



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS**

Por,  
**Ricardo Alcântara Gomes Teixeira**

**Brasília, 03 de Dezembro de 2014**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**MONTAGEM E INSTALAÇÃO DE TURBINAS  
HIDROCINÉTICAS**

POR,

**Ricardo Alcântara Gomes Teixeira**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. Alberto Carlos G. C. Diniz, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ ENM

---

Prof. Mario Olavo M. de Carvalho, UnB/ ENM

---

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira, UnB/ ENM

---

Brasília, 3 de Dezembro de 2014

## **Agradecimentos**

*Agradeço a Deus, sem o qual nada seria possível. Agradeço à minha família que sempre me deu todo suporte necessário. Agradeço aos amigos que sempre estiveram presentes e aos amigos que fiz durante esses anos e levarei para a vida. Agradeço aos professores pelo exemplo, pela dedicação e pela contribuição na minha formação acadêmica e profissional.*

*Ricardo Alcântara Gomes Teixeira*

---

## RESUMO

O projeto completo de máquinas e equipamentos de grande porte, como a turbina hidrocínética desenvolvida no Projeto Tucunaré, deve incluir além dos aspectos construtivos, ligado ao projeto de máquinas e estruturas, as considerações de montagem, instalação e manutenção. Esses aspectos são fundamentais para o bom funcionamento da máquina, diminuição de custo e aumento da vida útil. Ou seja, o trabalho de engenharia deve contar com a especificação de componentes, e deve considerar também aspectos ligados a logística.

Diante disto, este Projeto de Grauação, integrado ao Projeto Tucunaré, trata em dar continuidade ao projeto construtivo e elaborar um procedimento técnico para o transporte, para a montagem e para a instalação desta turbina de modo a garantir o seu funcionamento e a eficiência na geração de energia elétrica.

---

## ABSTRACT

The complete design of machinery and large equipment, such as hydrokinetic turbine developed in Tucunaré project, shall include in addition to the constructive aspects on the design of machines and structures, considerations of assembly, installation and maintenance. These aspects are crucial for the proper functioning of the machine, reduced cost and increased service life. In other words, the engineering work must rely on the specification of components, but must also consider the logistics aspects.

Thus, this paper, integrated with Tucunaré project, comes in continuing the construction project and prepares a technical procedure for transport, for assembly and for installation of this turbine to ensure its functioning and efficiency in generating electricity.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Projeto Tucunaré .....	1
1.2	Metodologia .....	2
1.3	Organização do Trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>Análise Crítica do Difusor .....</b>	<b>5</b>
2.1	Aspectos Gerais.....	5
2.2	Análise de Materiais.....	7
2.2.1	Aço .....	7
2.2.2	Alumínio.....	9
2.2.3	Compósitos.....	10
2.3	Análise das Propriedades dos Materiais para Fabricação do Difusor .....	11
2.3.1	Aço Sae 4340 .....	11
2.3.2	Aço Inox 304.....	13
2.3.3	Alumínio Naval 5052 .....	14
2.3.4	Compósito Reforçado com Fibra de Vidro ( <i>E-Glass</i> ).....	15
2.4	Análise de Custo Para Fabricação do Difusor com os Diferentes Materiais .....	16
2.5	Análise dos Esforços Solicitadas pela Estrutura para Fabricação do Difusor.....	17
2.6	Projeto dos Suportes.....	26
2.6.1	Introdução.....	26
2.6.2	Processo Construtivo.....	28
2.6.3	Considerações Complementares Para Fabricação e Instalação.....	30
2.6.4	Análise Dos Esforços .....	35
2.7	Conclusões Parciais.....	39
<b>3</b>	<b>Transporte de Cargas e Equipamentos.....</b>	<b>40</b>
3.1	Transporte Terrestre .....	40
3.1.1	Ferrovias.....	40
3.1.2	Rodovias.....	42
3.2	Transporte Aquaviário.....	44
3.3	Transporte Aéreo .....	46
3.4	Análise de Custo do Transporte .....	47
3.4.1	Variáveis para Análise de Custo .....	47
3.4.2	Variáveis da Montagem da Turbina .....	48
3.4.3	Determinação dos Locais de Saída e Chegada.....	48
3.5	Outras Variáveis para A Seleção do Método de Transporte .....	50
3.5.1	Levantamento de Custos .....	50
3.6	Conclusões Parciais.....	51
<b>4</b>	<b>Movimentação de Cargas .....</b>	<b>53</b>
4.1	Introdução à Movimentação de Cargas .....	53
4.2	Aspectos Gerais.....	53
4.2.1	Massa da Turbina .....	54
4.2.2	Dimensões da Turbina.....	56
4.2.3	Centro de Massa do Conjunto Gerador com Difusor.....	57
4.2.4	Centróide da Turbina.....	58
4.3	Sequência de Operações e Momentos Críticos .....	61
4.3.1	Içamento do Conjunto Gerador com Difusor.....	61
4.3.2	Mergulho do Conjunto Gerador com Difusor.....	63
4.3.3	Posicionamento do Conjunto Gerador com Difusor .....	65

4.4	Acessórios e Dispositivos de Apanhar Carga .....	65
4.4.1	Cabos de Aço .....	65
4.4.2	Olhais de Suspensão.....	66
4.4.3	Pega-Chapas .....	67
4.4.4	Ganchos .....	68
4.4.5	Cintas de Amarração .....	69
4.4.6	Manilhas .....	70
4.4.7	Lingas .....	70
4.4.8	Travessões de Carga.....	71
4.5	Métodos de Amarração da Carga .....	71
4.5.1	Indicação dos Pontos e Formas de Amarração da Carga .....	71
4.5.2	Seleção dos Acessórios Para Apanhar Carga .....	72
<b>5</b>	<b>Fixação da Turbina Hidrocinética.....</b>	<b>76</b>
5.1	Adversidade na Implementação de Tecnologias <i>Offshore</i> .....	76
5.1.1	Correntes Variáveis .....	76
5.1.2	Corrosão .....	77
5.1.3	Abrasão.....	77
5.1.4	Vedação .....	77
5.1.5	Cavitação.....	77
5.1.6	Difícil Intervenção Humana .....	78
5.1.7	Infraestrutura Elétrica.....	79
5.2	Alternativas de Fixação de Turbinas <i>Offshore</i> .....	80
5.2.1	Base de Gravidade.....	80
5.2.2	Monopile .....	81
5.2.3	Tripé .....	82
5.2.4	Flutuante.....	82
5.3	Método de Fixação Aplicado .....	83
5.3.1	Concepções do Sistema de Fixação Anteriores.....	84
5.3.2	Conclusão Parcial .....	87
<b>6</b>	<b>Montagem da Turbina Hidrocinética.....</b>	<b>88</b>
6.1	Cuidados com a Montagem.....	88
6.2	Sequência de Montagem .....	88
<b>7</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>94</b>
<b>8</b>	<b>Referencias Bibliograficas .....</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>99</b>
9.1	Anexo 1: Desenhos de Fabricação .....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Ilustração dos componentes do conjunto de geração. ....	1
Figura 1.2 - Conjunto gerador com difusor da HTUC-03.....	3
Figura 2.1 - Ilustração dos tipos de difusores conhecidos.....	6
Figura 2.2 - Esquema de classificação das ligas ferrosas.....	8
Figura 2.3 - Condições de contorno para análise do difusor.....	17
Figura 2.4 - Condições de contorno para análise do difusor.....	18
Figura 2.5 - Malha desenvolvida para o difusor.....	18
Figura 2.6 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de aço AISI 4340. ....	19
Figura 2.7 - Deformação equivalente da análise do difusor de aço AISI 4340.....	19
Figura 2.8 - Fator de segurança do difusor de aço AISI 4340. ....	20
Figura 2.9 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de aço inox 304. ....	21
Figura 2.10 - Deformação equivalente da análise do difusor de aço inox 304. ....	21
Figura 2.11 - Fator de segurança do difusor de aço inox 304. ....	22
Figura 2.12 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de alumínio naval 5052.....	23
Figura 2.13 - Deformação equivalente da análise do difusor de alumínio naval 5052. ....	23
Figura 2.14 - Fator de segurança do difusor de alumínio naval 5052.....	24
Figura 2.15 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de fibra de vidro. ....	25
Figura 2.16- Deformação equivalente da análise do difusor de fibra de vidro. ....	25
Figura 2.17 - Fator de segurança do difusor de fibra de vidro. ....	26
Figura 2.18 - Ilustração dos suportes de fixação interno da turbina no difusor.....	27
Figura 2.19 - Ilustração dos suportes de fixação posteriores da turbina no difusor.....	27
Figura 2.20 - Especificação dos suportes superiores e o suporte inferior.....	28
Figura 2.21 – Primeira proposta para os suportes superiores da turbina.....	29
Figura 2.22 - Segunda proposta para os suportes superiores da turbina. ....	29
Figura 2.23 - Terceira proposta para os suportes superiores da turbina.....	29
Figura 2.24 - Proposta para o suporte inferior da turbina. ....	30
Figura 2.25 - Ilustração da base dos suportes.....	30
Figura 2.26 - Ilustração das abas de sustentação dos suportes.....	31
Figura 2.27 - Peças do suporte superior da turbina. ....	31
Figura 2.28 - Suportes superiores da turbina com aba de ligação.....	33
Figura 2.29 - Especificações da barra roscada de fixação.....	33
Figura 2.30 - Especificações da porca correspondete para fixação.....	33
Figura 2.31 - Especificações da aruela correspondete para fixação.....	34
Figura 2.32 - Ilustração dos furos passantes de fixação.....	34
Figura 2.33 - Malha gerada para o estudo da suporte inferior. ....	35
Figura 2.34 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do suporte inferior.....	35
Figura 2.35 – Deformação equivalente da análise do suporte inferior.....	36
Figura 2.36 – Fator de segurança do suporte inferior. ....	36
Figura 2.37 - Malha gerada para o estudo da suporte superior. ....	37
Figura 2.38 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do suporte superior.....	37
Figura 2.39 - Deformação equivalente da análise do suporte superior.....	38
Figura 2.40- Fator de segurança do suporte inferior. ....	38
Figura 3.1 - Trem transportando as pás de uma turbina eólica. ....	41
Figura 3.2 - Trechos Ferrovia Norte-Sul e possíveis ramificações.....	42
Figura 3.3 - Nacele de uma turbina eólica. ....	42
Figura 3.4 – Ilustração do transporte aquaviários de partes das torres de aerogeradores realizado por rebocador.....	44

Figura 3.5 - Mapa da Bacia Tocantins-Araguaia e o acesso a UHE Tucuruí. ....	45
Figura 3.6 - Terminais de Logística de Carga da Infraero pelo país. ....	46
Figura 3.7 - Transporte aéreo de uma turbina da Alstom .....	47
Figura 3.8 - Primeiro trecho estipulado, entre Rio de Janeiro e Belém, para o estudo. ....	49
Figura 3.9 - Segundo trecho estipulado, entre Belém-PA e Tucuruí-PA, para o estudo.....	49
Figura 4.1 – Ilustração dos esforços sofridos pela estrutura da nacela. ....	55
Figura 4.2 – Atuação do peso do gerador e do difusor separadamente, e o peso total do conjunto gerador com difusor. ....	55
Figura 4.3 – Ilustração da localização dos centros de massa do difusor e conjunto gerador, com e sem difusor. ....	57
Figura 4.4 - Coordenadas do Centro de Massa e do Momento de Inércia do Conjunto Gerador com Difusor no <i>SolidWorks</i> .....	58
Figura 4.5 - Coordenadas do Centróide e do Momento de Inércia no Centróide do Conjunto Gerador com Difusor no <i>SolidWorks</i> .....	59
Figura 4.6 – Ilustração da força de empuxo atuando no centróide do conjunto .....	60
Figura 4.7 – Exemplos de suspensão utilizando travessões: (a) ocorre um desnivelamento da carga em relação ao seu CM, (b) ocorre o desalinhamento dos cabos com relação a carga e em (c) posicionamento correto.....	61
Figura 4.8 – Ilustração do reposicionamento adequado do contrapeso, que varia de acordo com o peso da carga elevada. ....	62
Figura 4.9 – Ilustração dos efeitos centrífugos causado por um giro em alta velocidade.....	62
Figura 4.10 - Vista lateral dos esforços gerados pelo mergulho da turbina no rio dividido em etapas. ....	64
Figura 4.11 - Vista frontal do procedimento de mergulho da turbina no rio dividido em etapas. ....	64
Figura 4.12 - Vista lateral dos esforços gerados pelo mergulho do difusor no rio dividido em etapas. ....	65
Figura 4.13 - Ilustração dos tipos de composição e construção de um cabo de aço. ....	66
Figura 4.14 - Ilustração de um olhal aparafusável com cotas essenciais para seleção do acessório. ....	67
Figura 4.15 - Detalhe da aplicação e dos ângulos máximos dos Pega-Chapas.....	67
Figura 4.16 - Composição de acessórios para içamento de chapa .....	68
Figura 4.17 - Ganchos simples com uniões divesas.....	69
Figura 4.18 - Ilustração das cintas de amarração, em que (a) explicita as dimensões importantes para a seleção, (b) alguns exemplos de aplicação e (c) as formas de utilização com as respectivas porcentagem de carga suportada para cada caso. ....	69
Figura 4.19 - Ilustração de uma manilha com suas dimensões. ....	70
Figura 4.20 - Ilustração de uma linga com variações do ângulo de içamento. ....	70
Figura 4.21 - Imagem de um balancim usual. ....	71
Figura 4.22 - Imagem mostra (a) os pontos de amarração no difusor com aplicação dos Pega-Chapas, (b) em detalhe os Pega-Chapas Verticais e (c) ilustração em detalhe dos Pega-Chapas Horizontais. ....	72
Figura 4.23 - Vista frontal, lateral e superior com o posicionamento dos acessórios de amarração .....	73
Figura 4.24 – Ilustração do esquema de amarração do conjunto gerador com difusor que deve utilizar os Pega-Chapas, lingotes, ganchos e travessão.....	73
Figura 4.25- Ilustração do posicionamento da chapa e do acessório .....	74
Figura 4.26 - Ilustração do posicionamento da chapa e do acessório de acordo com as dimensões da carga. (Fonte: RUD, 2014) .....	75
Figura 4.27 - Ilustração do posicionamento da chapa e do acessório de acordo com o centro de massa da carga. (Fonte: RUD, 2014) .....	75

Figura 5.1 - Velocidade necessária para o início da cavitação em função da profundidade da água. ....	78
Figura 5.2 - Ilustração do procedimento de proteção dos cabos submersos em uma fazenda de turbinas eólicas. ....	79
Figura 5.3 - Ilustração de três tipos de fixação aplicados para turbinas maremotriz mar. ....	80
Figura 5.4 - Peça da base de gravidade de uma turbina eólica <i>offshore</i> . ....	81
Figura 5.5 – Turbina maremotriz dupla com base <i>monopile</i> da Siemens .....	81
Figura 5.6 – Turbina maremotriz da Rolls Royce com base tipo tripé. ....	82
Figura 5.7 - Turbina maremotriz dupla com flutuador da Bluetec. ....	83
Figura 5.8 - Concepção inicial da fixação das turbina e difusores. ....	84
Figura 5.9 - Vista frontal e lateral com as variações do sistema de geração concebido inicialmente .....	85
Figura 5.10 - Nova concepção que integra o difusor a estrutura de sustentação. ....	85
Figura 5.11 - Concepção tipo flutuador .....	86
Figura 5.12 - Tipo flutuador com içamento independente .....	86
Figura 6.1 - Redutor posicionado no chassi .....	89
Figura 6.2 - Ilustração do posicionamento do freio no chassi. ....	89
Figura 6.3 - Posicionamento do motor no chassi. ....	90
Figura 6.4 - Montagem final da estrutura interna da nacele da turbina. ....	90
Figura 6.5 - Detalhe do selo mecânico. ....	91
Figura 6.6 - Montagem do hub a nacele através do eixo do redutor. ....	91
Figura 6.7 - Pás montadas no hub. ....	92
Figura 6.8 - Vista frontal do conjunto difusor-turbina. ....	93
Figura 6.9 - Ilustração da montagem final. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Condições de operação previstas .....	2
Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas e físicas do aço AISI 4340.....	12
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas e físicas do aço inox 304 .....	13
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas e físicas e composição química do alumínio naval 5052 .....	14
Tabela 2.4 - Propriedades mecânica e físicas da fibra de vidro <i>E-glass</i> .....	15
Tabela 2.5 – Tabela de custo do quilograma de cada um dos materiais. ....	16
Tabela 2.6 - Resultados da análise por MEF do difusor de aço AISI 4340 .....	20
Tabela 2.7 - Resultados da análise por MEF do difusor de aço inox 304.....	22
Tabela 2.8 - Resultados da análise por MEF do difusor de alumínio naval 5052.....	24
Tabela 2.9 - Resultados da análise por MEF do difusor de fibra de vidro.....	26
Tabela 2.10 - Parâmetros de Soldagem do Projeto .....	32
Tabela 2.11 – Resultados da análise por MEF do suporte inferior da turbina. ....	36
Tabela 2.12 - Resultados da análise por MEF do suporte superior da turbina.....	38
Tabela 3.1- Limites dados pela CONTRAN de peso bruto transmitido por eixo às superfícies das vias públicas.....	43
Tabela 3.2 - Limites Dimensionais de acordo com o tipo de veículo .....	43
Tabela 3.3 - Dados da Hidrovia do Tocantins para navegação e transporte. ....	45
Tabela 3.4- Características Operacionais (Fleury, 2000) .....	50
Tabela 3.5 - Características da carga e custos da simulação do orçamento do frete.....	51
Tabela 4.1 - Forças atuantes na estrutura da nacelle .....	54
Tabela 4.2 - Forças atuantes na estrutura do conjunto gerador com difusor.....	56
Tabela 4.3 - Principais dimensões e características .....	56
Tabela 4.4- Valores da variáveis para cálculo da Força de Empuxo .....	60
Tabela 4.5 – Especificações requeridas para cada componente utilizado na amarração do difusor para o içamento .....	74
Tabela 5.1 - Condições de Projeto .....	84

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$v$	Velocidade	[m/s]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_w$	Velocidade do Vento	[m/s]
$P_a$	Pressão Aerodinâmica	[Pa]
$F_w$	Força do Vento	[N]
$P_f$	Pressão a Jusante	[Pa]
$P_v$	Pressão de Vapor	[Pa]
$U$	Velocidade do Fluido	[m/s]
$T$	Temperatura	[°C]
$M_T$	Massa Total	[kg]
$m_i$	Massa de uma partícula	[kg]
$r$	Vetor posição de uma partícula	[m]

## Símbolos Gregos

$\rho$	Densidade	[m <sup>3</sup> /kg]
$g$	Aceleração da Gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]

## Grupos Adimensionais

$C$	Coeficiente Aerodinâmico
$\sigma_c$	Número de Cavitação

## Subscritos

$min$	Mínimo
$máx$	Máximo
1,2, i	Índices referentes aos corpos 1, 2, i.

## **Siglas**

<i>UHE</i>	Usina Hidrelétrica
<i>HTUC</i>	Unidade de Geração Hidrocinética
<i>ARBL</i>	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga
<i>MFG</i>	<i>Molded Fiber Glass Companies</i>
<i>AISI</i>	<i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>CONTRAN</i>	Conselho Nacional de Trânsito
<i>ANTAQ</i>	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>NR</i>	Norma Regulamentadora
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>NACA</i>	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
<i>IATA</i>	<i>International Air Transport Association</i>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROJETO TUCUNARÉ

O Projeto Tucunaré é um projeto que tem como objetivo desenvolver uma turbina hidrocínética para o aproveitamento do potencial energético das águas de rios. O projeto é composto por um grupo de colaboradores, dentre eles, a Universidade de Brasília e a Eletronorte. Inicialmente, a turbina será instalada no Rio Tocantis, a jusante da UHE de Tucuruí, com intuito de produção de energia através das águas da hidrelétrica.

Ao contrário das usinas hidrelétricas tradicionais, que exigem grandes infraestrutura e altos investimentos, a idéia é desenvolver uma tecnologia alternativa de transformação da energia cinética, obtida da vazão da água, em energia elétrica sem necessidade da construção de barragens ou de condutos forçados, mas apenas um conjunto gerador instalado no leito do rio.

Tomando como base os projetos de turbinas eólicas, foi concebida uma turbina hidrocínética com potência de 500 kW constituído por um conjunto de geração. O conjunto de geração é formado pela turbina, sistema eletromecânico, nacele e instrumentação de controle e monitoração. A turbina, composta por três pás e hub, transforma a energia cinética do escoamento em energia mecânica que será convertida em energia elétrica pelo sistema eletromecânico. O sistema eletromecânico é constituído principalmente pela caixa multiplicadora e pelo gerador. A nacele tem a função de conter o sistema eletromecânico e impedir a entrada de água, sem influenciar demasiadamente no escoamento. A instrumentação de controle e monitoração visa informar sobre as condições de funcionamento, e performance da unidade geradora e auxiliar na manutenção das corretas condições de operação.

### Unidade de Geração Hidrocínética - HTUC 03

#### Projeto preliminar e conceitual

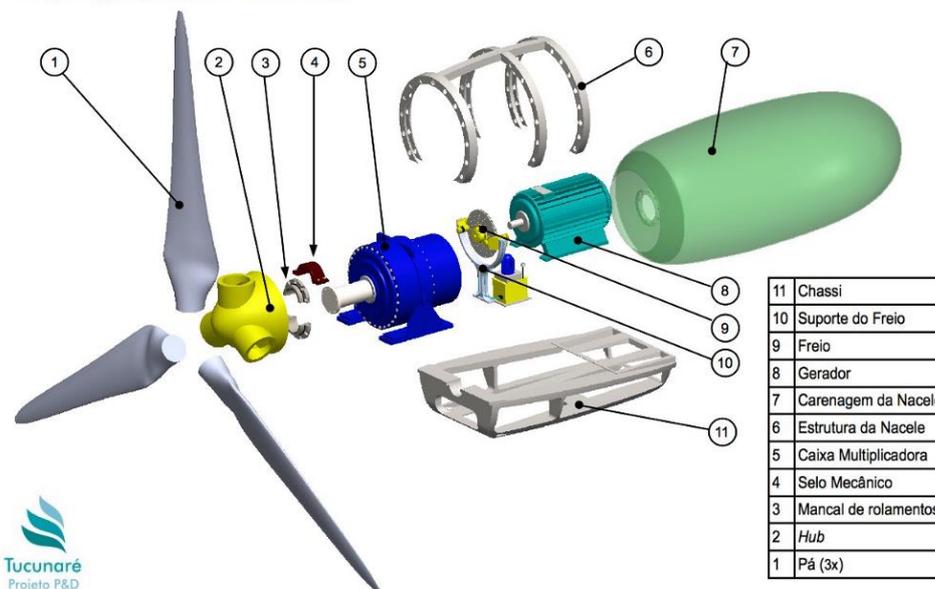


Figura 1.1- Ilustração dos componentes do conjunto de geração.

## 1.2 METODOLIGIA

O projeto completo de máquinas e equipamentos de grande porte, como a turbina hidrocínética desenvolvida no Projeto Tucunaré, deve incluir além dos aspectos construtivos, ligado ao projeto de máquinas e estruturas, as considerações de montagem, instalação e manutenção. Esses aspectos são fundamentais para o bom funcionamento da máquina, diminuição de custo e aumento da vida útil. Ou seja, o trabalho de engenharia deve contar com as especificação de componentes, e deve considerar também aspectos ligados ao orçamento e a logística.

Diante disto, ainda existem aspectos importantes para a boa concretização do Projeto Tucunaré que devem ser considerados para complementar os trabalhos já realizados. Desta forma, este Projeto de Graduação, integrado ao Projeto Tucunaré, tem como objetivo dar continuidade ao projeto construtivo e elaborar um procedimento técnico para o transporte, para a montagem e para a instalação dessas turbinas de modo a garantir o seu funcionamento e a eficiência na geração de energia elétrica. A Unidade de Geração Hidrocínética (HTUC), tomada como base para este projeto, foi o HTUC-03 nas condições de trabalho mostrados na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Condições de operação previstas

Grandeza	Característica Valor previsto
Potência elétrica a ser gerada	500 kW
Velocidade de corrente do rio	1,7 m/s (max. 2,5 m/s)
Rotação nominal da turbina	25 rpm
Rotação máxima da turbina	80 rpm
Rotação do Gerador	500 rpm
Razão de multiplicação	20 vezes
Torque na árvore do rotor	318 kN.m (500 kW)
Torque no gerador	15,4 kN.m
Potência nominal	160 kW (1,7 m/s) 500 kW (2,5 m/s)
Potência máxima	600 kW

Inicialmente, será realizado uma análise crítica do material do difusor, visto que é um elemento de grande porte, difícil de fabricar e fundamental para aumentar a eficiência da turbina. Composto essa análise, será feito um projeto simplificado da estrutura do suporte que une o conjunto gerador e o difusor.

Em seguida, propõe-se uma descrição dos métodos de transporte para que a turbina chegue ao local de instalação e para dar diretrizes do local de montagem do conjunto. Para a montagem, propõe-se definir um procedimento que assegure o máximo desempenho do projeto eletromecânico elaborado e que não comprometa a vida dos elementos mecânicos. Na instalação, a meta é desenvolver um plano de movimentação de carga para possibilitar o posicionamento e fixação do conjunto de geração no rio.

A busca de soluções se dará por meio de estudos comparativos, pesquisa e formulação de hipóteses com base nas informações atuais do projeto. Quando necessário, serão propostas soluções para serem implementadas no Projeto Tucunaré.

Neste projeto não será tratada a parte de manutenção da turbina e de seus componentes. Primeiramente, porque existem outros projetos de graduação voltados para esta temática. Outra razão, é pela falta de informações que ainda existem no projeto, o que levaria a uma proposta deficiente e incompleta.

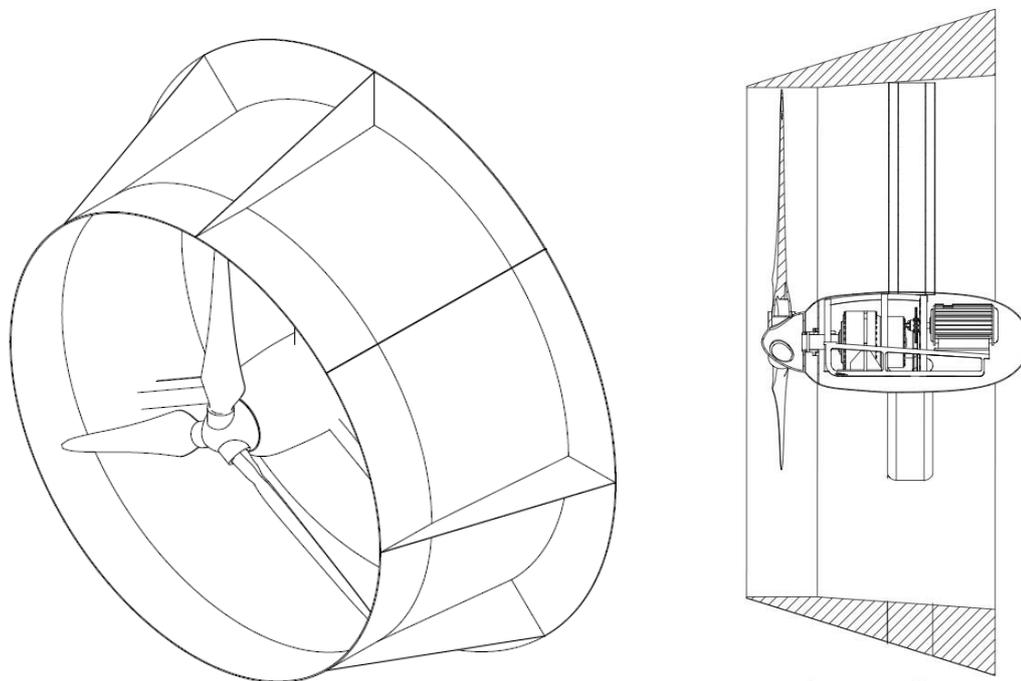


Figura 1.2 - Conjunto gerador com difusor da HTUC-03

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Dentro do método estabelecido, dividiu-se o trabalho em 6 capítulos, sendo o primeiro uma introdução do trabalho. O segundo é relativo a análise crítica da fabricação do difusor e dos suportes. Os últimos quatro relativos aos dois critérios técnicos em estudo: montagem e instalação. A instalação foi subdividida em duas etapas: a movimentação de carga e a fixação da turbina.

