de ensaio.

Tabela 5.10: Resumo das propriedades dos materiais utilizados para ensaios de Cavitação

Amostra	Metal	Revestimento	Método de aplicação	Espessura de camada (mm)	Rugosidade Ra ( $\mu m$ )	Dureza superfície (HV)
WCNi	AISI 410	86%WC 13% Ni 3% Cr	HVOF	0.180-0.210	Min. 2.2	1000-1300
WCCoCr	AISI 410	84%WC 10% Co 4% Cr	HVOF	0.180-0.210	Min. 2.2	1100-1400
410	AISI 410	N/A	N/A	N/A	Min. 2.2	350-400
410P	AISI 410	N/A	N/A	N/A	Máx. 0.4	350-400

A realização do estudo de cavitação utilizou os materiais do metal base em aço Inoxidável AISI 410, além de amostras revestidas com materiais a base de WC em matriz de Cobalto e cromo e a base de WC com matriz de Niquel e Cromo. Para identificação das amostras durante condução dos testes, a seguinte nomenclatura foi utilizada:

1. WCNi: metal base em aço inoxidável, revestido com 0.2 mm de Carboneto de Tungstênio em matriz metálica de Niquel-Cromo pelo processo HVOF e sem acabamento superficial alcançando rugosidade de mínima de 2.2 microns.
2. WCCoCr: metal base em aço inoxidável, revestido com 0.2 mm de Carboneto de Tungstênio em matriz metálica de Cobalto-Cromo pelo processo HVOF e sem acabamento superficial alcançando rugosidade mínima de 2.2 microns.
3. 410: metal base em aço inoxidável, sem revestimento, com a superfície jateada e leve acabamento superficial para produção de rugosidade mínima de 2.2 microns.
4. 410P: metal base em aço inoxidável, sem revestimento, com superfície acabada através de lixamento progressivo desde lixa 80 até 600 para atingir rugosidade máxima de 0,4 microns.

Um resumo das características das amostras está apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.11: Tabela com medições de massa e cálculo de perda de massa durante ensaio de cavitação.

WC10Co4Cr			WCNi			410		
Tempo (min)	Peso (g)	Perda de massa	Tempo (min)	Peso (g)	Perda de massa	Tempo (min)	Peso (g)	Perda de massa
0	54.40645	0.00000	0	54.00434	0.00000	0	52.30166	0.00000
20	54.40252	0.00393	20	54.00177	0.00257	20	52.29752	0.00414
40	54.40160	0.00485	40	54.00105	0.00329	40	52.29634	0.00532
60	54.40044	0.00601	60	54.0033	0.00401	60	52.29533	0.00633
80	54.39953	0.00692	80	53.99907	0.00527	80	52.29442	0.00724
100	54.39884	0.00761	100	53.99901	0.00533	100	52.29349	0.00817
120	54.39797	0.00848	120	53.99863	0.00571	120	52.29254	0.00912
180	54.39565	0.01080	180	53.99734	0.00700	180	52.28958	0.01208
240	54.39387	0.01258	240	53.99610	0.00824	240	52.28675	0.01491
300	54.39170	0.01475	300	53.99503	0.00931	300	52.28368	0.01798
360	54.39063	0.01582	360	53.99404	0.01030	360	52.28070	0.02096
420	54.38997	0.01648	420	53.99263	0.01171	420	52.27706	0.02460
480	54.38880	0.01765	480	53.99150	0.01284	480	52.27485	0.02681
540	54.38660	0.01985	540	53.99010	0.01424	540	52.27178	0.02988
600	54.38465	0.02180	600	53.98912	0.01522	600	52.26859	0.03307

Os resultados comparativos entre as amostras WCNi, WCCoCr e 410 estão apresentados na Tabela 5.11, e no gráfico do Fig. 5.60. Os resultados comparativos entre as amostras 410 e 410P estão apresentadas na Tabela 5.12 e no gráfico da Fig. 5.61.

Pode-se concluir que ambos os revestimentos melhoraram a resistência à cavitação da superfície, tendo o revestimento WCNi a base de Carboneto de Tungstênio em matriz de Níquel-Cromo rendimento aproximadamente 50% superior ao revestimento WCCoCr.

Após a entrega dos resultados comparativos entre as amostras com e sem revestimento, foi realizada uma visita ao laboratório responsável pela execução dos testes. Durante essa visita foram realizadas as seguintes atividades:

1. Verificação da metodologia utilizada e dos parâmetros utilizados nos ensaios;
2. Discussão técnica dos resultados;

## Graficos perda de massa vs tempo

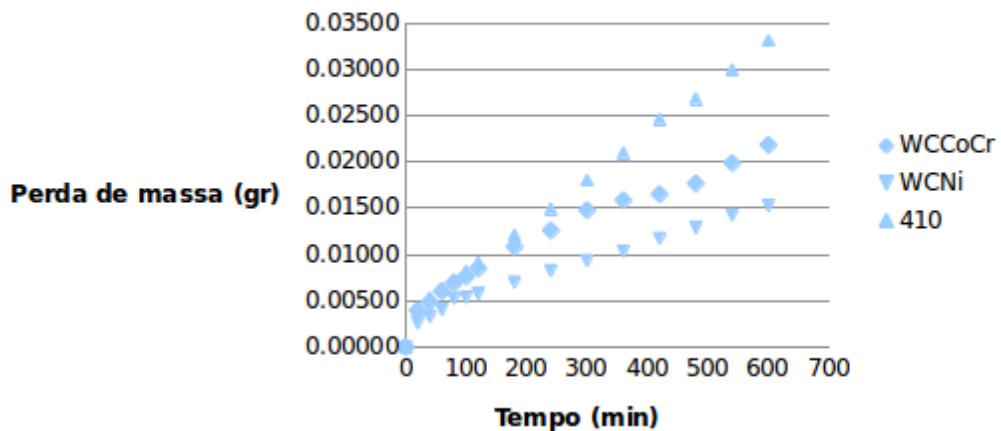


Figura 5.60: Resultados comparativos entre as amostras de materiais distintos.

Tabela 5.12: Mediçãoes de perda de massa durante ensaio de cavitação das amostras 410P.

410 (Ra 2.2)			410P (Ra 0.4)		
Tempo (min)	Peso (g)	Perda de massa	Tempo (min)	Peso (g)	Perda de massa
0	52,30166	0,00000	0	52,15546	0,00000
20	52,29752	0,00414	20	52,15495	0,00051
40	52,29634	0,00532	40	52,15457	0,00089
60	52,29533	0,00633	60		
80	52,29442	0,00724	80		
100	52,29349	0,00817	100		
120	52,29254	0,00912	120		
180	52,28958	0,01208	180	52,15273	0,00273
240	52,28675	0,01491			
300	52,28368	0,01798			
360	52,28070	0,02096			
420	52,27706	0,02460			
480	52,27485	0,02681			
540	52,27178	0,02988			
600	52,26859	0,03307			

## Graficos perda de massa vs tempo

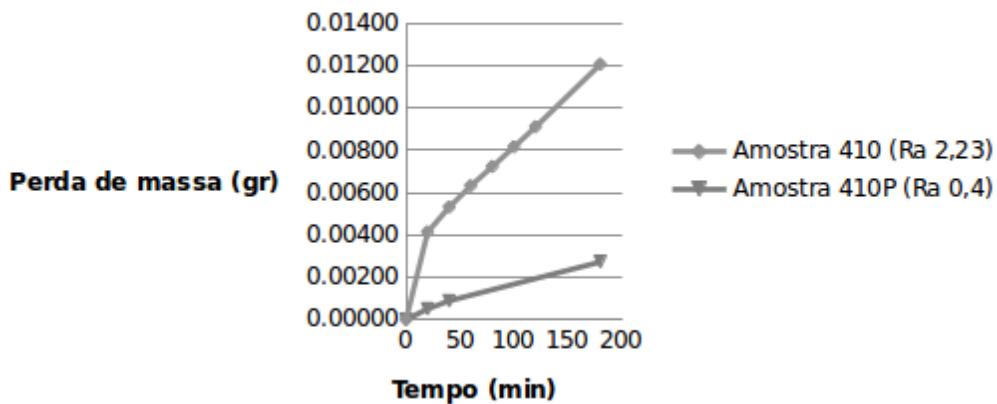


Figura 5.61: Influência do acabamento na taxa de desgaste por cavitação.

3. Preparação de amostras e realização de teste para verificação do efeito de rugosidade no desgaste por cavitação;
4. Caracterização superficial com lupa de baixo aumento;

Foi realizada a análise dos resultados juntamente com os pesquisadores do departamento de engenharia metalúrgica e de materiais da Universidade Federal de São Paulo realizadas com a análise de artigos técnicos referentes ao assunto de desgaste por cavitação. Primeiramente os resultados encontrados foram comparados com os resultados no artigo [37]. Neste, o autor também verificou aumento na resistência à cavitação das superfícies qa partir da aplicação de revestimentos aspergidos termicamente.

A norma estabelece que a superfície antes do ensaios seja acabada até a lixa com granulometria 600, o que não foi realizado por opção devido à tentativa de reproduzir o acabamento o mais próximo da situação atual dos revestimentos das pás, que entram em operação com uma rugosidade de material como aspergido, ou seja sem nenhum acabamento posterior ao revestimento. Nesse sentido a tese de doutorado [45] foi analisada e optou-se por realizar o procedimento de acabamento de uma amostra em AISI 410 através de lixamentos subsequentes até que a superfície ficasse com rugosidade abaixo de  $0.4 \mu\text{mRa}$  e então chamando essa amostra de 410P e realizando o ensaio seguindo o mesmo procedimento já descrito anteriormente porém em intervalos maiores e menor

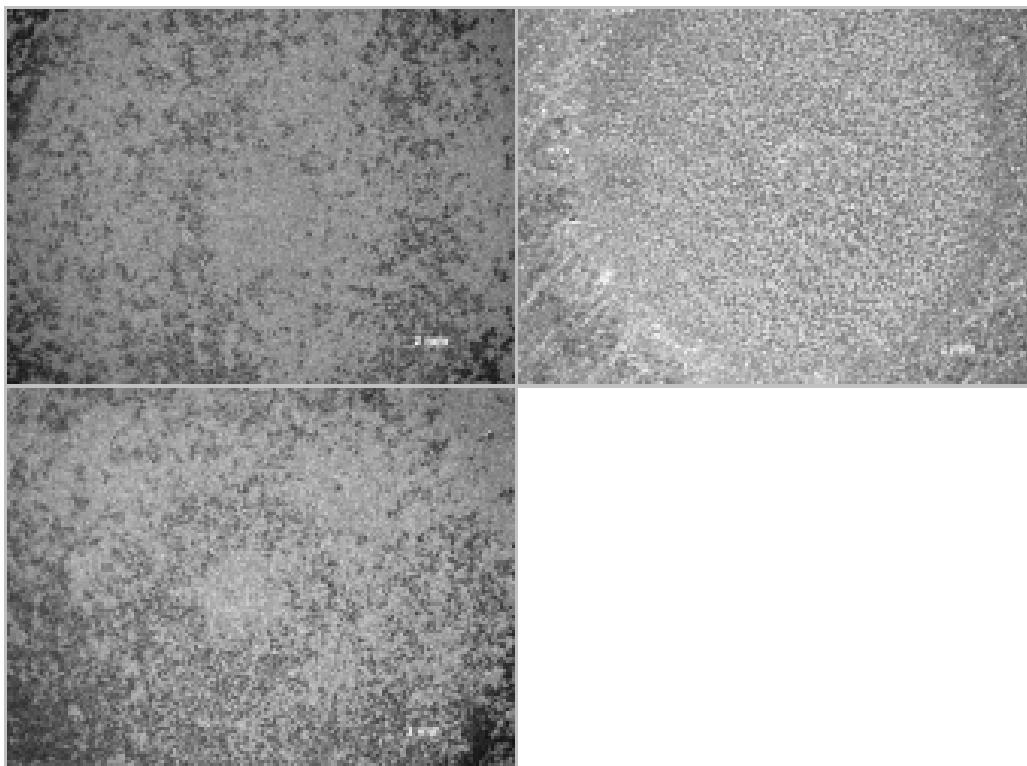


Figura 5.62: Superfícies degastadas analisadas em Lupa com aumento de 8x após ensaios de cavitação. A) WCCoCr. B) AISI410. C)WCNi.

tempo total de ensaio, para verificar a tendência da curva de desgaste. Os resultados comparativos podem ser analizados na Tabela 5.12 e gráfico da Fig. 5.61. Percebe-se que o acabamento exerce influência na taxa de desgaste por cavitação, podendo ser um importante fator para retardar o dano na pás com revestimento.

A caracterização da superfície em lupa de baixo aumento (8x) foi realizada a fim de se observar trincas no revestimento após 10 h de ensaio. As imagens estão apresentadas na Fig. 5.62.

### 5.5.6 Seleção dos revestimentos

Em praticamente todos os ramos de engenharia encontram-se problemas relacionados ao desgaste. As perdas econômicas e consequentes de desgastes são generalizadas e críticas. Estas não envolvem somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, perdas de produção, de competitividade e de oportu-

nidades de negócios. O desgaste pode ser descrito como a perda progressiva de massa da superfície de um corpo sólido causada pela ação mecânica, isto é, por contato e movimento relativo de um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso. De maneira mais simplificada é a perda de material de uma ou de ambas as superfícies em contato quando submetidas ao movimento relativo.

A avaliação da resistência à erosão relativa entre materiais, um número de fatores deve ser considerado. Além dos fatores óbvios como temperatura, velocidade e ângulo de impacto das partículas, tamanho e geometria dos grãos, que podem ser controlados em testes normatizados pois a compreensão da combinação das variabilidades na performance é limitada. O procedimento normatizado reduz o número de variáveis com a intenção de prever uma base para comparação. Modelos constituidos baseados em propriedades intrínsecas de cada sistema são utilizados para prever a resistência à erosão e tiveram progresso ao longo dos anos mas ainda estão em desenvolvimento. Modelos fluidodinâmicos utilizados para prever o fluxo das partículas tem sido utilizados para aplicações típicas, porém, os modelos necessitam ainda de valores medidos de taxas de erosão para alimentação de banco de dados e para validação de resultados. O modelamento da erosão tem um problema comum ao estudo dos diferentes tipos de desgaste, que tem a ver com a grande quantidade de variáveis relacionadas com o tribo-sistema, que podem influenciar a taxa de perda de material.

Quanto ao formato geométrico das partículas abrasivas, as de formas mais irregulares encontradas na prática de engenharia produzem identações mais variáveis que as de formatos esféricos e muitas vezes as pontas se destacam e se incorporam frequentemente na superfície do alvo. Isto nos leva a uma camada de compósito constituída do abrasivo com o metal de base cujo mecanismo de erosão não é conhecido. A forma dessa camada de compósito entre partícula incidente com o metal de base é de descoberta recente e o seu papel na erosão dos metais ainda não é clara criando portanto uma outra variável antes não prevista pelos modelos estudados.

O desgaste erosivo por impacto de partículas duras atua como fonte de deterioração em componentes de equipamentos mecânicos industriais, sendo prática comum a troca de peças que sofrem esses danos, e, portanto, fenômenos que provocam desgastes, como corrosão, abrasão, erosão e cavitação, devem ser considerados já nos projetos mecânicos e estruturais, não só na seleção dos materiais a serem utilizados, mas também no aperfeiçoamento do próprio desenho. A deterioração de componentes mecânicos se manifesta em

função das circunstâncias.

Os processos tribológicos que ocorrem no contato de duas superfícies que estão em movimento relativo são muito complexos, uma vez que envolvem, simultaneamente, o atrito e diferentes tipos e escalas de mecanismos de desgaste e deformação. Apesar disso, na prática, atrito e desgaste são fenômenos qualitativamente diferentes.

O atrito em sua definição mais elementar é a resistência ao movimento de um corpo sobre o outro. É, também, a medida da dissipação de energia entre dois corpos que deslizam e estão em contato. Ele geralmente é quantificado em termos do coeficiente de atrito, que é uma medida adimensional obtida pela relação entre força de atrito (força que se opõe ao movimento) e a carga ou peso do corpo deslizante.

O atrito é causa de desgastes e de dissipação de energia em componentes mecânicos, conduzindo à queda de desempenho e ao aumento do número de descartes e reposições, com os consequentes reflexos nos custos de operação e manutenção. O controle do atrito e de seus efeitos conduz a uma considerável economia, estimando-se que cerca de um terço dos recursos energéticos mundiais sejam usados, de alguma forma, para se superar o atrito.

Entre sólidos com movimento relativo entre si, a deterioração pode ocorrer de duas maneiras: quando a diferença de dureza entre eles não é muito grande, temos um desgaste, no material mais macio, provocado pelo atrito, com danos superficiais e perdas de massa, em geral uniformes, o que provoca desajustes e folgas indesejadas, como no caso dos mancais de deslizamento; quando os materiais possuem durezas muito diferentes, temos a abrasão, um desgaste superficial mais significativo, onde a perda de massa é mais rápida e em geral irregular. Em componentes e instalações em que temos superfícies sólidas, em contato com fluidos em movimento relativo, temos outros tipos de deterioração. A cavitação (do latim *cavus*, que significa um espaço vazio ou cavidade), é um fenômeno observado tipicamente em equipamentos como turbinas e bombas hidráulicas, e em válvulas e hélices de navios. Gases dissolvidos no líquido de trabalho levam à formação e à implosão (colapso) de bolhas que provocam um ataque às pás daqueles equipamentos, ataque este caracterizado pela perda localizada de massa. No caso de fluidos em movimento, que contenham partículas sólidas em suspensão, o contato com superfícies internas leva a um desgaste das mesmas conhecido como erosão. Tal desgaste, é provocado pelo choque das partículas com as superfícies. Como consequência, temos uma redução da vida útil e danos em tubulações e equipamentos.

Quando o fenômeno da erosão age em conjunto com o da corrosão, temos a chamada erosão-corrosão. Sabe-se que quando da atuação do efeito sinérgico, a deterioração é maior que a soma dos outros dois (efeito erosivo e efeito corrosivo) atuando individualmente. Em componentes e estruturas expostos a meios agressivos, os materiais constituintes estão sujeitos à corrosão. A corrosão é a causa mais importante de deterioração de materiais, e decorre de reações químicas e eletroquímicas agindo sobre eles e alterando, ao longo do tempo, seu aspecto, sua integridade estrutural e sua massa. No que diz respeito a um estudo mais geral da deterioração de materiais, a área de pesquisa abrangente é chamada de Tribologia e engloba os estudos que envolvem atrito, lubrificação e desgaste de materiais.