O segundo capítulo consiste em uma análise crítica da implementação do difusor a turbina hidrocínética e um estudo de diversos materiais que podem ser aplicados na fabricação deste componente. Além disto, contém o projeto dos suportes que irão unir a estrutura do difusor ao chassi da turbina para que o conjunto gerador fique bem posicionado e estável, como preterido pelo projeto.

O terceiro capítulo consiste em um estudo das alternativas de transporte de cargas, visto que, para que a turbina chegue ao destino de fixação, deve-se pensar em um planejamento estratégico, já que existem normas e leis regulatórias para atividade e serviços em vias de transporte terrestres, aquaviárias e aéreo. Peso, licenças especiais, restrições, tipo de carga, todos esses fatores são importantes para garantir o traslado dessa turbina. Além disto, é necessário definir o procedimento de montagem, pois este é fundamental para definir o transporte e a instalação final da turbina.

O quarto capítulo trata dos procedimentos de movimentação da carga. A partir das normas disponíveis e relacionadas ao tema, fez-se um estudo dos cuidados e dos procedimentos que devem haver com a carga de trabalho, dos acessórios que podem ser aplicados na movimentação da carga, dos métodos de amarração de carga, dos requisitos de segurança. Para isto, avaliou-se o peso, dimensões, o centro de massa e demais características do conjunto gerador com difusor

O quinto capítulo trata do posicionamento e da fixação do conjunto gerador. Esse estudo é fundamental para que a turbina atinja o desempenho e eficiência desejada. Para tal, tendo como base os procedimentos aplicados em turbinas eólicas e de maré, descreveu-se uma série de métodos de fixação existentes e possíveis para o caso estudado. Por fim, foi realizada uma análise de cada método a partir das forças envolvidas, dos métodos de fixação existentes, do local de implementação e da realidade do Projeto Tucunaré.

O sexto capítulo consiste em um roteiro com os passos que devem ser seguidos para montagem interna e externa da turbina. Além disso, serão detalhados alguns cuidados que devem ser tomados para que a turbina trabalhe com máximo desempenho e haja um prolongamento da sua vida útil.

## 2 ANÁLISE CRÍTICA DO DIFUSOR

Atualmente, os investimentos e estudos estão voltados para a diversificação sistêmica e para o aumento da eficiência das fontes energéticas. É nesse cenário, buscando maior eficiência, que foi proposta a implementação do difusor no projeto da turbina hidrocínética, visto que esse elemento pode alavancar ainda mais o potencial de produção energética. Para isto, será realizada uma análise da sua funcionalidade e aplicabilidade no projeto.

### 2.1 ASPECTOS GERAIS

Segundo Grady e Hayder (2012), na busca por maior eficiência, é prática comum posicionar turbinas eólicas na crista da superfície ou em colinas para aumentar a velocidade sobre o fluxo livre do escoamento. Essa estratégia tem a mesma finalidade que a aplicação dos difusores em turbinas eólicas ou turbinas maremotriz. O difusor atua como um dispositivo que amplifica o escoamento através da aceleração do fluxo de entrada, aumentando assim a taxa de fluxo de massa e a potência de saída, consequentemente, a eficiência da turbina é significativamente aumentada.

De acordo com Mehmood (2012), a potência gerada por uma turbina de corrente de maré é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do fluxo de entrada, portanto, mesmo que o aumento da velocidade de entrada seja pequeno, haverá um aumento considerável da potência gerada. A energia confinada no fluxo do fluido é diretamente proporcional à densidade ( $\rho$ ), área transversal ( $A$ ) e cubo da velocidade do fluido ( $V$ ), assim:

$$\text{Fluxo de Energia} \propto \rho AV^3$$

Nas turbinas do tipo maremotriz, a velocidade da corrente ideal é de cerca de 2 m/s. No entanto, a média disponível de velocidade das correntes marinhas em todo o mundo é de 1 m/s. A fim de aproveitar a energia das marés, mesmo em velocidades baixas, seria necessário projetar um sistema de turbina muito maior. Um conjunto maior levanta questões como: a limitação da profundidade da água, uma estrutura de fixação enorme e o aumento do arrasto. Diante disso, o difusor se torna uma grande ferramenta, pois ele contribui para a geração da mesma potência com uma turbina de diâmetro menor.

Em 1956, segundo Mehmood (2012), pesquisadores britânicos concluíram que os principais contribuintes para o aumento da produção de energia através da colocação de um difusor em torno de uma turbina são: a amplificação da velocidade de fluxo axial do escoamento e a redução de perdas nas pontas das lâminas da turbina. Isso torna o processo construtivo de união do conjunto gerador com o difusor fundamental para o aumento da eficiência da turbina hidrocínética. Os limites dimensionais e de tolerância entre as pás e a estrutura do difusor devem ser precisos e bem estipulados.

O difusor é um dispositivo passivo, assim, isento de manutenção. Trata-se simplesmente de um dispositivo que aumenta a produção de energia elétrica ao longo da vida da turbina. Consequentemente, o uso de um difusor em turbinas maremotriz torna o projeto mais viável economicamente em comparação com as turbinas maremotriz “nuas”. Por esse motivo, diversas pesquisas e estudos estão em andamento em todo o mundo para explorar o potencial da inclusão do difusor na turbina.

Das investigações e estudos disponíveis, existem basicamente dois tipos principais de formas de difusor, como mostrado na figura 2.1.

- Forma Retilínea
  - Com entrada;
  - Sem entrada;
  - Sem entrada e Flange;
  - Com entrada e Flange.
- Forma Anular

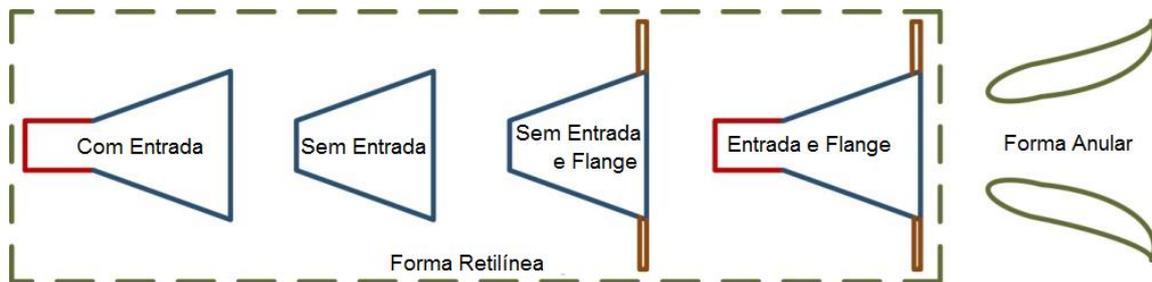


Figura 2.1 - Ilustração dos tipos de difusores conhecidos.  
(Fonte: Mehmood, 2012, adaptado)

Por fim, segundo Mehmood (2012), pode-se apontar de forma geral as principais vantagens com relação a aplicação do difusor, as quais são:

- O difusor contribui para extrair mais energia do escoamento quando comparado com as turbinas convencionais “nuas”. Além disso, elas se tornam mais eficientes atuando em escoamentos de alta velocidade e com a eliminação de perdas de ponta das longarinas;
- As turbinas com difusor são mais silenciosas do que as turbinas abertas convencionais;
- A utilização de um difusor evita o crescimento de musgo na nacele, uma vez que protege a turbina contra a luz solar e inibe a proliferação dessas plantas;
- O difusor oferece segurança contra detritos flutuantes e mergulhadores;
- O difusor pode ser feito com materiais de baixo custo. Assim, na escolha de dois difusores de materiais diferentes que geram um aumento de eficiência igual, a possibilidade de fabricar o difusor com um material mais barato reduz os custos do projeto.

No entanto, o aumento da potência vem com algum custo, podendo citar:

- Para atingir alta eficiência, é necessário pequena folga entre a estrutura interna do difusor e a ponta da pás. Isto torna a fabricação e a montagem complexas e com tolerâncias muito estreitas;
- Os perfis determinados para o interior e para o exterior da estrutura do difusor podem dificultar a fabricação da peça;
- O arrasto aumenta com a inclusão do difusor no sistema;

- iv. O difusor gera um aumento da velocidade do escoamento e também da rotação das pás da turbina, consequentemente, há um aumento da vibração no conjunto;
- v. O difusor exige uma estrutura de sustentação e de fixação mais resistentes e cara.

## **2.2 ANÁLISE DE MATERIAIS**

Todo projeto de engenharia deve conter uma investigação das relações entre a estrutura do sistema e as propriedades dos materiais selecionados para que elemento projetado alcance o desempenho desejado. O foco desse subcapítulo é avaliar as características de alguns dos principais materiais utilizados em turbinas eólicas e de maré que possam se adequar a realidade do Projeto Tucunaré, em especial do difusor.

Segundo Callister (1999), existem alguns critérios de análise fundamentais que dão embasamento a seleção e escolha dos materiais. Primeiramente, as condições de serviço devem ser caracterizadas, uma vez que estas irão ditar as propriedades exigidas do material. Raramente um material possui todas as propriedades requeridas, assim, pode ser necessário abrir mão de alguma características em favor de outra. Uma segunda consideração de seleção é a possibilidade de deterioração do material ao longo do processo de operação em serviço, a qual pode gerar falhas precoces indesejadas.

Por fim, provavelmente a consideração de seleção dominante estará relacionada aos fatores econômicos. Talvez seja possível encontrar um material que possua o conjunto ideal de propriedades e consiga resistir ao processo de operação em serviço, mas será proibitivamente caro, podendo comprometer todo o projeto.

### **2.2.1 Aço**

De acordo com Callister (1999), os aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga; existem milhares de ligas que possuem composições e/ou tratamentos térmicos diferentes. As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, que é normalmente inferior a 1%. Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a sua concentração de carbono, quais sejam, os tipos com baixo, médio e elevado teor de carbono. Também existem subclasses dentro de cada grupo, de acordo com as concentrações de outros elementos de liga.

Os aços comuns ao carbono contêm apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono e de um pouco de manganês. No caso de aços-liga, mais elementos de liga são adicionados intencionalmente em concentrações específicas.

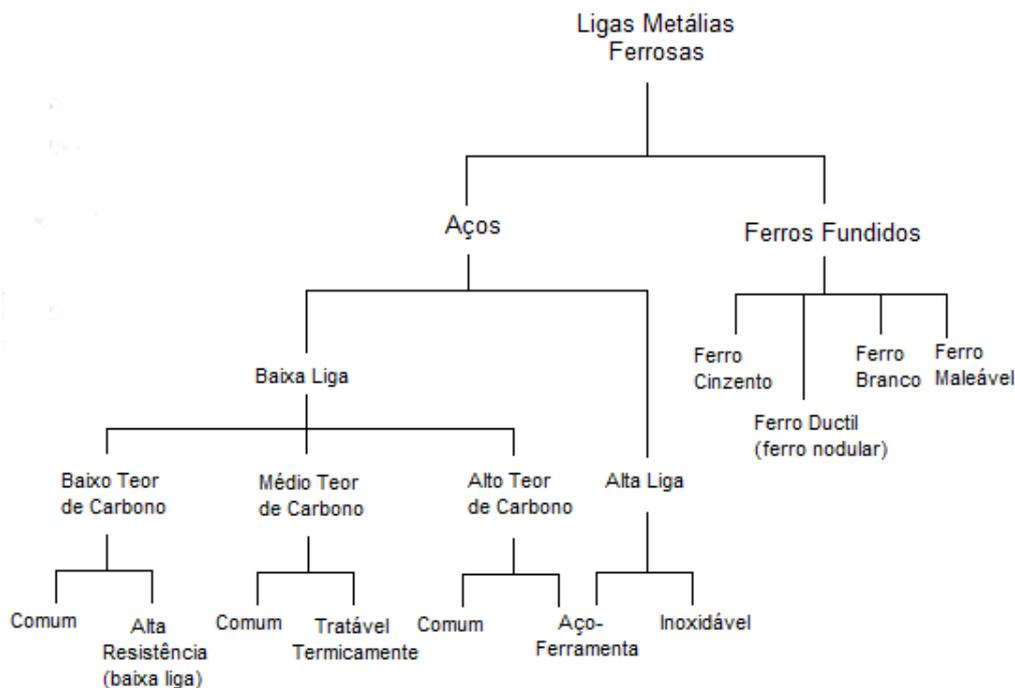


Figura 2.2 - Esquema de classificação das ligas ferrosas  
(Fonte: adaptado de Callister, 1999)

### **AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO**

A maior quantidade dos aços produzidos estão dentro da classificação de baixo teor de carbono. Eles contêm valores menores que 0,25% de carbono na sua composição e não respondem a tratamento térmico, porém, um aumento de resistência pode ser obtido através de trabalho à frio. Devido a sua microestrutura, são ligas relativamente moles e fracas, mas com ductilidade e tenacidades excepcionais. Esse tipo de aço pode ser usinado, soldados e, dentre todos os tipos de aço, são os que tem produção mais barata. Aplicações típicas para esses tipos de aço incluem os componentes de carcaças de automóveis, formas estruturais e chapas usadas em tubulações, edificações, pontes e latas estanhadas. Em geral, eles possuem um limite de escoamento de 275 MPa, limites de resistência à tração entre 415 e 550 MPa.

Um outro grupo de ligas com baixo teor de carbono são os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL ou HSLA — *High-Strength, Low-Alloy*). Eles contêm outros elementos de liga, tais como o cobre, o vanádio, o níquel e o molibdênio, em concentrações combinadas que podem ser tão elevadas quanto 10%, e possuem maiores resistências do que os aços comuns ao carbono com baixo teor de carbono. A maioria pode ter sua resistência aumentada mediante tratamento térmico, dando limites de resistência à tração superiores a 480 MPa (70.000 psi); além disso, eles são dúcteis, conformáveis, e podem ser usinados. Em meio a atmosferas normais, os aços ARBL são mais resistentes à corrosão do que os aços comuns ao carbono, os quais eles substituíram em muitas aplicações onde a resistência estrutural é um fator crítico (Callister, 1999).

## ***AÇOS COM MÉDIO TEOR DE CARBONO***

Os aços com médio teor de carbono possuem concentrações de carbono entre aproximadamente 0,25 e 0,60%. Os aços comuns ao carbono com médio teor de carbono possuem baixas endurecibilidades e podem ser termicamente tratados com sucesso somente em seções muito delgadas e com taxas de resfriamento muito rápidas para melhorar as suas propriedades mecânicas. Adições de cromo, níquel e molibdênio melhoram a capacidade dessas ligas de serem termicamente tratadas, dando origem a uma variedade de combinações resistência-ductilidade. Essas ligas termicamente tratadas são mais resistentes do que os aços com baixo teor de carbono, porém com o sacrifício de ductilidade e tenacidade. As suas aplicações incluem as rodas e os trilhos de trens, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas e componentes estruturais de alta resistência que exigem uma combinação de elevada resistência, resistência à abrasão e tenacidade.

## ***AÇOS COM ALTO TEOR DE CARBONO***

Os aços com alto teor de carbono, que possuem normalmente valores de carbono na sua composição entre 0,60 e 1,4%, tornando-os mais duros, mais resistentes mecanicamente e especialmente resistentes ao desgaste e à abrasão. Entretanto, são também os menos dúcteis dentre todos os aços carbono. É muito comum usá-los em uma condição endurecida e revenida.

Os aços para ferramentas e matrizes são ligas com alto teor de carbono, contendo geralmente cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio. Esses elementos de liga combinam-se com o carbono para formar compostos à base de carbeto que são ainda mais duros e resistentes ao desgaste e à abrasão. Esses aços são utilizados como ferramentas de corte e matrizes para a modelação e a conformação de materiais, bem como para a fabricação de facas, lâminas de corte, lâminas de serras para metais, molas e arames com alta resistência (Callister, 1999).

## ***AÇOS INOXIDÁVEIS***

O aço inoxidável é um aço que tem como maior característica a alta resistência à corrosão em diversos ambientes. Seu elemento de liga predominante é o cromo, com concentração próxima a 11%. Uma ampla variedade de propriedades mecânicas combinadas a uma excelente resistência à corrosão tornam os aços inoxidáveis muito versáteis nas suas aplicabilidades.

Alguns aços inoxidáveis são usados com frequência a temperaturas elevadas e em meio a ambientes severos, uma vez que eles resistem à oxidação e mantêm as suas integridades mecânicas sob essas condições; o limite superior de temperatura em uma atmosfera oxidante é de aproximadamente 1000°C. Os equipamentos que empregam esses aços são as turbinas a gás, caldeiras de vapor de alta temperatura, fornos de tratamento térmico, aeronaves, mísseis e unidades geradoras de energia nuclear. Já o aumento de resistência, pode ser obtido através de tratamentos térmicos de endurecimento por precipitação (Callister, 1999).

### **2.2.2 Alumínio**

Obtido da bauxita após um longo processo de limpeza de impurezas, o alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa, boa condutividade elétrica e térmica, resistência à corrosão em alguns ambientes, ótima ductibilidade. Sua principal limitação é a baixa

temperatura de fusão, a qual acaba restringindo sua aplicação. A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada mediante a formação de ligas ou tratamento à frio, entretanto, esses processos tendem a diminuir a resistência à corrosão. Os principais elementos de liga são o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco. Vale citar que a reciclagem do alumínio não degrada sua estrutura microscópica, conseqüentemente, ele não perde suas características mecânicas e pode ser reutilizado.

Devido às suas características, principalmente a baixa densidade e a resistência a corrosão, as ligas de alumínio são comumente utilizadas em estruturais de aeronaves, peças automotivas, latas de bebidas, superestruturas de grandes navios ou de navios militares.

As ligas de alumínio com magnésio, da série 5xxx e 6xxx, são largamente usadas em estruturas marítimas, pois possuem elevada resistência mecânica. Elas contêm na sua composição o magnésio em porcentagens que variam entre 4% e 5%, adquirindo uma resistência adicional por conformação plástica a frio. Assim, pode-se citar as ligas 5086, 5083, 5456, 5454, 6061.

### **2.2.3 Compósitos**

Segundo Capella (2012), os requisitos atuais de alto desempenho em estruturas aeroespaciais, navais e automobilísticas vem proporcionando o desenvolvimento de novos materiais, bem como de novas técnicas de fabricação. Normalmente, elevados valores de resistência e rigidez específicas são procurados, obtendo-se frequentemente soluções a partir da utilização de materiais compósitos, particularmente polímeros termofixos dotados de reforços fibrosos. O termo compósito refere-se aos materiais fabricados a partir de dois ou mais constituintes, a nível macroscópico, normalmente, uma matriz sintética reforçada com fibras industriais ou naturais.

Fibras de vidro e fibras de carbono são os elementos de reforços mais utilizados para a fabricação de materiais compósitos e, juntamente com a variação da matriz polimérica, a resina epóxi. Quando comparados com os metais, os componentes de materiais compósitos poliméricos são resistentes ao ataque químico, são não-magnéticos e não-condutores, e apresentam uma excepcional relação resistência/peso.

A resina epóxi é uma classe de resinas termorrígidas de alto desempenho que possui uma grande variedade de aplicações, podendo ser usada como resinas de laminação, adesivos, selantes, tintas, vernizes.

#### ***REFORÇO DE FIBRA DE VIDRO***

A fibra de vidro é basicamente composta pela aglomeração de pequenos filamentos flexíveis obtidos pelo processo de fundição do vidro. Posteriormente, as fibras de vidro são recobertas por uma resina, sendo esse processo o principal responsável pela rigidez da peça. A utilização da fibra de vidro permite a construção de moldes em formas complexas, ou seja, propicia a fabricação de peças únicas.

Das principais características da fibra de vidro, pode-se citar a alta resistência à tração, a grande inércia química, a boa estabilidade dimensional, a conservação das propriedades mecânicas em ambientes diversos. Apesar de possuírem resistências elevadas, elas não exibem a rigidez necessária para algumas aplicações, por exemplo, como membros estruturais para aviões e pontes. Outro ponto importante, a fibra de vidro está limitada para aplicações com temperaturas de serviço abaixo de

200°C; a temperaturas mais altas, a maioria dos polímeros começa a escoar ou a se deteriorar (Callister, 1999)

Por fim, a lã de vidro é adicionada a um material polimérico, para juntos formarem um compósito muito resistente. De acordo com a MFG (*Molded Fiber Glass Companies* – 2014), para utilização da fibra de vidro em contato com a água, por exemplo, para cascos de embarcações, é comum utilizar um segundo tipo de resina de poliéster de alta qualidade (*get coat*), pois a resina epóxi absorve água, isto pode inchar a estrutura e causar sua degradação. Assim, a segunda camada de resina tem função de impedir essa penetração de água e de dar um bom acabamento a peça.

### **REFORÇO DE FIBRA DE CARBONO**

O carbono é um material de fibra de alto desempenho e o reforço mais comumente utilizado em compósitos avançados com matriz polimérica. O termo fibra de carbono, geralmente refere-se a uma variedade de filamentos compostos com mais de 90% de carbono. As técnicas de fabricação para produção de fibras de carbono são relativamente complexas e não são foco desse trabalho.

As fibras de carbono normalmente são adicionada a um material polimérico, para juntos formarem um compósito muito resistente. Atualmente, os compósitos poliméricos reforçados com carbono estão sendo largamente empregados em equipamentos esportivos, em carcaças de motores a jato, em vasos de pressão e em componentes estruturais de aeronaves e em helicópteros (Callister, 1999).

## **2.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DO DIFUSOR**

Tendo em vista a grande quantidade de materiais disponíveis para fabricação de elementos mecânicos, selecionar um material se torna uma tarefa extensa e difícil. Diante disso, uma maneira interessante de especificar alguns materiais é buscar outros projetos semelhantes e estudar materiais que sejam aplicáveis as condições de trabalho.

Assim, foram especificados os seguintes materiais para uma análise mais detalhada:

- Aço AISI 4340;
- Aço Inox 304;
- Alumínio Naval 5052;
- Compósito com Fibra de Vidro (*E-glass*);

### **2.3.1 Aço SAE 4340**

De acordo com *GGD Metals*, o aço AISI 4340 é ligado ao cromo-níquel-molibidênio e muito utilizado para fabricação de diferentes componentes mecânicos, principalmente elementos estruturais. Com esse aço, consegue-se um boa combinação de resistência mecânica e resistência à fratura, além de elevada resistência à fadiga. Este material pode ser tratado termicamente por recozimento, têmpera, nitretação e revenimento, assim, pode alcançar propriedades mecânicas ainda superiores.

A presença da liga visa melhoria das propriedades dos materiais, sobretudo das características mecânicas. Portanto, a seleção desse aço inclui uma análise da composição química e das finalidades dos elementos de liga presentes nesse material, em especial do cromo, do níquel e do molibidênio. É necessário também conhecer as propriedades mecânicas desse aço para avaliar a viabilidade da sua aplicação no difusor do Projeto Tucunaré. As propriedades do material são mostradas na Tabela 2.1.

A partir desses dados, pode-se observar que o aço AISI 4340 exibe uma boa combinação de ductilidade e resistência mecânicas, qualidades que são interessantes para a estrutura do difusor. Entretanto, esse material possui uma massa específica bastante elevada, conseqüentemente, exigiria uma estrutura de sustentação mais robusta. Além disso, mesmo com os elementos de liga presentes e em água doce, a utilização desse material não é apropriada devido aos efeitos corrosivos. A resistência a corrosão desse aço é muito baixa, sendo necessário adicionar algum revestimento superficial ao difusor, como, por exemplo, zincagem, galvanização ou pintura garantiriam à peça maior durabilidade. Com relação aos procedimentos para minimizar os efeitos abrasivos, dando maior longevidade ao difusor, pode-se aplicar um revestimento de carvão de tungstênio.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas e físicas do aço AISI 4340

<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>	<b>VALOR</b>
Resistência a Tração	1220 MPa
Limite de Escoamento	786 MPa
Dureza	341 HB
Alongamento	14%
Número de Poison	0,29
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>	<b>VALOR</b>
Massa Específica	7,85 g/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	205 GPa
Módulo de Cisalhamento	80 GPa
<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>	<b>VALOR (%)</b>
Carbono (C)	0,38-0,43
Fósforo	0,045
Cromo (Cr)	0,7-0,9
Silício (Si)	0,15-0,35
Níquel (Ni)	1,65-2
Fósforo (P)	0,035
Manganês (Mn)	0,6-0,8
Molibdênio (Mo)	0,2-0,3
Enxofre (S)	0,04

(Fonte: GERDAU, 2014; CALLISTER, 1997; MatWeb, 2014)

### 2.3.2 Aço Inox 304

O aço inox 304 faz parte da categoria dos aços inoxidáveis austeníticos da série AISI 300. Segundo *GGD Metals* (2014), estas ligas são muito comuns e nobres, sendo aplicada na fabricação de equipamentos para a indústria aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de tubos e tanques em geral.

Com relação as suas propriedades e características, ele tem excelente resistência à corrosão, conformabilidade e soldabilidade. Sua combinação de baixo limite de escoamento e alongamento elevado permite a fabricação de formas complexas. No entanto, este tipo de aço inox endurece rapidamente, então, para aliviar tensões produzidas no processo de conformação mecânica, as peças devem ser recozidas imediatamente após serem conformadas.

O aço inox 304 apresenta propriedades e características boas para compor a estrutura do difusor e possui uma resistência a corrosão excelente. Entretanto, um fator importante é que, assim como o AISI 4340, o aço inox 304 possui uma massa específica elevada, o que exigiria uma estrutura de sustentação mais resistente.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas e físicas do aço inox 304

<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>	<b>VALOR</b>
Resistência ao Cisalhamento	290 MPa
Resistência a Tração	505 MPa
Limite de Escoamento	215 MPa
Dureza	123 HB
Alongamento	70%
Número de Poison	0,29

<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>	<b>VALOR</b>
Massa Específica	8,00 g/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	193 GPa
Módulo de Cisalhamento	77 GPa
Modulo de Rigidez	86,2 GPa

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>	<b>VALOR (%)</b>
Fósforo	0,045
Cromo (Cr)	0,08
Silício (Si)	1
Níquel (Ni)	8-10,5
Enxofre	0,03
Manganês (Mn)	2

(Fonte: ABINOX, 2014; *GGD Metals*, 2014; CALLISTER, 1997; MatWeb, 2014)

### 2.3.3 Alumínio Naval 5052

A liga Al-Si, série 5000, são às vezes combinadas com manganês, e também são não-tratáveis termicamente. O magnésio é um dos elementos mais eficazes e largamente empregados na formação de ligas de alumínio, e é o principal responsável pelo aumento da resistência mecânica sob trabalho a frio. As ligas dessa série apresentam a maior resistências entre as ligas não-tratáveis termicamente. São facilmente soldáveis e resistentes à corrosão, principalmente em atmosfera marítima (Coraini, 2009).

Especificamente na liga 5052, também conhecida como alumínio naval 5052, são muito utilizadas na fabricação de estruturas de vagões ferroviários, de carrocerias, na indústria naval. Dentre as características desse material, para o projeto do difusor, pode-se citar a boa relação peso/resistência, alta resistência à corrosão, dureza, alta soldabilidade. Além disso, ao contrário do aço, tem um peso específico baixo. Construir um difusor de alumínio, ao invés de aço, exigiria uma estrutura de fixação muito menor e mais barata. A Tabela 2.3 fornece a composição química dessa liga e algumas propriedades do material.

Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas e físicas e composição química do alumínio naval 5052

<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS</b>	<b>VALOR</b>
Resistência ao Cisalhamento	124 MPa
Resistência a Tração	193 MPa
Limite de Escoamento	65 MPa
Dureza	47 HB
Alongamento	17%
Número de Poison	0,33

<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>	<b>VALOR</b>
Massa Específica	2,68 g/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	70,3 GPa
Módulo de Cisalhamento	25,9 GPa
Modulo de Rigidez	27,5 GPa

<b>COMPOSIÇÃO QUÍMICA</b>	<b>VALOR (%)</b>
Magnésio (Mg)	2,20-2,80
Cromo (Cr)	0,15-0,35
Silício (Si)	0,25
Ferro (Fe)	0,4
Cobre (Cu)	0,1
Manganês (Mn)	0,1
Zinco (Zn)	0,1

(Fonte: *GGD Metals*, 2014; *MatWeb*, 2014)

### 2.3.4 Compósito reforçado com Fibra de Vidro (*E-glass*)

Segundo a AZOM (2014), a fibra de vidro *E-Glass* foi originalmente desenvolvido para ser usada como isolante em fiações elétricas. Atualmente, é usado quase exclusivamente como um reforço. Esse material tem como composição química, principalmente, o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o trióxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) e o óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ). O compósito, apesar de ter uma baixa resistência à fadiga, tem várias propriedades potencialmente atraente para fabricação de estruturas:

- alta rigidez;
- alta resistência mecânica;
- boa resistência à corrosão;
- retenção das suas propriedades em altas temperaturas;
- densidade relativamente baixa;
- não inflamável;
- resistente ao calor;
- boa resistência química;
- relativamente insensível à umidade;
- bom isolamento elétrico;

O *E-Glass* é muito aplicado na indústria aeroespacial, indústria automotiva e de produtos químicos. Cada vez mais eles também são usados em componentes mecânicos que são submetidos a interações de superfície em movimento, tais como engrenagens, rodas, freios, embreagens, rolamentos, buchas.

Propriedades de resistência ideais são obtidos quando as fibras retas e contínuas estão alinhadas paralelamente em uma única direção. Para promover a força em outras direções estruturas laminadas podem ser construídas com fibras alinhadas em outras direções. É importante ressaltar que, em geral, esse material não é um material isotrópico, ou seja, suas propriedades mecânicas, físicas e térmicas variam de acordo com a disposição das fibras. Contudo, para fins do estudo comparativo, foram encontrados alguns valores conhecidos para as principais propriedades desse compósito, os quais estão expostos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Propriedades mecânica e físicas da fibra de vidro *E-glass*

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALOR
Resistência a Tração	3450 MPa
Limite de Escoamento	2750 MPa
Alongamento	4%
Número de Poison	0,21
PROPRIEDADES FÍSICAS	VALOR
Massa Específica	2,55 g/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	70 GPa
Módulo de Cisalhamento	30 GPa

(Fonte: AZOM, 2014; MatWeb, 2014)

Para o caso do difusor do Projeto Tucunaré, diante das adversidades encontradas na implementação desta tecnologia, além da lã de vidro, seria essencial utilizar como material polimérico complementar a resina epóxi. Essa resina é um plástico termofixo que endurece quando misturado a um catalisador. Assim, ela garante ao compósito excelente resistência física, alta resistência química e excelente proteção anticorrosiva.

Sendo a estrutura fabricada a de um difusor, utilizar a fibra de vidro em matrix de resina epóxi é uma boa solução, mas algumas observações importantes devem ser feitas. Primeiramente, nota-se que a resina epóxi, quando em contato com meio aquoso, absorve água. Isto ocasionaria o inchamento da estrutura e, conseqüentemente, sua degradação e falha do projeto. Para solucionar esse problema, deve-se adicionar a resina epóxi uma substância chamada *gelcoat*. Os *gelcoats* são resinas utilizadas para proporcionar um acabamento de alta qualidade sobre a superfície visível de um material compósito reforçado com fibras. Esse processo é muito aplicado em embarcações marinhas, aviões e automóveis com uma camada exterior de revestimento, tipicamente de 0,5 a 0,8 milímetros de espessura. Os *gelcoats* são projetados para serem duráveis, proporcionando também resistência à degradação ultravioleta, resistência à hidrólise e para coloração da peça.

Por fim, para garantir que a estrutura do difusor seja capaz de resistir aos esforços gerados pelo escoamento do rio e pela própria turbina, deve-se prever insertos metálicos na fabricação da fibra em alguns pontos estratégicos, como por exemplo, nos pontos de fixação do conjunto gerador e nos pontos de içamento.

## 2.4 ANÁLISE DE CUSTO PARA FABRICAÇÃO DO DIFUSOR COM OS DIFERENTES MATERIAIS

Como foi citado anteriormente, além de avaliar as propriedades físicas e mecânicas de cada material que poderá ser utilizado na fabricação do difusor, é necessário também levar em conta os fatores econômico. Os custos envolvendo o material selecionado e a fabricação do componentes podem ser fundamentais para o viabilizar ou inviabilizar o projeto.

Diante disto, foi feita uma análise comparativa simplificada do custo de cada material especificado no item 2.3 deste trabalho. Os dados presentes na tabela foram coletados dos seguintes fornecedores: GGD METALS, GERDAU, REDELEASE.

Tabela 2.5 – Tabela de custo do quilograma de cada um dos materiais.

<b>Tabela de Custo</b>				
<b>Material</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço Unitário (R\$)</b>	<b>Quantidade (kg)</b>	<b>Preço Estimado Final (R\$)</b>
Aço AISI 4340	kg	12,00	42.781	513.372,00
Aço Inox 304	kg	13,50	43.746	590.571,00
Alumínio Naval 5052	kg	17,80	14.605	259.969,00
Compósito - Fibra de Vidro (E-glass)	kg*	22,40	13.733	307.619,20

\*Análise do preço dos componentes para produzir 1 kg deste material utilizando uma manta de alta qualidade de fibra de vidro 450.

Conclui-se com estes dados que, apesar de terem valor unitário superior aos aços, o alumínio naval 5052 e a fibra de vidro, quando comprados em grande escala, acabam sendo muito mais vantajosos financeiramente devido a sua baixa densidade.

A tabela 2.5 apresenta os custo envolvendo apenas a materia-prima, propriamente dita, não incluindo valores de fabricação real da peça. No futuro, seria importante definir e levantar os custos envolvendo os processos de fabricação, tratamento superficial, soldagem, mão-de-obra que estaria envolvido na fabricação com cada um dos materiais para uma comparação ainda mais precisa.

## 2.5 ANÁLISE DOS ESFORÇOS SOLICITADAS PELA ESTRUTURA PARA FABRICAÇÃO DO DIFUSOR

Para avaliar a sua integridade estrutural quando submetido aos esforços atuantes, devido à geometria complexa, foi utilizado o programa CAD SolidWorks 2012 para uma análise em elementos finitos de modo a avaliar a distribuição de tensões pela sua geometria e garantir que o difusor suportará os componetes internos. A análise foi realizada igualmente para os materiais citados no item 2.3, a fim de agregar informações para decisão final do material de fabricação do difusor.

Primeiramente, para cada ensaio, foi realizada uma análise de convergência da malha, para isso, primeiramente, utilizou-se uma malha não sofisticada. Em seguida, realizou-se o refinamento da mesma até que este não fosse mais determinante no resultado. Essa análise tem o intuito de diminuir o tempo/custo computacional evitando análises das geometrias mais sofisticadas que o necessário.

A análise foi realizada da seguinte maneira: engastou-se as abas de sustentação laterais e a aba de sustentação superior, pois são os pontos previstos para fixação do difusor quando içado e fixado. Posteriormente, aplicaram-se as respectivas forças de reação geradas pela turbina, pelo escoamento e pelos pontos de fixação (figuras 2.3 e 2.4).

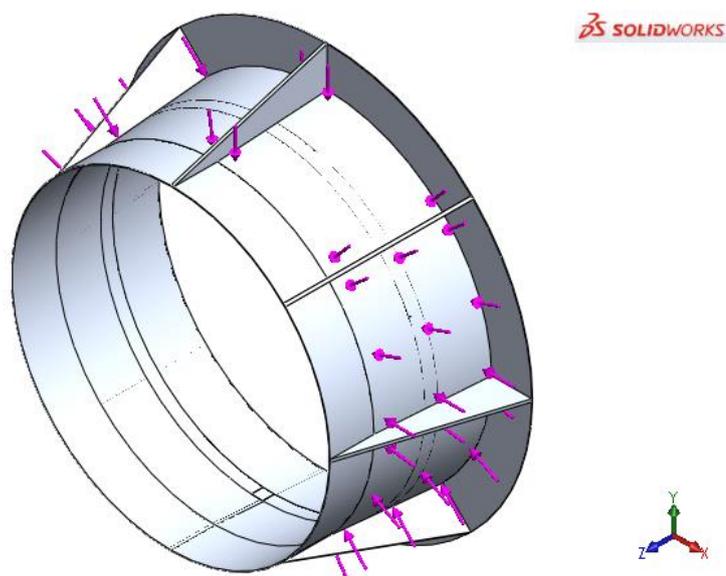


Figura 2.3 - Condições de contorno para análise do difusor.

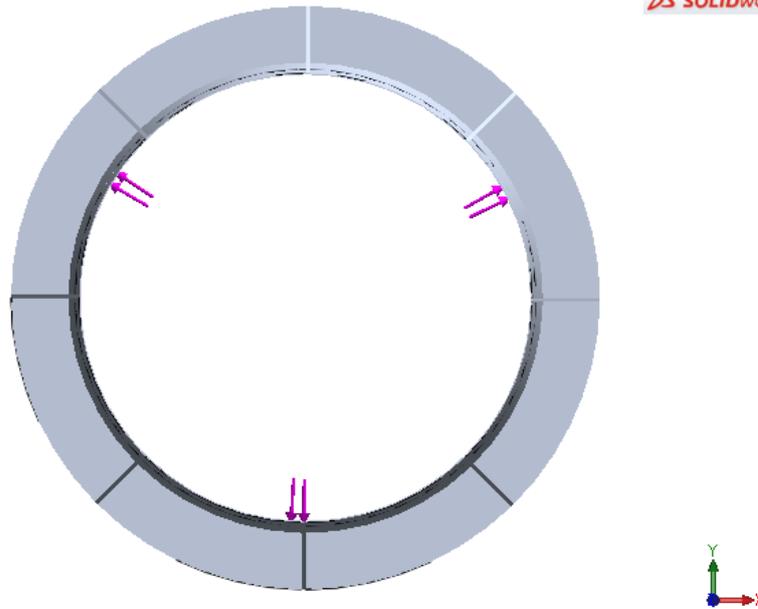


Figura 2.4 - Condições de contorno para análise do difusor.

Com as condições de contorno determinadas, gerou-se a malha com elementos de três graus de liberdade e com tamanho máximo de 15 mm. A malha é constituída por 45210 nós e 22710 elementos. A figura 2.5 ilustra a malha gerada para este componente.

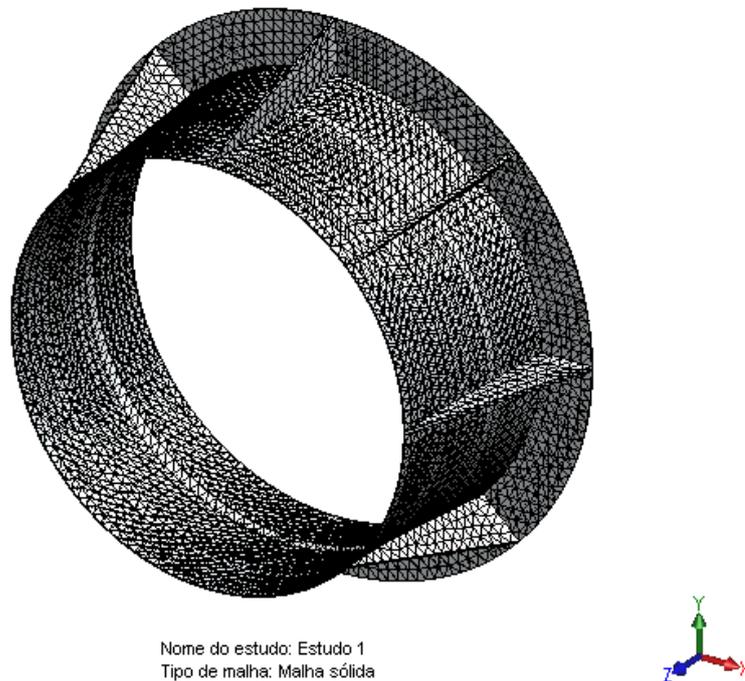


Figura 2.5 - Malha desenvolvida para o difusor

**ACO AISI 4340**

Os resultados obtidos para o ensaio com o aço AISI 4340 são mostrados nas Figuras 2.6 a 2.8.

Nome do modelo: Difusor Aço 4340  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: análise estática tensão nodal Tensão1

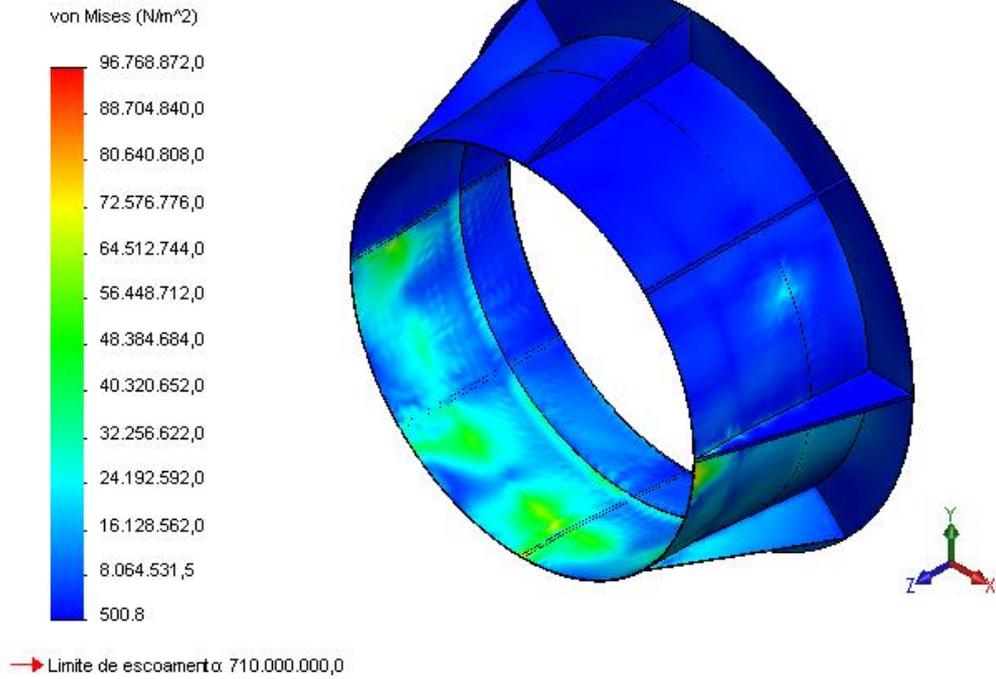


Figura 2.6 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de aço AISI 4340.

Nome do modelo: Difusor Aço 4340  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação01

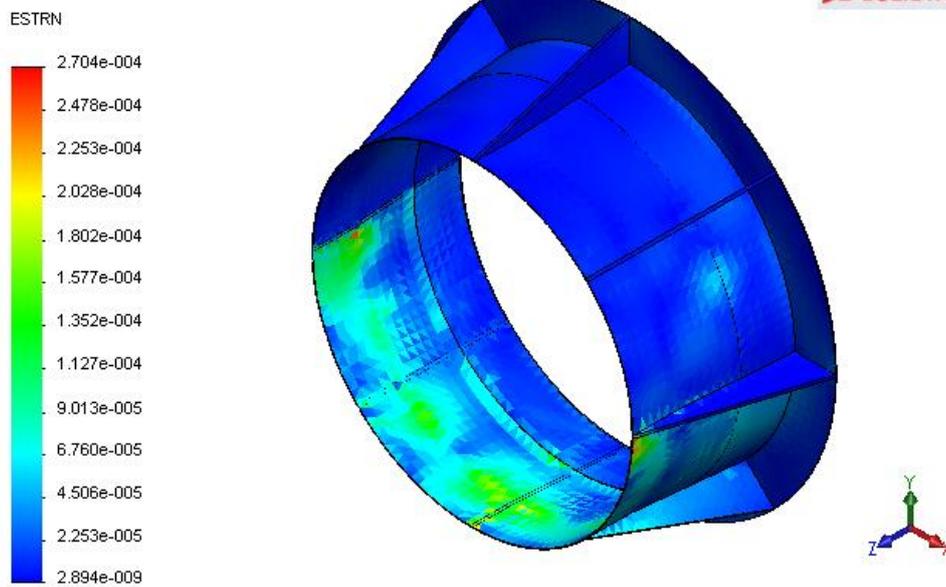


Figura 2.7 - Deformação equivalente da análise do difusor de aço AISI 4340.

Nome do modelo: Difusor Aço 4340  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1  
Critério: Automático  
Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 7.3

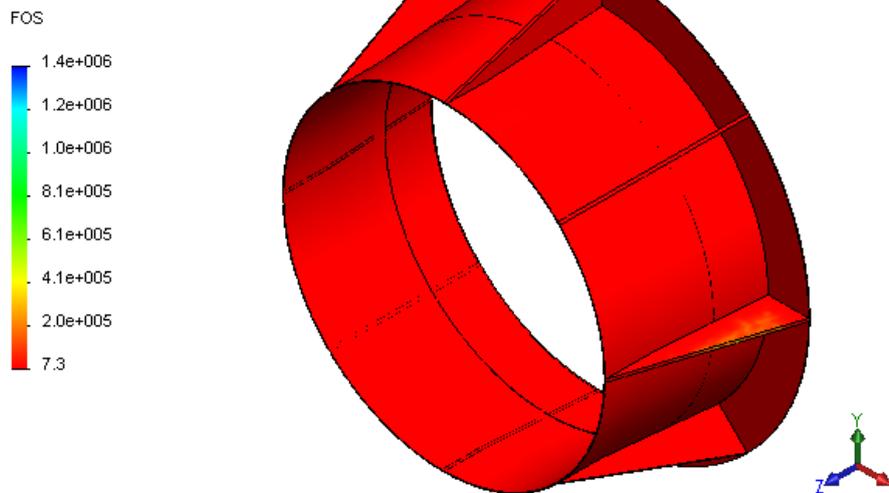


Figura 2.8 - Fator de segurança do difusor de aço AISI 4340.

Os resultados seguem na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Resultados da análise por MEF do difusor de aço AISI 4340

Resumo	Valor
Fator de Segurança	7,3
Deformação Equivalente Máxima (m/m)	0,003
Tensão Equivalente de Von Mises (MPa)	98,8

Os resultados acima mostram que a solução adotada para o difusor é satisfatória, uma vez que sua integridade está resguardada, como indica seu fator de segurança, relativamente alto de 7,3. Além disto, sofre uma deformação muito pequena e tem uma tensão equivalente máxima inferior a do material.

### ACO INOX 304

Os resultados obtidos para o ensaio com o aço inox 304 são mostrados nas Figuras 2.9 a 2.11.

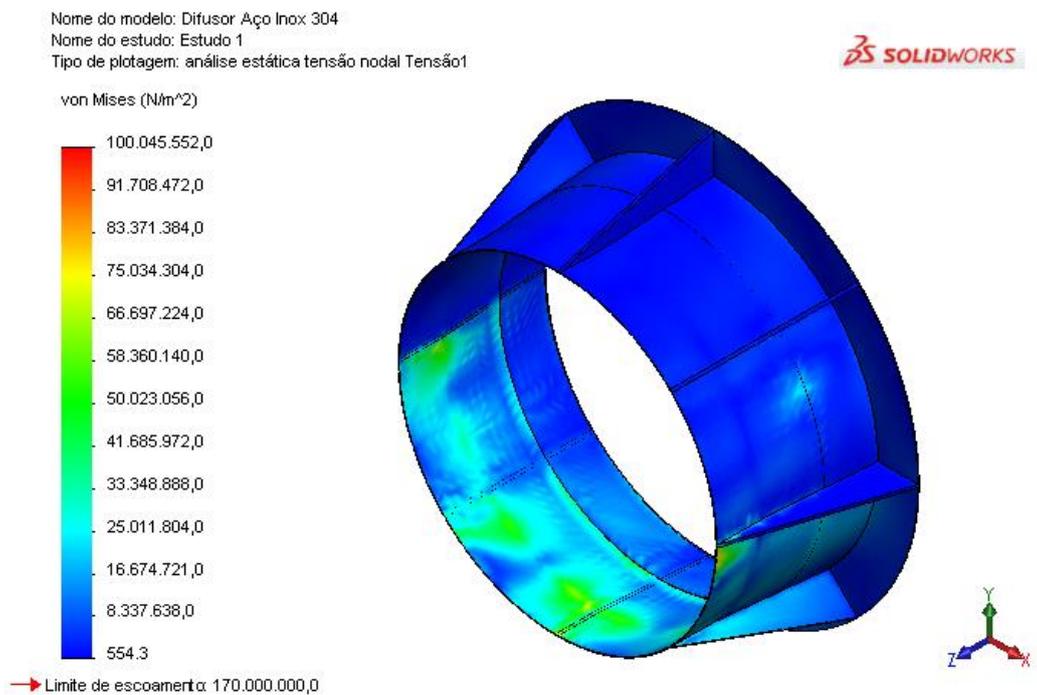


Figura 2.9 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de aço inox 304.

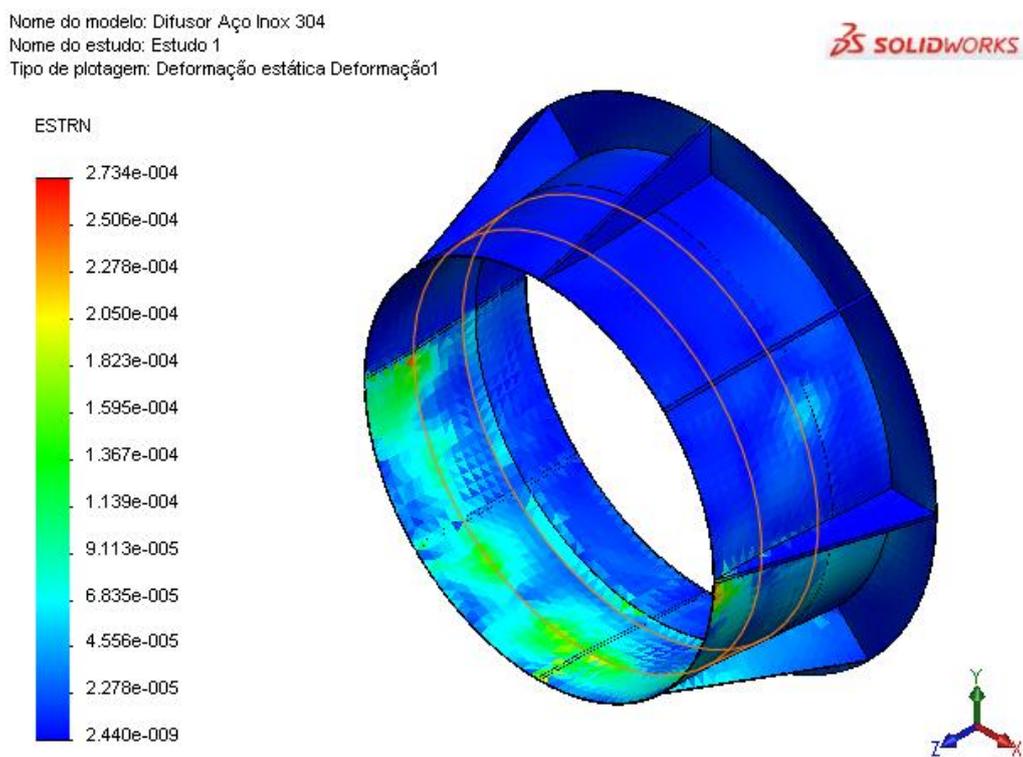


Figura 2.10 - Deformação equivalente da análise do difusor de aço inox 304.

Nome do modelo: Difusor Aço Inox 304  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1  
Critério: Automático  
Distribuição do fator de segurança: Min. FOS = 1.7

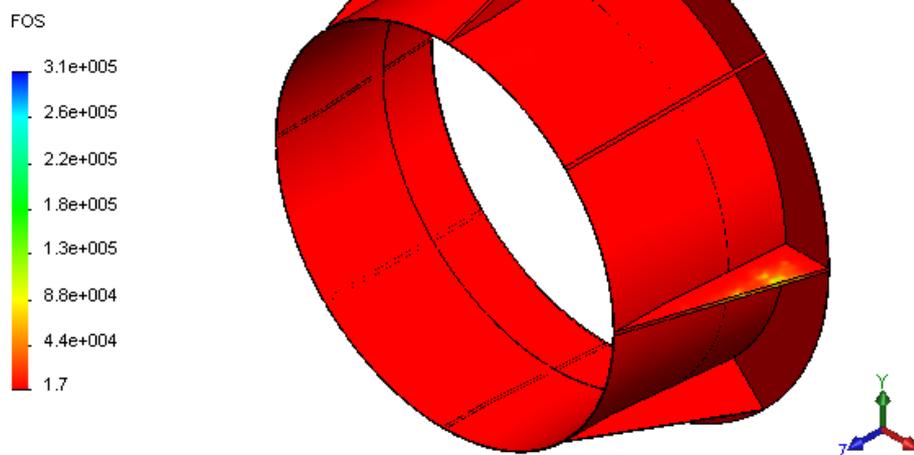


Figura 2.11 - Fator de segurança do difusor de aço inox 304.

Os resultados seguem na tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Resultados da análise por MEF do difusor de aço inox 304

Resumo	Valor
Fator de Segurança	1,7
Deformação Equivalente Máxima (m/m)	0,003
Tensão Equivalente de Von Mises (MPa)	100,1

Os resultados acima mostram que a solução adotada para o difusor também é satisfatória, como indica seu fator de segurança de 1,7. Apesar disto, é aconselhável revisar o projetos, dando foco nas partes com menores fatores de segurança a fim de aumentar este parâmetro.

### ALUMÍNIO NAVAL 5052

Os resultados obtidos para o ensaio com o alumínio naval 5250 são mostrados nas Figuras 2.12 a 2.14.

Nome do modelo: Difusor AI 5052  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: análise estática tensão nodal Tensão2

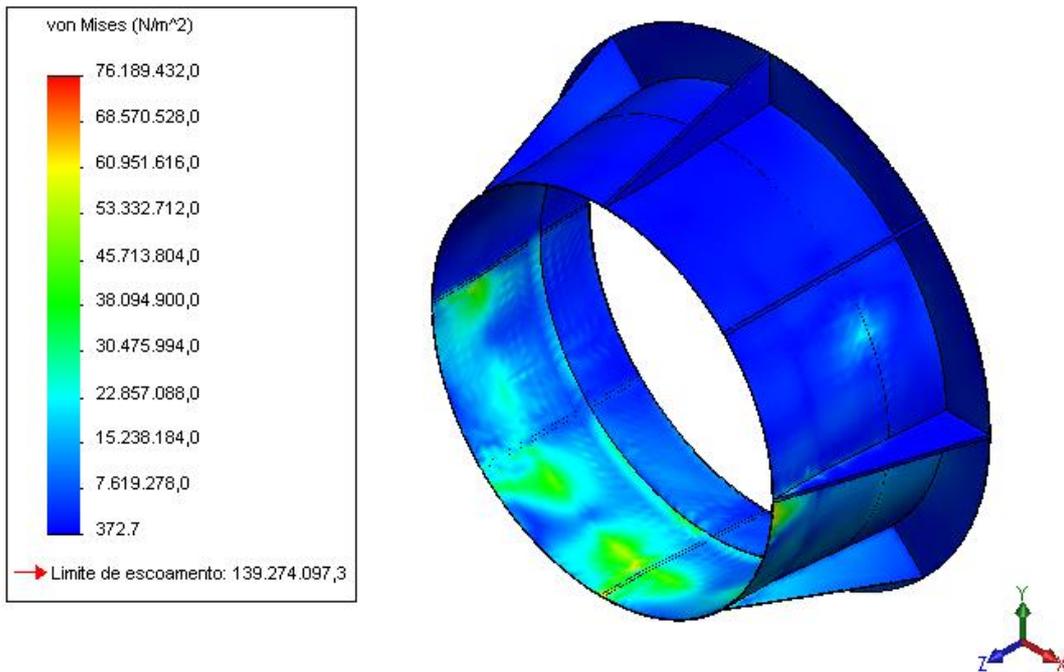


Figura 2.12 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de alumínio naval 5052.

Nome do modelo: Difusor AI 5052  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação01

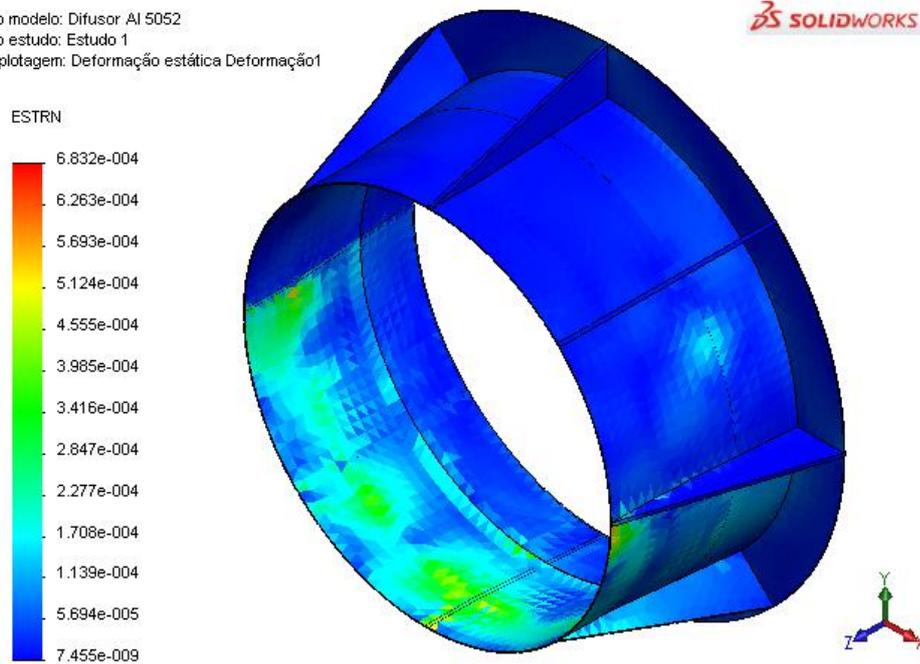


Figura 2.13 - Deformação equivalente da análise do difusor de alumínio naval 5052.