Tribologia é a ciência que faz a conexão entre todos os fatores associados aos processos tribológicos e é voltada para o estudo do atrito, desgaste e lubrificação de superfícies que estão em movimento relativo. É, portanto, compreendida como a ciência e a tecnologia da interação de superfícies que estão em movimento umas em relação às outras.

Alguns sistemas de classificação definem que os processos de desgaste podem ser classificados em desgaste por deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e desgaste erosivo, dependendo da cinemática do sistema. Pode ser classificado ainda em quatro mecanismos básicos: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica ou ainda como de acordo com seu mecanismo em abrasão, adesão e erosão.

A abrasão é normalmente provocada por partículas duras que estão incorporadas em alguma superfície, ou por partículas que estão livres para deslizar e rolar entre duas superfícies em contato deslizante. O desgaste abrasivo é causado pela passagem destas partículas duras sobre a superfície e ocorre com perda progressiva de material. O desgaste por abrasão pode ser definido como o desgaste devido à penetração de partículas ou asperezas superficiais duras de um contra corpo em uma superfície, durante o contato por deslizamento.

Partículas ou grãos abrasivos fazem parte das características inerentes de muitos sistemas tribológicos. Dois grandes fatores que controlam a abrasividade de uma partícula são tamanho e angularidade. Quanto maiores às dimensões das partículas abrasivas maior será a taxa de desgaste da superfície atritada. Já a angularidade ou afiabilidade descreve a forma das partículas, incluindo saliências de sua superfície em termos do seu potencial de abrasão ou erosão. Quanto mais agudo for o ângulo que constituem

as arestas de um elemento abrasivo, maior será a tendência de elevação na taxa de desgaste. A dureza, tanto da partícula abrasiva como o da superfície de deslizamento, é outra característica importante no processo de desgaste por abrasão. A taxa de desgaste tende a diminuir com o aumento da dureza da superfície de deslizamento. Nos metais, a presença de microconstituintes com elevada dureza (alta concentração de carbono, carbeto, fases como a bainita e martensita) contribuem para o aumento da resistência ao desgaste. Por outro lado, quanto maior a dureza do agente abrasivo, tal como a de óxidos, por exemplo, maior será o efeito de deterioração da superfície.

A maneira como os grãos passam sobre a superfície determina a natureza do desgaste abrasivo, que pode ser classificado como desgaste a dois ou a três. Partículas incorporadas produzem abrasão a dois corpos (abrasão por deslizamento) enquanto a ação de partículas abrasivas soltas é chamada de abrasão a três corpos (abrasão por rolagem).

O desgaste abrasivo a dois corpos corresponde a um modelo de ferramenta de corte, enquanto o desgaste abrasivo a três corpos envolve a ação de mecanismos mais lentos de remoção de material. Neste caso, o material desgastado não é removido por uma série de riscos como é o caso do desgaste abrasivo a dois corpos. Em vez disso, a superfície gasta exibe uma topografia aleatória, sugerindo a remoção gradual das camadas superficiais pelo contato sucessivo de grãos. A taxa de remoção de material na abrasão a três corpos pode ser uma ordem de magnitude menor do que a da abrasão a dois corpos porque as partículas abrasivas soltas abradam a superfície apenas 10% do tempo, enquanto passam 90% do tempo rolando. As partículas abrasivas podem interagir com a superfície de desgaste através de diferentes mecanismos: microcorte, microfratura, arrancamento de grãos, microssulcamento e formação de aresta.

Já o desgaste erosivo, a norma ASTM G76 define como a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre superfície e um fluido, um fluido multicomponente, partículas líquidas ou sólidas impactantes. A velocidade das partículas, o ângulo de impacto e o tamanho das partículas abrasivas fornecem uma proporção de energia cinética da colisão das partículas. Partículas de desgaste são formadas na erosão como resultado de sucessivos impactos. Assim como no desgaste abrasivo, o desgaste por erosão ocorre pela deformação plástica ou fratura frágil, dependendo do material a ser erodido e das condições de operação. A relação entre taxa de desgaste e ângulo de impacto é diferente para materiais dúcteis e frágeis. A forma das partículas abrasivas também afeta a taxa de desgaste. Partículas achatadas levam a uma

deformação mais localizada e por isso terão taxas de desgaste maiores do que partículas arredondadas.

O impacto econômico da deterioração dos materiais metálicos, o desenvolvimento de um sistema de revestimento e a viabilização da aplicação desse sistema dentro dos equipamentos de uma unidade hidrelétrica, baixando os custos transporte e tempo de parada de máquina são os motivadores do estudo deste projeto. Este trabalho foi desenvolvido com o fim de simularmos experiências práticas de laboratório, utilizando-se dos resultados e comparando-os com os da literatura existente.

Como mencionado anteriormente os mecanismos de desgastes são complexos além de uma área de estudo vasta e particular de cada interação e equipamento. Diversas são as formas de classificação e o que ocorre na prática é a sinergia dos processos de deterioração e em muitos casos o processo de desgaste se inicia por um mecanismo e se agrava por outro. Por este motivo vários testes foram conduzidos de forma a selecionar o melhor sistema de revestimento para proteção das superfícies das pás do tipo kaplan de turbinas hidrelétricas. Nesses testes levou-se em consideração quatro diferentes formas de desgaste. Os procedimentos foram conduzidos seguindo-se recomendações de normas internacionais a fim de se obter resultados abrangentes.

Com o intuito de medir comparativamente o desempenho dos materiais selecionados quanto a resistência à erosão foram conduzidos testes em um erodímetro com granulha de óxido de alumínio seguindo as recomendações da norma ASTM G76. Neste ensaio o abrasivo é dosado de forma precisa em um jato de ar comprimido direcionado para a peça reproduzindo um desgaste por erosão de partícula sólida.

O desgaste erosivo é um fenômeno complexo devido aos tempos de interação partícula-superfície serem muito baixos, também chamado de período de incubação, sendo, portanto um fenômeno de natureza fundamentalmente dinâmica. Os parâmetros utilizados estão descritos na tabela 5.13.

Parâmetros de ensaio e descrição das amostras

Granulha utilizada	Alumina eletrofundida angular
Diâmetro médio da partícula	375 microns
Velocidade da partícula	50m/s
Temperatura de ensaio	25°C
Tempo Total de ensaio	60 min
Intervalo de medições	30 e 60 min
Amostras 410-P	Amostras em aço inox AISI 410, dureza de 35 HRc, sem revestimento com acabamento polido, rugosidade $Ra < 0,8$
Amostras 410-R	Amostras em aço inox AISI 410, dureza de 35 HRc, sem revestimento com acabamento jateado, rugosidade $Ra > 2,5$
Amostras WCCoCr-P	Amostras com revestimento HVOF em Carboneto de Tungstênio com 10% de Cobalto e 4% de Cromo, dureza acima 1100 HV, acabamento polido e rugosidade $Ra < 0,8$
Amostras WCCoCr-R	Amostras com revestimento HVOF em Carboneto de Tungstênio com 10% de Cobalto e 4% de Cromo, dureza acima 1100 HV, acabamento como aspergido e rugosidade $Ra > 2,5$
Amostras WCNi-P	Amostras com revestimento HVOF em Carboneto de Tungstênio com 13% de Niquel e 3% de Cromo, dureza acima 1000 HV, resistência à cavitação, acabamento polido e rugosidade $Ra < 0,8$
Amostra WCNi-R	Amostras com revestimento HVOF em Carboneto de Tungstênio com 13% de Niquel e 3% de Cromo, dureza acima 1000 HV, resistência à cavitação, acabamento como aspergido e rugosidade $Ra > 2,5$

Tabela 5.13: Parâmetros utilizados no ensaio de desgaste por erosão e descrição das amostras

Os resultados foram medidos em perda de massa em 30 minutos de ensaio e em 60 minutos. Também foi controlado durante o processo o gasto de erodente que também é embutido no cálculo do desgaste erosivo.

Para avaliação final utilizou-se somente os ensaios realizados nas amostras Polidas atendendo a rugosidade solicitada na norma pois o ensaio sofre muito influência do acabamento. Dessa forma quanto mais fino o acabamento superficial menor a influência no resultado do ensaio.

O resultado final é fornecido em perda de volume em  $\text{mm}^3$  – considerando as densidades de cada material – e normalizado em relação ao gasto de erodente durante o ensaio. A tabela 5.14 e o gráfico da figura 5.63 apresentam os resultados de desgaste erosivo compilados para cada sistema.

	410-P	WCCoCr-P	WCNi-P
30 min	0,00965	0,00332	0,00544
60 min	0,01744	0,00486	0,00648
Total	0,02709	0,00818	0,01192

Tabela 5.14: Perda de volume em 30 e 60 minutos de ensaio para

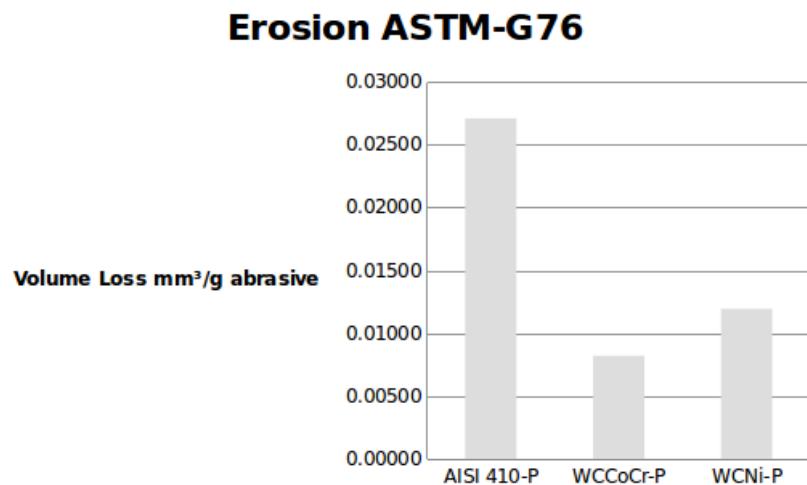


Figura 5.63: Ensaio de erosão: perda de volume acumulado por gasto de erodente.

Os ensaios de desgaste abrasivo foram realizados em um abrasômetro tipo roda

de borracha projetado e construído pela Rijeza a fim de atender os requisitos da norma ASTM G65 que estabelece os procedimentos para a realização desse tipo de ensaio. Foi utilizado o provedimento B da norma que recomenda uma rotação de 200 rpm, carga de 130 N, tempo de 10 min e areia de sílica de granulometria ASTM 100 como abrasivo. Cada corpo de prova é pesado antes e depois do ensaio utilizando uma balança analítica de precisão 0,0001g. Com este ensaio é possível obter a perda de volume de cada material o que interferirá no desempenho relativo contra o desgaste de cada solução.

Para estes ensaios também se utilizou os mesmos materiais descritos para os ensaios de erosão e cavitação. No entanto o ensaio foi realizado também para qualificar a proposta de revestimento elastomérico sobre o coating HVOF. As superfícies metalizadas foram preparadas com primer para receber a deposição do revestimento Metaline 785, pulverizável, com dureza de 85 Shore A e resistente à cavitação. Os sistemas utilizados nos testes destrutivos de abrasão estão relacionados na tabela 5.15. O resultados obtidos neste ensaio estão apresentados no gráfico da figura 5.64.

Amostra	Descrição
WC <sub>10</sub> Co <sub>4</sub> Cr	Revestimento com composição química de 86% Carboneto de Tungstênio com 10% de Cobalto e 4% de Cromo
WC <sub>13</sub> Ni	Revestimento com composição química 88%Carboneto de Tungstênio com 13% de Níquel e 3% de Cromo
AISI 410	Aço Inoxidável com composição química especificada na norma AISI410
Metaline 785	Material base em aço Inoxidável, revestimento duplo de WC <sub>10</sub> Co <sub>4</sub> Cr e elastômero pulverizável Metaline 785

Tabela 5.15: Lista de Materiais utilizados no ensaio de abrasão conforme ASTM G65-B.

### 5.5.7 Conclusão

O conceito do projeto foi criado com a formulação das 4 perguntas que resumem a finalidade do protótipo desenvolvido:

## Abrasão ASTM-G65

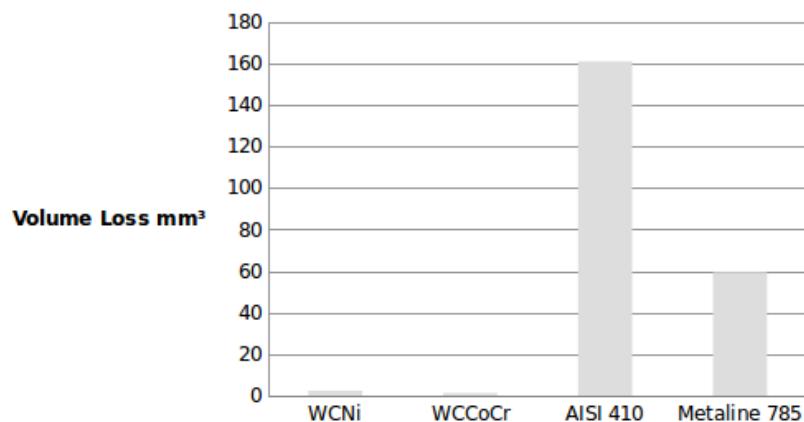


Figura 5.64: Ensaio de abrasão: perda de volume para cada sistema testado.

- Quais as modificações necessárias aos equipamentos de coating e jateamento para garantir acesso, funcionamento no circuito hidráulico e requisitos de segurança e meio ambiente?
- Quais as características do revestimento que podem ser influenciadas pelo ambiente proposto e devem ser constantemente controladas?
- Qual a classificação dos tipos de desgaste que estão danificando a superfícies das pás de UHE-Jirau e quais as regiões mais afetadas?
- Quais os sistemas de revestimentos mais adequados para combater o desgaste das pás, e quais modificações podem ser realizadas no Coating atual a fim de melhorar o desempenho do mesmo?

Os ensaios de abrasão mostraram a alta resistência à esse tipo de desgaste que a superfície adquire após a aplicação do revestimento HVOF. Tanto o revestimento à base de WCNi como o revestimento à base de WCCoCr apresentaram taxas de desgaste aproximadamente 70x e 120x menores que a superfície em aço INOX AISI 410 similar ao utilizado nas Pás da UHE de Jirau. A resistência à erosão, cavitação e corrosão dos dois revestimentos medidas em ensaio comparativo mostraram que os coatings HVOF efetivamente aumentam substancialmente a superfície desgastada. Como dito anteriormente que o desgaste é um resultado da somatória de cada mecanismo, também é im-

portante considerar o acabamento da superfície que pode ser realizada a partir de produto elastomérico pulverizável Metalite – 785 que protege o revestimento quanto a caviação e mostra resistência à abrasão intermediária entre os coatings HVOF e aço inoxidável.

O estudo do desgaste através de inspeções mostraram que a severidade e o tipo é diferente para diferentes regiões das pás. A proposta final é revestir as pás nas regiões superiores, próximo à zona de entrada do lado pressão com material em WC-Ni com camada mínima de 0,2 mm e nas demais zonas das pás com material WC-CoCr com camada mínima de 0,1 mm, utilizando um equipamento modelo DJ2700, mais a aplicação de material elastomérico pulverizável para acréscimo da proteção contra a cavitação e erosão da superfície. O equipamento de metalização com combustão de GLP e Oxigênio ficará alocado como todos os seus insumos e consoles no corredor de acesso à escotilha inferior da turbina. A superfície será preparada com jateamento abrasivo de Óxido de Alumínio, pré-aquecida se necessário e o ambiente deverá ser monitorado e controlado através da montagem de um sistema de exaustão e a utilização de instrumentos medidores de temperatura e umidade relativa do ar.