Nome do modelo: Difusor AI 5052  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1  
Critério: Automático  
Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 1.8

SOLIDWORKS

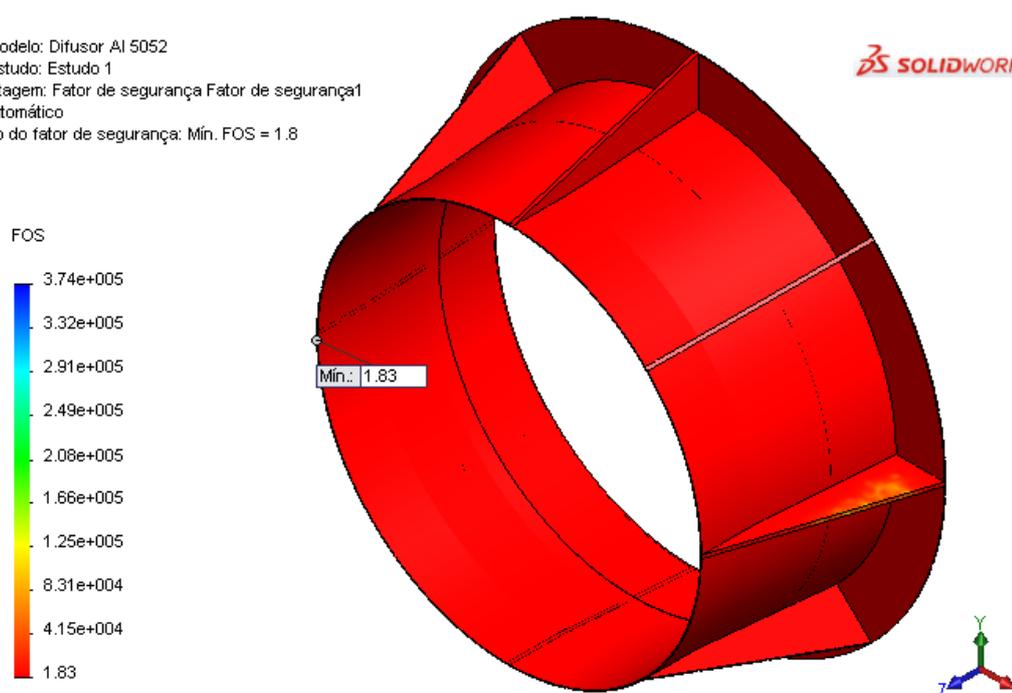


Figura 2.14 - Fator de segurança do difusor de alumínio naval 5052.

Os resultados seguem na tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Resultados da análise por MEF do difusor de alumínio naval 5052

Resumo	Valor
Fator de Segurança	1,83
Deformação Equivalente Máxima (m/m)	0,007
Tensão Equivalente de Von Mises (MPa)	76,2

Assim como nos outros estudos, os resultados mostram que a solução adotada para o difusor fabricado de alumínio naval também é satisfatória, como pode ser visto pelo seu fator de segurança de 1,83. Apesar disto, o projeto com este material poderia ser revisado para dar maiores garantias, principalmente pelo porte e o investimento do projeto.

### COMPÓSITO COM FIBRA DE VIDRO (E-GLASS)

Os resultados obtidos para o ensaio com o compósito de fibra de vidro são mostrados nas Figuras 2.15 a 2.17.

Nome do modelo: e-glass  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: análise estática tensão nodal Tensão2

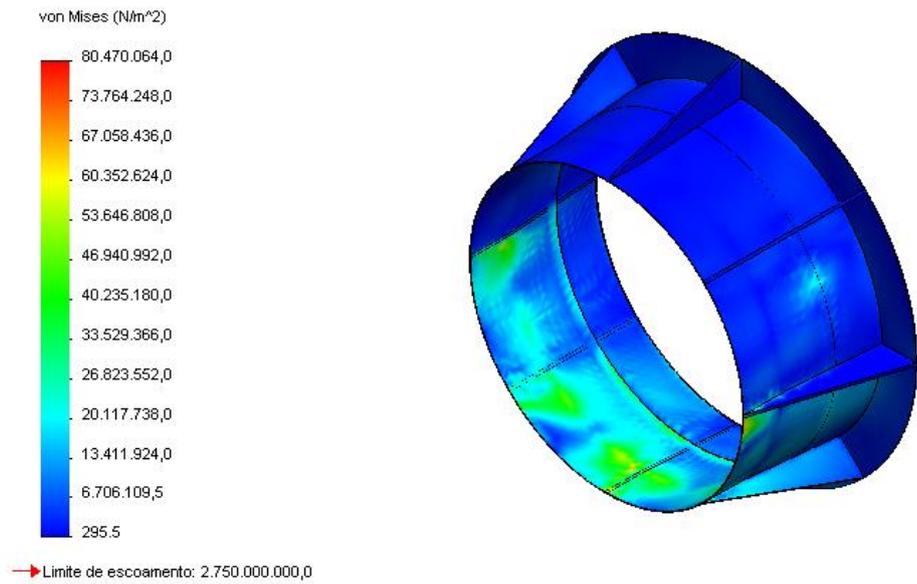


Figura 2.15 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do difusor de fibra de vidro.

Nome do modelo: e-glass  
Nome do estudo: Estudo 1  
Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação01

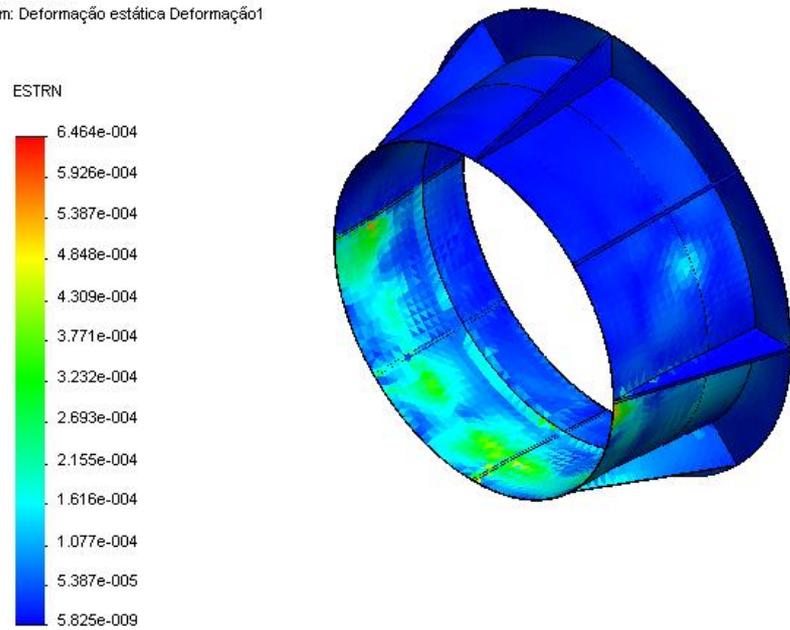


Figura 2.16- Deformação equivalente da análise do difusor de fibra de vidro.

Nome do modelo: e-glass  
 Nome do estudo: Estudo 1  
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1  
 Critério: Automático  
 Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 34

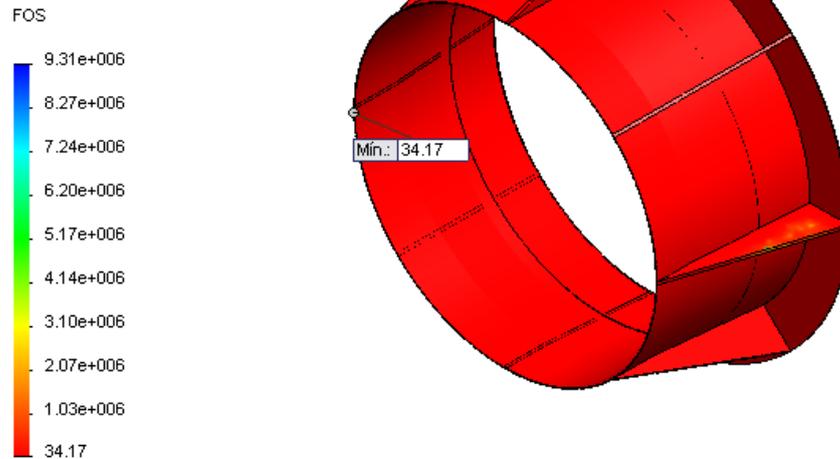


Figura 2.17 - Fator de segurança do difusor de fibra de vidro.

Os resultados seguem na tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Resultados da análise por MEF do difusor de fibra de vidro

Resumo	Valor
Fator de Segurança	34
Deformação Equivalente Máxima (m/m)	0,0007
Tensão Equivalente de Von Mises (MPa)	80,5

Os resultados acima mostram que a solução adotada para o difusor fabricado de fibra de vidro é satisfatória, uma vez que sua integridade está resguardada, como indica seu fator de segurança bastante alto. Entretanto, deve-se lembrar que o *E-glass* é um material fibroso e sua fabricação é quase manufaturada, logo suas propriedades são extremamente variáveis, consequentemente, os resultados reais podem ser muito distintos dos obtidos.

## 2.6 PROJETO DOS SUPORTES

### 2.6.1 Introdução

Para o projeto em questão, levando em conta a inclusão do difusor, é necessário projetar um conjunto de suportes com função de fixar o conjunto gerador na estrutura do difusor. Esses suportes devem proporcionar a máxima estabilidade a turbina, para tal, devem ter boa resistência mecânica. Além disto, estas estruturas não podem interferir no desempenho da turbina e do difusor.

Inicialmente, dois métodos foram pensados: suporte com fixação interna ou um suporte com fixação posterior. As imagens 2.3 e 2.4 ilustram, respectivamente, essas duas propostas.

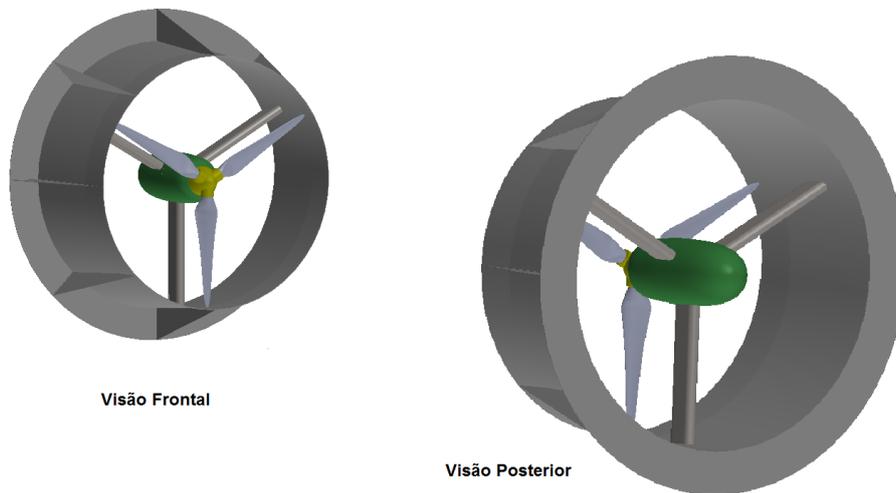


Figura 2.18 - Ilustração dos suportes de fixação interno da turbina no difusor



Figura 2.19 - Ilustração dos suportes de fixação posteriores da turbina no difusor  
(Fonte: adaptado de Windlens, 2104)

Na fixação interna, o suporte é engastado em locais estratégicos na superfície da parede interna do difusor e na estrutura da turbina. Foi pensado em um conjunto de três suporte com formato Y, pois quando unidos a estrutura de fixação, criarão uma malha de rigidez impedindo a estrutura de ceder. Outro detalhe importante é que os suportes devem estar próximos aos centros de massa da turbina e do difusor, minimizando os efeitos dos momentos de força.

Já os suporte de fixação posterior, colocados externamente a jusante da estrutura, tem como principal vantagem a menor influência na eficiência do difusor, porém são mais aplicado em difusores com flange frontal e em turbinas com nacele alongada.

Os suportes foram divididos em dois grupos: os superiores e o inferior. Os suportes superiores são simétricos e sofrem esforços muito semelhantes. O suporte inferior deve ser analisado separadamente, pois é peculiar aos outros. Para implementação destes suportes, é preciso rever o projeto do chassi e da estrutura para garantir que ela irá suportar os novos esforços. A figura 2.5 mostra a divisão dos tipos de suporte.

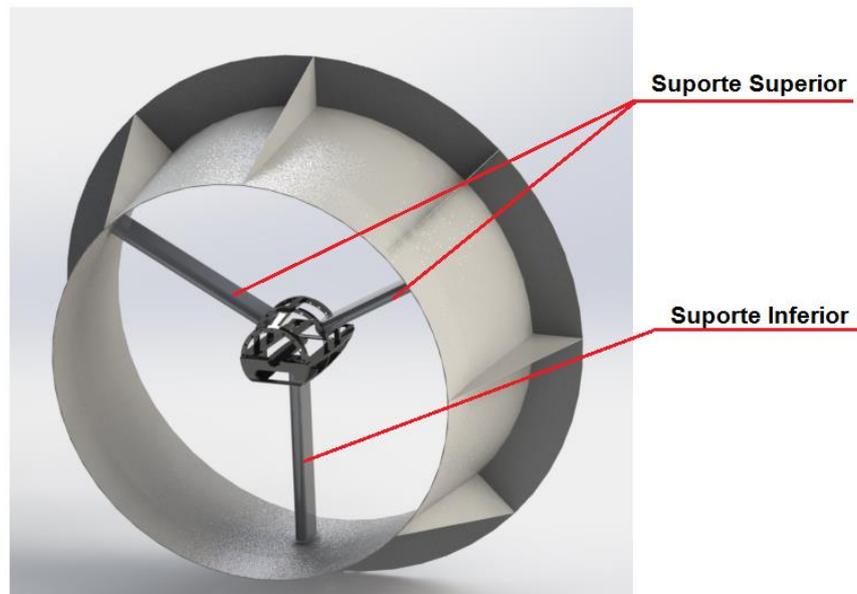


Figura 2.20 - Especificação dos suportes superiores e o suporte inferior

## 2.6.2 Processo Construtivo

Como estudado anteriormente, o alumínio naval apresenta boas propriedades mecânicas e é financeiramente positivo, assim, a liga de alumínio 5052 foi utilizada no projeto, com um limite de escoamento de 65 MPa, limite de resistência a tração de 170 MPa e massa específica de  $2,68 \text{ g/cm}^3$ , segundo o catálogo da GGD METALS.

O projeto foi idealizado de tal forma a se obter suportes passíveis de serem usinados, conformados mecanicamente ou fundidos, podendo ainda utilizar os processos de soldagem, rebites ou parafusos na montagem. A soldagem, se bem realizada, tem como vantagem a garantia de perfeita vedação e qualidade na montagem estrutural.

O primeiro protótipo do projeto dos suportes superiores era bem simplificado e robusto, além disto, exigiria alterações significativas na estrutura da espinha para união das partes ao suporte. Na segunda proposta, alterou-se a geometria do corpo do suporte a fim de simplificar sua fabricação e acrescentou-se um ponto de fixação semelhante ao de estruturas treliçadas. Por fim, foi concebido um terceiro projeto, em que foi proposto outro ponto de fixação entre o suporte e a espinha, buscando, principalmente, minimizar as alterações do projeto da mesma. O projeto final, da figura 2.20, prevê o corpo do suporte fabricado de chapa, enquanto a sua ponta, que promove a união a espinha, é uma peça usinada, e que deve ser soldada posteriormente ao corpo do suporte.

Para a fixação dos suportes no difusor, foram previstas abas de fixação que seguem o perfil da parede interna do difusor, com isto, há um aumento da área de contato entre o difusor e o suporte. As figuras 2.18, 2.19, 2.20 ilustram detalhes de cada uma das etapas de criação dos suportes superiores.

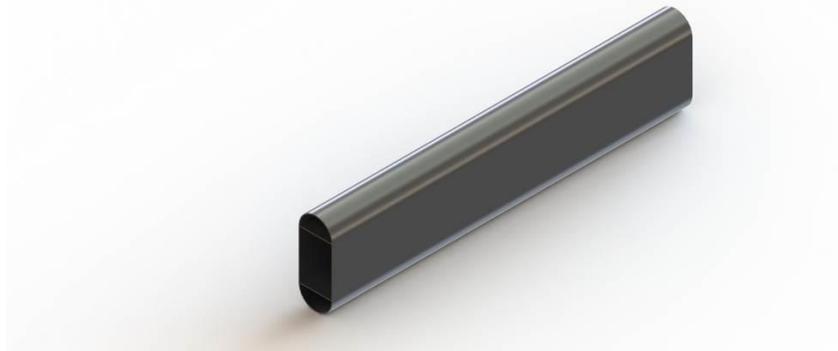


Figura 2.21 – Primeira proposta para os suportes superiores da turbina.

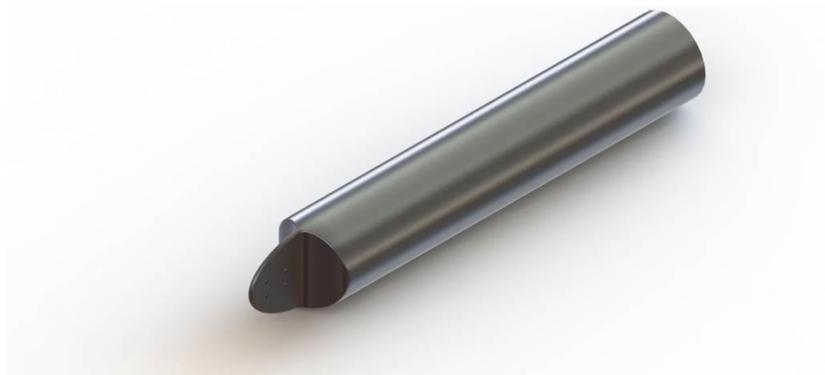


Figura 2.22 - Segunda proposta para os suportes superiores da turbina.



Figura 2.23 - Terceira proposta para os suportes superiores da turbina.

Já o suporte inferior tem um projeto diferenciado devido aos esforços sofridos e pela método de união ao chassi da turbina. Inicialmente, o protótipo era bem simplificado e robusto também, o que exigiria alterações bruscas na estrutura do chassi e na espinha para união das partes ao suporte. Trata-se de um copo cilíndrico com abas de sustentação que vai ser ligado diretamente ao chassi por solda, como está ilustrado na figura 2.21.



Figura 2.24 - Proposta para o suporte inferior da turbina.

### 2.6.3 Considerações Complementares para Fabricação e Instalação

Primeiramente, as considerações com relação as abas e placas que promovem a ligação e a estabilidade dos suportes ao difusor. Para fabricação das placas, as peças podem ser facilmente forjadas à quente com uma das matrizes moldada com a angulação da parede do difusor. Em seguida, a peça passaria por um procedimento de corte para a retirada das rebarbas, além de um tratamento superficial para poder ser usinada. As abas são chapas que podem ser facilmente cortadas de acordo com um gabarito e soldadas ao corpo cilíndrico.

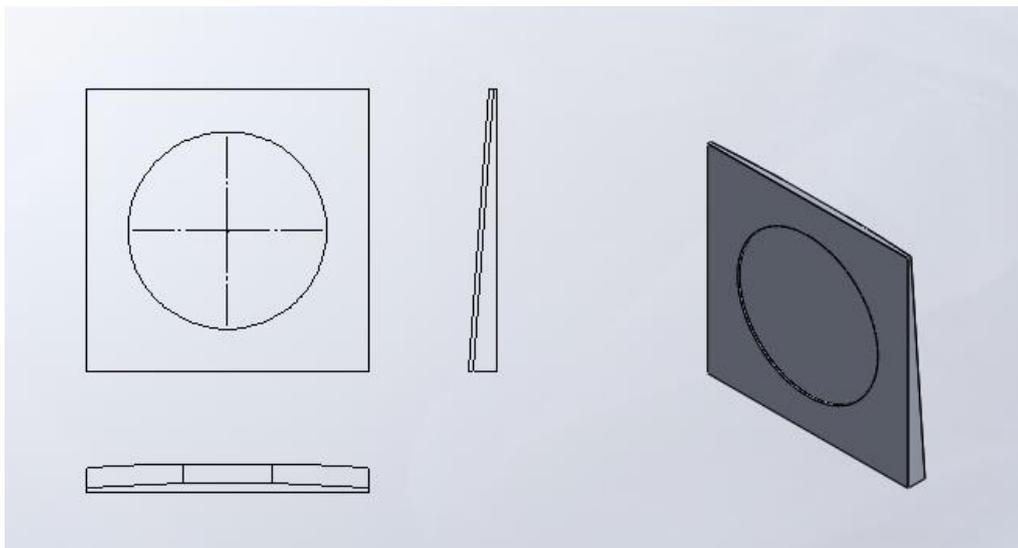


Figura 2.25 - Ilustração da base dos suportes.

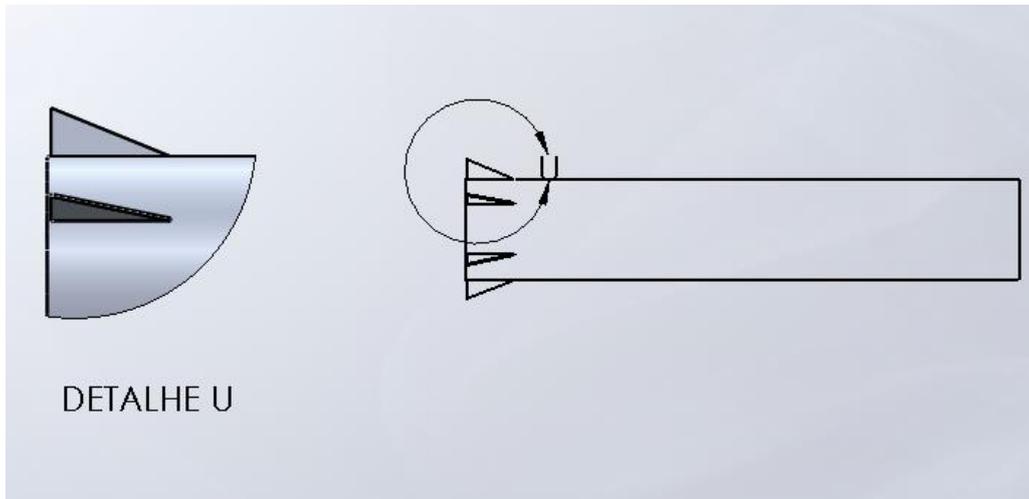


Figura 2.26 - Ilustração das abas de sustentação dos suportes.

A fabricação do suporte superior como peça única seria extremamente complexa, assim, dois elementos foram pensados: a cabeça do suporte superior (1) e o corpo cilíndrico do suporte superior (2). O corpo cilíndrico do suporte, pode ser extrudado, encurvado com costura linear ou encurvado com costura espiral, predominando o mais barato. No caso do encurvamento, precisa ser soldada ao final para unir as suas extremidades. Com relação as cabeças dos suportes superiores, parte que une o corpo cilíndrico ao esqueleto da nacela, é uma peça maciça usinada, e que, ao final, deve ser soldada ao corpo cilíndrico para formar a peça única, como pode ser visto na figura 2.27.

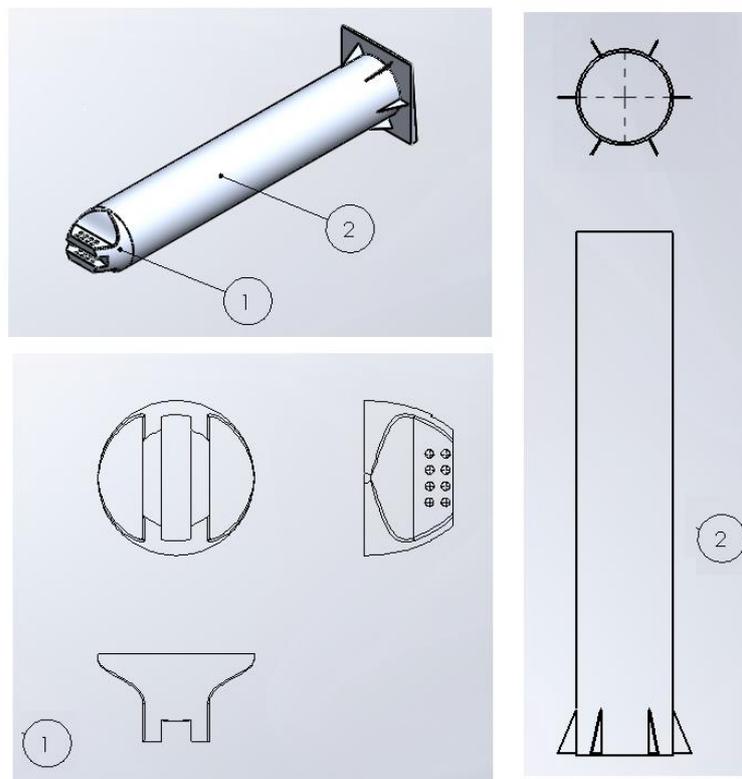


Figura 2.27 - Peças do suporte superior da turbina.

Para união das abas ao corpo do suporte, das abas ao difusor e do suporte inferior, propõe-se utilizar a soldagem. Visto isto, primeiramente, é necessário selecionar qual o processo mais adequado. Para esta seleção, devem ser feitas considerações técnicas, de produção e econômicas (Parmar, 1995). As considerações técnicas envolvem as propriedades dos materiais, sua espessura, projeto da junta e, também, acessibilidade bem como a posição de soldagem. As considerações de produção envolvem a forma e o tamanho da peça de trabalhado, as taxas de deposição, a disponibilidade de materiais a serem consumidos durante o processo, a manutenção do equipamento, fumos e respingos causados durante a operação, o pré-aquecimento e o tratamento necessário pós-solda, a habilidade do operador, a possibilidade de mecanização e automação e a compatibilidade com outros processos. Por fim, as considerações econômicas buscam avaliar os custos envolvendo cada processo.

Diante destes parâmetros, o processo mais adequado é o MIG, pois apresenta características fundamentais, como: alta taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador, grande versatilidade quanto ao tipo de material, incluindo alumínio utilizado, e espessuras aplicáveis, não existência de fluxos de soldagem e, conseqüentemente, ausência de operações de remoção de escória e exigência de menor habilidade do soldador. Além disto, quando comparado com a solda TIG, a MIG é um procedimento muito mais barato e mais fácil para encontrar mão-de-obra capacitada.

A tabela 2.9 mostra os parâmetros determinados para a soldagem MIG deste projeto. O método selecionado é o mais comum e também o preferido para a soldagem do alumínio, o processo de transferência por aerossol, o qual independentemente da espessura do material ou da posição de soldagem. A alta condutividade térmica do alumínio é tal que, mesmo com o alto aporte térmico desenvolvido na soldagem com transferência por aerossol, a taxa de solidificação da poça de fusão é alta o suficiente para permitir a soldagem fora de posição.

O gás de proteção deve ser uma mistura de argônio e hélio (Ar -25%, He-75%), essa mistura comumente utilizada é largamente empregada na soldagem automática de alumínio com espessura maior que 25 mm. O arame selecionado é o ER5654, o qual tem composição químicas muito próxima ao do material base. Os demais parâmetros, como corrente, tensão, taxa de deposição, variam em função da espessura das chapas que serão soldadas.