# Referências Bibliográficas

- [1] A. Deibe F. Lopez-Pena R. J. Duro A. Faina, D. Souto and X. Fernandez. Development of a climbing robot or grit blasting operations in shipyards. *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 200-205, 2009. [57](#)
- [2] Sandra Arlinghaus. *Practical handbook of curve fitting*. CRC press, 1994. [152](#)
- [3] Manuel Armada, Pablo Gonzalez De Santos, María A Jiménez, and Manuel Prieto. Application of clawar machines. *The International Journal of Robotics Research*, 22(3-4):251–264, 2003. [57](#)
- [4] C. Han B. Chu, K. Jung and D. Hong. A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No 4, pp. 633-647, 2010. [57](#)
- [5] N. Bayramoglu and a.a. Alatan. Shape Index SIFT: Range Image Recognition Using Local Features. *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*, (September):1–5, 2010. [183](#)
- [6] Marco Bibuli, Massimo Caccia, and Lionel Lapierre. Path-following algorithms and experiments for an autonomous surface vehicle. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 7(PART 1):81–86, 2007. [6, 45, 54, 55](#)
- [7] Nelso Gauze Bonacorso, Jr a a Goncalves, and Jair Carlos Dutra. Automation of the processes of surface measurement and of deposition by welding for the recovery of rotors of large-scale hydraulic turbines. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3):231–238, 2006. [6, 45, 54, 55](#)
- [8] Christopher E Brennen. *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press, 2013. [40](#)

- [9] A. Gimenez C. Balaguer and M. Abderrahim. Roma robots for inspection of steel based infrastructures. *Industrial Robot: An international Journal*, 2002. 57
- [10] D. Schmidt C. Hillenbrand and K. Berns. Cromsci - a climbing robot with multiple sucking chambers for inspection tasks. *WSPC Proceedings*, 2008. 57
- [11] Marco Camurri, Roberto Vezzani, and Rita Cucchiara. 3d hough transform for sphere recognition on point clouds. *Machine Vision and Applications*, 25(7):1877–1891, 2014. 181
- [12] Hui Chen and Bir Bhanu. 3D free-form object recognition in range images using local surface patches. *Pattern Recognition Letters*, 28(10):1252–1262, 2007. 183
- [13] Rosen Diankov and James Kuffner. Openrave: A planning architecture for autonomous robotics. *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-08-34*, 79, 2008. 96, 138
- [14] Aluminium und Aluminiumlegierungen Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeugen. Standard, Deutsches Institut für Normung, 2007. 171
- [15] Norbert Elkmann, Torsten Felsch, and Tilo Forster. Robot for rotor blade inspection. In *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2010. 7, 62, 65
- [16] Xavier Escaler, Eduard Eguisquiza, Mohamed Farhat, François Avellan, and Miguel Coussirat. Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical systems and signal processing*, 20(4):983–1007, 2006. 38
- [17] Gerald E Farin. *Curves and surfaces for CAGD: a practical guide*. Morgan Kaufmann, 2002. 152
- [18] Paal Johan From. Off-shore robotics: Robust and optimal solutions for autonomous operation. 2010. 153
- [19] José Goldemberg and Oswaldo Lucon. Energia e meio ambiente no brasil. *Estudos Avançados*, 21(59):7–20, 2007. 38
- [20] Michael Gschwandtner, Roland Kwitt, Andreas Uhl, and Wolfgang Pree. BlenSor: Blender sensor simulation toolbox. *Lecture Notes in Computer Science (including sub-*

series *Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics*), 6939 LNCS(PART 2):199–208, 2011. 187

- [21] G. Hetzel, B. Leibe, P. Levi, and B. Schiele. 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, 2001. 183
- [22] Arjang Hourdash. The kinematic hessian and higher derivatives. In *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Symposium on*, pages 169–174. IEEE, 2005. 114
- [23] MOTOMAN-MH12 Instructions. Manual, YASKAWA MOTOMAN ROBOTICS, 2015. 172
- [24] T. Kim D. Lee S. Lee C. Lim J. Kim, K. Y. Lee and S. W. Kang. Rail running mobile welding robot rrx3 for double hull ship structures. *Proc. of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 1061-1069, 2004. 57
- [25] S. Koehring A. Obermaier J. Maempel, T. Koch and H. Witte. Concept of a modular climbing robot. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, 2009. 57
- [26] Minseok Jeon, Byunggon Kim, Sora Park, and Daehie Hong. Maintenance robot for wind power blade cleaning. *Seoul, Korea: Department of Mechanical Engineering, Korea University*, 2012. 62
- [27] Bert Jüttler and Alf Felis. Least-squares fitting of algebraic spline surfaces. *Advances in Computational Mathematics*, 17(1-2):135–152, 2002. 152
- [28] Hwang Kim, Dongmok Kim, Hojoon Yang, Kyouhee Lee, Kunchan Seo, Doyoung Chang, and Jongwon Kim. Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism. *Journal of mechanical science and technology*, 22(8):1490–1498, 2008. 70
- [29] Larry Li. Time-of-flight camera – an introduction, 01 2014. 13, 130
- [30] International Climbing Machines. The climber. International Climbing Machines (ICM) website. <http://www.icm.cc/climber.php> Accessed on March 30<sup>th</sup>, 2015, 2015. 57

- [31] Marc Manz, Jens Hilljegerdes, Alexander Dettmann, and Frank Kirchner. Development of a lightweight manipulator arm using heterogeneous materials and manufacturing technologies. [71](#)
- [32] JMST Motta, CH Llanos, GC Carvalho, and SCA Alfaro. A prototype of a specialized robotic system for repairing hydraulic turbine blades. In *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2010 1st International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010. [63](#)
- [33] Andreas Nüchter, Kai Lingemann, Joachim Hertzberg, and Hartmut Surmann. Accurate object localization in 3D laser range scans. *2005 International Conference on Advanced Robotics, ICAR '05, Proceedings*, 2005:665–672, 2005. [183](#)
- [34] Jörg Peters and Ulrich Reif. *Subdivision surfaces*. Springer, 2008. [152](#)
- [35] PLC. Random sample consensus. PLC website. [http://www.pointclouds.org/documentation/tutorials/random\\_sample\\_consensus.php](http://www.pointclouds.org/documentation/tutorials/random_sample_consensus.php)  
Acessado no dia 30 de Novembro, 2015, 2015. [11, 180](#)
- [36] Frédéric Rochat, Patrick Schoeneich, Olivier Truong-Dat Nguyen, and Francesco Mondada. Tripillar: Miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability. In *Proceedings of 12th International conference on climbing and walking robots and the support technologies for mobile machines (CLAWAR)*, volume 1, pages 343–350. World Scientific, 2009. [57](#)
- [37] JF Santa, LA Espitia, JA Blanco, SA Romo, and A Toro. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear*, 267(1):160–167, 2009. [40, 212](#)
- [38] Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano. Differential kinematics and statics. In *Modelling and Control of Robot Manipulators*, pages 79–129. Springer, 2000. [113, 114](#)
- [39] Jean-Jacques E Slotine and Li Weiping. Adaptive manipulator control: A case study. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 33(11):995–1003, 1988. [114](#)
- [40] Bastian Steder, Giorgio Grisetti, Mark Van Loock, and Wolfram Burgard. Robust on-line model-based object detection from range images. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, pages 4739–4744, 2009. [183](#)

- [41] Federico Tombari and Luigi Di Stefano. Object recognition in 3D scenes with occlusions and clutter by Hough voting. *Proceedings - 4th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, PSIVT 2010*, pages 349–355, 2010. [184](#)
- [42] Torbo. torbomate crawler. torboMate Crawler website. <http://www.torbo24.com> Acessado no dia 30 de Março, 2015, 2008. [7](#), [62](#), [64](#)
- [43] T Weber, O Hellwich, Computer Vision, and Remote Sensing. Comparison of 3D Interest Point Detectors and Descriptors for Point Cloud Fusion. II(September):5–7, 2014. [183](#)
- [44] Jingwei Wu, Hongyuan Fang, Sanghoon Yoon, HyungJun Kim, and Changhee Lee. The rebound phenomenon in kinetic spraying deposition. *Scripta materialia*, 54(4):665–669, 2006. [42](#)
- [45] Z Xiaojun. Effect of surface modification processes on cavitation erosion resistance. *Effect of Surface modification processes on cavitation erosion resistance*, 2002. [212](#)
- [46] Titus B Zaharia and Françoise J Prêteux. 3D versus 2D/3D shape descriptors: a comparative study. *Image Processing: Algorithms and Systems*, 5289(Section 3):47–58, 2004. [183](#)

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE A**

---

### **Pesquisa de Mercado Manipuladores**

---



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

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

Sheet1

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

## Sheet1

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

Sheet1

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

## Sheet1

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

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE B**

---

### **Dimensionamento 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:**

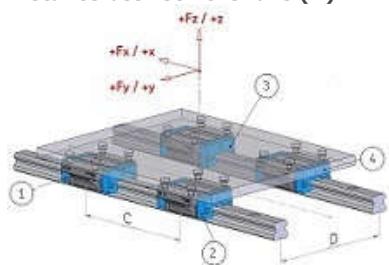
Two rail guides with four guide carriages

**Distance between the carriages (C):**

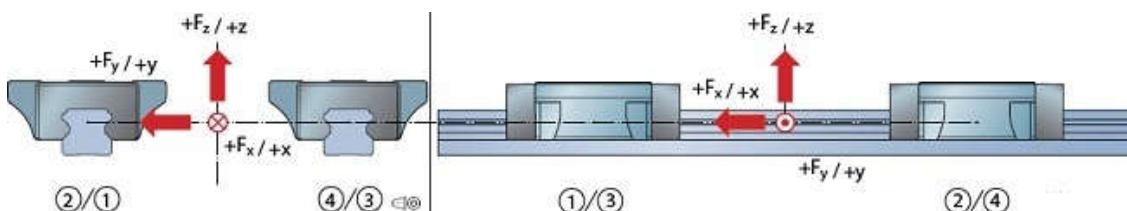
425 mm

**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
<b>Load 1:</b>	Forcas	9025.0	9025.0	5885.0	0.0	0.0	1300.0
<b>Load 2:</b>	Mv	4120.0	4120.0	0.0	0.0	0.0	1000.0
<b>Load 3:</b>	Mh	4120.0	4120.0	0.0	1000.0	1000.0	0.0

## Load result

Load result for Carregamento\_Max:

	<b>Carriage 1</b> <i>N</i>	<b>Carriage 2</b> <i>N</i>	<b>Carriage 3</b> <i>N</i>	<b>Carriage 4</b> <i>N</i>
<b>Resulting load in Y-direction:</b>				
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
<b>Resulting load in Z-direction:</b>				
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
<b>Resulting carriage loads:</b>				
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<sub>tot</sub> per carriage

Designation		Carriage 1		Carriage 2		Carriage 3		Carriage 4	
		N	N	N	N	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 <sub>ns</sub>	C	C <sub>0</sub>	Safety factor	
								N	N
LLTHS 30 LU	T1	125.4	60	42	28	48.7		33900	60800
LLTHS 30 LA	T1	125.4	90	42	28	48.7		33900	60800
LLTHS 30 LR	T1	125.4	60	45	28	48.7		33900	60800
LLTHS 35 U	T1	114.4	70	48	34	52.2		34700	54650
LLTHS 35 A	T1	114.4	100	48	34	52.2		34700	54650
LLTHS 35 R	T1	114.4	70	55	34	52.2		34700	54650
LLTHS 35 LU	T1	142.9	70	48	34	113.9		45000	79400
LLTHS 35 LA	T1	142.9	100	48	34	113.9		45000	79400
LLTHS 35 LR	T1	142.9	70	55	34	113.9		45000	79400
LLTHS 45 U	T1	136.5	86	60	45	259.4		59200	91100
LLTHS 45 A	T1	136.5	120	60	45	259.4		59200	91100
LLTHS 45 R	T1	136.5	86	70	45	259.4		59200	91100
LLTHS 45 LU	T1	168.5	86	60	45	474.4		72400	121400
LLTHS 45 LA	T1	168.5	120	60	45	474.4		72400	121400
LLTHS 45 LR	T1	168.5	86	70	45	474.4		72400	121400

## 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

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE C**

---

### Relatório de Testes

---





## RELATÓRIO DE VIAGEM

### 1. IDENTIFICAÇÃO

*Forneça informações sobre você e seu projeto*

Nome(s)	Eduardo Elael, Estevão Fróes, Gabriel Alcântara, Julia Campana, Renan Salles e Ramon Costa
Projeto (título)	Projeto EMMA
Número ANEEL	6631-0003/2015

### 2. DESCRIÇÃO DA VIAGEM

*Forneça informações sobre sua viagem*

Cidade de origem:	Rio de Janeiro
Cidade(s) visitada(s): (em ordem cronológica)	Porto Velho (Canteiro)
Período da viagem:	 Início: 13/10/2015 Término: 16/10/2015
Meio de transporte:	Avião/ Locação de veículo
Quilometragem: (em caso de automóvel)	
Autorizado por: (ESBR)	

### 2. OBJETIVO DA VIAGEM

*Fale do(s) motivo(s), da finalidade da sua viagem.*

Apresentação da pesquisa do Projeto EMMA para ESBR e Santo Antônio visando a fase de construção do projeto. Visita as instalações intalações de Santo Antônio e conhecimento de algumas diferenças entre as turbinas de cada usina.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

*Descreva o que realizou na sua viagem, suas atividades desenvolvidas.*

Conhecimento das diferenças entre turbinas de cada Usina e alinhamento de solução que atenda ambos os casos.

### 4. VALOR TOTAL DA VIAGEM

*Insira o valor total do custo desta viagem, detalhado nos anexos.*

Passagem aérea.....	R\$ 10.407,00
Locação Automóveis..	R\$ 610,00
Diárias.....	R\$ 1200,00
<b>Total.....</b>	<b>R\$ 12.217,00</b>

Cidade/UF: Rio de Janeiro

Data: 1 de Novembro de 2015.

Prof. Ramon Costa  
Coordenador da Equipe P&D  
Fundação Coppetec

## 2 Teste Base Magnética

### 2.1 Visão geral

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

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

### 2.2 Equipamentos utilizados

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

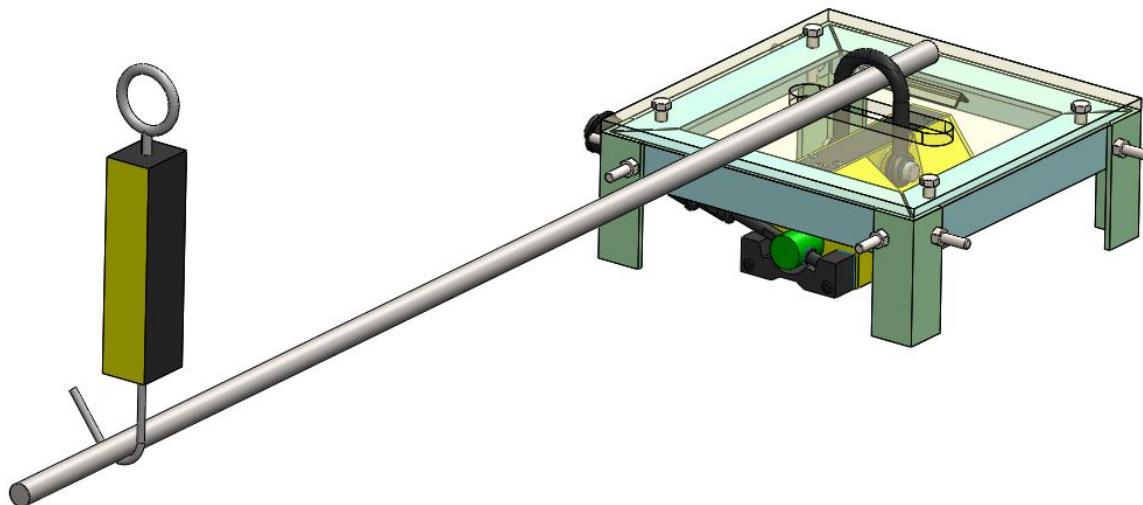


Figura 1: Conjunto de teste da base magnética

## 2.3 Dados dos equipamentos

### Base Magnética

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

### Alavanca

De acordo com a figura 2:

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

Os valores de L e d foram medidos em cada resultado do teste e a razão L/d está indicada na tabela 1 da seção 2.7.

### Dinamômetro

Capacidade máxima do dinamômetro: 25 kgf



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

## 2.4 Cálculo da força magnética máxima

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

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

## 2.5 Mapa de posicionamento

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

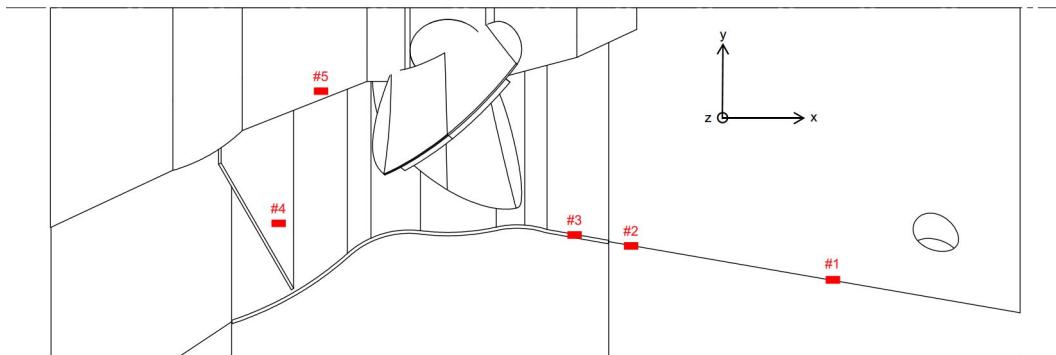


Figura 3: Mapa esquemático de posições

## 2.6 Procedimento

A adesão magnética foi testada nas posições indicadas no mapa esquemático da seção 2.5. Para as posições 1 e 2 variou-se a orientação da base de acordo com o eixo de coordenadas indicado na figura 3.

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

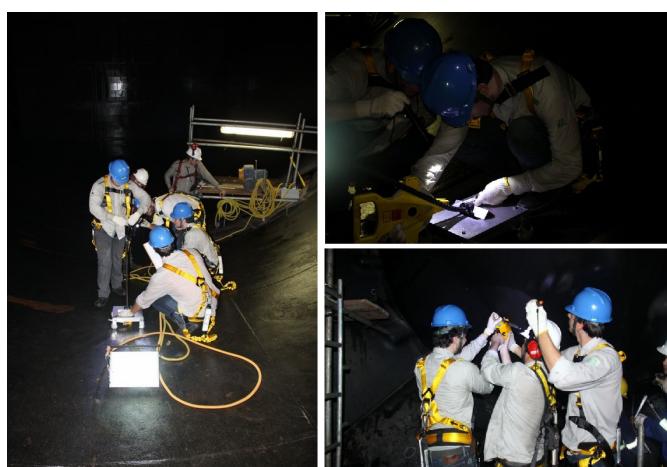


Figura 4: Fotos durante o teste

## 2.7 Resultados

A tabela 1 apresenta o resultado do teste da base magnética nas posições indicadas na seção 2.5.

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

Tabela 1: Resultados do teste experimental

## 2.8 Conclusões

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

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

A posição 3, de acordo com o mapa esquemático da seção 2.5, é uma região composta por aço inoxidável e não forneceu adesão magnética. As posições 4 e 5 são respectivamente a superfície das paletas do distribuidor e a superfície do rotor. Estas superfícies apresentaram boa adesão magnética, mas não foi possível medir valores limite, pois tais posições não estavam previstas no teste e o equipamento projetado não permitiria uma medição adequada.

### 3 Teste sensor Faro Focus 3D X330

#### 3.1 Visão Geral

Este teste visou verificar a aplicabilidade do sensor laser Faro Focus 3D X330 no ambiente de trabalho da turbina. O dispositivo apresenta sensibilidade a ambientes onde haja alta umidade, pois opera com um sistema de lentes e lasers e, caso apresente condensação em um desses componentes, o resultado final de sensoriamento pode ser prejudicado. Por esse motivo foi necessário realizar testes com o sistema para analisar a viabilidade técnica de se usar o sensor para a aplicação do projeto EMMA.

#### 3.2 Equipamentos utilizados

1. Faro Focus 3D X330
2. Tripé de apoio
3. Esferas Reflexivas com base magnética



Figura 5: Sensor Faro Focus 3D X330.

#### 3.3 Dados dos equipamentos

- Faro Focus 3D X300
  - **Alcance:** 0,6 m - 330 m
  - **Velocidade de medição (pts/seg.):** 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000



Figura 6: Conjunto de esferas Reflexivas e tripé

- **Erro de alcance:**  $\pm 2\text{mm}$
- **Campo de visão vertical (vertical/horizontal):**  $300^\circ / 360^\circ$
- **Tamanho do passo (vertical/horizontal):**  $0,009^\circ$
- **GPS:** Receptor GPS integrados
- **Peso:** 5,2 kg
- **Temperatura ambiente:**  $5^\circ - 40^\circ\text{C}$
- **Umidade:** Sem condensação

### 3.4 Procedimento

Quatro esferas reflexivas foram distribuídas pelo ambiente, ficando três na succção, próximas ao aro câmara, e uma sobre o distribuidor. Em seguida, foram coletados dados a partir de 4 pontos com o sensor montado sobre o tripé. Três dos pontos de coleta foram na succção, aproximadamente igualmente espaçados e alinhados com o eixo da turbina, e um entre a turbina e o distribuidor.