Tabela 2.10 - Parâmetros de Soldagem do Projeto

<b>Parâmetro de Soldagem</b>	<b>Especificação</b>
Método de Soldagem	Aerossol
Gás de Proteção	Argônico (25%) + Hélio (75%)
Arame	ER5654
Espessura da Peça (mm)	10 a 30
Diâmetro do Arame (mm)	1,6
Corrente de Soldagem (A)	230-240
Tensão (V)	22-24
Velocidade de Alimentação do arame (mm/s)	9 a 11
Taxa de Deposição (kg/h)	3
Distância do bocal à peça de trabalho (mm)	15-25

(Fonte: ESAB, 2014; Parmar, 1995)

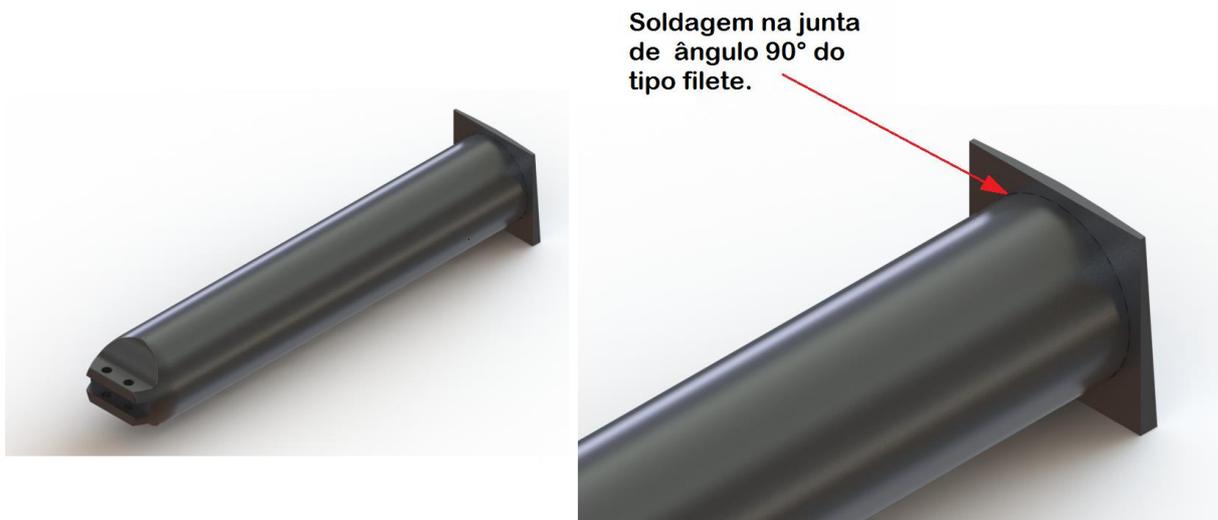
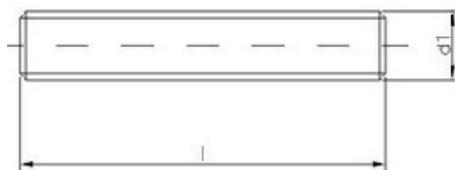


Figura 2.28 - Suportes superiores da turbina com aba de ligação.

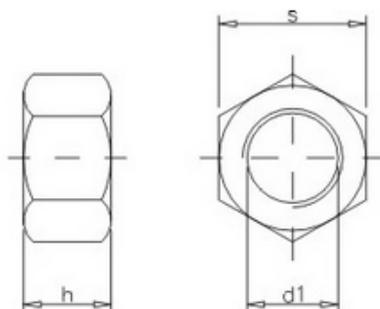
Já a fixação do suporte ao chassi e ao esqueleto deve ser realizada através retalhos de barras roscadas galvanizados devido ao grande comprimento. Este método é muito aplicado por empresas de ar condicionado na fixação de *chillers*, nas indústrias petroquímicas para fixação de vasos de pressão, válvulas, flanges. Existem diversos fabricantes e revendedores, sendo a Ciser, a Fusopar, a TecFixadores muito conhecidas. Foi selecionado a barra roscada G7 de 1.1/2", segundo a ASTM A-193 GRAU B7. Os pedaços devem ter comprimento L igual a 385 mm para que haja espaço para as porcas e arruelas em ambos os lados.



Bitola(d1)	1.1/2
Material	ACO A193 - B7
Met. ou Pol.	POLEGADA
Norma Dimensões	A193-B7

Figura 2.29 - Especificações da barra roscada de fixação  
(Fonte: Fusopar, 2014)

As porcas de aço carbono correspondetes a barra utilizada devem ser temperadas e zincadas à fogo, de acordo com a norma ASTM A-194 GRAU 2H. No caso, com bitola de 1.1/2" do tipo 2H UNC.



Bitola(d1)	1.1/2
Met. ou Pol.	POLEGADA
Norma Dimensões	ANSI / ASME B 18.2.2
Norma Rosca	ANSI / ASME B 1.1
FPP	6
Chave MM.(s)	60,32
Chave Pol.(s)	2 3/8
Altura Min.(h)	36,4
Altura Max.(h)	38,23
Tipo	STANDARD
Material	ACO CARBONO - GRAU 2

Figura 2.30 - Especificações da porca correspondete para fixação.  
(Fonte: Fusopar, 2014)

As arruelas são estruturais de aço carbono, e devem ser reforçadas e zincadas, de acordo com a norma ASTM F-436. No caso, com bitola de 1.1/2" e diâmetro externo máximo de 15 mm para evitar interferências na montagem.

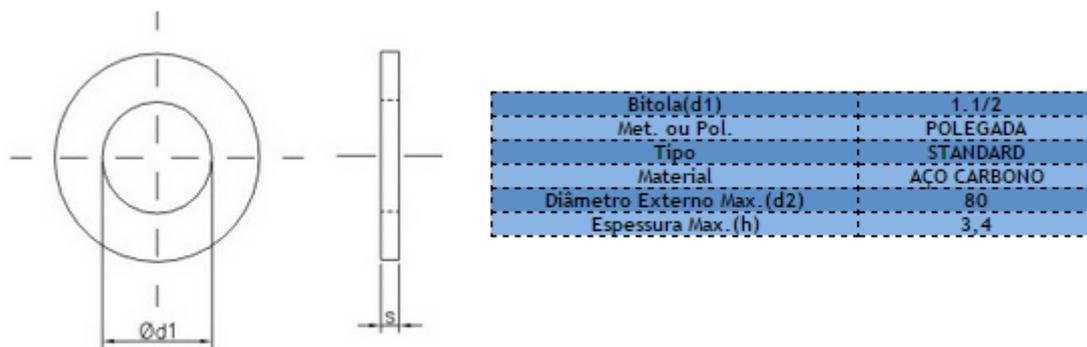


Figura 2.31 - Especificações da aruela correspondete para fixação.  
(Fonte: Fusopar, 2014)

Estes elementos não ficarão expostos a meio de trabalho, logo a exigência de serem zincadas é suficiente para lidar com ambiente úmido apenas. A figura 2.32 mostra o detalhe dos furos passantes que receberão os elementos de fixação na cabeça dos suportes superiores.

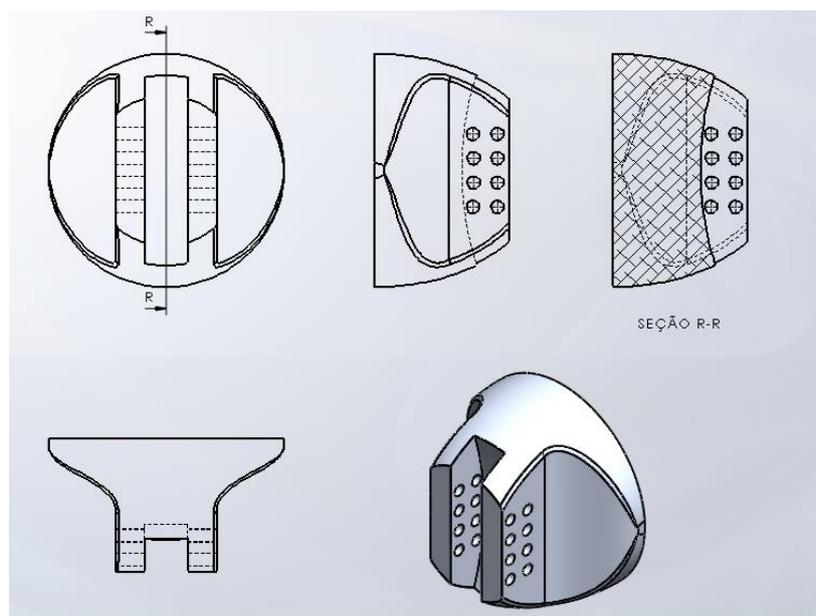


Figura 2.32 - Ilustração dos furos passantes de fixação.

Por fim, como a estrutura da nacele será perpassada pelo suporte, deixando um furo passível de penetração e infiltração de água, deve-se utilizar um selante de silicone à base de poliuretano (PU) de alto desempenho. Após a aplicação e passado o tempo de cura indicado pelo fabricante, este material proporciona ótima vedação. Outra solução, é pressurizar a parte interna da nacele, impedindo a entrada de água, de forma semelhante ao que foi especificado por Quixadá (2014) para o selo mecânico do hub. Esta alternativa exige um estudo detalhado para ser implementado, que não é foco deste projeto.

## 2.6.4 Análise dos Esforços

O projeto final dos suportes necessita ser avaliado quanto à sua integridade estrutural. Para isso, foi realizada uma análise em elementos finitos de modo a garantir que cumpra seu papel de sustentação e avaliar a distribuição de tensões pela sua geometria. A análise foi feita para o suporte inferior e apenas um suporte superior, uma vez que as peças superiores sofrem esforços semelhantes.

A análise foi realizada da seguinte maneira: engastou-se os suportes nos locais onde serão soldados nas bases de sustentação e aplicou-se as respectivas forças de reação geradas pela turbina, pelo arrasto do escoamento. O arrasto foi estimado em relação a um coeficiente de arrasto igual a 1,5 (cilindro liso) considerando um Reynolds de  $10^3$ .

Para o suportes inferior da turbina, com as condições de contorno determinadas, foi gerada uma malha com elementos de três graus de liberdade e com tamanho máximo de 67 mm. A malha é constituída por 94406 nós e 50486 elementos. A figura 2.5 ilustra a malha gerada para este componente.

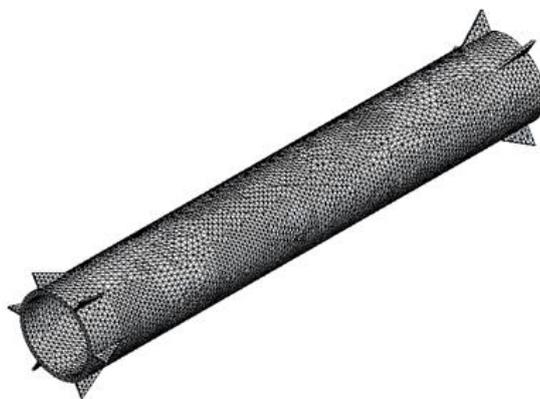


Figura 2.33 - Malha gerada para o estudo da suporte inferior.

Os resultados obtidos para o ensaio do suporte inferior da turbina fabricados com o alumínio naval 5250 são mostrados nas Figuras 2.34 a 2.36.

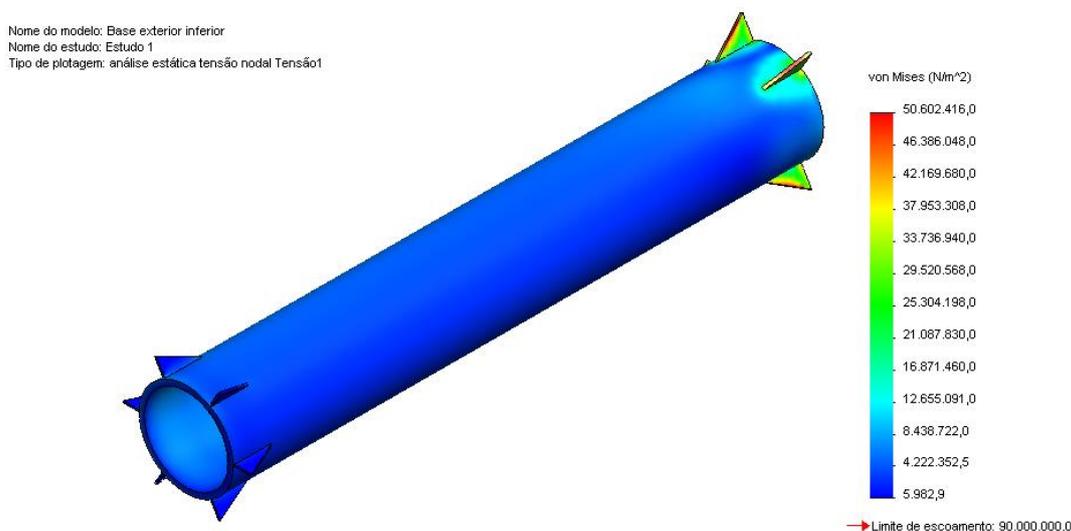


Figura 2.34 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do suporte inferior

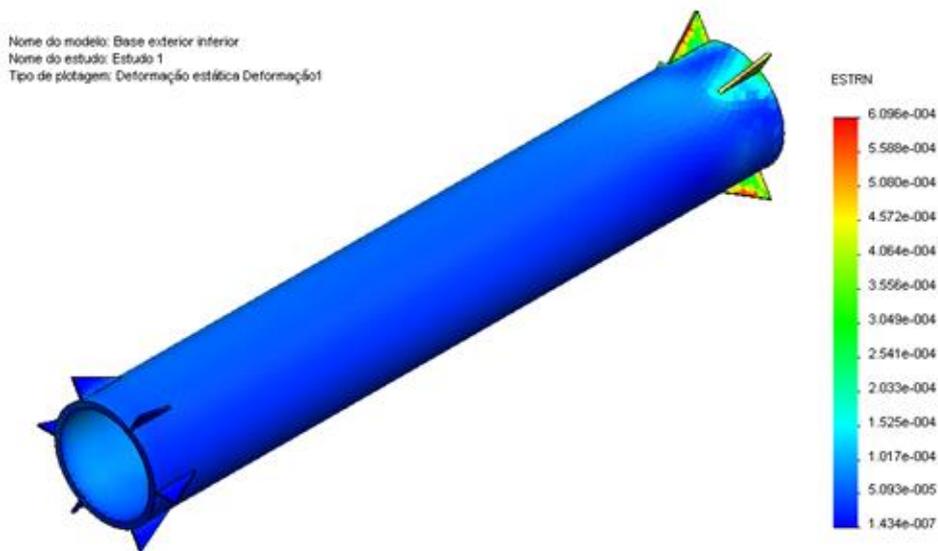


Figura 2.35 – Deformação equivalente da análise do suporte inferior.

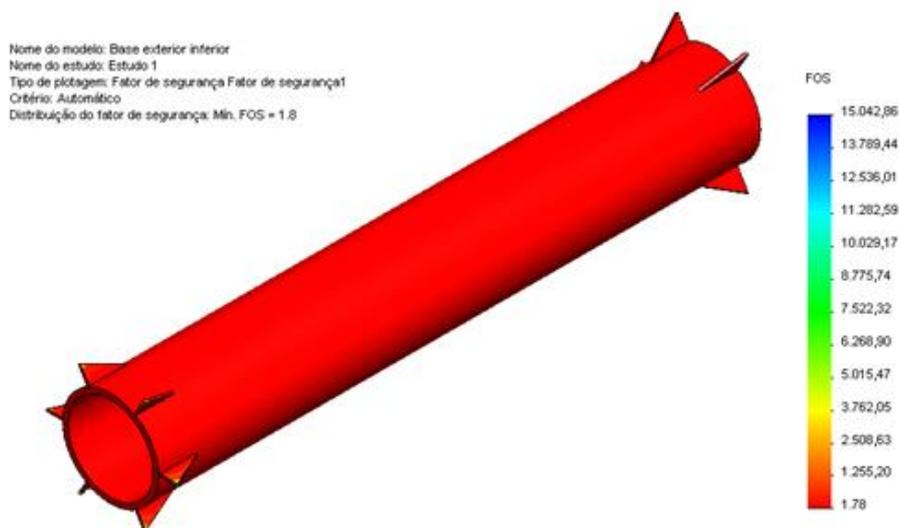


Figura 2.36 – Fator de segurança do suporte inferior.

Tabela 2.11 – Resultados da análise por MEF do suporte inferior da turbina.

Resumo	Valor
Fator de Segurança	1,8
Deformação Equivalente Máxima (m/m)	0,0006
Tensão Equivalente de Von Mises (MPa)	50,6

Já para o suporte superior da turbina, com as condições de contorno determinadas, foi gerada uma malha com elementos de três graus de liberdade e com tamanho máximo de 15 mm. A malha é

constituída por 257708 nós e 150372 elementos. A figura 2.34 ilustra a malha gerada para este componente.



Figura 2.37 - Malha gerada para o estudo da suporte superior.

Os resultados obtidos para o ensaio do suporte superior da turbina fabricados com o alumínio naval 5250 são mostrados nas Figuras 2.38 a 2.40.

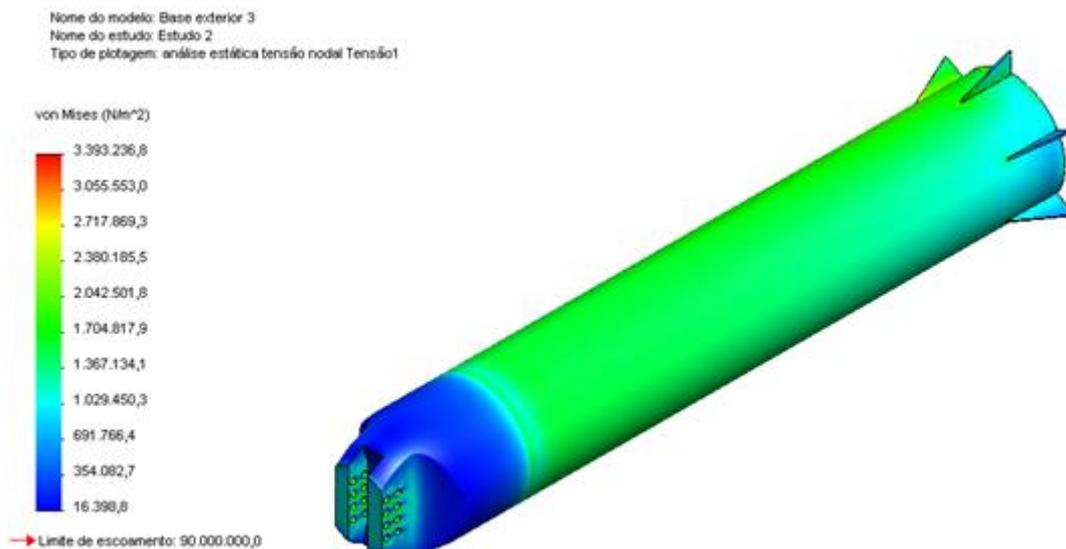


Figura 2.38 - Tensão equivalente de Von Mises para análise do suporte superior.

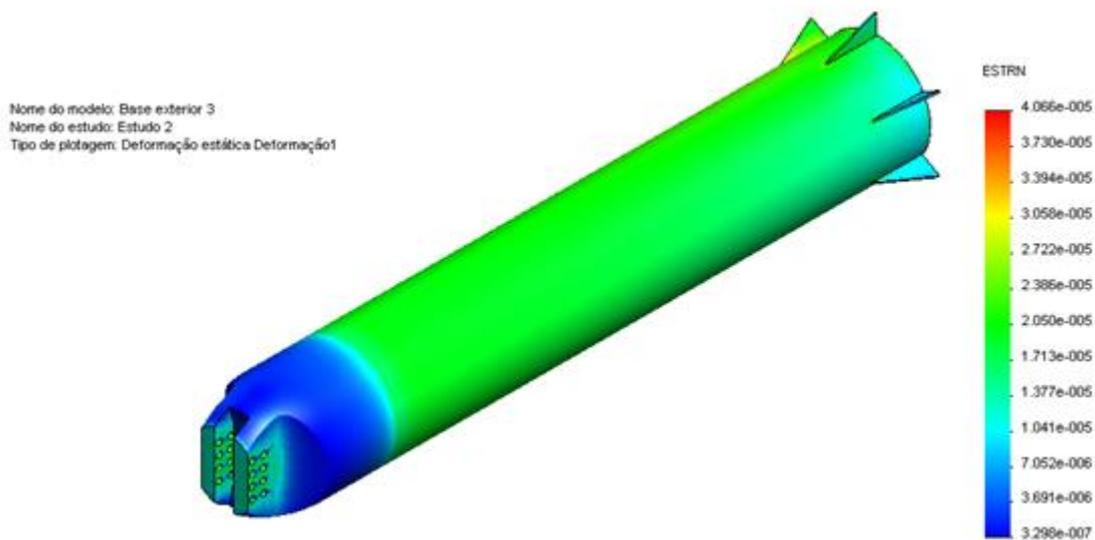


Figura 2.39 - Deformação equivalente da análise do suporte superior

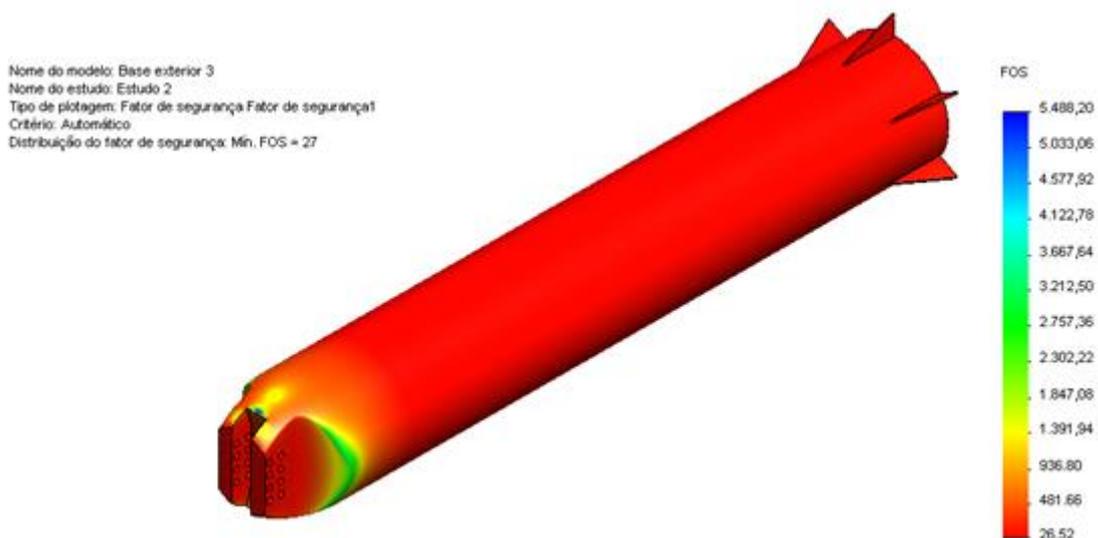


Figura 2.40- Fator de segurança do suporte inferior.

Tabela 2.12 - Resultados da análise por MEF do suporte superior da turbina.

Resumo	Valor
Fator de Segurança	26
Deformação Equivalente Máxima (m/m)	> 0,0001
Tensão Equivalente de Von Mises (MPa)	33,9

Os resultados acima mostram que a solução adotada para ambos os suportes é satisfatória, uma vez que sua integridade está resguardada, como indicam seus fatores de segurança mínima acima de 1,8.

## 2.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os objetivos desta etapa eram fazer uma análise crítica da inclusão de um difusor no projeto da turbina hidrocínética e realizar um estudo de alguns materiais com aplicabilidade para fabricação deste elemento mecânico. Em seguida, fazer uma análise de custo dos materiais, sendo este um fator determinante para seleção final. Com a possibilidade de adição deste componente, se fez necessário também um projeto dos suportes de ligação entre difusor e turbina.

Ao longo do estudo, notou-se como é complicado obter um material que possua todas as características ideais para um projeto, cabendo ao projetista determinar aquelas que são fundamentais para a seleção final. No caso, em que as propriedades mecânicas de todos eram satisfatórios, os fatores econômicos foram determinantes.

Pode-se concluir que a implementação do difusor é válida na busca por maior eficiência e produção de energia. Assim, decidiu-se pela utilização do alumínio naval 5052 como material base, o qual atendia as exigências do projeto, principalmente por ter boas propriedades mecânicas, massa específica baixa e custo final inferior aos demais. O compósito alcançou resultados muito parecidos com o alumínio, porém há muitas incertezas com relação ao seu comportamento, principalmente devido ao porte da estrutura.

A outra fase desta etapa era projetar os suportes de sustentação da turbina no difusor. O processo de criação foi feito a partir de um conceito pré-existente e simplificado, evoluindo até o modelo adotado. Métodos de fixação, material utilizado, aspectos de fabricação, análise de esforços, todos foram estudados no capítulo. A grande dificuldade foi conceber parte de um projeto com indefinições das outras partes do projeto, como por exemplo, o projeto da nacela que não foi finalizado.

### Propostas Futuras

No caso do Projeto Tucunaré, contruir diversos difusores a partir de diferentes materiais e testá-los reproduzindo as condições do rio é inviável. Logo, torna-se essencial fazer simulações numéricas para garantir a confiabilidade e a viabilidade da fabricação desse componente. Além disto, esses resultados mostram especificidades do projeto que precisam ser aperfeiçoados e pontos que podem ser otimizados. Neste projeto foram feitas simulações estáticas apenas, assim, para complementar o estudo, propõe-se avaliar o comportamento da estrutura nas condições dinâmicas impostas pelo escoamento.

Outra proposta, com a inclusão do difusor e dos suportes ao conjunto da turbina hidrocínética, é preciso rever o projeto da estrutura do chassi e da espinha, os quais estarão sendo submetidos a esforços diferentes.

Por fim, dando continuidade ao projeto dos suportes, propõe-se um refinamento destes elementos a fim de minimizar os efeitos de sua inclusão na eficiência da turbina e do difusor. Pode-se pensar, assim, em suportes com uma hidrodinâmica mais apurada.

## 3 TRANSPORTE DE CARGAS E EQUIPAMENTOS

Para que a turbina chegue ao destino, deve-se pensar em um planejamento de transporte da carga, já que existem normas e leis regulamentadoras para atividade e serviços em vias de transporte terrestres, aquaviárias e aéreo. Além disso, o transporte, quando relacionado a montagem, tem uma grande influência nos custos finais do projeto. Peso, licenças especiais, restrições, tipo de carga, todos esses fatores são importantes para garantir o traslado do conjunto da turbina. Os pormenores das leis não são foco de estudo desse trabalho, mas cabe aqui algumas observações importantes, principalmente com relação as exigências dimensionais e de peso, que irão contribuir para uma avaliação das vantagens e das desvantagens de cada forma de transporte disponível.

Em suma, existem dois fatores mutuamente opostos em evidência. De um lado, a montagem feita no local de fabricação da turbina, o que promove economia de tempo, de trabalho e de custo. Em contrapartida, podem existir limitações dimensionais no transportar do conjunto pronto, tendo-se que realizar a montagem no próprio sítio. É possível fazer uma analogia com turbinas eólicas menores, em que o problema do transporte e montagem *in loco* é considerado um critério econômico. Para manter os custos de transporte baixos, os tamanhos máximos dos componentes se torna um fator determinante (Hau, 2006).

Sabendo da importância do custo e do local de montagem para o plano de transporte, a adequação aos detalhes das normas ou leis também é fundamental. Por exemplo, para estruturas de concreto a movimentação do concreto bruto por longas distâncias encarece muito o projeto. Estruturas assim tendem a ser pré-fabricadas, porém, dentro das exigências dimensionais e de peso estipuladas por lei.

No caso do Projeto Tucunaré, existem vantagens e limitações que devem ser pontuadas. Por exemplo, entre as vantagens, a principal é a presença da Bacia do Tocantins – Araguaia, que torna o transporte aquaviário um alternativas interessante. Em contrapartida, é um local extremo do país, longe dos pólos industriais e de difícil acesso.

### 3.1 TRANSPORTE TERRESTRE

Entende-se como transporte terrestre qualquer modo de condução de carga por vias terrestres, seja por ferrovias ou por rodovias, que contribua para a mobilidade entre locais. Todas as vias terrestres tem uso regulamentado pelo órgão com circunscrição sobre ela, assim, existem regras impostas para sua utilização. Nessa parte do estudo, serão analisados ferrovias e rodovias separadamente.

#### 3.1.1 Ferrovias

Transporte ferroviário é o realizado sobre linhas férreas para transportar pessoas e mercadorias. As mercadorias transportadas neste modal são de baixo valor agregado e em grandes quantidades como: minério, produtos agrícolas, fertilizantes, carvão, derivados de petróleo, etc. Destaca-se que grande parte da malha ferroviária do Brasil está concentrada nas regiões sul e sudeste com predominância para o transporte de cargas.