### 3.5 Resultados

A visualização dos dados coletados pelo scanner confirmou que não houve condensação nos espelhos, apesar da alta humidade do local. Uma pequena apresentação em vídeo (figura 7)

dos dados coletados e uma reconstrução em CAD da pá (figura 8) da turbina também foram alcançadas.



Figura 7: Recorte do vídeo dos dados adquiridos durante o teste.

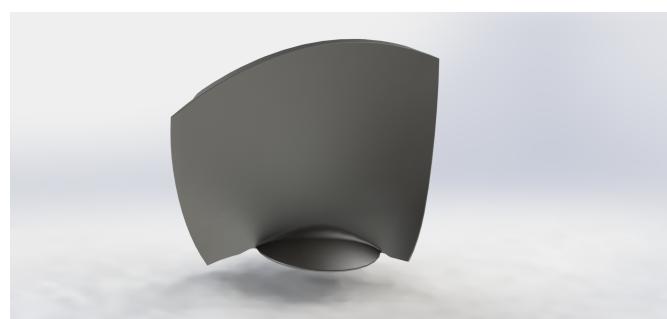


Figura 8: Reconstrução em CAD da pá com os dados do teste.

### 3.6 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos através desse teste, a hipótese de uso do Faro Focus 3D X300 no ambiente da turbina foi confirmada.

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE D**

---

### **Relatórios de Viagem**

---



## RELATÓRIO DE VIAGEM

### 1. IDENTIFICAÇÃO

*Forneça informações sobre você e seu projeto*

Nome(s)	Eduardo Elael, Gabriel Alcântara, Julia Campana, Renan Salles e Ramon Costa
Projeto (título)	Projeto EMMA
Número ANEEL	6631-0003/2015

### 2. DESCRIÇÃO DA VIAGEM

*Forneça informações sobre sua viagem*

Cidade de origem:	Rio de Janeiro
Cidade(s) visitada(s): (em ordem cronológica)	Porto Velho (Canteiro)
Período da viagem:	 Início: 27/04/2015 Término: 01/05/2015
Meio de transporte:	Avião/ Locação de veículo
Quilometragem: (em caso de automóvel)	
Autorizado por: (ESBR)	

### 2. OBJETIVO DA VIAGEM

*Fale do(s) motivo(s), da finalidade da sua viagem.*

Apresentação do Estado da Arte do Projeto EMMA, Reunião com Rijeza e visita a suas instalações.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

*Descreva o que realizou na sua viagem, suas atividades desenvolvidas.*

Foram realizados estudos de natureza técnica relacionados a área onde o projeto será desenvolvido.

### 4. VALOR TOTAL DA VIAGEM

*Insira o valor total do custo desta viagem, detalhado nos anexos.*

Passagem aérea..... R\$ 10.542,00  
Locação Automóveis.. R\$ 760,00  
Diárias..... R\$ 1000,00  
  
Total..... R\$ 12.302,00

Cidade/UF: Rio de Janeiro

Data: 11 de Junho de 2015.



Prof. Ramon Costa  
Coordenador da Equipe P&D  
Fundação Coppetec

## 1. INTRODUÇÃO

A viagem a Jirau realizada entre os dias 27 de Abril e 01 de Maio teve como objetivo coletar informações para a fase conceitual do Projeto EMMA.

## 2. OBJETIVO DE VIAGEM

- Breve apresentação SOTA (Estado da Arte de sistemas robóticos semelhantes);
- Alinhamento técnica com Rijeza, perguntas e respostas relacionadas ao processo de hardcoating (descritas no artigo);
- Definição das tarefas do robô EMMA com a ESBR;
- Discussão do problema relacionadas ao ambiente da turbina (descritas no artigo)
- Demonstração do processo de hardcoating pela Rijeza;
- Visita à uma turbina para inspecionar os pontos de acesso.;

## 3. EXECUÇÃO

Em um primeiro momento foi realizada a reunião para a apresentação de estado da arte de sistemas robóticos que executam tarefas semelhantes às que serão realizadas, seguida de perguntas e respostas aos técnicos da Rijeza e ESBR para esclarecimento dos aspectos técnicos pertinentes ao projeto.



Figura 1. Reunião com Rijeza e ESBR.



Figura 2. Equipe visita o galpão da Rijeza.

Posteriormente, visitamos as instalações da Rijeza dentro da usina para presenciar o funcionamento do robô que executa o *hardcoating*, assim como o estado das pás onde o *hardcoating* já havia sido aplicado. Visando compreender melhor o processo de metalização, suas etapas e especificidades quando realizado sobre uma pá da turbina.

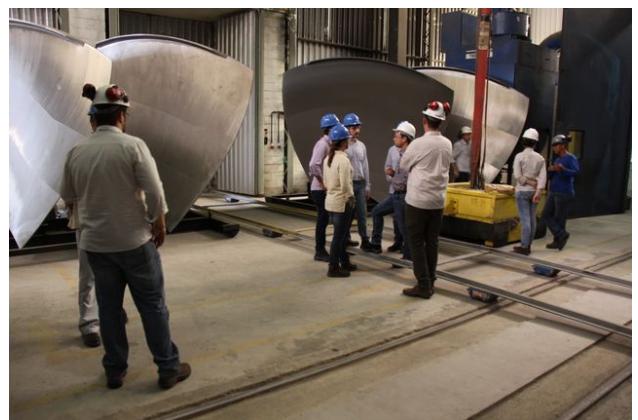


Figura 3. Equipe do projeto EMMA visita o galpão da Rijeza para verificar o processo de inspeção vigente.



Figura 4. Instalações da Rijeza: Robô Industrial utilizado para aplicação de hardcoating.



Figura 5. Instalações da Rijeza: secador, dosador, cilindros de gases, medidores,unidade de segurança e o console do robô.



Figura 6. Instalações da Rijeza: Equipamentos como cooler e compressor ao fundo do galpão.

Na parte da tarde visitamos uma unidade geradora para nos familiarizamos com o local onde a aplicação de hardcoating será feita, nosso objetivo foi inspecionar os locais de acesso, a montagem dos andaimes e a geometria da hélice.



Figura 7. Pá já com Hardcoating aplicado.



Figura 8. Acesso a unidade geradora.



Figura 9. Montagem de andaimes dentro da unidade geradora.



Figura 10. Engenheiros medem hélices.



Figura 11. Em detalhe a escotilha de acesso superior.

O segundo dia em Jirau foi voltado para a formulação dos conceitos possíveis para o Robô

EMMA. Em um primeiro momento avaliamos os braços mecânicos disponíveis no mercado e todas suas possíveis aplicações no espaço da unidade gerador onde a inspeção deve acontecer. Em seguida, levantamos hipóteses sobre as possíveis vias de entradas e suas implicações.

#### 4. RESULTADO

A viagem se mostrou de grande relevância para a viabilidade técnica do projeto, uma vez que nos deu parâmetros para formular os conceitos que serão explorados como soluções para a inspeção de turbinas. Realizamos as reuniões necessárias, a inspeção da unidade geradora, bem como conhecemos as instalações da Rijeza onde o hardcoating é feito. No último dia organizamos tais informações para que sejam devidamente adicionadas em nosso Relatório Técnico.



## RELATÓRIO DE VIAGEM

### 1. IDENTIFICAÇÃO

*Forneça informações sobre você e seu projeto*

Nome(s)	Ramon R. Costa e Renan Salles Freitas
Projeto (título)	Projeto EMMA
Número ANEEL	<b>6631-0003/2015</b>

### 2. DESCRIÇÃO DA VIAGEM

*Forneça informações sobre sua viagem*

Cidade de origem:	Rio de Janeiro
Cidade(s) visitada(s): (em ordem cronológica)	Porto Alegre (São Leopoldo)
Período da viagem:	 Início: 08/07/2015 Término: 09/07/2015
Meio de transporte:	Avião/ Locação de veículo
Quilometragem: (em caso de automóvel)	
Autorizado por: (ESBR)	

### 2. OBJETIVO DA VIAGEM

*Fale do(s) motivo(s), da finalidade da sua viagem.*

Reunião com a Equipe cooperadora do Projeto **EMMA (Metodologia para Revestimento Robótico de turbinas In Situ)**, Contrato Jirau 09-15, PD-6631-0003/2015.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS

*Descreva o que realizou na sua viagem, suas atividades desenvolvidas.*

Apresentação de estudos sobre a solução do escopo do projeto EMMA, alinhamento de informações, conclusões das ideias apresentadas e decisão dos próximos passos.

### 4. VALOR TOTAL DA VIAGEM

*Insira o valor total do custo desta viagem, detalhado nos anexos.*

Passagem aérea..... R\$ 2.163,76

Diárias..... R\$ 1.032,00

**Total..... R\$ 3.195,76**

Cidade/UF: Rio de Janeiro

Data: 13 de Julho de 2015.

Prof. Ramon Costa  
Coordenador da Equipe P&D  
Fundação Coppetec

## 2 Sobre a visita

Foram dois dias de visita à Rijeza, 08 e 09 de Julho de 2015:

Dia 08/07/2015:

- Apresentação realizada por Ramon/Renan: requisitos do processo HVOF, restrições do ambiente e soluções conceituais para os três acessos da turbina de Jirau. A solução conceitual pelo acesso superior foi a mais elaborada até o momento.
- Apresentação realizada pela Rijeza: requisitos do processo HVOF, cavitação e erosão das pás de Jirau, soluções para exaustão do processo e instalação dos componentes.

Dia 09/07/2015:

- Visita às instalações e aplicação de hardcoating.
- Reunião para resumo, feedback e próximos passos.

## 3 Informações

### 3.1 Sobre Jirau

- Todas as turbinas de Jirau têm uma escotilha superior semelhante. Éder fará a verificação do diâmetro da escotilha superior na turbina chinesa e providenciará os desenhos.
- A estrutura do andaime pode ser soldada dentro do aro-câmera. Esse é um procedimento usual.
- O distribuidor pode ser aberto durante a manutenção da turbina. Isso é importante para a solução de exaustão.
- Para evitar o problema ambiental causado pelos peixes que invadem o túnel durante as paradas, a comporta vagão é fechada juntamente com o distribuidor. Isso cria uma correnteza durante o fechamento que impede a entrada dos peixes. Com essa nova informação, a opção de acesso pela jusante deve ser abandonada, devido à correnteza durante o procedimento de fechamento da comporta vagão.
- São 30 dias para desmontar a turbina e 30 dias para a montagem.
- A pá só pode ser girada antes do desligamento da máquina. Após uma angulação ser escolhida, deveremos trabalhar com ela até o final.

### 3.2 Sobre o processo de revestimento

- Para revestir uma turbina completa são necessários cerca de 500 Kg de pó metálico. O rendimento do processo de revestimento é de 50%. Isto é, 250 Kg de pó metálico serão perdidos.
- A potência gerada pelo processo é de cerca de 1.5 MW ( $\approx$  2.000 HP).
- A ventilação necessária para a refrigeração é bem grande.
- As pistolas que existem no mercado possuem praticamente o mesmo peso.
- A RIJEZA planejava utilizar a escotilha superior para a exaustão de ar. Éder sugeriu abrir o distribuidor para a ventilação. Existe uma outra escotilha do outro lado.
- A RIJEZA avaliou a perda de carga se o equipamento for instalado abaixo da turbina devido ao grande comprimento das mangueiras e cabos, e a altura.
- A RIJEZA achou boa a opção de acesso pela escotilha superior. Isso resolve o problema da perda de carga.
- Esclarecida a dúvida sobre a precisão necessária/possível. O mecanismo não será tão preciso quanto o manipulador. A diferença de uma trajetória para a outra é de 3 mm.
- Sugestão: Checar o software SprutCAM para a simulação de cinemática.
- Sugestão: Checar o sistema laser vision ARC-EYE. Pode ser uma opção para a calibração e identificação de bordas.
- Ideia alternativa para o shutter: utilizar um switch para desviar o pó.
- Ideia: projetar um container com todo o equipamento. O container deve se apoiar sobre o aro câmera sem interferir no acesso já instalado.
- Ambiente: os resíduos podem ser abandonados? Questão a ser investigada.
- Ideia: a turbina poderia ser lavada ao final do procedimento de revestimento e haver algum tipo de separação entre a água e o pó, que decanta.
- Segurança: raio mínimo de curvatura das mangueiras deve ser observado. Cuidado para não quebrar o conector.
- Segurança: será necessário projetar um mecanismo para acender a tocha remotamente.
- A RIJEZA utiliza robôs da ABB. A assistência técnica é rápida. Considerar a utilização de robôs da ABB no caso de acesso pela escotilha inferior.
- Existe um processo de revestimento que usa querosene. É mais complexo e consome mais energia para refrigeração. Possivelmente, não deve valer a pena.

### 3.3 Algumas conclusões

- Abandonar a opção de acesso pela jusante.
- Solução convergindo para usar um manipulador de pequeno porte e um procedimento de revestimento por fases.
- Tendência: focar na opção de acesso pela escotilha superior. Verificar acesso dos cabos com passagem por dentro da base móvel da escotilha superior.
- Abrir o distribuidor para auxiliar a ventilação.
- A logística para a movimentação é um ponto chave. É um ponto favorável importante a ser considerado na avaliação do acesso pela escotilha superior.

### 3.4 Próximos passos

- Avancar com o conceito do acesso inferior. Redirecionar o Gabriel.
- Estudar com mais detalhes o uso do robô pequeno com um processo de revestimento em fases.
- Estudar o problema de aceleração e desaceleração do robô.
- Estudar o problema do sincronismo.
- Estudar o problema da calibração.
- Falar com o Toni sobre o problema de calibração e simulação dinâmica.

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE E**

---

### **Capacitação**

---



A pesquisa e o desenvolvimento (P&D) tem como propósito fomentar o avanço tecnológico e novas maneiras de desenvolver tipos específicos de conhecimento no país. O desenvolvimento do robô EMMA, no âmbito P&D é um exemplo de como a parceria entre agências do governo e universidades federais podem colaborar para a capacitação tecnológica e o desenvolvimento de novas tecnologias. Especificamente na área de robótica, o projeto EMMA mostra como a otimização e automação de diversos processos de trabalho pode contribuir na indústria energética. Em termos acadêmicos, esta linha de projetos possibilitou a realização de duas dissertações de mestrado, uma no Programa de Engenharia Elétrica (PEE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e outra no Departamento de Artes e Design (PPGDesign):



## UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa

Divisão de Ensino de Pós-graduação

## Declaração

Declaro, para fins de direito, que ESTEVAO FROES FERRAO, portador do Documento número 20292821-4, expedido por DETRAN / RJ, é aluno regularmente matriculado, com situação de matrícula ATIVA no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica desta Universidade e está registrado sob o número 115013637.

31 de Março de 2016 , emitido às 14:58h



\_\_\_\_\_  
Henrique Luiz Cukierman  
Superintendente Acadêmico de Pós-Graduação

Código de autenticação:

**F28B.8C90.9B5C.793C.990C.0171.14AC.1B10**

Versão da chave: 1.0

Este código pode ser validado em: <https://gnosys.ufrj.br/Documentos/autenticacao>



PUC-RIO - PONTIFICIA UNIVERSIDADE CATOLICA DO RIO DE JANEIRO

VICE-REITORIA PARA ASSUNTOS ACADEMICOS  
DIRETORIA DE ADMISSAO E REGISTRO

RELATORIO DE MATRICULA ON LINE

MATRICULA

1612258-8-1

NOME DO ALUNO

JULIA RAMOS CAMPANA

TURNO

DIURNO

EMISSAO

03/03/2016

I MAT

MN

PROGRAMA

PDG-POS-GRADUACAO EM DESIGN

CURSO

MDG-MESTRADO EM DESIGN

AREA

ADS-DESIGN E SOCIEDADE

PERIODO

2016.1

## MATRICULA CONFIRMADA

DISCIPLINA	TURMA	SUBTUR	CRED	HORARIOS E SALAS	
ART2003	1AA		03	2 13-16	
ART2004	1AI		03	00-00	
ART2201	1AB		03	3 13-16	
ART2277	1AA		03	3 16-19	

1a.via) POR MOTIVOS ACADEMICOS-ADMINISTRATIVOS E CONFORME AS NORMAS EM VIGOR, A PUC TOTAL DE CREDITOS: 12  
SE RESERVA O DIREITO DE CANCELAR DISCIPLINAS OU ALTERAR SEUS HORARIOS

PUC-RIO - PONTIFICIA UNIVERSIDADE CATOLICA DO RIO DE JANEIRO					
VICE-REITORIA PARA ASSUNTOS ACADEMICOS					
DIRETORIA DE ADMISSAO E REGISTRO					
RELATORIO DE MATRICULA ON LINE					
MATRICULA	NOME DO ALUNO		TURNO	EMISSAO	I MAT
1612258-8-1	JULIA RAMOS CAMPANA		DIURNO	03/03/2016	MN
PROGRAMA	CURSO		AREA	PERIODO	
PDG-POS-GRADUACAO EM DESIGN	MDG-MESTRADO EM DESIGN		ADS-DESIGN E SOCIEDADE	2016.1	
MATRICULA CONFIRMADA					
DISCIPLINA	TURMA	SUBTUR	CRED	HORARIOS E SALAS	
ART2003	1AA		03	2 13-16	
ART2004	1AI		03	00-00	
ART2201	1AB		03	3 13-16	
ART2277	1AA		03	3 16-19	

1a.via) POR MOTIVOS ACADEMICOS-ADMINISTRATIVOS E CONFORME AS NORMAS EM VIGOR, A PUC TOTAL DE CREDITOS: 12  
SE RESERVA O DIREITO DE CANCELAR DISCIPLINAS OU ALTERAR SEUS HORARIOS

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE F**

---

### **Artigos**

---



# State of the art and conceptual design of robotic solutions for *in situ* hard coating of hydraulic turbines

Renan S. Freitas · Gabriel Alcantara C. S. · Eduardo Elael M. S. ·  
Estevão Fróes F. · Ramon R. Costa

the date of receipt and acceptance should be inserted later

**Abstract** Hydropower turbine's blades are constantly exposed to abrasion and cavitation phenomena, demanding regular maintenance for flow stability and turbine efficiency. Hard coating techniques by thermal asperion are used to reduce the mechanical wear, thus increasing blade's life cycle, and turbine efficiency. Currently, applying a new coating layer requires turbine disassembling, and recalibration. EMMA is a robotic system to perform hard coating by thermal spray on hydraulic turbine blades within the turbine environment, i.e., hard coating application to an installed blade, significantly reducing the turbine downtime. This document is a study of the state of the art of *in situ* hydropower turbine robotic systems, and describes the conceptual designs for EMMA. The results outlines the

next steps for EMMA and future projects in the same area.

**Keywords** hard coating · hydropower · turbine · thermal spray · robotics · *in situ*

## 1 Introduction

According to the world energy council, hydropower is the most flexible and consistent of the renewable energy resources. Brazil is the second country in hydropower production, and second with the highest consumption of hydropower with a 70.000 MW installed capacity, and 433 hydroelectric plants in operation. Since Brazil is one of the world's richest countries in water resources, and the hydropower is the most dominant across the country, it motivates the development and investment in hydropower generation.

In Brazil, the renovation and improvement of the built large power plants is estimated to result in a potential increase of 32.000 MW (Goldemberg and Lucon, 2007), a figure that can be achieved, in large part, by the maintenance of the hydropower turbines. These turbines are constantly exposed to abrasion and cavitation phenomena. The cavitation phenomenon (Fig. 1) is detailed in Escaler et al (2006), which outlines their types, occurrences and effects in the different hydraulic turbines. This physical phenomenon can cause erosions in the hydraulic turbines, leading to water flow instability, excessive vibrations and turbine efficiency reduction.

Hard coating techniques by thermal asperion are used to reduce the erosion of the turbine's blade from cavitation or abrasion, thus increasing its life cycle. This solution is analogous to a paint that protects walls from environment exposure. The hard coating procedure is performed by a robotic manipulator before the

---

Renan S. Freitas  
Department of Electrical Engineering, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.  
Tel.: +5521996038585  
E-mail: renan028@gmail.com

Gabriel Alcantara C. S.  
Department of Electrical Engineering, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.  
E-mail: alcantara@poli.ufrj.br

Eduardo Elael M. S.  
Department of Electrical Engineering, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.  
E-mail: elael2@gmail.com

Estevão Fróes F.  
Department of Electrical Engineering, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.  
E-mail: ef.ferrao@mecanica.coppe.ufrj.br

Ramon R. Costa  
Department of Electrical Engineering, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.  
E-mail: ramonrcosta@gmail.com



**Fig. 1** Jirau hydraulic turbine's blade eroded by cavitation.

hydraulic turbine installation. It requires a robotic system due to high precision, speed, and the hazardous substances that are used, as propane and other gases. Although sufficient for blade protection, the coating also has a life cycle itself, thus it needs to be redone from time to time to ensure the blade's protection from physical phenomena.

In the specific case of the Jirau hydroelectric dam, built on the Madeira river, the number of suspended particles that the river carries intensifies the abrasion phenomena, and Rijeza, a hard coating specialized company, identified cavitation erosion on blades, further reducing the coating life cycle. Currently, coating reaplication requires stoppage of the turbine, blade removal, blade positioning for coating, turbine assembling, and recalibration. This process can take up to two months, meaning a huge loss in power generation. EMMA is a robotic system for *in situ* hard coating application. However, there are several difficulties encountered when attempting to robotize *in situ* maintenance, as accessibility, system placement and calibration.

This document is divided as follows: section 2 describes, in detail, the problem, contextualizes the reader in the Jirau environment and describes the robot's tasks; section 3 surveys the state of the art; section 4 describes the conceptual designs for the robot and mechanical bases; finally, the section 5 concludes and outlines the next steps for EMMA.

## 2 The problem

Cavitation and abrasion in hydropower turbines erode the surface of the blades and are responsible for hydraulic profile deformation, resulting in efficiency reduction (Brennen, 2013). A preventive solution is the High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating process of the blades. The hard coating creates a lamellar structure, increasing power generation efficiency, and provides greater resistance to erosion. The coating of turbine's blades is performed before turbine assembling

and installation. In the specific case of Jirau, the abrasion due to a large number of particles and sediment in the Madeira river and the recent identified cavitation require recoating in short intervals (Santa et al, 2009).

Since turbine disassembling for runner's blade recoating would be a huge loss in power generation, the problem is to design a robotic system for *in situ* hydropower runner's blades coating. The robotic system must overcome turbine accessibility, as robot transportation and placement in confined space, and some common robotic problems, as localization, mapping and control.

In this section, the coating technology is addressed as the way to reduce the damage by cavitation. Also, the reader is contextualized in the Jirau facility. Finally, *in situ* robotic tasks are highlighted.

### 2.1 The HVOF coating process

The thermal spraying (or metallizing) is a process in which heated materials are sprayed onto a surface in order to improve or restore their properties and dimensions. The coating significantly increases the resistance to erosion or corrosion.

A thermal spraying system comprises: a spray gun, which partially melts and accelerates the particles to be deposited onto metal surface; a feeder, which provides the powder (particles) via pipes; a provider of burning material; a robot (manipulator) to handle the gun; an electric power supply to the gun; and a control console for the system.

In the specific case of Jirau, turbine blades (stainless steel 420) are coated on High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spraying type by the Rijeza company with a robotic manipulator 150 kg payload, which is a good safety margin, since the system mass is 10 kg (cables and gun). The process takes 6 hours per side of the blade.

The HVOF consists of feeding, in a combustion chamber, the coating material (tungsten carbide), a gaseous fuel mixture (propane), and oxygen. According to the data provided by the Rijeza company, the 8 kg spray gun projects a flame of 3000°C, spraying the particles at 700 to 1000 m/s speed, and generating a 15 N recoil force.

The manipulator must have 5 mm accuracy, and the spray gun should remain at a 210 to 240 mm distance with  $90^\circ \pm 60^\circ$  angle in respect to the metallic surface plane for a regular coating layer. The end effector of the manipulator must control the spray gun at a constant 40 m/min speed, and should not stop during the process with the blade in its range (*long stop*), otherwise

**Table 1** HVOF process data

Component	Data
Spray gun mass	8 Kg
Cables mass	12 Kg
Flame temperature	3000°C
Spray gun recoil	15 N
Manipulator precision	5 mm
Spray gun to blade distance	230-240 mm
Spray gun to blade angle	30°-90°
Manipulator velocity	40 m/min
HVOF sound noise	100 a 140 dB
Blade temperature	up to 110°C

coating material would accumulate. The end effector direction changes are considered *long stop* too, thus direction changes should be made out of the blade range, or sacrifice plates should be used. Sacrifice plates, or masking, are metal plates placed on blade spots that should not be coated.

Regarding the operating conditions, the hydropower turbine is a confined space, the HVOF process has excessive audible noise (100-140 dB), and hazardous and potentially explosive gases are expelled; the blade can reach up to 110°C; the environment's temperature and humidity should be monitored and ideally set for the coating process; and 40% of the sprayed particles are lost during the process (Wu et al., 2006), which are spread throughout the environment. Thus, the process requires a very well ventilated environment. Table 1 summarizes the project restrictions and specifications.

## 2.2 Environment contextualization

The Jirau facility has horizontal axis bulb type turbines. In hydropower plants, electric power generation depends on the water level and river flow, and bulb type turbines are designed to produce enough electricity only with high water flow.

In the context of EMMA, the turbine points of interest are: 1) the variable pitch propeller, or Kaplan blades; 2) Runner and adjacent areas; 3) turbine's access or hatches; and 4) Draft tube.

1) Blades: the rotor or turbine propeller consists of the hub, the blades and the cone. Blades of Jirau's turbine is approximately 2.5 m tall and 3 m wide, they are fully reachable from the turbine interior, excepting the lips, which can be visualized through a small top hatch. The variable pitch propeller varies from 0° to 29° relative to the water flow.

The rotor can be manually rotated in both directions, but blades' angles are changed by hidraulic actuators.

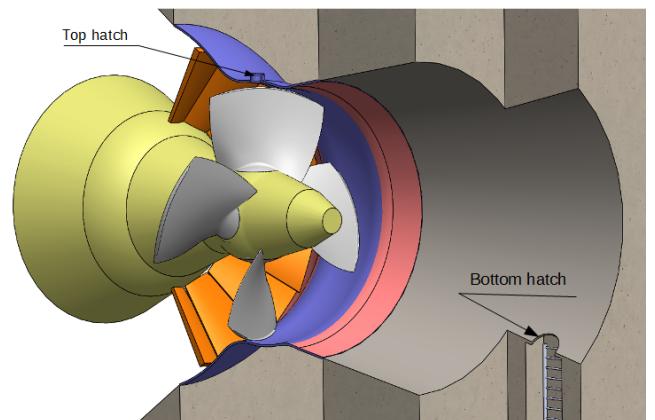
2) Runner and adjacent areas: the runner area and the variable pitch guide vanes (wicket gates) have metal surface, but only the latter is composed of ferromagnetic materials, allowing magnetic fixing solutions for robotic systems. The cylindrical and sloping shape of the runner area hinders robot fixation and movement. An horizontal plane or a stiff mechanical base should be build for the system fixation. Under turbine maintenance, devices and equipments are fixed by a scaffolding anchored by ropes. Fig. 2 illustrates a turbine under maintenance.

**Fig. 2** Turbine under maintenance. Scaffolding as fixation point for equipments.

3) Hatches: the two turbine accesses are the 800 mm diameter bottom hatch, located at the beginning of the draft tube and generally used by operators for maintenance; and the 357 mm diameter top hatch, located at the top of the runner and generally used for blade's lip inspection.

4) Draft tube: at the end of the discharge pipe is located the downstream stoplogs and then the riverbed. If the stoplog are not inserted, there is a 10 m wide gap, which could be used as access. However, the high water flow due to the opening of the distributor make it impossible for access.

A 3D CAD model of the turbine was built with SolidWorks® for future simulation and conceptual solution analysis (Fig. 3). The model is not fully detailed, but the upstream tunnel, the stator, the rotor, a small sector of the downstream, and the hatches are represented with great accuracy.

**Fig. 3** 3D CAD model of the Jirau turbine (SolidWorks®).

### 2.3 Main challenges and robot tasks

The summary of the tasks to be performed for an *in situ* hard coating application are: 1) Blade damage inspection for repair and coating; 2) Repair; 3) System mounting ; 4) Abrasive blasting; 5) Hydraulic profile modeling; 6) Calibration; 7) HVOF coating. Tasks 1 to 4 can be performed manually and tasks 2, 4, 5, 6 and 7 by robot.

A major problem for *in situ* robotic process is accessibility and placement. The robot must be brought to the turbine, operate in a confined and curved space, and has a stiff mechanical base for hard coating accuracy.

The runner's blade should conform to the template, hydraulic profile, before the coating process. Therefore, the system should build an hydraulic profile (mapping) and analyze flaws. Also, the system should be calibrated, as the blade and robot positions are not known.

In case of deep blade deformations, a repair by welding should be done. An operator can manually perform the welding because there is no hard restrictions as the coating process (accuracy, speed, load). However, the hostile and confined environment can hinder the manual execution, thus welding can also be a robot task.

If the blades conforms to the hydraulic profile, the coating erosion identification is made measuring the thickness of specific points on the surface of the blade. An operator with a specific device can manually do this process, efficiently, in ten minutes.

The abrasive blasting process is generally done before the coating operation. Rijeza company performs the abrasive blasting manually, but there are studies and companies performing abrasive blasting with robots (Ren et al, 2008).

## 3 State of the art

The study of the state of the art of robots for HVOF coating process on hydraulic turbine blades covers systems that meet some of the following requirements: operation in hostile and confined environments; manipulator's end-effector with at least 8.5 kg payload, 5 mm precision and  $0.67m/s$  speed; 2.5 m x 3.0 m system workspace; and the ability to operate on complex 3D geometry surfaces.

### 3.1 Robots on rails

In industry, HVOF coating process is performed by a large-sized manipulator, which offer task versatility and large work envelope. A compact robot does not have the required workspace on a fixed position, and it could be

hard to mount and unmount the system several times. A prismatic joint coupled to a rail is the most common strategy for extending the robot work space, without adding weight to the manipulator.

The Roboturb (Bonacorso et al, 2006) is a robotic manipulator composed of six revolution joints and one prismatic joint coupled to a flexible rail.

The robot performs welding, filling cavities generated by erosion. The rail may be shaped and then fixed to the blade surface by a passive system of suction cups. The robot has two end-effectors: an optical sensor for erosion inspection; and a welding tool, a PWH-4A plasma torch with automatic feeder.

The Scompi robot (Bibuli et al, 2007) is a multi-purpose manipulator, designed to perform repairs on *Francis* type turbines, as welding and grinding. It has six degrees of freedom: a manipulator with five revolution joints; and a prismatic joint, coupled to curved rails that are designed specifically for each application.

The systems described do not have the required payload for HVOF, which is too heavy to be fixed on the blade itself. Besides, in a similar solution, the customized rail and robot need to be repositioned, as the area in which the rail is fixed is not in the robot workspace. On the other hand, rail systems fixed on adjacent structures should considerate the installation conditions, and balance the cost-benefit of installation/removal of the rail. The solution should be modular and stiff enough due to robot vibrations during coating application.

The system advantages are: manipulator size reduction; and manipulator weight reduction. The disadvantages are: rail mounting; and rail handling.

### 3.2 Climbing robots

Climbing robots are systems capable of supporting its own weight against gravity, moving in simple or complex geometric structures, such as walls, ceilings and roofs, turbine blades and nuclear plants. Generally, climbers are used to provide operational efficiency in harsh environments, and to increase safety. Some applications for climbing robots are: skyscrapers inspection and cleaning, storage tanks diagnosis in nuclear power plants, ship's hull and turbine welding and maintenance (Ar-mada et al, 2003).

The major challenges in climbers development are mobility, adhesion, power consumption, load capacity, and weight. In Maempel et al (2009) and Chu et al (2010), climbers are divided into types of locomotive mechanisms: legs; walker; translation; wheels; tracks; advance by arms; cable-driven; and biomimetics. And adhesion types: suction or pneumatic; magnetic; electrostatic; chemical; gripping; and hybrid.

The following climber robots were investigated:

- **Ships and turbines:** RRX3 for welding (Kim et al, 2004), *Climbing Robot for Grit Blasting* for cleaning (Faina et al, 2009), ICM Robot for inspection (Machines, 2015), and RIWEA (Elkmann et al, 2010);
- **Industrial:** ROME II (Balaguer et al, 2002) and CROMSCI (Hillenbrand et al, 2008), both for inspection;

The RRX3, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, is a robot for ship's hull welding with manipulator. It has a gripping adhesion type, a translation locomotion type (sliding segments), and longitudinal locomotion by wheels. The RRX3 robot has a 1.5 m manipulator with three prismatic joints and three revolution joints (3P3R) for welding operation. The system weighs 120 kg with 5 kg payload, it has a manipulator with welding tool.

The *Climbing Robot for Grit Blasting*, University of Coruna, is a robot for abrasive blasting application in ships. The robot moves by two sliding platforms with magnetic adhesion. The platforms have relative motion between them and can rotate to compensate ship's hull curvatures or to deflect objects. The abrasive system is similar to HVOF, but the robot locomotion is not applicable to complex structures.

The *Climber*, ICM Robotics, is an inspection robot for wind turbines, coating removal, surface cleaning and coating application. It has pneumatic adhesion and locomotion by tracks. It has 25 kg base payload, and a small-sized low speed manipulator. The locomotion type presents restrictions to some curvatures.

The Rome II , University Charles II of Madrid, is an inspection robot for complex environments. It has pneumatic adhesion and moves like a caterpillar (biomimicry). Rotation and planning trajectory are performed optimally to ensure stability and obstacle avoidance.

CROMSCI , Kaiserslautern University of Technology, is an inspection and autonomous robot for large concrete walls, as pillars of bridges and dams. Its adhesion system is composed of seven vacuum chambers (suction), valves and pressure sensors for system control. The locomotion system has omnidirectional wheels.

RIWEA is a purely cabling robot, as it has no other type of position adjustment, for cleaning wind power turbines. It is an open frame concept robot which uses four ropes to move up and down. It has five main parts, which automatically adjust to the blade surface during its movement (Jeon et al, 2012). Its greatest advantage lies in the ability to adapt to the curvature of the blade while maintaining a foothold on it, and it is also less susceptible to vibration.

Climbing robots are widely applicable, have different adhesion solutions and mobility. There is not, so far, a climber that fulfills all the HVOF requirements for the large hydropower turbine's blades, but some of the systems, such as *The Climber* (ICM Robotic), can generate complete solutions with adaptations.

The advantages of climbers are: easily installation, small-sized manipulator, small base, lightweight, autonomy; and the disadvantages are: complex locomotion system, complex mechanics, manual installation on blade, required a well-developed safety system, it generally has limited battery or an umbilical management system.

#### 4 Design of a robotic system for *in situ* HVOF

The robotic system design for HVOF in hydraulic turbine blades is a solution that meet all the requirements. Thus, the envisioned robots of this section merge some technologies exhibited in section 3 in the context of the Jirau hydroelectric dam.

In section 2, the runner area accesses were described and their restrictions are essential for the elaboration of the solution. This section is divided into robotic solutions for both accesses, since they are the most important development restriction, as they limit robot's dimensions, features, and accessibility.

##### 4.1 Top hatch

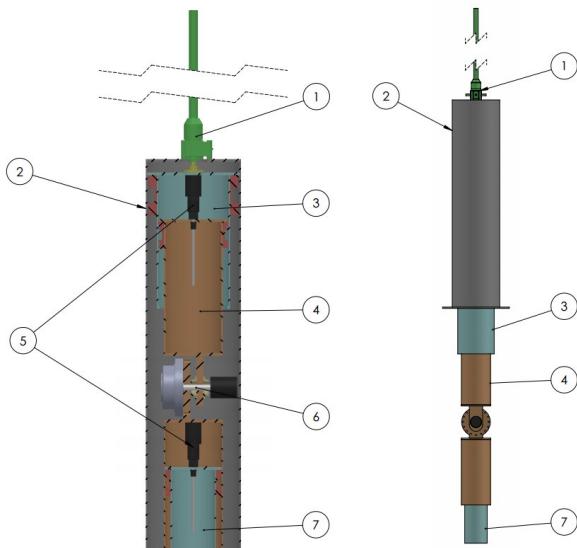
The top hatch, at the top of the runner area, has only 357 mm diameter (Fig. 3). Using the top hatch as the access for the robot has the following advantages: base stiffness (robot fixation stability), fixed reference point (facilitating localization system, mapping, control and calibration), built logistics (conveyor gantry to position the robot and the HVOF system); and the following disadvantages: robot size (only 357 mm diameter), system must be removed to rotate the blades, and it is not a general solution (specific to Jirau installations).