De acordo com o Agência Nacional de Transporte Terrestre, as primeiras ferrovias construídas no Brasil foram estimuladas por capitais privados, nacional ou de países estrangeiros, que tinham o desejo de obter uma infraestrutura de transporte ferroviário capaz de levar a produção agrícola dos interiores aos principais centros urbanos e portos brasileiros. Assim, começou a se desenvolver o transporte ferroviário no Brasil, passando a integrar alguns dos estados brasileiros, buscando uma forma eficiente de transportar pessoas e cargas de maneira mais rápida, segura e em grandes quantidades. A figura 3.1 ilustra um conjunto de pás de turbinas eólicas sendo transportado via ferrovia.

Por volta da década de 50, o transporte ferroviário brasileiro passou por algumas crises devido ao processo de industrialização e de urbanização que favoreceu o transporte rodoviário no país. As empresas que eram lucrativas começaram a falir e surgiu a necessidade da estatização de várias companhias ferroviárias. Nas década seguinte, de 70, principalmente, as crises econômicas brasileiras obrigaram a privatização das ferrovias. Atualmente, as principais ferrovias são operadas por empresas privadas que trabalham com produtos primários, proporcionando aumento dos custos e limitando o tipo de carga. Além desse cenário, o Brasil possui uma malha ferroviária pequena e polarizada em relação a suas dimensões.



Figura 3.1 - Trem transportando as pás de uma turbina eólica.  
(Fonte: Lovatto, 2012)

Para o Projeto Tucunaré, pode ser interessante esse meio de transporte, pois há linhas ligando o Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país ao estado do Pará, mais especificamente a Belém, cidade que fica, aproximadamente, à 400 km da UHE de Tucuruí, local de instalação da turbina. Uma das principais vias é a EF-151, denominada Ferrovia Norte-Sul, concessionarizada pela Vale S.A. A EF-151 vai do Rio Grande-RS até Belém-PA, passando pelos estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Tocantins e Maranhão. Dela saem diversas ramificações de acesso a região litorânea e aos pólos industriais e comerciais, como pode ser visto na figura 3.2.



Figura 3.2 - Trechos Ferrovia Norte-Sul e possíveis ramificações  
(<http://migre.me/jcqXo> , acessado em 15 de maio de 2014)

### 3.1.2 Rodovias

As ruas, estradas e rodovias são vias terrestres regidas pelo Código de Trânsito Brasileiro, instituído pelo CONTRAN. Nele, há uma série de determinações legais para garantir o funcionamento e a manutenção dessas vias. Diversas obrigatoriedades, classificações, limitações dimensionais e de peso são citadas no extenso Código. Como dito anteriormente, os pormenores da lei não são foco de estudo desse trabalho, mas cabe aqui algumas observações importantes, principalmente com relação as exigências dimensionais e de peso.

Para o caso, cabe também avaliar as características da malha rodoviária do Brasil. Muito se sabe do estado deplorável de grande parte das estradas e das dimensões continentais do país, e isso gera custos extras, contudo, existem vantagens que devem ser consideradas também. Pode-se dizer, por exemplo, que o Brasil possui uma rede extremamente ramificada e interligada de norte a sul, principalmente entre as capitais. Além disso, tem um custo relativamente baixo e disponibilidade alta.



Figura 3.3 - Nacele de uma turbina eólica.  
(<http://goo.gl/tPUDAx>, acessado em 16 de maio de 2014)

Com relação aos peso e dimensões, a Resolução nº 318 (2009), estabelece limites para circulação de veículos de transporte de cargas pelo território nacional. Os limites dimensionais variam de acordo com o tipo de veículo, mas para efeito de análise, utilizou-se os dados do tipo veicular mais convencional para transporte utilizado no país, o caminhão com reboque. Já os limites de peso variam de acordo com o número de eixos e rodas, estipulando um peso bruto total máximo de 45 toneladas. A tabela 3.1 e 3.2 explicita os dados mostrado na lei.

Tabela 3.1- Limites dados pela CONTRAN de peso bruto transmitido por eixo às superfícies das vias públicas.

Especificações do Veículo	Peso Máx (t)
Eixo simples dotado de 2 (duas) rodas	6
Eixo simples dotado de 4 (quatro) rodas	10,5
Eixo duplo dotado de 4 (quatro) rodas	10
Eixo duplo dotado de 6 (seis) rodas	14
Eixo duplo dotado de 8 (oito) rodas	18
Eixo triplo dotado de 6 (seis) rodas	14
Eixo triplo dotado de 10 (dez) rodas	21
Eixo triplo dotado de 12 (doze) rodas	25,5

Entende-se por eixo duplo e triplo o conjunto de dois eixos cuja distância entre o centro das rodas seja igual ou superior a 1,20 metros e igual ou inferior a 2,40 metros. Outro detalhe é que na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária é admitida à tolerância máxima de 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares, para suprir a incerteza de medição do equipamento, conforme legislação metrológica.

Tabela 3.2 - Limites Dimensionais de acordo com o tipo de veículo

Dimensão avaliada para cada tipo de veículo	Dimensão (m)	
Comprimento máximo	Caminhão Simples	14
	Caminhão Reboque	20
	Reboque	8,6
	Caminhão-trator com semi-reboque	18,6
	Caminhão trator com semi-reboque e reboque	20,5
	Ônibus de longa distância	14
Largura máxima	Todos os veículos	2,6
Altura máxima	Ônibus de longa distância	4,1
	Caminhão	4,3

A circulação de veículos especiais ou de combinação de veículos com pesos ou dimensões superiores ao estabelecido somente será admitida através de autorização especial de trânsito, expedida de acordo com as normas estabelecidas pelas autoridades competentes.

## 3.2 TRANSPORTE AQUAVIÁRIO

De acordo com o Ministério do Transporte, o transporte hidroviário é o tipo de transporte aquaviário realizado nas hidrovias para transporte de pessoas e mercadorias. As hidrovias de interior tem percursos pré-determinados e podem ser rios, lagos e lagoas navegáveis que receberam algum tipo de melhoria, sinalizações e balizamento para que um determinado tipo de embarcação possa trafegar com segurança por esta via.

As hidrovias são de grande importância para este tipo de modal, visto que, através delas consegue-se transportar grandes quantidades de mercadoria a grandes distâncias. Nelas são transportados produtos como: minérios, cascalhos, areia, carvão, ferro, grãos e outros produtos não perecíveis. A figura 3.4 mostra partes de torres de turbinas eólicas sendo transportadas por um rebocador.



Figura 3.4 – Ilustração do transporte aquaviários de partes das torres de aerogeradores realizado por rebocador.

(Fonte: Windpower Engineering & Development, 2014)

Para o Projeto Tucunaré, é interessante avaliar a Bacia Tocantins e Araguaia, pois ela permite o acesso a jusante da UHE de Tucuruí, local de instalação da turbina hidrocínética. A figura 3.5 ilustra o acesso à Hidrelétrica de Tucuruí por essa bacia, além de citar algumas empresas que realizam esse tipo de transporte e os portos fluviais da área.

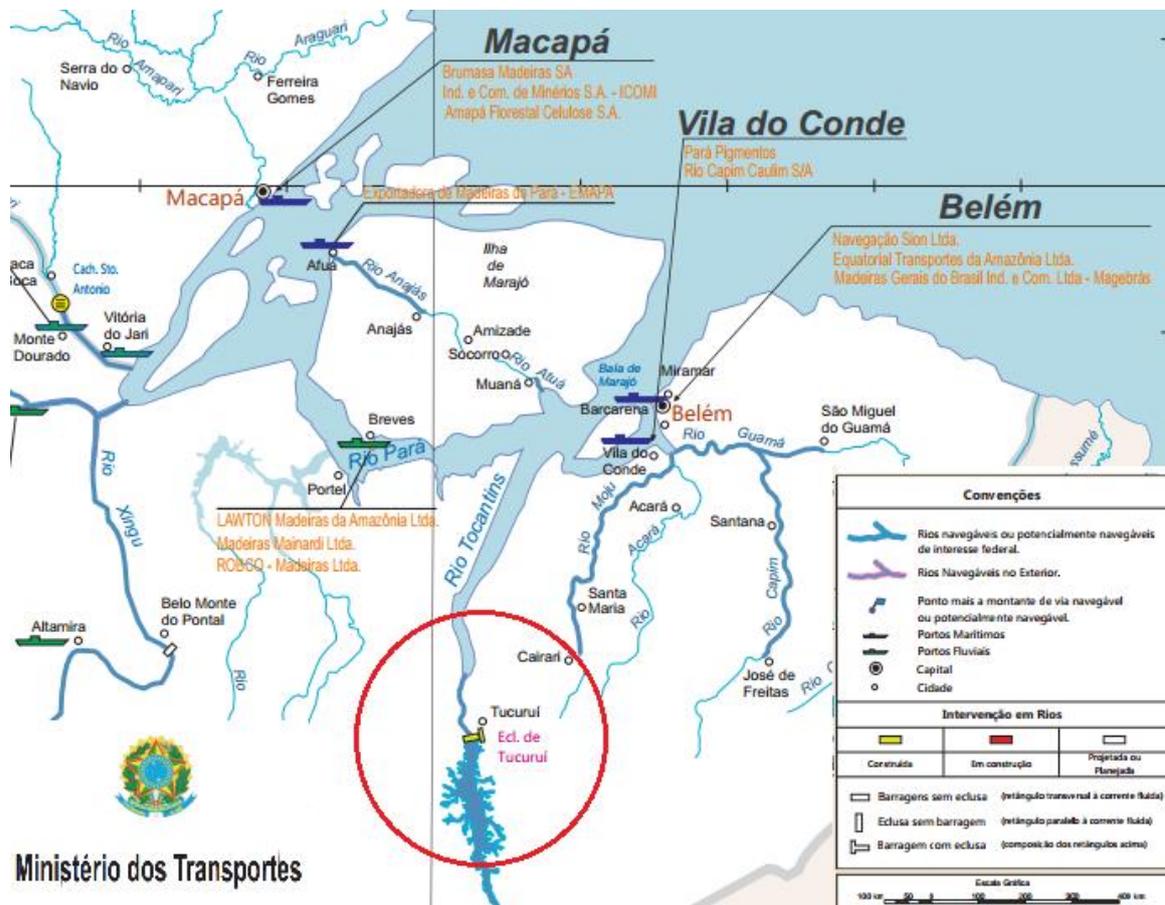


Figura 3.5 - Mapa da Bacia Tocantins-Araguaia e o acesso a UHE Tucuruí.  
(Fonte: adaptado de Ministério dos Transportes, 2014)

A partir dos dados técnicos fornecidos pelo Ministério do Transporte e pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), gerou-se a tabela 3.3 contendo informações e características que contribuem para a análise.

Tabela 3.3 - Dados da Hidrovia do Tocantins para navegação e transporte.

Dados da Hidrovia do Tocantins	Resultados
Características Físicas	
Extensão Navegável	420 km
Período de Águas Baixas	Junho - Novembro
Período de Águas Altas	Dezembro - Maio
Navegabilidade	
Sistema de Sinalização e Balizamento	Sim
Restrições	Não há
Combóio-Tipo	
Largura (L)	200 m
Boca* (B)	24 m
Calado** (C)	1,5 - 2,5 m

\* Boca são as dimensões do casco da embarcação.

\*\* Calado é a distância do casco da embarcação ao leito do rio e varia de acordo o nível do rio.

### 3.3 TRANSPORTE AÉREO

Transporte aéreo é o realizado por vias aéreas dentro do território nacional e internacional para transportar pessoas e mercadorias. O órgão responsável pela logística dessa modalidade no país é a Infraero, que tem função de administrar e fiscalizar o fluxo realizado pelas empresas de transporte em geral. O Brasil possui diversos aeroportos distribuídos pelo território, alguns apenas para passageiros, outros apenas para cargas e outros realizam ambas as funções, como pode ser visto na figura 3.6.



Figura 3.6 - Terminais de Logística de Carga da Infraero pelo país.  
(INFRAERO CARGO, 2014)

Apesar de ser um transporte extremamente seguro, eficaz e rápido, na maioria das vezes, o transporte aéreo de cargas esbarra na disponibilidade e nos limites quantitativos e dimensionais da carga, tornando os custos operacionais altíssimos. A figura 3.7 mostra parte de uma turbina eólica sendo colocada em um avião para o transporte.



Figura 3.7 - Transporte aéreo de uma turbina da Alstom  
(<http://goo.gl/ZLqySX>, acessado em 16 de maio de 2014)

## 3.4 ANÁLISE DE CUSTO DO TRANSPORTE

Essa etapa consiste em fazer uma avaliação dos custos envolvendo o transporte. Certamente, esse fator tem um peso muito grande na escolha do plano de transporte e montagem final.

Do ponto de vista de custos (Fleury, 2000), pode-se afirmar que o transporte representa, em média, cerca de 60 % das despesas logísticas. Ele pode variar entre 4% e 25% do faturamento bruto, e em muitos casos supera o lucro operacional. Dessa forma, iniciativas como a intermodalidade e o surgimento de operadores logísticos, ou seja, de prestadores de serviços logísticos integrados, apresentam relevante importância para redução dos custos de transporte, pois geram economia de escala ao compartilhar sua capacidade e seus recursos de movimentação com vários clientes.

### 3.4.1 Variáveis para Análise de Custo

O cálculo do frete de cada modal tem suas características e variáveis de custo próprias de acordo com as normas, as leis, os impostos e as exigências de cada um.

O frete rodoviário é calculado em diversos fatores, dentre os principais: as dimensões da carga, o peso da carga, a cubagem da carga, o valor da carga, o tipo de carga e as distâncias percorridas. Além destes, existem impostos, custos de manutenção, lucros da transportadora e seguros que devem ser adicionados ao custo final.

O frete ferroviário é baseado em dois fatores: quilometragem percorrida, ou seja, distância entre as estações de embarque e desembarque; e o peso da mercadoria. O frete ferroviário é calculado por meio da multiplicação da tarifa ferroviária pelo peso ou volume, utilizando-se aquele que proporcionar maior valor. O frete também pode ser calculado pela unidade de contêiner, independente do tipo de carga, peso ou valor da mercadoria.

A base de cálculo do frete aéreo é obtida por meio do peso ou do volume da mercadoria, sendo considerado aquele que proporcionar o maior valor. De acordo com a IATA (*International Air Transport Association*), estabeleceu-se a seguinte relação peso/volume: 1 kg = 6000 cm<sup>3</sup>.

A tarifa do frete básico hidroviário é composta basicamente dos seguintes itens: valor cobrado segundo o peso ou o volume da mercadoria (cubagem), prevalecendo sempre o que propiciar maior receita ao armador.

### **3.4.2 Variáveis da Montagem da Turbina**

O plano de montagem do conjunto afeta grandemente o transporte, já que nele estão envolvidos a variação das dimensões, do preço e do peso das cargas envolvidos. Para isto, levou-se em conta três possibilidades básicas: montagem prévia total, montagem parcial prévia, montagem posterior total.

A montagem prévia total consiste na construção e montagem total da turbina hidrocínética e do flutuador no local de fabricação. Desta forma, com relação ao transporte, a carga teria características especiais e específicas que tornam o frete mais complexo, pois seria um deslocamento de uma carga de dimensões e peso gigantescos até jusante da UHE de Tucuruí. Para tal, a utilização das hidrovias disponíveis é a alternativa muito boa. Neste formato, seria ideal transportar a turbina, unida ao flutuador e já imersa, com um rebocador no Rio Tocantins. Porém, devido a topografia do rio, torna-se impossível, pois há pontos em que a profundidade máxima do rio varia entre 1,5 e 4 metros, sendo que apenas o diâmetro das pás ultrapassa essa limitação, fora o diâmetro externo do difusor.

A montagem parcial prévia consiste na construção e montagem de partes da turbina hidrocínética que pouco interferem no transporte, finalizando a instalação de pontos críticos no local de fixação. Essa alternativa minimiza os trabalhos em campo, porém não os elimina. Por outro lado, com a divisão dos conjuntos a serem transportados, há uma diminuição das limitações e das exigências para o deslocamento da carga.

Por fim, a montagem posterior total, em que todo o projeto seria executado apenas no local de fixação da turbina. Essa alternativa pode ser facilmente justificada pela facilidade e rapidez do transporte, porém não se pode dizer o mesmo com respeito a montagem. Deve-se acrescentar a esta opção os custos e desdobramentos envolvendo deslocamento da mão de obra especializada e prever um local amplo de trabalho e com infraestrutura para montagem e construção da turbina.

No caso da instalação a jusante de Tucuruí, pode-se avaliar as condições de infraestrutura para a montagem, considerando os recursos técnicos e de maquinário disponíveis na UHE de Tucuruí.

### **3.4.3 Determinação dos Locais de Saída e Chegada**

Para tornar o estudo comparativo, visto que ainda não se conhece os locais exatos de fabricação dos componentes, estipulou-se cidades, ou referências, estratégicas para realização deste plano. Em princípio, decidiu-se partir do Rio de Janeiro-RJ, com escala em Belém-PA e como destino final a UHE de Tucuruí. Foi selecionada a cidade do Rio de Janeiro devida as suas características geográficas e econômicas, visto que todos os modais tem um ponto de partida ali, é um grande pólo industrial do

país e está bem localizado geograficamente. A cidade de Belém foi escolhida como escala devido a sua importância para a região norte, devido a sua localização geográfica na foz do Rio Tocantins, além de ter estrutura para receber todos os modais supracitados.

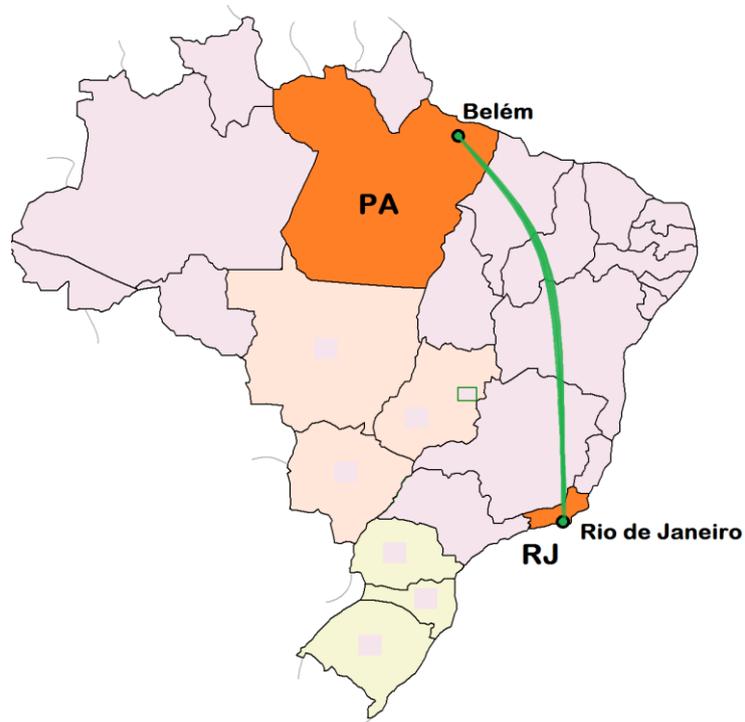


Figura 3.8 - Primeiro trecho estipulado, entre Rio de Janeiro e Belém, para o estudo.

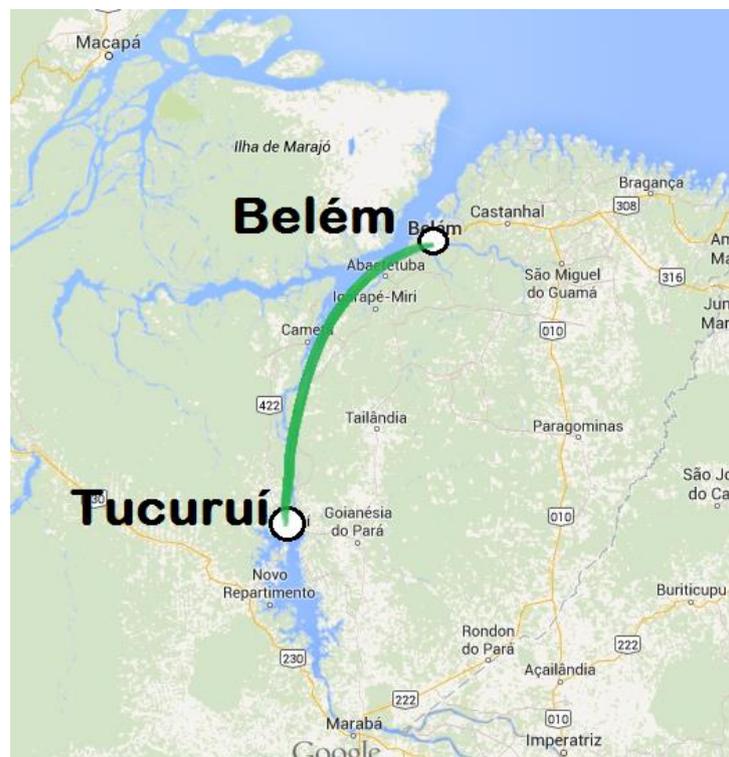


Figura 3.9 - Segundo trecho estipulado, entre Belém-PA e Tucuruí-PA, para o estudo.  
(Fonte: adaptado do Google Maps, 2014)

### 3.5 OUTRAS VARIÁVEIS PARA A SELEÇÃO DO MÉTODO DE TRANSPORTE

Para se escolher o modal certo para o transporte do produto que se deseja entregar, deve-se observar as características operacionais relativas por modal de transporte, além do custo. De acordo com Fleury (2000), em relação aos modais, há cinco pontos importantes para se classificar o melhor transporte: velocidade, disponibilidade, confiabilidade, capacidade e frequência.

Na tabela 3.4, pode-se observar estas características, sendo que a pontuação menor, significa que o modal possui excelência naquela característica.

Tabela 3.4- Características Operacionais (Fleury, 2000)

<b>Características</b>	<b>Ferroviário</b>	<b>Rodoviário</b>	<b>Aquaviário</b>	<b>Aéreo</b>
Velocidade	3	2	4	1
Disponibilidade	2	1	4	3
Confiabilidade	3	2	4	5
Capacidade	2	3	1	4
Frequência	4	2	5	3
<b>Total</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>16</b>

A velocidade é o tempo decorrido em dada rota, sendo o modal aéreo o mais rápido de todos. Já a disponibilidade é a capacidade que cada modal tem de atender as entregas, sendo melhor representado pelo transporte rodoviário, que permite o serviço porta a porta. A confiabilidade reflete a habilidade de entregar consistentemente no tempo declarado em uma condição satisfatória. Nesta característica, o rodoviário também ocupa lugar de destaque. A capacidade é a possibilidade do modal de transporte lidar com qualquer requisito de transporte, como tamanho e tipo de carga. Neste requisito, o transporte hidroviário é o mais indicado. Finalmente, a frequência é caracterizada pela quantidade de movimentações programadas, é liderada pelo rodoviário, devido a maior continuidade do serviço entre dois pontos.

Na pontuação total percebe-se que a preferência geral é dada ao transporte rodoviário. Este ocupa o primeiro e segundo lugar em todas as categorias, exceto em capacidade. No Brasil, ainda existe uma série de barreiras que impedem que todas as alternativas modais, multimodais e intermodais sejam utilizadas da forma mais racional. Isso ocorre devido ao baixo nível de investimentos nos últimos anos em conservação, ampliação e integração dos sistemas de transporte, pois houve mudanças pouco significativas na matriz brasileira, mesmo com as privatizações.

#### 3.5.1 Levantamento de Custos

Por fim, restou entrar em contato com algumas das principais transportadoras do Brasil solicitando custo do frete para cada modal e para cada modalidade de montagem.

Após a solicitação de orçamentos para várias empresas transportadoras dos modais descritos, optou-se por excluir dois tipos: aéreo e ferroviário. O aéreo, após contatar a TAM Cargo, foi descartado pela sua complexidade e alto custo, principalmente do seguro da carga. O ferroviário,

após contatar as empresas MRS Logística e VALE, atuantes nos trechos estipulados, também foi descartado pela falta de interesse das mesmas em realizar um tipo de transporte tão específico e esporádico, visto que, no Brasil, as ferrovias e trens são basicamente para o transporte de grãos e de minério.

Por fim, foi orçado o transporte realizado pela empresa Transportes Bertolini Ltda. Esta empresa trabalha com transporte rodoviário e aquaviário, além de atender aos locais estipulados no item 3.4.3. Para viabilizar e facilitar o orçamento, foi simulado o transporte de um *chiller*, um equipamento que tem características dimensionais e físicas muito semelhantes as do conjunto da nacela da turbina: um equipamento com grandes dimensões, peso considerável e alto custo.

Tabela 3.5 - Características da carga e custos da simulação do orçamento do frete.

<b>Características da Carga</b>	<b>Valor</b>
Comprimento (m)	5
Altura (m)	4
Largura (m)	2,5
Peso (kg)	6000
Valor da Nota Fiscal (R\$)	350.000,00
<b>Custo Final do Transporte (multimodal)</b>	
Fator Predominante	Valor da Nota Fiscal
Porcentagem da NF	11,5%
Custo Final (R\$)	40.250,00

Pela pesquisa, o cálculo do frete tem diversas variáveis e é muito volátil. Contudo, para cargas com valor agregado alto, normalmente, o custo varia dentro do intervalo de 3 a 15 % do preço da carga, crescendo de acordo com as distâncias dos trechos a serem percorridos.

### 3.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

A proposta desta etapa era fazer um planejamento do transporte dos elementos da turbina, do local de fabricação, até a UHE de Tucuruí para realizar a instalação da turbina hidrocínética. Para isto, foi feita uma análise crítica completa das diversas variáveis que estão envolvidas neste plano de transporte.

A metodologia adotada seguiu os seguintes passos: primeiramente, foram caracterizados todos os modais existentes, apresentando vantagens e desvantagens de cada um deles e algumas das suas exigências legais e normativas. Em seguida, para realização de uma análise de custo, foram especificadas diversas variáveis fundamentais para selecionar o tipo de transporte e orçar um frete. Características da carga, do procedimento de montagem, do trecho percorrido, da realidade enfrentada pelos modais no Brasil, todos são detalhes imprescindíveis ao plano de transporte.

Ao longo do estudo, surgiram muitas dificuldades, dentre elas, pode-se citar a complexidade para conseguir algumas informações, principalmente, da carga, já que o projeto construtivo ainda está em andamento. Em muitos casos, as próprias fabricantes fazem o transporte e diluem o frete no valor final do produto, o que dificulta o desmembramento dos custos para análise. Outro obstáculo foi encontrar

empresas interessadas em orçar um frete esporádico de um equipamento deste porte e tão peculiar. Ainda, pode-se citar as indeterminação dos locais exatos de saída e chegada da carga e a indefinição do preço da carga.

A fim de obter resultados mais concretos, algumas destas variáveis foram estimadas, por exemplo, para as condições atuais do projeto Tucunaré, conclui-se que é mais interessante se pensar em uma montagem posterior total, haja visto a dificuldade de encontrar transportadoras dos diversos modais que realizariam este serviço considerando a turbina como peça única. Mesmo que seja necessário um deslocamento de mão-de-obra, trabalhar com peças menores no transporte facilitaria essa etapa da instalação da turbina. No caso de rebocar a turbina imersa e montada, a ideia foi abortada devido a profundidade pequena em alguns trechos do trajeto.

Por fim, aferidas as condições de contorno necessárias citadas, através de uma simulação de um orçamento de frete, conheceu-se quais são as características primordiais para o desenvolvimento de um plano de transporte: o modal utilizado, o peso e dimensões da carga (montagem), o preço da carga e a cubagem da carga. Além disto, foi possível estimar um intervalo do custo cobrado por uma transportadora que utiliza dois modais. Assim, quando o projeto da turbina estiver em fase final, prestes a ser executado, será possível coletar antecipadamente as informações corretas e prever os custos do frete da turbina.

# 4 MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS

## 4.1 INTRODUÇÃO À MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS

As normas técnicas tem como objetivo estabelecer critérios e diretrizes de processos diversos. Esta certificação padronizada, quando validada, está normalmente associada a um órgão de referência que garante a funcionalidade e a segurança da operação. Visto isso, existem normas e leis que regem a realização de qualquer atividade industrial que envolva o deslocamento de cargas.

Os procedimentos adotados nesse projeto serão baseados nas seguintes normas e leis:

- Norma Regulamentadora número 11 (NR-11): Transporte, Movimentação, Armazenamento e Manuseio de Materiais;
- Norma Regulamentadora número 12 (NR-12): Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos;
- ABNT NBR 8400: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas;
- PETROBRAS N-1965: Movimentação de cargas, Inspeção, Manutenção e Operação de Equipamentos Terrestres;
- PETROBRAS N-2869: Segurança em Movimentação de Carga.