Climbers and rail systems are not suitable for the top hatch due to its dimension. These solutions will be detailed in Section 4.2, since the top hatch do not pose logistic gain for these approaches.

The proposed solution for this access point is to use an industrial manipulator that fits through the hatch, anchored on the external part of the turbine. The choice of the robot is primarily associated with reach, but only a small share of off-the-shelf manipulators can fit. Thus, the study was focused on the KUKA Light Weight (LBR iiwa 14 R820), which weighs 30 kg, has seven joints and 14 kg payload, enough to carry the coating equipment,

but further dynamics tests should be done to validate the robot, at the speed and accuracy required.

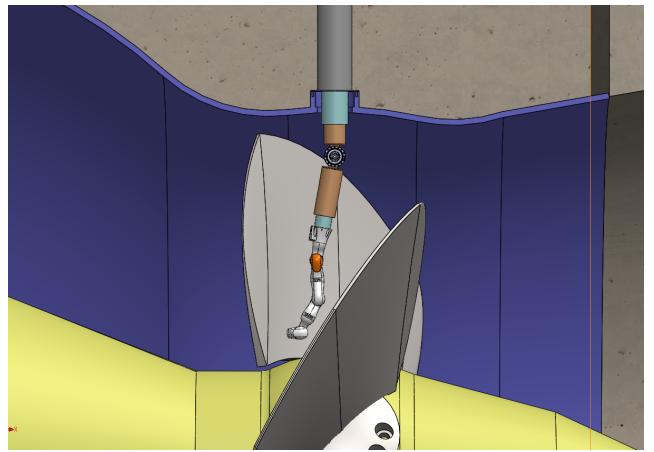
To place the LBR in a position where it is able to process all the blade, a hinged base model was proposed. The mechanical system consists of three telescopic links interconnected by a revolute joint, and the first link is attached to the top hatch itself. To cover the entire blade, the mechanical base must be able to assume different angles with respect to the insertion axis, and the base's links must be telescopic with prismatic joints. The links are cylinders with maximized diameter at low thickness, which features a high polar moment of inertia and light weight, providing great bending stiffness, and minimizing positioning errors and excessive vibration. A recirculating ball actuator was chosen for low backlash and high precision. Fig. 4 shows the mechanical system concept in two configurations: retracted and extended.



**Fig. 4** Initial and extended configuration of the base.

The main components of the base are shown in Fig. 4: 1) worm gear linear actuator; 2) fixed base; 3) prismatic arm #1; 4) prismatic arm #2; 5) linear actuators; 6) revolute joint; 7) prismatic arm #3. Fig. 5 shows the mechanical system and the LBR R820 manipulator.

Inserting the mechanical system and the manipulator in the top hatch requires special care, as the system total length is greater than the distance from the top of the runner area to the turbine nose. In extended configuration, the arm and the base will need to be rotated during the insertion, which will result in system's central mass misalignment with respect to the perpendicular axis of the hatch, which demands compensations to the generated torque.



**Fig. 5** Base and KUKA LBR R820 manipulator

#### 4.2 Bottom hatch

The bottom hatch, at the middle of the draft tube, is a 800 mm diameter hole. Accessibility is a major problem, as the bottom hatch is 10 m far from the blade and 4 m above the external ground level, thus the system should be manually hoisted, transported on the slippery, conical and sloping environment, and placed close to the blade. Using the bottom hatch as the access for mid-sized robots has the following advantages: large enough for mid-sized robots, free access, it is generally used by operators for turbine maintenance. And the following disadvantages: the hatch is not big enough for large-sized manipulators, complex logistics (scaffolding and hoists), hard robot transportation and positioning.

The system solution is focused on mid-sized manipulators, and a modular base. Solutions were divided into subsections in accordance to fixation strategies: mobile robots that move on rails fixed on the blade; climbers; industrial manipulators that move on rails fixed on the floor.

##### 4.2.1 Rail guided robot fixed on blade

A rail guided manipulator fixed on the blade satisfies all requirements for the HVOF and inspection. The development of a compact system for easy transportation and installation on the runner area are possible, since the manipulator dimensions are reduced due to the extra mobility provided by the rail.

In the context of the proposed application, the solution consists in a system similar to Roboturb, presented in section 3.1. Thus the rail should be flexible to be able to follow the blade curvature, it should allow several placement options, and, as the blade is not ferromagnetic, the adhesion would be done by active suc-

tion cups made of a special material to work on large temperature variations.

**Solution conclusion** Fixing a rail on the blade has some complexities: rail and robot manual installation for each blade side; design of customized flexible rails; and design of special active suction cups for high temperature variation and payload. It is possible to use an off-the-shelf manipulator, such as the LBR R820, making the design focused on signal processing, mapping, localization, control, and the rail construction.

The solution should be suitable for the application, but the required rail customization does not make it a simple and general solution. Besides, a rail attached to the blade requires a compact and lightweight robotic system, which is very complex for the HVOF requirements.

#### 4.2.2 Robotic climbers

In this subsection, the robotic solution for HVOF are the fusion of technologies documented in subsection 3.2. It is an adaptation of *The Climber*, ICM, given its ability to reconfiguration.

*The Climber*, ICM, is a commercial solution which meets many of the HVOF specifications and some improvements do not compromise its structure. The robot's adhesion is suction and it moves through flexible mats. The system has already been tested in harsh environments, as wind turbines, hydroelectric plants and others. We can divide the robotic system design into four systems: mobility, adhesion, manipulator and autonomy.

*The Climber* uses only one vacuum chamber instead of the suction cups in Kim et al (2008), for instance. *The Climber*'s flexible mats allow smoothly and continuously motion. The solution with a single chamber seems more advantageous, as the robot can move on curvatures up to 30 cm radius. In the specific case of the HVOF, a manipulator applies the coating while the robot travels along the blade. The robot locomotion on the blade rises some design issues: blade's temperature variation during the procedure, which requires active suction chamber with special material; mats and the suction chamber must work on highly curved surface.

In adhesion by suction, an intelligent security mechanism should be implemented, with accelerometers, gyros and other sensors to ensure the shutdown of the electronics, and the HVOF gases. A path planning generation could increase the operation safety.

**Solution conclusion** Although tempting because of the autonomy, the surface complexity of the turbine blade,

the confined environment, and the required speed and payload are major challenges to this solution.

The climber's manipulator should have the following characteristics: to be lightweight; to be fast and accurate; to be modular, as the operation is performed in confined space; to be small, improving mobility, but capable to operate on blade's edges with 230 mm minimum distance; and to have 10 kg payload and vibration resistance. Off-the-shelf manipulators with the required payload weighs 30 to 50 kg. Therefore, manipulator, HVOF gun and cables weighs 50 to 80 kg. The manipulator greatly increases the dimensions of the mobile base, and hence diminishes its workspace, slowing the process.

Finally, the climber as described above does not switch automatically between blades. A climber with arms to switch between blades is a costly solution in terms of control and mechanical structure. Another solution would be a robot with locomotion by sliding segments, as RRX3, and adhesion by suction, but the flexibility for motion between blades complicates the design.

Compared to alternative solutions, a climber would be a general solution, it has logistical advantages, but it is a robotic challenge.

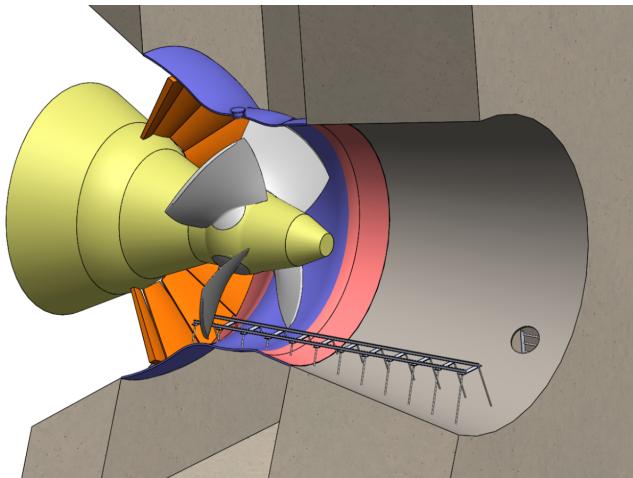
#### 4.2.3 Proposed solution

There are several large-sized off-the-shelf manipulators which fulfill the HVOF requirements, and compatible with the bottom hatch dimensions. However, those manipulators are too big to operate behind the blade, on the distributor side, due to environment collisions, and joint constraints. Besides, manipulators with such workspace are heavyweight, thus the robot placement and motion would be complex inside the turbine. A feasible solution is a mid-sized manipulator, and a customized modular rail base to place and move the robot.

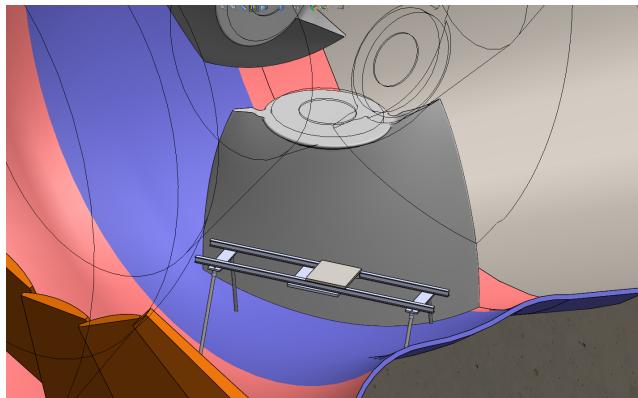
The mechanical base consists of two modular non-actuated and customized rails: the main rail (transport) and the secondary (positioning) rail, both fixed by magnetic fixtures or welding. The transport rail moves the robot from the bottom hatch to the blade, solving a logistic problem. The positioning rail is assembled to the transport rail by a rotary joint, and it positions the robot along the blade, solving the horizontal coverage of the blade. The mechanical system can be summarized in three joints: prismatic (main rail), revolution (joint between main and second rail), and prismatic (second rail) (P-R-P). As the robot can not vertically cover the entire blade, vertical positions should also be manually selected. The blade can be coated on linear or circular motion, and, in both cases, the manipulator will be responsible for speed, position and the gun orientation.

The solution for end effector direction exchange (*long stop*) is an actuated valve to redirect the coating particles.

Regarding turbine accessibility, a mid-sized manipulator should be hoisted through the bottom hatch, placed on the transport rail and carried to the blade, as in Fig. 6. At the runner area, the robot is manually switched to the secondary rail. On it, the solution is similar to the *ex situ* operation: a manipulator in a fixed position, at the front or at the back of the blade, with a coating gun. However, a simple geometric study with blade's actual dimensions shows that a mid-sized (1400 mm workspace) manipulator cannot fully cover the blade. Therefore, the secondary rail must be able to move the robot horizontal and vertically (Fig. 7).



**Fig. 6** Transport rail mounted inside the turbine.



**Fig. 7** Positioning rail behind the blade.

*Solution conclusion* In terms of robotics, a rail guided industrial manipulator with magnetic fixtures is the

simplest among all solutions. Off-the-shelf manipulators are available and fulfill the HVOF requirements, thus the mechanics will be responsible for the mechanical base design, stiff and modular rails, and the magnetic fixtures. The robotic challenges, as path generator and calibration are well discussed in the literature.

## 5 Conclusion and future work

The maintenance of hydroelectric turbines is essential for full operation, as it substantially increases the power plant potential. The maintenance of the hydraulic profile of runner's blades is a major concern for turbine efficiency, thus regular inspections, repairs and coating application for cavitation and abrasion protection should be performed.

Currently, *ex situ* recoating operation would be costly, it will require turbine disassembling and recalibration. This document aimed to: analyze the constraints of the *in situ* thermal spray coating process; characterize the environment where the process is taking place; make a state of the art survey of similar problems; and design conceptual solutions.

The feasibility study for an *in situ* coating application is promising and some possible solutions were investigated for each turbine access. As a conclusion, EMMA's hardware concept solution is an industrial manipulator on customized modular rails. If the top hatch access is chosen, the solution is a small-sized manipulator, and a telescopic actuated mechanical base; in the case of the bottom hatch, the solution is a mid-sized industrial manipulator with two rails and magnetic fixtures.

Climbers, systems fixed on the blade, and mobile robots were analyzed. However, those solutions are not suitable for: the HVOF process, due to speed and payload requirements; or the geometric complexity and confined space of the hydropower turbine (sloping and slippery floor). The proposed solutions raise some logistical and technical challenges.

The bottom hatch's solution is the most general among the proposed solutions, since the top hatch is a peculiarity of Jirau's power plant. Thus, for future work, the concept solution for the bottom hatch access will be fully detailed in terms of mechanics, electronics, software and control.

## Acknowledgements

We gratefully acknowledge the financial support of Energia Sustentável do Brasil and the ANEEL R&D pro-

gram (contract COPPETEC/UFRJ JIRAU 09/15 6631-0003/2015).

## References

- Armada M, De Santos PG, Jiménez MA, Prieto M (2003) Application of clawar machines. *The International Journal of Robotics Research* 22(3-4):251–264
- Balaguer C, Gimenez A, Abderrahim M (2002) Roma robots for inspection of steel based infrastructures. *Industrial Robot: An international Journal*
- Bibuli M, Caccia M, Lapierre L (2007) Path-following algorithms and experiments for an autonomous surface vehicle. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 7(PART 1):81–86, DOI 10.1002/rob
- Bonacorso NG, Goncalves Jaa, Dutra JC (2006) Automation of the processes of surface measurement and of deposition by welding for the recovery of rotors of large-scale hydraulic turbines. *Journal of Materials Processing Technology* 179(1-3):231–238
- Brennen CE (2013) Cavitation and bubble dynamics. Cambridge University Press
- Chu B, Jung K, Han C, Hong D (2010) A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol 11, No 4, pp 633–647
- Elkmann N, Felsch T, Forster T (2010) Robot for rotor blade inspection. In: *Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*, 2010 1st International Conference on, IEEE, pp 1–5
- Escaler X, Egusquiza E, Farhat M, Avellan F, Cousirat M (2006) Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical systems and signal processing* 20(4):983–1007
- Faina A, Souto D, Deibe A, Lopez-Pena F, Duro RJ, Fernandez X (2009) Development of a climbing robot or grit blasting operations in shipyards. Proc of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 200–205
- Goldemberg J, Lucon O (2007) Energia e meio ambiente no brasil. *Estudos Avançados* 21(59):7–20
- Hillenbrand C, Schmidt D, Berns K (2008) Cromsci - a climbing robot with multiple sucking chambers for inspection tasks. *WSPC Proceedings*
- Jeon M, Kim B, Park S, Hong D (2012) Maintenance robot for wind power blade cleaning. Seoul, Korea: Department of Mechanical Engineering, Korea University
- Kim H, Kim D, Yang H, Lee K, Seo K, Chang D, Kim J (2008) Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism. *Journal of mechanical science and technology* 22(8):1490–1498
- Kim J, Lee KY, Kim T, Lee D, Lee S, Lim C, Kang SW (2004) Rail running mobile welding robot rrx3 for double hull ship structures. Proc of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots, pp 1061–1069
- Machines IC (2015) The climber. International Climbing Machines (ICM) website. <http://www.icm.cc/climber.php> Accessed on March 30<sup>th</sup>, 2015
- Maempel J, Koch T, Koehring S, Obermaier A, Witte H (2009) Concept of a modular climbing robot. *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*
- Ren T, Kwok N, Liu D, Huang S (2008) Path planning for a robotic arm sand-blasting system. In: *Information and Automation, 2008. ICIA 2008. International Conference on*, IEEE, pp 1067–1072
- Santa J, Espitia L, Blanco J, Romo S, Toro A (2009) Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear* 267(1):160–167
- Wu J, Fang H, Yoon S, Kim H, Lee C (2006) The rebound phenomenon in kinetic spraying deposition. *Scripta materialia* 54(4):665–669

# A ROBOTIC SYSTEM FOR *IN SITU* HYDROPOWER TURBINE HARD COATING

RENAN S. FREITAS\*, ESTEVÃO F. FERRÃO\*, GABRIEL ALCANTARA C. S.\*, EDUARDO ELAEL M. S.\*,  
RAMON R. COSTA\*

\*Department of Electrical Engineering, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Emails: renan028@gmail.com, ef.ferrao@mecanica.coppe.ufrj.br, alcantara@poli.ufrj.br,  
elael2@gmail.com, ramonrcosta@gmail.com

**Abstract**— Hard coating of hydropower turbine's blades increase power generation efficiency and system's life cycle. Currently, blade coating is an *ex situ* process limited to unassembled turbines. EMMA is a robotic solution for *in situ* hard coating maintenance. The system operates in the confined turbine's environment, and complies the hard coating process requirements. The proposed system is composed of modular and customized rails, a robotic manipulator, and sensors for control, localization and mapping. The simulations and field tests validate the concepts considered so far and rise several challenges for future works.

**Keywords**— Hard coating, manipulator, robotics, robot calibration, rail system, hydropower

**Resumo**— O processo de metalização das pás de turbinas hidrelétricas aumenta a eficiência da geração de energia, e sua vida útil. Atualmente, o revestimento das pás é um processo realizado fora do ambiente da turbina. EMMA é uma solução robótica para manutenção *in situ* por metalização de pás de turbinas hidrelétricas. O sistema opera no espaço confinado da turbina, e cumpre com as restrições do processo de metalização. O sistema é composto por trilhos modulares e customizados, um manipulador industrial robótico, e sensores para controle, mapeamento e localização. As simulações e testes de campo validam os conceitos considerados e levantam novos desafios para trabalhos futuros.

**Keywords**— Metalização, manipulador robótico, robótica, calibração, sistemas em trilhos, hidrelétrica

## 1 Introduction

Hydropower has an important share in the global electricity production, and will continue to be a major source of renewable power-generation<sup>1</sup>. In hydropower generating plants, the average maintenance cost is 2% of the investment cost per kW, and, typically, the large mechanical components, as turbines, must be maintained and replaced every 25 years. The cavitation and abrasion phenomena on the turbine's blades have become a concern, as the erosion can lead to water flow instability, excessive vibrations and turbine efficiency reduction (Goldemberg and Lucon, 2007). Hard coating techniques by thermal aspersion are used to greatly increase the life cycle of runner's blades (Krella, 2011).

In the specific case of Brazil, hydropower is the largest power-generation source. To support future economic growth, Brazil has invested in additional large hydroelectric facilities, for instance, the 14 GW Belo Monte along the Xingu River<sup>2</sup>, and Jirau dam (Fig. 1) along the Madeira river. At the latter, the high concentration of suspended particles carried by the river intensifies the abrasion phenomena, thus regular maintenance is needed. Currently, blade coating maintenance in these large facilities is performed before turbine assembling by a large-sized robotic manipulator.

Repair maintenance, as grinding and welding, can be done manually in the turbine's environ-

ment, but the hard coating procedure requires a robotic system due to high precision, speed, and the usage of hazardous substances. There are several difficulties encountered when attempting to robotize *in situ* maintenance, as accessibility, system placement and calibration. A few robotic systems have been investigated to perform *in situ* repair of turbine runners, as it could greatly improve efficiency and safety, but none has been used for the hard coating operation. Some examples found in the literature are:



Figure 1: Jirau's hydropower turbine.

- The Roboturb (Bonacorso et al., 2006) and the Scompi (Bibuli et al., 2007) are robotic systems to perform erosion inspection and welding on damaged runner's blades. They move on a flexible rail, which may be shaped and then fixed to the blade surface.

- The Climber<sup>3</sup> is an intervention robot for

<sup>1</sup>International Energy Agency (2010), <http://www.iea.org/>.

<sup>2</sup>Energy Information Administration (2014), <https://www.eia.gov/>.

<sup>3</sup>International Climbing Machines (2013), <http://www.icm.cc/>.

wind and hydroelectric turbines, to perform coating removal, surface cleaning and coating application. It is a climbing robot with pneumatic adhesion and locomotion by tracks.

In this paper, we present a general overview of a robotic system called EMMA, and a detailed description of the mechanics, the manipulator, and calibration. The system performs *in situ* hydropower runner's blade hard coating.

## 2 The hard coating process

Hydropower runner's blades are typically eroded by cavitation and abrasion phenomena, resulting in hydraulic profile deformation, thus efficiency reduction. The High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) coating is a preventive solution for erosion, and creates a lamellar structure.

The HVOF is a 2000 hp power process which consists of spraying coating particles by an 8 kg spray gun, through a flame with mixed gases. To achieve the best coating layer, the spray gun should be at a fixed 210 mm to 240 mm distance, and  $90^\circ \pm 30^\circ$  angle, in respect to the metallic surface plane of the blade; and the gun should move at 40 m/min speed along the path (Li and Wang, 2002). Besides, for a regular coating cover, the trajectory is 3 mm spaced horizontal lines crossing the blade's surface (coating step), which requires great positional accuracy of the robot. The common solution which meets the requirements for *ex situ* HVOF coating is a robotic manipulator with a blade-sized workspace in a fixed position.

## 3 The problem

The problem is to design a robotic system for *in situ* hydropower runner's blades. Accessibility is a major problem: the robot must be brought to the turbine through a hatch; and it must operate in the confined, curved, slippery and harsh environment of the turbine. Besides, there are several control and calibration problems, as trajectory planning, and robot localization.

The mechanical challenges are robot locomotion, base stiffness, and fixation. The robot should be transported and positioned in turbine's environment, as the access is generally far from the runner's blade. The stiffness is required for the hard coating process, since a base's vibrations are propagated to the manipulator's end-effector with high amplitudes, compromising the coating quality.

Regarding calibration, the relative position between the manipulator and the blade is not fixed. The system calibration consists in the identification of the manipulator and blade, and their pose estimation in respect to the turbine interior. Due to the environment's light conditions,

3D laser sensing technology should be used to map the topography of the blade, and the robotic system.

Large-sized manipulators are not suitable for *in situ* operations, due to the accessibility, and conventional compact manipulators do not have the required work envelope or payload for the task. Therefore, customized or mid-sized manipulators should be investigated by kinematics and dynamics simulations. Besides, the modeling of curvilinear space, the automatically trajectory generation, and the robot position and velocity control comprise the robot control strategy.

## 4 Solution

EMMA robotic technology is described in this section. The following system's elements will be presented: the robotic manipulator; the customized modular base; and the robot calibration.

### 4.1 Robotic Manipulator

The HVOF coating requirements and environment constraints demand a mid-sized robotic manipulator (Sec. 2). A survey was conducted to determine the most adaptable off-the-shelf manipulator for the application. Overall simulations and analysis were performed using the OpenRave (Diankov and Kuffner, 2008), an environment for simulating motion planning algorithms for robotics. There are several tools for dynamics simulation of robots: Gazebo, V-Rep, Webots, and others. OpenRave was selected because of its integral design for real-time control and execution monitoring, the core functionality for kinematics operations and physics simulations, and the ROS support, simplifying future software integration.

The simulations were performed to analyze the manipulator's work envelope in the turbine, the required positions for full blade coating, the manipulator's efforts (torque estimation), and to investigate possible collisions with mechanical parts. The simulations steps are runner's blade discretization, manipulator's base position computations for full cover, and robotic manipulator's kinematics and dynamics.

The blade's surface discretization is an uniform sampling of the blade, determining the manipulator's end-effector directions. The current approach is to take the bounding box of the blade and sample its surface uniformly. Once the surface of the box is sampled, the intersection of the blade and a ray originating from each point going inward is taken. The normal of the blade's surface from each of these intersection points is taken to be the end-effector direction. The resulting samples are translated 230 mm in respect with their normal vectors, and collisions with the environment are checked.

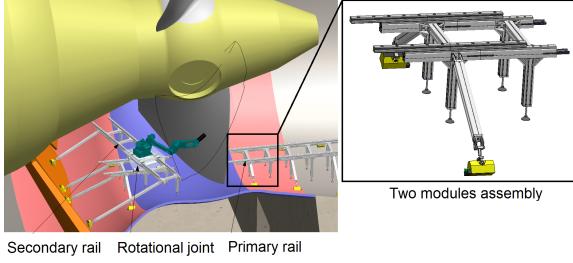


Figure 2: Customized base: primary and secondary rails.

Manipulator's base position computations are to uniformly sample the turbine's confined space and to calculate the minimum required positions to process all the blade's samples, considering angle and distance tolerances of the process. It is a brute force search: for each position, inverse kinematics are computed to determine the manipulator's joint parameters that provide the desired positions and orientations of the end-effector.

The kinematic approach described above is not enough to ensure that the robot will reach the samples. Maximum accelerations and torques should be investigated and compared to the manipulator's specifications. To do this, we employ the well known relation:  $\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$  (Sciavicco and Siciliano, 2000), where  $\tau$  is the joints' torques,  $M$  is the matrix of moments of inertia estimated by manipulator's CAD model,  $q$  is the joints' angles,  $C$  is the Coriolis matrix, and  $G$  is the gravity vector. The angular accelerations are derived by differential kinematics:  $\ddot{q} = J^\dagger(\ddot{x} - \dot{q}^T H \dot{q})$ , where  $H$  is the Hessian matrix (Hourtash, 2005),  $\ddot{x}$  is the linear accelerations, and  $J^\dagger$  is the Jacobian matrix pseudoinverse. Therefore, torques can be analytically estimated by the inverse dynamics in OpenRave.

#### 4.2 Mechanical system

EMMA's mechanical system is non-actuated rails for manipulator's base transportation, positioning and fixation. It comprises two rails, forming two prismatic joints (P-P). The first rail is parallel to the turbine axis, and it is responsible for the transportation of the manipulator from hatch to close to the blade. The secondary rail is assembled from the first by a rotational joint (R), which allows to position the upper rail parallel to the blade's surface.

The hatch limits the size of the rail in terms of weight and geometry, thus a modular concept was adopted, such that the small modular parts can be easily and manually assembled inside the turbine. Each module contains all the necessary components to support, transport and position the manipulator along it. Thus, the modules can be simply assembled in sequence to increase the overall

length of the prismatic joint.

A two parallel profiled rail system with a four carriage setup<sup>4</sup> was adopted. This configuration creates a balanced force couple, eliminating the reaction moments in each carriage. The frame structure is formed by aluminum profile, since it is lightweight, corrosion resistant, geometrically flexible, and modular (easy rail reconfiguration by changing few parts or adding anchor arms).

The resulting frame structure is slender and lightweight, demanding careful dynamic analysis of its integrity and stiffness. A Finite Element Analysis (FEA) was performed to evaluate the stresses, strains and forces along the structure. FEA is also used to specify the frame components, such as the profile's size, and anchors quantity, dimensions, directions, and attachment points.

Since the draft tube and runner area are curved and sloped, properly fixing the mechanical base is a major challenge in EMMA. The draft tube is composed of a ferromagnetic steel material, hence magnetic fixtures is solution for base attachment without environment modifications, as welding.

#### 4.3 Calibration

The calibration process was divided in two different approaches depending on the element to be localized and its characteristics. The possibility to attach or install markers in known positions dictated the strategies to be chosen, therefore the calibration is separated in the pose estimation of the robot and of the blade, as follows.

The attachment of markers on the robotic manipulator can be performed with high precision and repeatability, thus reflective spheres were chosen as reference points in the process of robot localization. These spheres are identified inside the point cloud by the 3D Hough Transform method (Camurri et al., 2014). The 3D Hough Transform, as the 2D Hough Transform, is the search of an object on the (discretized) parametric space. A sphere has four parameters: three for the position of its center, and one for its radius. For each point on the point cloud, it is assigned a collection of voxels on the discretized parametric space, corresponding to the possible spheres passing through that point. As in a voting process, the voxels with the greatest number of points assigned to define the parameters of the most probable spheres. There might be computational issues depending on the size of the parameter space, but it can be mitigated by exploiting previous knowledge regarding the expected radius and viable region for the robot inside the environment. Further improvements can be achieved through the use of the normal vector at each point, exploiting the

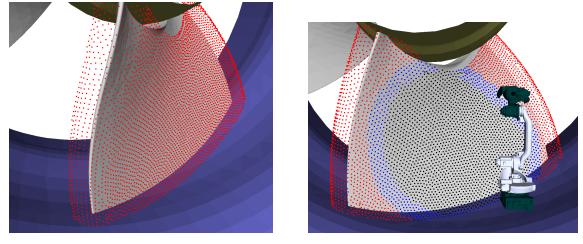
<sup>4</sup>Profile Rail Guides LLT: Mounting maintenance and repair instructions, SKF Group.

fact that the center of the sphere is in the direction of the normal, thus reducing the number of assigned voxels per point and in consequence the computational effort.

Fixing any marker on the blade would require its own calibration to ensure a consistent reference point, thus the pose estimation of the blade must rely only on the intrinsic properties of its surface geometry. The information must be extracted from the point cloud (the scene) provided by the 3D laser sensor and compared to a reference model previously stored. The characteristics of the point clouds are represented by local descriptors, i.e., each interest point on the blade is associated with a piece of information about its local neighborhood. Given the sets of features from the model and the scene, it is possible to determine the correspondence between their descriptors. If enough correspondences are found in the scene, above a threshold, the blade is identified and the position can be determined (Tombari and Di Stefano, 2010).

As the blade is a large and smooth surface, the neighborhood of each point may introduce similar information, creating ambiguous descriptors that degrade the matching performance, thus it is fundamental to wisely pick the interest points. The ambiguous descriptors provide information about perpendicular translation to the supporting plane, and the two rotations associated with it, thus no information about the other DOFs, making the alignment to “slide” from the correct transformation. Therefore, the interest points were sampled to diversify the normal vectors’ directions (Rusinkiewicz and Levoy, 2001), allowing to reduction of the number of samples to have a descriptor associated, when compared to a uniform sampling, and maintaining the computational cost low.

Once the descriptors were estimated, the correspondences are determined if the Euclidean distance between a descriptor in the scene and in the model is lower than a threshold. Each correspondence vote for a specific pose and scale factor in the Hough space. After an instance of the model is found, it is performed the Iterative Closest Point (ICP) matching with the full resolution point clouds to realize a fine alignment and compensate any discrepancy introduced by the sampling. With the position of the blade and the manipulator in respect to a common coordinate system, i.e., the origin of the laser sensor, it is possible to determine the transformation between them and this information can be fed to the trajectory and coverage algorithms. It is important to note that in every step of the operation, in which either the manipulator base or the blade are moved, there is the need to recalibrate the system.



(a) Blade discretization      (b) Manipulator workspace

Figure 3: Blade discretization and manipulator workspace for a fixed position.

## 5 Results

Simulations and experimental tests at Jirau’s facility were performed to verify the proposed concepts. The results are divided according to the EMMA system’s elements introduced in Sec. 4.

### 5.1 Robotic manipulator analysis

As stated in Subsec. 4.1, simulations for the robotic manipulator were implemented with OpenRave, and consist of the following steps: blade’s surface discretization; base position computation; kinematics and dynamics.

A survey of off-the-shelf manipulators was conducted for Jirau’s turbine. Regarding the runner’s blade dimension, among the analyzed mid-sized robotic manipulators, the Yaskawa Motoman MH12 robot was chosen due to its satisfactory workspace, and versatility. Blade discretization is performed in a Jirau runner’s blade CAD model, Fig. 3(a) shows the blade’s samples, and Fig. 3(b) shows the manipulator workspace, where black dots are coated points and blue dots are coated points with the angle tolerance. Thus it is possible to create a coating strategy and to select the simplest base positions. The result is the minimum required positions for the robotic manipulator’s base.

Comparing estimated torques with the technical specifications, dynamic simulations’ results showed that the robotic manipulator should be placed at, at least, 1400 mm distance from the blade’s surface plane. Placing the robot nearer would enhance the robotic manipulator’s workspace, but it would increase also the torques.

Despite being able to coat approximately 50% of the blade on a fixed position, kinematic and dynamic analysis show that the MH12 robot cannot fully cover it vertically or horizontally, demanding extra 2-DOF along the blade’s surface. The base position computations reveal that the blade’s top extremities require a specific base position, reachable with a primary rail between the blades. Therefore, the MH12 robot will require at least four positions along the blade and one position on a primary rail, between blades.

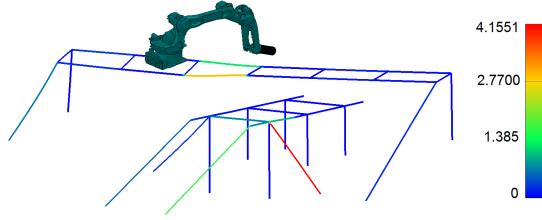


Figure 4: Von Mises's stress result.

### 5.2 Mechanical system analysis

In the specific case of Jirau, the secondary rail is customized with a third prismatic joint for height adjustment of the robotic manipulator. The primary and secondary rails with extra DOF guarantee the full coating, as they allow the robotic manipulator movement in the confined space by a 4-DOF base, PRPP joints.

The FEA of the base verifies the Von Mises stress and the displacements along the structure's slender members. The stress analysis determines the integrity of the base due to the maximum loads of the robotic manipulator. The displacements determine if the structure provides a rigid base for the robotic manipulator. According to the hard coating requirements, displacements of the order of millimeters are not allowable in the elastic region of the material.

The FEA solver was the Nastran In-CAD<sup>®</sup> with SolidWorks<sup>®</sup>. Model's elements are 1-D *bar line elements* with a global mesh's size of 25 mm. The material's properties are: density  $2700 \text{ kg/m}^3$ ; Young modulus 70 GPa; Poisson's ratio 0.34; and Yield strength 200 MPa. Boundary conditions are three translational constraints for the anchors and a vertical constraint to the feet. The rotational joint is modeled as a rigid connector between the rails, such as the robot's base with respect to the second rail. The robotic manipulator's maximum dynamic forces and moments are applied, as static loads, to the point that represents the origin of the robot's base.

The maximum Von Mises stress was 4.16 MPa (Fig. 4), which gives a factor of safety of 34.6. It was found for a particular case where the robotic manipulator is in the secondary rail, 800 mm from the rotational joint. The displacement of the structure causes a maximum translation of 0.47 mm and a angular deflection of  $0.0149^\circ$  in respect to robotic manipulator base's coordinate system.

The field tests conducted in the draft tube for the magnetic fixtures, at different equipment's orientations and places, confirmed the manufacturer's payload capacity. As the maximum tractive reaction force obtained in FEA simulations was 956 kgf, it was chosen a magnetic fixture with 1200 kgf payload capacity.

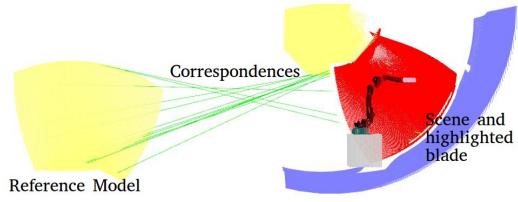


Figure 5: Blade reference model localized in the turbine environment with occlusions.

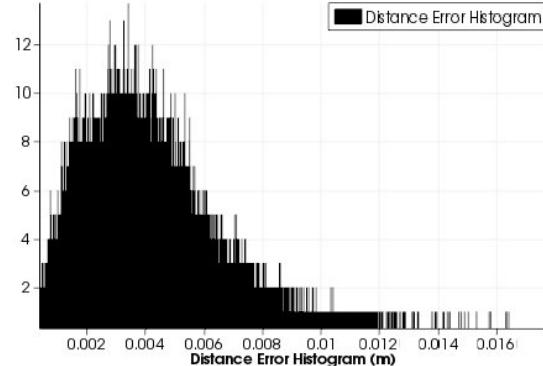


Figure 6: Histogram of the error (meters) between the model and reference scene point to point.

### 5.3 Calibration analysis

To test the calibration algorithm for the blades, the turbine environment and the robotic manipulator were simulated with help of the toolbox Blensor (Gschwandtner et al., 2011) and based on the technical drawings from the powerplant. The blade model, however, was acquired in a field test by a 3D laser scanner for a better representantion of the actual hidraulic profile.

The laser sensor was modeled following manufacturer's technical specifications, and different scenes were generated for several sensor positions. The algorithm is able to localize the blade in respect to the sensor's coordinate system, even in occlusion generated by the presence of the robotic manipulator. In Fig. 5, it can be seen the correspondences between the reference model and the scene, or the turbine environment, and also the correctly localized blade instance highlighted in red.