## 4.2 ASPECTOS GERAIS

O estudo de movimentação de carga é extremamente particular, já que depende de diversos fatores que envolvem as características da carga, do ambiente de trabalho, dos equipamentos de içamento, do tipo de máquina de elevação utilizado.

Esse projeto não visa dimensionar a máquina de elevação, já que a movimentação da turbina hidrocínética é esporádica e pode ser feito sem grande dificuldade por empresas especializadas. Esse capítulo visa a análise das características da carga, as quais irão compor o plano de içamento.

O plano de içamento é um documento que contém todos os parâmetros essenciais para levantamento de cargas. Nele deve haver também a análise de tensões para avaliação da resistência estrutural da carga içada e dos acessórios como olhais, vigas de içamento. Se possível, deve-se considerar os efeitos de atrito, folgas, pré-tensões, amortecedores e efeitos de contato. A análise estrutural da carga içada faz-se indispensável no caso em que não são previstos pontos de pega ou mesmo o içamento. É necessário também analisar as situações intermediárias, como embarque, transporte e posicionamento temporário, pois geralmente são fases críticas (Roncetti, 2010).

Ainda segundo Roncetti (2010), quando a solução do içamento é desenvolvida na fase de projeto da própria carga, pode-se surgir vantagens como, por exemplo, a eliminação de alguns dispositivos de içamento - vigas ou balanços - e em alguns casos, a diminuição da quantidade de máquinas.

Assim, para o estudo de movimentação de carga ser realizado, parte-se dos seguintes pressupostos:

- Equipamentos de elevação certificados pelo fabricante;
- Equipamentos de elevação com manutenções e inspeções periódicas adequadas;
- Equipamentos de elevação possuem os aparatos de segurança;
- Equipamentos de elevação usados dentro dos seus limites operacionais;
- Içamento do tipo não-crítico, sem obstáculos e com vento;
- Condições meteorológicas adequadas para a operação;
- Condições do solo adequadas para a operação;
- Área de movimentação e de influência de carga sinalizada e isolada;
- Utilização de cabo guia para estabilização da carga, evitando giros e colisões;
- Não existência de materiais e equipamentos soltos que possam deslocar ou provocar desequilíbrio durante sua movimentação.

#### 4.2.1 Massa da Turbina

A determinação da massa total da turbina é fundamental para as atividades propostas nesse projeto de graduação, tanto para a movimentação e transporte da carga, quanto para a fixação da turbina no flutuador, visto que a atuação da gravidade na massa do corpo gera uma força importante a ser considerada.

No desenvolvimento do plano de movimentação de carga, a massa total é essencial para seleção adequada da máquina de elevação, dos acessórios e dispositivos para apanhar a carga, das medidas de segurança que devem ser adotadas. Já na fixação da turbina, a força peso (produto da massa pela aceleração da gravidade local) deve compor os esforços atuantes na estrutura, conseqüentemente, contribui para o dimensionamento da estrutura de sustentação do conjunto gerador.

A partir do Caderno de Especificações da Unidade de Geração Hidroelétrica, de 16 de maio de 2014, e dos desenhos técnicos e especificações de material feitos no *SolidWorks*, foram estipuladas as massas de cada componente e da massa total do conjunto da turbina.

Na figura 4.1 são mostradas as forças devido as massas dos componentes do sistema eletromecânico, cujas massas são especificadas na tabela 4.1. Já a figura 4.2 mostra os esforços atuantes no conjunto gerador com difusor, e a tabela 4.2 mostra as massas dos componentes.

Tabela 4.1 - Forças atuantes na estrutura da nacelle

Componentes	Valor
Total do Hub - $P_{Hub}$	3485 kg
Caixa Multiplicadora - $P_{Caixa}$	6150 kg
Total Conjunto do Freio - $P_{Freio}$	507 kg
Gerador - $P_{Gerador}$	2380 kg
Chassi do Sistema Eletromecânico - $P_{Chassi}$	1641 kg
Estrutura da Nacelle - $P_{Estrutura}$	645,7 kg
Força de Arrasto [N] - $F_{Arrasto}$	200000

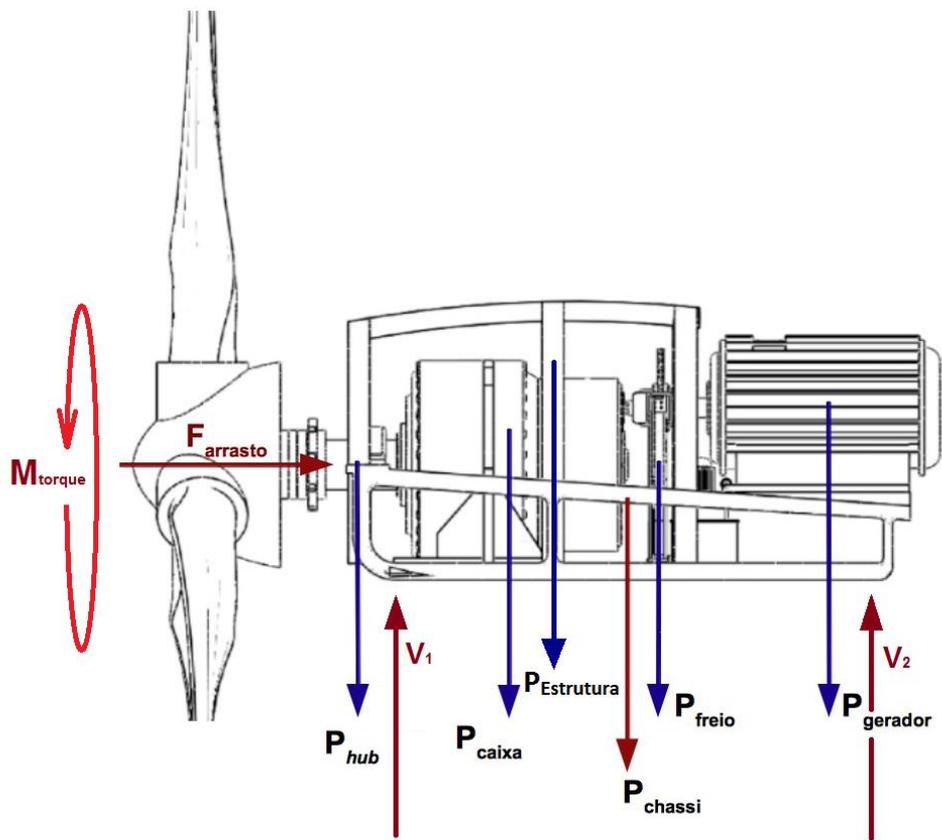


Figura 4.1 – Ilustração dos esforços sofridos pela estrutura da nacelle.

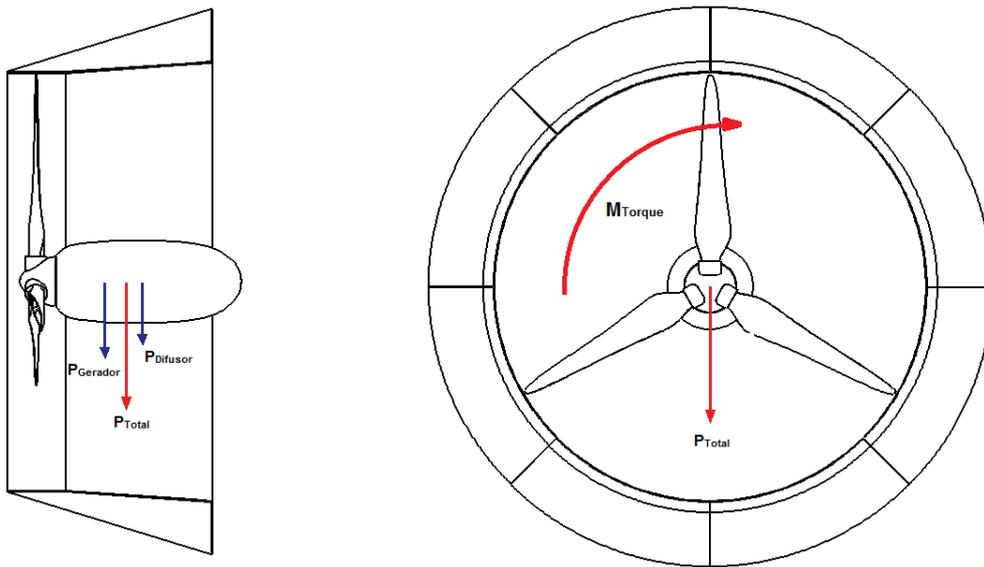


Figura 4.2 – Atuação do peso do gerador e do difusor separadamente, e o peso total do conjunto gerador com difusor.

Tabela 4.2 - Forças atuantes na estrutura do conjunto gerador com difusor

Componentes	Massa (kg)
Estimativa* para o Difusor - $P_{\text{difusor}}$	15000
Conjunto Gerador - $P_{\text{conjunto}}$	12650
<b>Total</b>	<b>27650</b>

\*Estimativa para um difusor fabricado de compósito reforçado com fibra de vidro

## 4.2.2 Dimensões da Turbina

Para qualquer avanço no projeto de fixação da turbina, da movimentação e transporte de carga, é indispensável deter as informações dimensionais dos elementos mecânicos e do conjunto gerador.

Assim como a massa, é importante saber as dimensões da turbina, pois elas contribuem no desenvolvimento do plano de movimentação de carga, na seleção adequada da máquina de elevação, dos acessórios e dispositivos para apanhar a carga, na determinação das medidas de segurança que devem ser adotadas. Já para a fixação da turbina, as dimensões auxiliam na elaboração do diagrama de corpo livre, conseqüentemente, contribuem para o dimensionamento da estrutura de sustentação do conjunto gerador e na ancoragem do sistema.

A partir da versão HTUC 3 do desenho mecânico feito no *SolidWorks* e dos dados fornecidos, temos que:

Tabela 4.3 - Principais dimensões e características

Grandeza / Característica	Valor estimado
Número de pás	03 (três)
Diâmetro do rotor	10.000 mm (10 m)
Diâmetro do cubo do rotor	1.200 mm
Diâmetro de entrada do difusor	10.100 mm
Diâmetro de saída do difusor	10.639 mm
Comprimentos da parte cilíndrica do difusor	1.399 mm
Comprimentos da parte cônica	3.521 mm
Ângulo de abertura do tronco de cone do difusor	4°
Largura máxima da carenagem da nacele	2.002 mm
Comprimento máximo da carenagem da nacele	4.445 mm
Comprimento total do HTUC-01	5.315 mm
Volume da carenagem da nacele	11,30 m <sup>3</sup>
Volume total externo sem difusor (pás, hub e nacele)	12,48 m <sup>3</sup>

### 4.2.3 Centro de Massa do Conjunto Gerador com Difusor

O conceito de centro de massa (CM) é extremamente importante para diversos campos da engenharia. O CM muitas vezes é confundido com o centro de gravidade (CG). É válido ressaltar que há uma diferença entre o centro de massa e o centro de gravidade. O centro de gravidade é um termo usado para denominar o ponto de equilíbrio de um corpo, que tem influência do campo gravitacional local. A exceção se dá quando o campo gravitacional é considerado uniforme, nesta condição o centro de massa se torna coincidente com centro de gravidade.

Visto isso, existem programas computacionais capazes de analisar geometrias e determinar as coordenadas do centro de massa com precisão, por exemplo, o *SolidWorks* e o *AutoCAD*. Por fim, a partir da versão HTUC 3 do desenho mecânico feito no *SolidWorks* e dos dados fornecidos, pode-se determinar que:

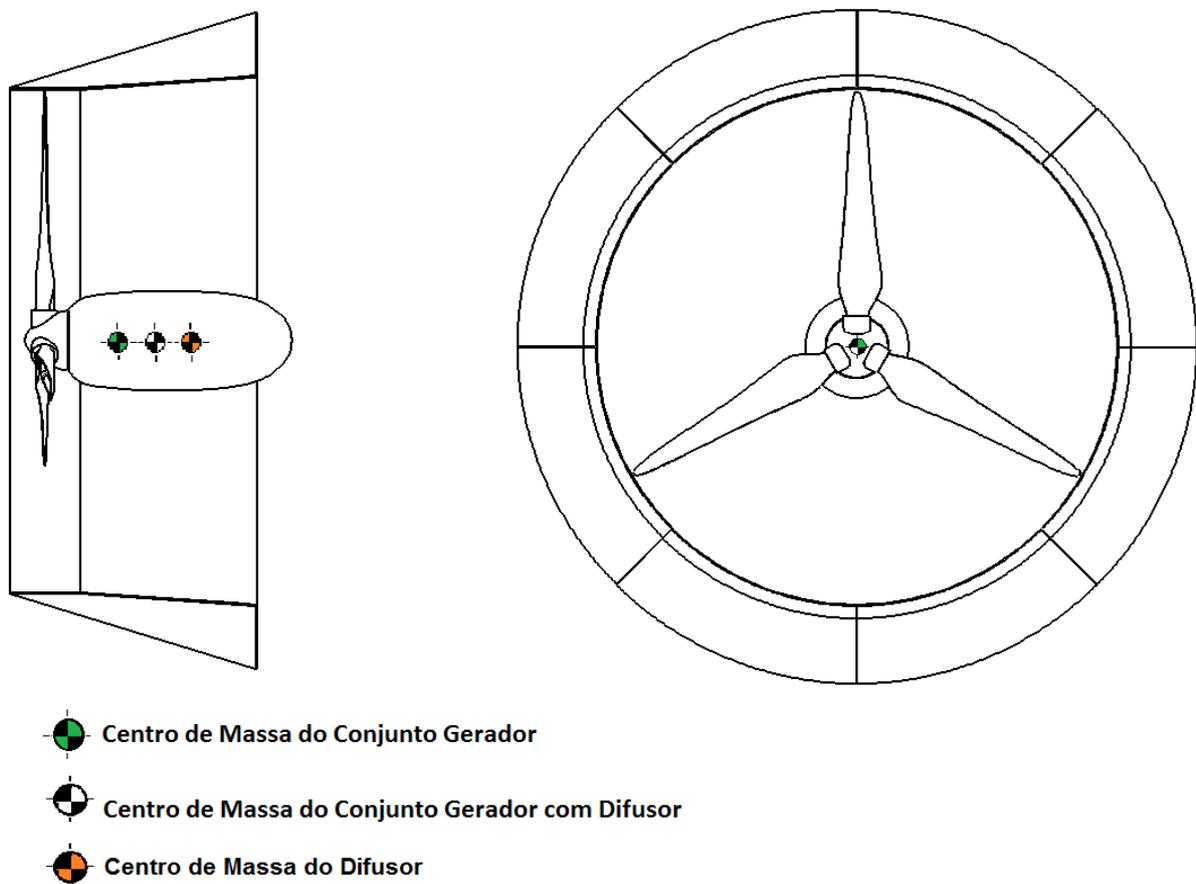


Figura 4.3 – Ilustração da localização dos centros de massa do difusor e conjunto gerador, com e sem difusor.

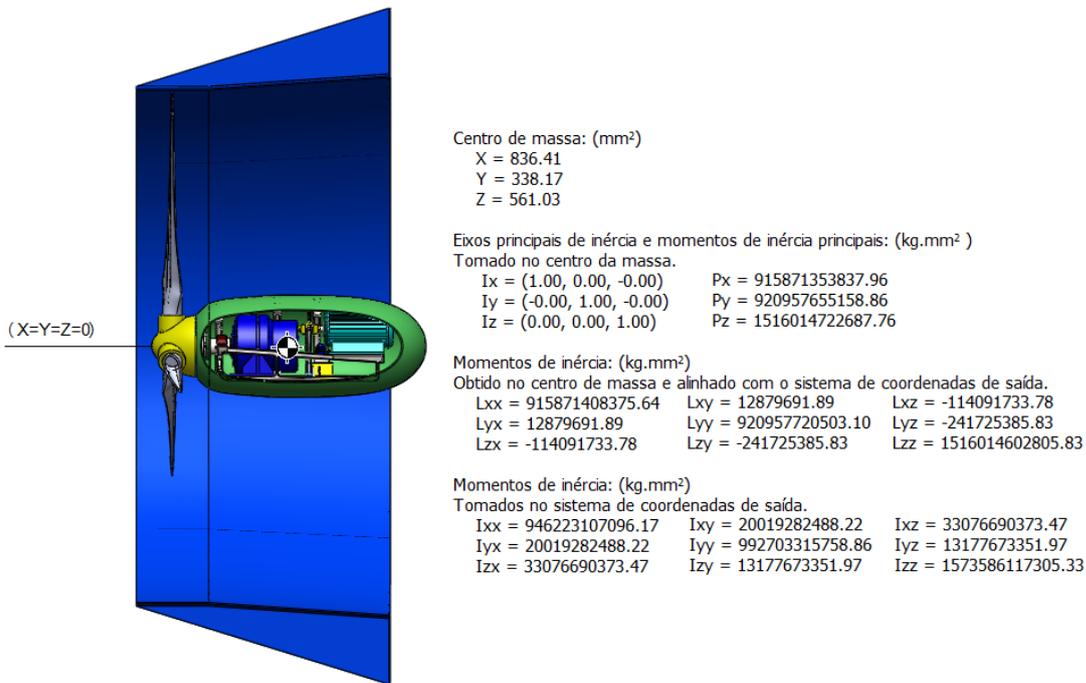


Figura 4.4 - Coordenadas do Centro de Massa e do Momento de Inércia do Conjunto Gerador com Difusor no *SolidWorks*

#### 4.2.4 Centróide da Turbina

Pode-se definir centróide, como o centro geométrico de um corpo, de uma superfície ou de uma linha. Ou seja, é um conceito relacionado puramente a geometria do corpo. Para configurações relativamente simples a determinação de centróides é mais fácil, por vezes até é intuitiva, porém quando se trata de geometrias mais complexas, determinar centróides pode se tornar uma tarefa penosa.

Esse ponto é extremamente importante para esse projeto, já que é no centro geométrico que atua a força de empuxo exercida pelo fluido na turbina. Com isso, utilizou-se do próprio *SolidWorks* para determinar as coordenadas do centro geométrico.

A partir da versão HTUC-03, com o desenho mecânico feito no *SolidWorks* e dos dados fornecidos, é possível encontrar as coordenadas do centróide. A figura 4.5 ilustra o local e as suas coordenadas.

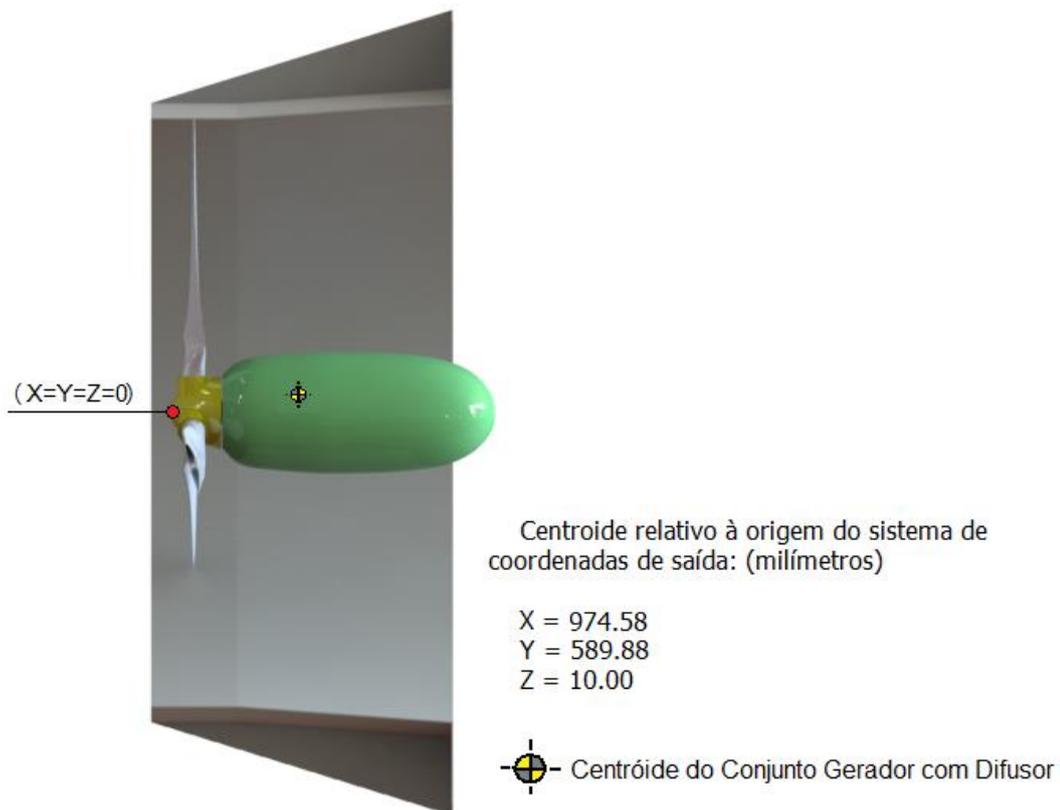


Figura 4.5 - Coordenadas do Centróide e do Momento de Inércia no Centróide do Conjunto Gerador com Difusor no *SolidWorks*

Como é sabido, o valor do empuxo que atua em um corpo mergulhado em um fluido é igual ao peso do volume do fluido deslocado pelo corpo. Neste caso, conhecendo o volume total do conjunto gerador e do difusor, pode-se calcular a força de empuxo que atua na carga.

O cálculo do empuxo é dado por:

$$F_{Empuxo} = \rho_L \cdot V \cdot g$$

Onde:

$\rho_L$ : densidade do fluido ( $kg/m^3$ )

$V$ : o volume de fluido deslocado com o mergulho do corpo ( $m^3$ )

$g$ : o valor da aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

Para o caso, considerando a temperatura da água do Rio Tocantins como 25 °C, pode-se assumir a densidade do fluido como 997,05  $kg/m^3$ . O valor da aceleração da gravidade naquela região é aproximadamente 9,8  $m/s^2$ . O volume de fluido deslocado é o mesmo valor do volume do corpo, logo,  $V$  é igual a 13,98  $m^3$ . Assim, a força de empuxo tem módulo igual a 136599,84 N. A tabela 5.4 mostra esses valores de forma resumida e a figura 5.6 ilustra a força aplicada no centróide do conjunto gerador com difusor.

Tabela 4.4- Valores da variáveis para cálculo da Força de Empuxo

Condições	Valores
Densidade do Fluido ( $\text{kg/m}^3$ )	997,05
Volume Deslocado ( $\text{m}^3$ )	13,98
Aceleração da Gravidade ( $\text{m/s}^2$ )	9,8
<b>Força de Empuxo [N] - <math>F_{\text{empuxo}}</math></b>	<b>136599,84</b>

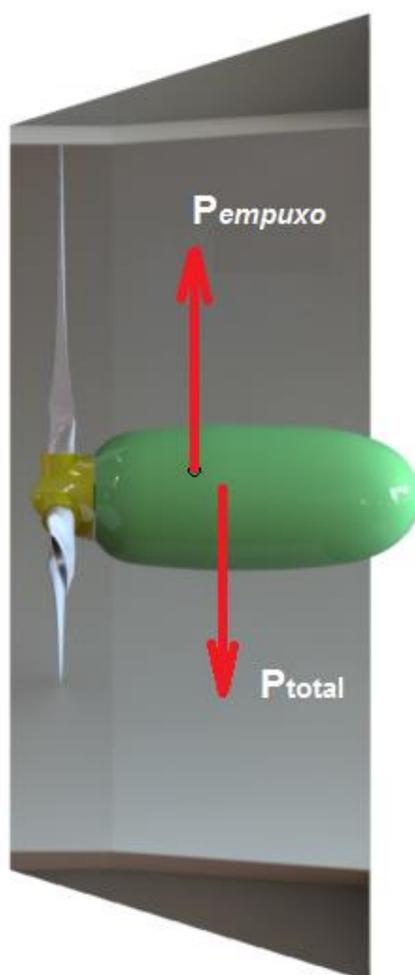


Figura 4.6 – Ilustração da força de empuxo atuando no centróide do conjunto

## 4.3 SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES E MOMENTOS CRÍTICOS

Qualquer atividade de movimentação de carga só deve ser executada após uma análise da sequência de operações. Então, assim como em qualquer outro projeto de engenharia, deve-se destacar os momentos críticos da movimentação de carga, deste modo, garantindo que todas as outras etapas estarão superdimensionadas.

Para este projeto, compreende-se como um momento crítico qualquer etapa da movimentação da carga atípico que promova solicitações suficientemente grandes, podendo causar tombamento da máquina de elevação, comprometer a instalação da turbina, afetar a estrutura mecânica da turbina. Diante desta definição, três momentos fundamentais para o sucesso da operação merecem destaque: o içamento, o mergulho e o posicionamento da carga.

### 4.3.1 Içamento do Conjunto Gerador com Difusor

O primeiro momento crítico a ser analisado é o instante inicial do movimentação do conjunto gerador com o difusor, quando ele sai da inércia e é acelerado verticalmente. Erros como desalinhamento da carga com relação ao guincho, suspensão desnivelada da carga em relação ao centro de gravidade, velocidade alta do arranque do içamento, desprendimento da carga do dispositivo de amarrar a carga, posicionamento errado do contrapeso, todos podem se tornar fatais para a operação e causar acidentes.

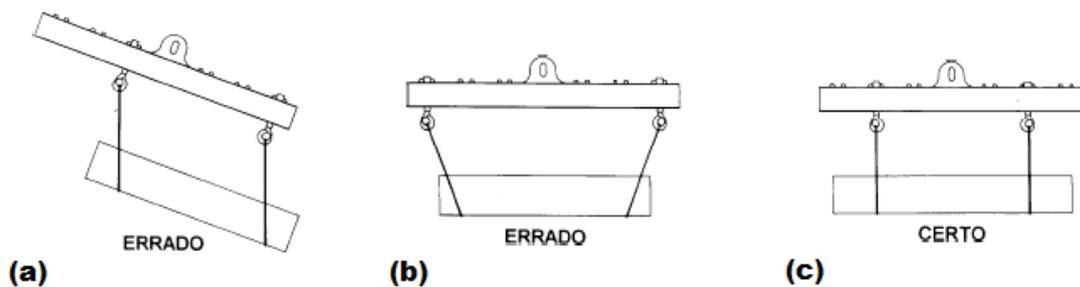


Figura 4.7 – Exemplos de suspensão utilizando travessões: (a) ocorre um desnivelamento da carga em relação ao seu CM, (b) ocorre o desalinhamento dos cabos com relação a carga e em (c) posicionamento correto.

(Fonte: SENAI/CST-ES, 1996)

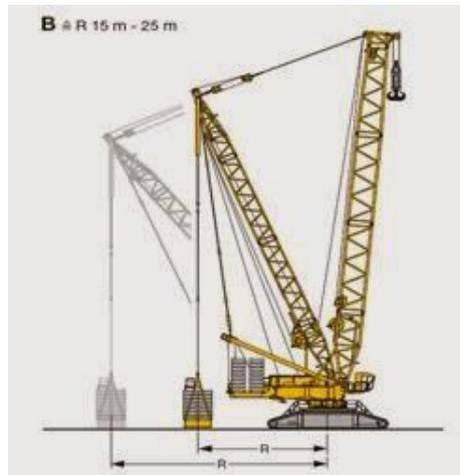


Figura 4.8 – Ilustração do reposicionamento adequado do contrapeso, que varia de acordo com o peso da carga elevada.  
(van der Linden, R. S., 2013)

A norma NBR 8400 mostra alguns tipos de solicitações que devem ser observadas e que podem comprometer um içamento de carga, entre elas, as solicitações verticais e as solicitações horizontais.

As solicitações devido aos movimentos verticais são provenientes das oscilações provocadas por içamento relativamente brusco da carga de serviço. Nos cálculos das solicitações devidas ao levantamento da carga de serviço, multiplica-se as solicitações por um fator chamado coeficiente dinâmico. Esse coeficiente é especificado para o tipo de máquina de elevação utilizado e cresce de acordo com a velocidade de elevação inicial.

As solicitações devido aos movimentos horizontais são causadas por três fatores: efeitos de inércia, efeitos centrífugos e efeitos de choque. Os efeitos de inércia são causados por acelerações ou desacelerações quando há partidas ou frenagens, podendo haver agravamento quando se tem velocidades altas de içamento. Os efeitos da força centrífuga são levados em consideração nos guindastes, devido ao movimento de orientação e rotação do equipamento. Os efeitos de choque são resultado de impactos na carga ou na estrutura que geram oscilações perigosas.