The Fig. 6 exemplifies the error or distance distribution to the closest point from the scene to each point of the model. The mean distance between each swipe of the laser scan is 9 mm and the RMS error is 4 mm, which is consistent as the half of the resolution of the point clouds.

Similar procedure was followed to recreate a scene with four reference spheres (supposedly attached to the robot). The 3D Hough Method was able to locate all spheres' centers within a 5mm error (fig. 7).

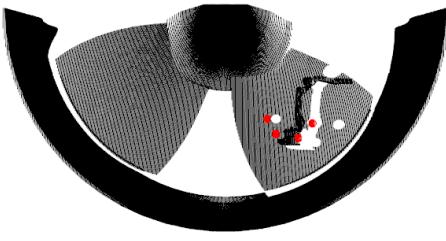


Figure 7: Points recognized as belonging to the four spheres (in red).

## 6 Conclusion and future work

In this paper, we presented the concept solution and detailed some aspects of the EMMA robotic system, for the problem of *in situ* hard coating system of hydropower turbine. All the robotic systems seen so far were developed for repairing by welding or inspection applications, but the challenging requirements and constraints of the *in situ* HVOF coating procedure were not yet considered.

Climbers and robotic systems on rails attached to the blade were investigated as general solutions. However, these systems typically have small payloads and low speed, which do not meet the process' requirements. The design of these systems would be very complex, due to the blade's temperature variation, and the locomotion and adhesion mechanisms. The proposed system is simpler, similar to the *ex situ* solution, and the modular concept offers flexibility to logistics.

EMMA methodology and some elements of the system was presented: the customized modular rails; manipulator workspace analysis, kinematics, and dynamics; and the system localization and calibration. Field tests and simulations were performed and preliminary results show the feasibility of the concept solution.

Ongoing implementations and future work include:

1. *Software integration*: trajectory generation, control strategy calibration;
2. *Field tests*: field test with the designed robotic system;

## Acknowledgements

We gratefully acknowledge the financial support of Energia Sustentável do Brasil and the ANEEL R&D program (contract COPPETEC/UFRJ JI-RAU 09/15 6631-0003/2015).

## References

- Bibuli, M., Caccia, M. and Lapierre, L. (2007). Path-following algorithms and experiments for an autonomous surface vehicle, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 7(PART 1): 81–86.
- Bonacorso, N. G., Goncalves, J. a. a. and Dutra, J. C. (2006). Automation of the processes of surface measurement and of deposition by welding for the recovery of rotors of large-scale hydraulic turbines, *Journal of Materials Processing Technology* 179(1-3): 231–238.
- 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.
- Diankov, R. and Kuffner, J. (2008). Openrave: A planning architecture for autonomous robotics, *Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RI-TR-08-34*.
- Goldemberg, J. and Lucon, O. (2007). Energia e meio ambiente no brasil, *Estudos Avançados* 21(59): 7–20.
- Gschwandtner, M., Kwitt, R., Uhl, A. and Pree, W. (2011). BlenSor: Blender Sensor Simulation Toolbox Advances in Visual Computing, Vol. 6939 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, chapter 20, pp. 199–208.
- Hazel, B., Côté, J., Laroche, Y. and Mongenot, P. (2012). Field repair and construction of large hydropower equipment with a portable robot, *Journal of Field Robotics* 29(1): 102–122.
- Hourtash, A. (2005). The kinematic hessian and higher derivatives, *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 169–174.
- Krella, A. K. (2011). The new parameter to assess cavitation erosion resistance of hard pvd coatings, *Engineering Failure Analysis* 18(3): 855–867.
- Li, C. and Wang, Y. (2002). Effect of particle state on the adhesive strength of hvof sprayed metallic coating, *Journal of thermal spray technology* 11(4): 523–529.
- Rusinkiewicz, S. and Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm, *Proceedings of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 3DIM 2001-January*: 145–152.
- Sciavicco, L. and Siciliano, B. (2000). Differential kinematics and statics, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer, pp. 79–129.

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* pp. 349–355.

# **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO EMMA**

## **APÊNDICE G**

---

Certificação em segurança

---





# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **ESTEVÃO FRÓES FERRÃO**, portador do RG: 20.292.821-4 DICRJ, concluiu com aproveitamento o Curso Básico de NR 10 – Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme NR 10 item 10.8 e Anexo III de acordo com a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ/ 001868-6

A handwritten signature in black ink, appearing to read "André Luiz Barreto da Silva".

## INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Raul Miralha Carneiro".  
Raul Miralha Carneiro  
Médico do Trabalho  
CRM 5245463-0 Reg. 8985

## RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **RENAN SALLAS DE FREITAS**, portador do RG: 242535409 DETRAN, concluiu com aproveitamento o Curso Básico de NR 10 – Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme NR 10 item 10.8 e Anexo III de acordo com a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

*André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE/RJ 001868-6*

*Raul Miralha Carneiro  
CRM 5245463-0 Reg. 3985*

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **EDUARDO ELAEL DE MELO SOARES**, portador do RG: 209485267 DETRAN, concluiu com aproveitamento o Curso Básico de NR 10 – Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme NR 10 item 10.8 e Anexo III de acordo com a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico do Trabalho  
CRM: 5245463-0 Reg. 8935

RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sra. **JULIA RAMOS CAMPANA**, portador do RG: 125622803 DETRAN, com aproveitamento o Curso Básico de NR 10 – Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme NR 10 item 10.8 e Anexo III de acordo com a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE/RJ 001868-6

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM: 52.454.63-0 Reg. 3385

A large handwritten signature of Raul Miralha Carneiro, which also serves as a stamp for his medical practice.

## RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

A large handwritten signature of André Luiz Barreto da Silva, which also serves as a stamp for his technical role.

## INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **RAMON ROMANKEVICIUS COSTA**, portador do RG: 3.318.218 SSP MG, concluiu com aproveitamento o Curso Básico de NR 10 – Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme NR 10 item 10.8 e Anexo III de acordo com a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

*André Luiz Barreto da Silva*  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ/001868-6

*André Luiz Barreto da Silva*

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

*Raul Miralha Carneiro*  
CRM: 5245463-0 Reg. 8985  
Médico de Trabalho

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **GABRIEL ALCANTARA COSTA DA SILVA**, portador do RG: 211105267 DETRAN, concluiu com aproveitamento o Curso Básico de NR 10 – Segurança e Instalações e Serviços em Eletricidade, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme NR 10 item 10.8 e Anexo III de acordo com a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

*André Luiz Barreto da Silva*  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ/ 001868-6

*André Luiz Barreto da Silva*  
**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

*Raul Miralha Carneiro*  
CRM: 5245463-0 Neg. 3935  
Médico do Trabalho  
*Raul Miralha Carneiro*  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**

# INBRAEP

Instituto Brasileiro de Ensino Profissionalizante

## CERTIFICADO



Certificamos que **GABRIEL COGO**, portando o CPF 009.205.040-94 concluiu com aproveitamento o curso de **NR-10 Básico (Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade)**, com carga horária de 40 horas. Realizado no período de 26/11/2015 a 12/12/2015.

São Leopoldo (RS), 12 de Dezembro de 2015.

Aluno

  
Antonio C. Zimmermann Jr.  
Diretor

INBRAEP

# CURSO BÁSICO DE SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES EM SERVIÇOS EM ELETRICIDADE

Este curso não habilita para ser Instrutor

**INBRAP – Instituto Brasileiro de Treinamento Profissional LTDA**

**CNPJ: 13.227.097/0001 -11**

Itajaí – Santa Catarina - Brasil

## CONTEÚDO MINISTRADO

- |  |  |                                     |
|--|--|-------------------------------------|
| 1. Introdução a Segurança com eletricidade.          | 6. Regulamentações do MTE.                 | 11. Riscos adicionais.              |
| 2. Riscos em instalações e serviços com eletricidade | 7. Equipamentos de proteção coletiva.      | 12. Proteção e combate a incêndios. |
| 3. Técnicas de Análise de Risco.                     | 8. Equipamentos de proteção individual.    | 13. Acidentes de origem elétrica    |
| 4. Medidas de Controle do Risco Elétrico.            | 9. Rotinas de trabalho – Procedimentos.    | 14. Primeiros socorros.             |
| 5. Normas Técnicas Brasileiras – NBR da ABNT.        | 10. Documentação de instalações elétricas. | 15. Responsabilidades.              |

## RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

 Segurança em Eletricidade <b>João Paulo Casalli Betto</b> Eng. Eletricista CREA-PR 74019/D	 Primeiros Socorros <b>Inara Roberta Ribeiro</b> Tec. Enfermagem. COREN-SC: 401975	 Combate a Incêndio <b>Luiz Alberto Moura</b> Bombeiro CBMSC 917539-3
---	---	---

**CARGA HORÁRIA TOTAL: 40 HORAS**

**REGISTRO 43108/2015**



  
**Maria Ap. Pereira Zimmermann**  
Especialista em Educação  
MEC/SC LP-877/85





# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **GABRIEL ALCANTARA COSTA DA SILVA**, portador do RG: 211105267 DETRAN, concluiu o Curso de NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

*André Luiz Barreto da Silva*  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ 001868-8

*André Luiz Barreto da Silva*

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

*Raul Miralha Carneiro*  
CRM 5245463-0 Reg. 8985

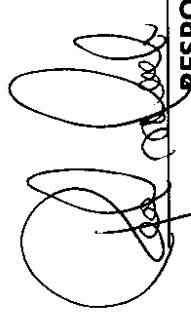
*Raul Miralha Carneiro*

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**  
Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

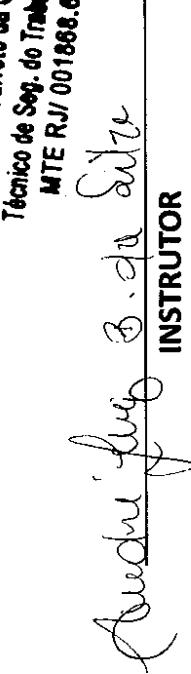


# CERTIFICADO

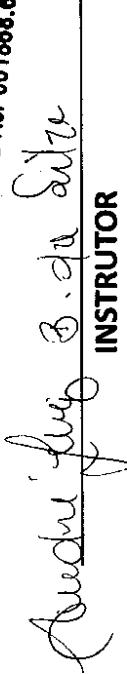
Certificamos que o Sr. **ESTEVÃO FRÓES FERRÃO**, portador do RG: 20.292.821-4 DICRJ, concluiu o Curso de NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

  
Raul Miralha Carneiro  
Médico do Trabalho  
CRM: 52.45463-0 Reg. 8935

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**  
Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

  
André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

**INSTRUTOR**

  
André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ



# CERTIFICADO

Certificamos que a Sra. **JULIA RAMOS CAMPANA**, portador do RG: 125622803 DETRAN, concluiu o Curso de NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

*André Luiz Barreto da Silva*

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM: 52.454.63-0 Reg. 3935

*Raul Miralha Carneiro*

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **RENAN SALLES DE FREITAS**, portador do RG: 242535409 DETRAN, concluiu o Curso de NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ/001868-6

INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM: 5245463-0 Reg. 3935

RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **RAMON ROMANKEVICIUS COSTA**, portador do RG: 3.318.218 SSP MG, concluiu o Curso de NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

*André Luiz Barreto da Silva*  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

*André Luiz Barreto da Silva*

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

*Raul Miralha Carneiro*  
Médico do Trabalho  
CRM: 5245463-0 Reg. 8985

*Raul Miralha Carneiro*

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**  
Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **EDUARDO ELAEL DE MELO SOARES**, portador do RG: 209485267 DETRAN, concluiu o Curso de NR 33 – Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados, com carga horária de 40 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

Handwritten signature of André Luiz Barreto da Silva

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico do Trabalho  
CRM: 5245463-0 Reg. 4935

Handwritten signature of Raul Miralha Carneiro

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

# INBRAEP

Instituto Brasileiro de Ensino Profissionalizante

## CERTIFICADO

Certificamos que **GABRIEL COGO**, portando o CPF 009.205.040-94 concluiu com aproveitamento o curso de **NR-33 Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados (Trabalhadores Autorizados e Vigias)**, com carga horária de 16 horas. Realizado no período de 24/11/2015 a 25/11/2015.

São Leopoldo (RS), 25 de Novembro de 2015.

Aluno

  
Antonio C. Zimmermann Jr  
Diretor

INBRAEP



# CURSO DE SEGURANÇA E SAÚDE NOS TRABALHOS EM ESPAÇOS CONFINADOS

## Trabalhadores Autorizados e Vigias

Este curso não habilita para ser Instrutor

## INBRAP – Instituto Brasileiro de Treinamento Profissional LTDA

CNPJ: 13.227.097/0001-11

Itajaí – Santa Catarina - Brasil

### CONTEÚDO MINISTRADO

1. Conceitos Básicos.	5. Profissionais do Espaço Confinado.	9. EPI - Equipamento de Proteção Individual.
2. Riscos no Espaço Confinado.	6. Permissão de Entrada e Trabalho- PET.	10. Resgate em Espaço Confinado.
3. Classificação dos Espaços Confinados.	7. Responsabilidades.	11. O Socorrista.
4. Check List.	8. Avaliação e Controle dos Riscos.	12. Primeiros Socorros

### RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Segurança em Espaços Confinados <b>Diogo Ramon Garcia Stupp</b> Eng. de Seg. do Trabalho CREA-SC 076981-5	Primeiros Socorros <b>Inara Roberta Ribeiro</b> Tec. Enfermagem. COREN -SC: 401975	Resgate e Transporte de Acidentados <b>Luiz Alberto Moura</b> Bombeiro CBMSC 917539-3

### CARGA HORÁRIA TOTAL: 16 HORAS

REGISTRO 42973/2015

**Portaria 1409**

Maria Ap. Pereira Zimmermann  
Especialista em Educação  
MEC/SC LP-877/85





# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **EDUARDO ELAEL DE MELO SOARES**, portador do RG: 209485267, concluiu o Curso de NR 35 – Trabalho em Altura, com carga horária de 8 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM 5245463-0 Reg. 9985

**RESPONSÁVEL TÉCNICO**  
Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE RJ 001888-8

**INSTRUTOR**

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **RENAN SALLLES DE FREITAS**, portador do RG: 242535409 DETRAN, concluiu o Curso de NR 35 – Trabalho em Altura, com carga horária de 8 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM 5245463-0 Reg. 8385

A large, stylized handwritten signature of Raul Miralha Carneiro, which appears to read "Raul Miralha Carneiro".

## RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

A large, stylized handwritten signature of André Luiz Barreto da Silva, which appears to read "André Luiz Barreto da Silva".

## INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **RAMON ROMANKEVICIUS COSTA**, portador do RG: 3.318.218 SSP MG, concluiu o Curso de NR 35 – Trabalho em Altura, com carga horária de 8 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ 001868-6

INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico do Trabalho  
CRM: 5245463-0 Reg. 8385

RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **GABRIEL ALCANTARA COSTA DA SILVA**, portador do RG: 211105267 DETRAN, concluiu o Curso de NR 35 – Trabalho em Altura, com carga horária de 8 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE RJ/001868-6

A handwritten signature in black ink, appearing to read "André Luiz Barreto da Silva".

## INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM: 52.454-63-0 Reg. 3935

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Raul Miralha Carneiro".

## RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454-63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que a Sra. **JULIA RAMOS CAMPANA**, portador do RG: 125622803 DETRAN, concluiu o Curso de NR 35 – Trabalho em Altura, com carga horária de 8 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Seg. do Trabalho  
MTE/RJ/001868-6

INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM: 5245463-0 Reg. 8985

RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho



# CERTIFICADO

Certificamos que o Sr. **ESTEVÃO FROES FERRÃO**, portador do RG: 20.292.821-4 DICRJ, concluiu o Curso de NR 35 – Trabalho em Altura, com carga horária de 8 horas, ministrado pela Medline Health Systems, conforme a portaria 3.214 / 78 do Ministério do Trabalho e Emprego.

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
MTE/RJ 001868-6

## INSTRUTOR

André Luiz Barreto da Silva  
Técnico de Segurança do Trabalho  
001868-6 MTE RJ

Raul Miralha Carneiro  
Médico de Trabalho  
CRM: 52.454.63-0 Reg. 4385

## RESPONSÁVEL TÉCNICO

Raul Miralha Carneiro  
CRM: 52.454.63-0  
Médico do Trabalho

# INBRAEP

Instituto Brasileiro de Ensino Profissionalizante

## CERTIFICAÇÃO



Certificamos que **GABRIEL COGO**, portando o **CPF 009.205.040-94** concluiu com aproveitamento o curso de **NR-35 Trabalho em Altura**, com carga horária de 16 horas. Realizado no período de **24/11/2015 a 27/11/2015**.

São Leopoldo (RS), 27 de Novembro de 2015.

Aluno

  
Antonio C. Zimmermann Jr.  
Diretor

INBRAEP

# CURSO DE SEGURANÇA E SAÚDE NOS TRABALHOS EM ESPAÇOS CONFINADOS

## Trabalhadores Autorizados e Vigias

Este curso não habilita para ser Instrutor

## INBRAP – Instituto Brasileiro de Treinamento Profissional LTDA

CNPJ: 13.227.097/0001-11

Itajaí – Santa Catarina - Brasil

### CONTEÚDO MINISTRADO

1. Conceitos Básicos.	5. Profissionais do Espaço Confinado.	9. EPI - Equipamento de Proteção Individual.
2. Riscos no Espaço Confinado.	6. Permissão de Entrada e Trabalho- PET.	10. Resgate em Espaço Confinado.
3. Classificação dos Espaços Confinados.	7. Responsabilidades.	11. O Socorrista.
4. Check List.	8. Avaliação e Controle dos Riscos.	12. Primeiros Socorros

### RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Segurança em Espaços Confinados <b>Diogo Ramon Garcia Stupp</b> Eng. de Seg. do Trabalho CREA-SC 076981-5	Primeiros Socorros <b>Inara Roberta Ribeiro</b> Tec. Enfermagem. COREN -SC: 401975	Resgate e Transporte de Acidentados <b>Luiz Alberto Moura</b> Bombeiro CBMSC 917539-3

### CARGA HORÁRIA TOTAL: 16 HORAS

REGISTRO 42973/2015

**Portaria 1409**

Maria Ap. Pereira Zimmermann  
Especialista em Educação  
MEC/SC LP-877/85