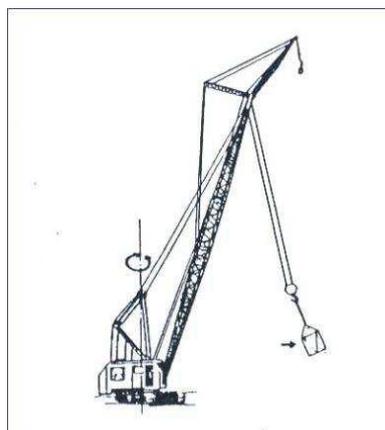


Figura 4.9 – Ilustração dos efeitos centrífugos causado por um giro em alta velocidade  
(Fonte: Roncetti, Eng. Leonardo, 2010)

Visto isso, buscando eliminar possíveis falhas no içamento da turbina, propõe-se que:

- içamento seja realizado por um profissional capacitado de *Rigging*;
- içamento com velocidade de movimentação adequada, de modo a evitar solicitações desnecessárias;
- haja conferência prévia dos métodos de amarração;
- sejam utilizados cabos guias.

### 4.3.2 Mergulho do Conjunto Gerador com Difusor

Denominou-se mergulho o período de transição, que se inicia quando o conjunto gerador com difusor ainda está completamente envolvido pelo ar atmosférico, próxima a superfície do rio; e termina quando o conjunto gerador com difusor está totalmente coberto pelo fluido de trabalho. A criticidade desse momento se deve, não só a mudança do fluido que envolve a turbina, mas também a possível diferença das velocidades dos escoamentos. O ideal é fazer o mergulho em um trecho do rio que escoe a menor velocidade possível, minimizando a criticidade desta etapa.

A norma NBR 8400 considera nos seus cálculos de dimensionamento de máquinas de elevação a ação dos ventos, traduzida pelo arrasto causado pelos esforços de sobrepressão e de depressão, cujos valores são proporcionais a pressão aerodinâmica. A pressão aerodinâmica é determinada pela fórmula descrita a seguir, sendo  $V_w$  a velocidade do vento ( $m/s$ ):

$$P_a = \frac{V_w^2}{1,6}$$

O esforço, em Newtons [N], devido à ação do vento em um corpo é uma força cuja componente na direção do vento é dada pela relação abaixo:

$$F_w = C \cdot A \cdot P_a$$

onde:

**C**: coeficiente aerodinâmico que depende da configuração do corpo e considera sobrepressão nas diferentes superfícies.

**A**: superfície (área, em  $m^2$ ) exposta ao vento pelo corpo, isto é, a superfície da projeção dos elementos constituintes do corpo em um plano perpendicular à do vento.

Visto que o vento, assim como o fluxo do rio, é um escoamento de um fluido num meio e que ambos os casos são regidos pelas mesmas equações dispostas pela mecânica dos fluidos, poderia-se fazer uma analogia do cálculo do arrasto sofrido pela carga na seleção da máquina de elevação levando em consideração a mudança do fluido de trabalho e suas características. Infelizmente, não se encontrou material contendo informações detalhadas ou uma base de dados confiável sobre o tema, desta forma, algumas medidas preventivas e conservadoras devem ser consideradas para a máquina de elevação, para a turbina e para o conjunto nessa etapa.

Dos cuidados com a máquina de elevação, amparado pela norma, o equipamento de elevação deve ser majorado em 10% e devem haver dispositivos de bloqueio para evitar um possível arrastamento. Outro cuidado importante é tentar manusear a carga o mais próximo do solo possível, pois isso evita acidentes em eventuais quedas de componentes da carga soltos ou da própria carga.

Com relação aos cuidados com a turbina, ela deve ser posicionada frontalmente na direção oposta ao escoamento, os freios devem estar acionados com uma das pás posicionadas verticalmente. Isto deve ser feito para não criar um momento assimétrico e sobrecarregar os equipamentos de elevação e a turbina.

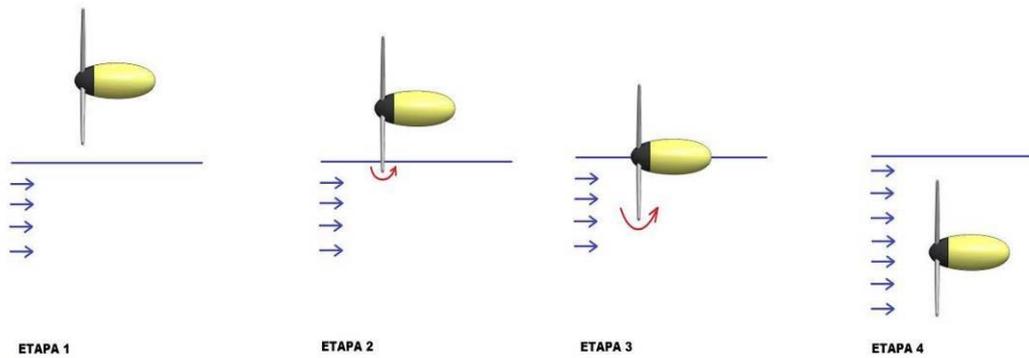


Figura 4.10 - Vista lateral dos esforços gerados pelo mergulho da turbina no rio dividido em etapas.

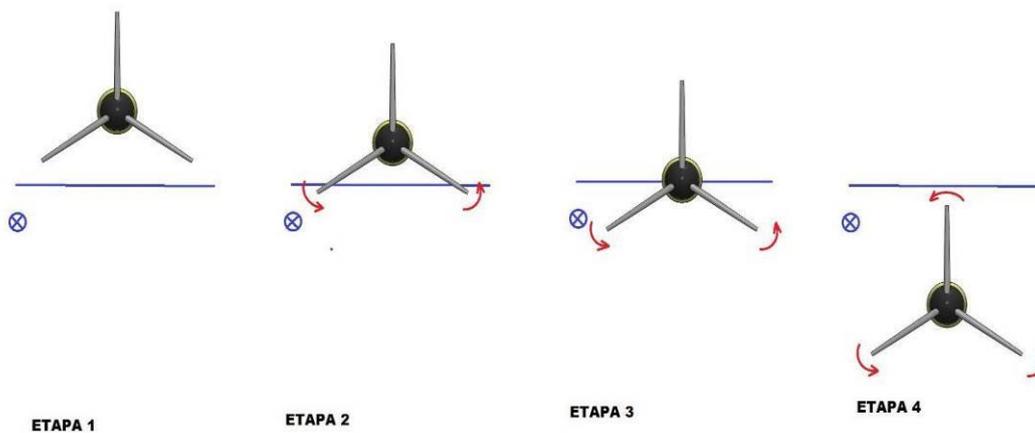


Figura 4.11 - Vista frontal do procedimento de mergulho da turbina no rio dividido em etapas.

Para o conjunto gerador com o difusor, propõe-se alguns cuidados para minimizar as possibilidades do arrastamento da carga durante o mergulho, como, por exemplo, um sistema de ancoragem submerso ou de cabos guia em mais de dois pontos nas margens. Os cabos guias devem ser dispostos de forma a não prejudicar a estrutura da turbina e do difusor.

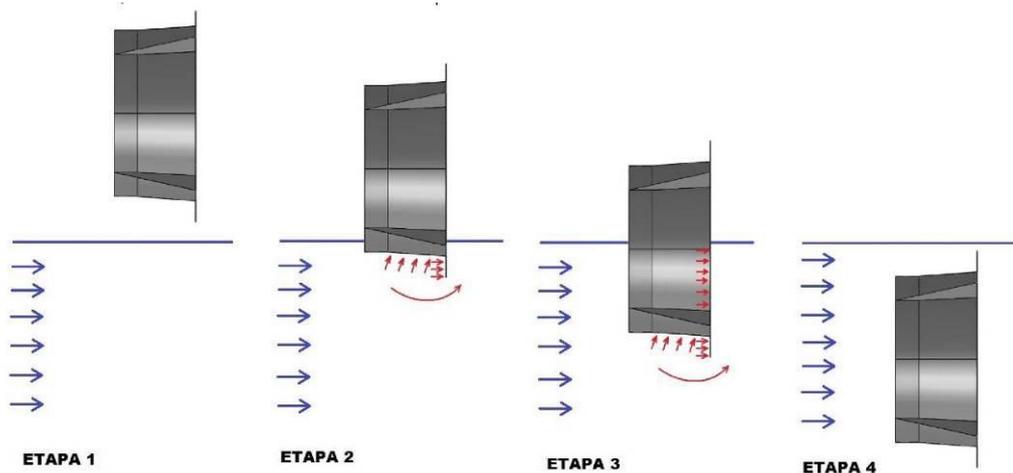


Figura 4.12 - Vista lateral dos esforços gerados pelo mergulho do difusor no rio dividido em etapas.

### 4.3.3 Posicionamento do Conjunto Gerador com Difusor

O posicionamento do conjunto gerador com difusor é um momento crítico posterior ao mergulho que compreende a movimentação da carga até ser unida ao seu sistema de fixação. Apesar desta fase possuir condições muito próximas a que turbina será submetida no seu funcionamento convencional, ainda há riscos, por exemplo, de momentos assimétrico e de sobrecargas nos equipamentos de elevação e na turbina.

Assim, ainda nessa etapa da operação, com auxílio dos cabos guia e de sistemas de ancoramento, a turbina deve estar apontada frontalmente na direção oposta ao escoamento, os freios devem permanecer acionados com uma das pás posicionadas verticalmente.

## 4.4 ACESSÓRIOS E DISPOSITIVOS DE APANHAR CARGA

Este subcapítulo pretende fazer um apanhado geral das tecnologias existentes que podem ser empregadas para a solução do problema proposto. Existem diversas alternativas que se enquadram nos requisitos de projeto e as principais serão apresentadas em detalhes.

### 4.4.1 Cabos de Aço

Os cabos de aço são equipamentos que auxiliam na movimentação de carga, fixação de elementos, entre outras funções. Os cabos são formados por um conjunto de arames torcidos ao redor de uma alma. Esta alma pode ser de fibra ou de aço. A alma de fibra, ao contrário da alma de aço, propicia maior flexibilidade ao cabo de aço, entretanto, menor resistência a tração.

As especificações para fabricação ou seleção de cabos de aço tem padrão normatizado, podendo citar a NBR 2408 e ISO 17893. De acordo com o catálogo da CIMAF, as características mais importantes a serem determinadas para seleção desse acessório são:

- Diâmetro;
- Construção (Figura 4.13);
- Tipo de Alma;
- Torção (regular ou Lang / direita ou esquerda)
- Pré-formação (pré-formado, não pré-formado ou semi pré-formado);
- Lubrificação (com ou sem lubrificação);
- Resistência dos arames à tração ou a Carga de Ruptura Mínima (CRM);
- Acabamento (polido ou galvanizado);
- Indicação da aplicação;
- Comprimento.

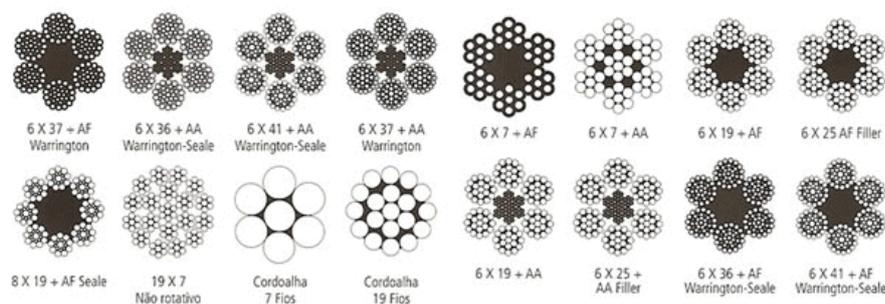


Figura 4.13 - Ilustração dos tipos de composição e construção de um cabo de aço.  
(Fonte: CableMAX, 2014)

Por fim, os cabos de aço devem passar por rigorosos procedimentos de inspeção e manutenção. O acompanhamento do número de arames rompidos, do desgaste externo, da corrosão, do desequilíbrio e deformação dos arames. A norma NBR 4309, por exemplo, detalha diretrizes para os cuidados, instalação, manutenção e inspeção do cabo de aço em serviço em um equipamento de movimentação de carga, bem como relaciona os critérios de descarte a serem aplicados para promover o uso seguro do equipamento de movimentação de carga.

#### 4.4.2 Olhais de Suspensão

Os olhais de suspensão são acessórios utilizados para auxiliar a movimentação de cargas. Normalmente, são acoplados em pontos de içamento estratégicos, de acordo com o centro de massa da carga, para que a movimentação seja estável e segura. Esse acessório é extremamente difundido para atividade de movimentação de carga e de engenharia. Isso assegura aos olhais uma diversidade de fabricantes, modelos, tamanhos, materiais.

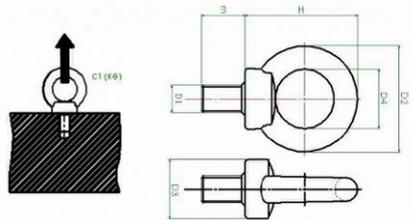


Figura 4.14 - Ilustração de um olhal aparafusável com cotas essenciais para seleção do acessório.  
(Fonte: REPIAN, 2012)

Existem dois grandes conjuntos de olhais de acordo com o seu modo de fixação: os soldáveis e os aparafusados. Ambos são confiáveis e têm boa resistência mecânica.

### 4.4.3 Pega-Chapas

O acessório Pega-Chapas é um equipamento indispensável na movimentação de chapas, vigas, perfis e estruturas. Normalmente, possuem alças fixas que proporcionam segurança e eficiência no transporte destes materiais. Essa peças são forjadas em aço liga com mordente temperado e revenido para melhoria das sua propriedades mecânicas. Pode-se classificar em dois grupos: pega-chapas horizontais e verticais.

De acordo com RUD (2014), o ângulo de trabalho é um ponto importantíssimo durante as operações de movimentação de cargas e o usuário deve sempre estar atento. A atenção deve ser redobrada quando a operação é com pega-chapas horizontais, pois estes são utilizados em pares, o que, geralmente, implica em abertura da língua, fazendo com que a mesma trabalhe em ângulo.

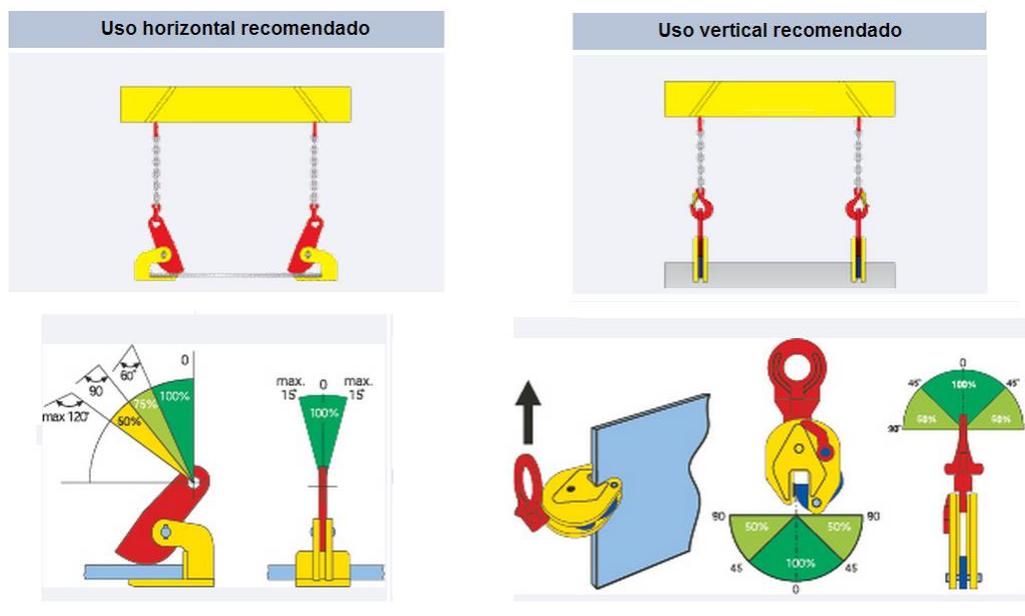


Figura 4.15 - Detalhe da aplicação e dos ângulos máximos dos Pega-Chapas  
(Fonte: adaptado de RUD, 2014)

Os pega-chapas sofrem redução da capacidade de carga em função do ângulo de trabalho, assim como as lingas de correntes, cintas e cabos de aço e olhais. Para garantir a estabilidade durante a movimentação, recomenda-se o uso de dois ou mais pares de lingas com pega-chapas, combinados com um dispositivo especial. Assim, para não sofrer a redução da capacidade de carga, recomendamos o uso de pega-chapas horizontais combinados com lingas de apenas um ramal e um travessão.

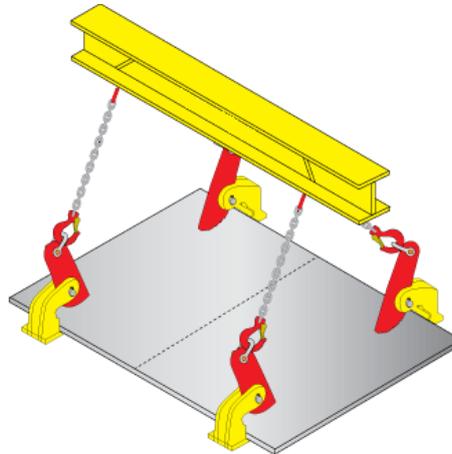


Figura 4.16 - Composição de acessórios para içamento de chapa  
(Fonte: adaptado de RUD, 2014)

#### 4.4.4 Ganchos

De acordo com Rudenko (1976), ganchos são acessórios aplicados no transporte e movimentação de cargas. Os ganchos são de aço carbono forjado em uma só peça, geralmente aço carbono 1045, e passam por cuidados para serem normalizados. Alguns modelos podem ser empregados para elevar cargas pesando acima de 100 toneladas.

Existem três tipos de ganchos: os simples, os duplos e os triangulares. Os ganchos simples são muito empregados e versáteis, além de proporcionar grande resistência mecânica. Os ganchos duplos conseguem resultados semelhantes aos dos ganchos simples, mas com selas menores. Entretanto, em virtude da suspensão assimétrica, há regras que proíbem operação com suspensão de carga em um só lado, o que sobrecarregaria um dos ganchos. Por fim, os ganchos triangulares sólidos, que são empregados em guindastes de alta capacidade de elevação. O inconveniente dos ganchos triangulares está no fato de que as lingas que sustentam a carga devem passar pelos olhais.

As dimensões e demais proporções dos ganchos são padronizadas e dispostas em normas específicas. As proporções de uma gancho são admitidas por tentativas, com base nas normas; posteriormente, o gancho é verificado à resistência para que as suas proporções sejam oficialmente estabelecidas. Existem modelos de ganchos que possuem travas de segurança para evitar fugas dos cabos e cintas ou enganchamentos acidentais em obstáculos.



Figura 4.17 - Ganchos simples com uniões divesas.  
(Fonte: Rudenko , 1976)

#### 4.4.5 Cintas de Amarração

As cintas de amarração, também chamadas de cintas de carga ou de elevação, geralmente são de material sintético - poliéster ou de nylon. Elas foram criadas para substituir os cabos de aço em algumas funções devido as suas características. Das diversas vantagens de trabalhar com cintas de amarração em relação aos cabos de aço, pode-se citar:

- Maior flexibilidade, diminuindo o espaço e custo necessário para armazenamento;
- Grande resistência e durabilidade;
- Peso consideravelmente menor, aumentando a produtividade e rapidez na operação de içamento;
- Não danifica a superfície do material içado e se ajusta a superfície do material durante o içamento;
- Inspeção fácil e simples, o que aumenta segurança;
- Permitem movimentação de cargas de todas as formas, seja vertical, *basket*, *choker* simples, *choker* duplo.

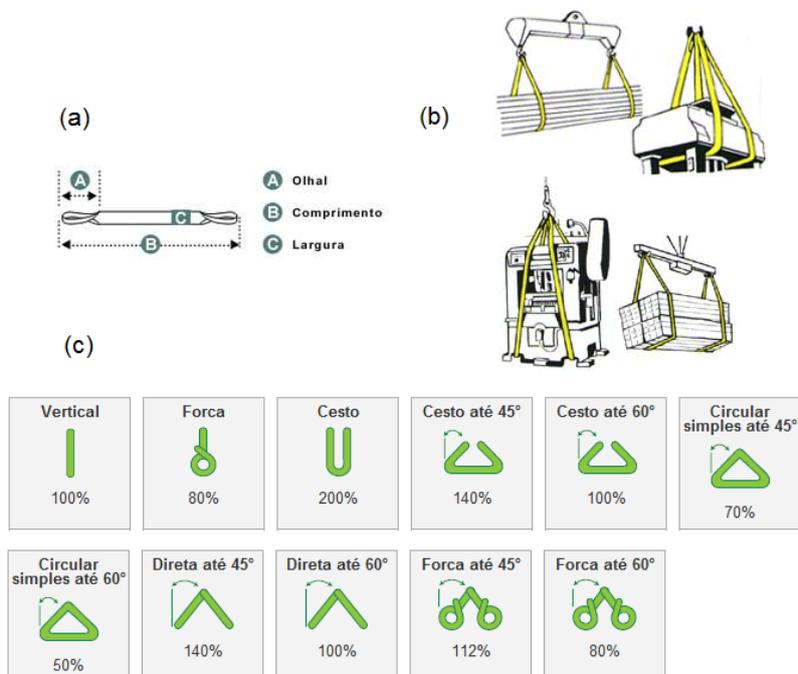


Figura 4.18 - Ilustração das cintas de amarração, em que (a) explicita as dimensões importantes para a seleção, (b) alguns exemplos de aplicação e (c) as formas de utilização com as respectivas porcentagem de carga suportada para cada caso.

(Fonte: adaptado de CableMAX, 2014)

#### 4.4.6 Manilhas

Manilha é um acessório utilizado como elemento de união para movimentação ou fixação de carga, principalmente com correntes ou cabos de aço. São formado por duas partes facilmente desmontáveis, o corpo e o pino. O corpo consiste em uma barra de seção conformada ou forjada em um formato apropriado e extremidades em forma de olhais coaxiais. O pino é barra roscada de seção circular que passa através dos olhais, disposta de modo seguro quando em posição.

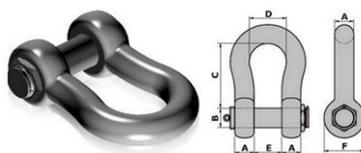


Figura 4.19 - Ilustração de uma manilha com suas dimensões.  
(Fonte: Columbus McKinnon Brasil, 2014)

As dimensões e tolerâncias das manilhas curvas são dadas por norma. A seleção do acessório é simples e deve ser adquirido de acordo com a carga de trabalho a que o cabo de aço é submetido.

#### 4.4.7 Lingas

A linga de corrente é um dispositivo utilizado para movimentação e elevação de cargas em geral, muito aplicada por seu fácil manuseio e opções de configurações, atendendo a diversas aplicações. São compostas por elos de correntes e podem possuir vários tipos de pernas, como padrão as lingas de correntes são encontradas com 1, 2, 3 ou 4 pernas, também em formato de cesto e sem fim, onde recebem vários complementos como ganchos, olhais, anéis de sustentação e garras.

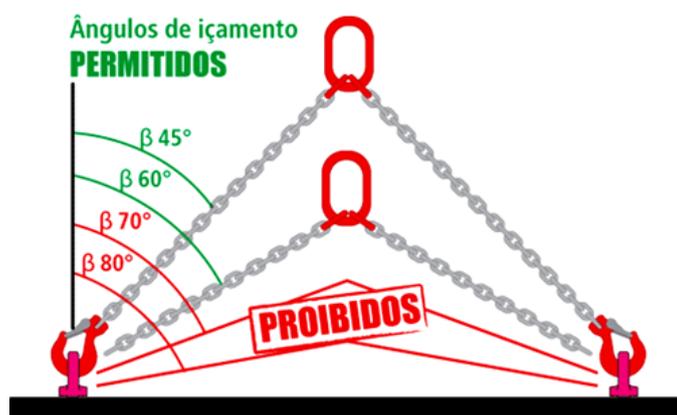


Figura 4.20 - Ilustração de uma linga com variações do ângulo de içamento.  
(RUD Brasil, 2014)

Suas aplicações são infinitas, as lingas de correntes podem ser utilizadas em guindastes, em navios para carga e descargas, transportes trefilados e peças, nos setores da construção civil, mineração, siderúrgicas, logística, embarcações, entre outros. Diâmetro, comprimento, número de pernas e capacidade são as principais características para seleção deste componente.

#### 4.4.8 Travessões de Carga

Os travessões (balancim de carga) são elementos auxiliares projetados e desenvolvidos para o içamento de cargas por ponte-rolante, monovias, guias, caminhão munck e guindastes. Possui ganchos de fixação lateral para encaixe de cintas de amarração, lingas de corrente com ganchos. É utilizado para movimentação de vergalhões, chapas, entre outras geometrias.

Sua forma construtiva não permite a avaria da carga a ser transportada, pois possui vários pontos de fixação lateral, o que proporciona uma distribuição melhor do ponto de esforço. É um equipamento que proporciona agilidade e segurança na movimentação.

A grande desvantagem do Travessão é o seu próprio peso, pois quanto maior seu peso, menor o peso que se pode transportar, devido a limitação da máquina de elevação.



Figura 4.21 - Imagem de um balancim usual.  
(RUD Brasil, 2014)

#### 4.5 MÉTODOS DE AMARRAÇÃO DA CARGA

Para o desenvolvimento do plano de movimentação de carga completo, diversas informações são indispensáveis, dentre elas, deve haver:

- Indicação dos pontos e da forma de amarração da carga;
- Descrição dos acessórios selecionados;
- Detalhe dos esforços sofridos pela estrutura da carga ao ser içada;
- Requisitos de segurança.

##### 4.5.1 Indicação dos Pontos e Formas de Amarração da Carga

Para que ocorra uma movimentação de carga segura e eficiente, deve haver um bom planejamento dos pontos de amarração. Quanto mais perigosa, frágil ou dispendiosa for a carga transportada, mais sofisticado deve ser esse estudo. Além disso, é preciso avaliar se a peça resiste aos esforços ao qual será submetida nesse processo, e isso varia também conforme o material do elemento içado e dos acessórios utilizados na movimentação. É muito comum combinar aos pontos de amarração fixos sistemas alternativos, por exemplo, com aplicação de cintas de amarração.

Para o caso do Projeto Tucunaré, a carga movimentada é composta do conjunto gerador fixado ao difusor. Assim, os pontos de amarração previstos deverão estar contidos apenas na estrutura do

difusor. Inicialmente, considerando o Caderno de Especificação do Projeto Tucunaré, o difusor será fabricado de compósito reforçado com fibra de vidro, e isto exigirá cuidados extras devido a sua rigidez relativamente baixa, conseqüentemente, é preciso avaliar se essa estrutura não cederá no momento do içamento.

Para determinar os pontos de amarração, alguns detalhes devem ser estipulados:

- Os pontos de amarração devem estar bem distribuídos ao longo da carga para que um acessório não seja mais solicitado que outro;
- Os pontos de amarração devem estar acima do centro de massa da carga para não proporcionar qualquer momento indesejado devido à instabilidade da carga;
- Os pontos de amarração estabelecidos não devem influenciar no desempenho e na eficiência do equipamento quando estiver instalado.

#### 4.5.2 Seleção dos Acessórios para Apanhar Carga

Visto que a estrutura do difusor é extremamente delgada, tendo espessura aproximada de 10 mm, e boa resistência mecânica, fez-se uma analogia com as chapas metálicas e se optou por tratar as abas de transversais de sustentação do difusor fabricadas de fibra de vidro como se fossem “chapas”. Assim, é possível realizar a operação utilizando o acessório Pega-Chapas com auxílio dos ganchos, lingas de corrente e travessões. Além de serem acessórios muito comuns nessa atividade, a aplicação do Pega-Chapas minimiza alterações no projeto construtivo do difusor.

Poderia-se selecionar apenas um par de Pega-Chapas verticais que suportariam uma carga limite de trabalho superior a do conjunto gerador com difusor, porém, a fim de garantir maior estabilidade, mais segurança e buscar minimizar a probabilidade de danos à estrutura do difusor, optou-se por superdimensionar o sistema de amarração com vários conjuntos desses acessórios. Assim, o conjunto de pega-chapas pode ter capacidade de elevar cargas superiores a 1,3 vezes a massa da turbina hidrocínética com o difusor. Os pontos de pega podem ser observados nas imagens 4.21, 4.22, 4.23. As especificidades de cada acessório de amarração são especificadas na tabela 4.5.

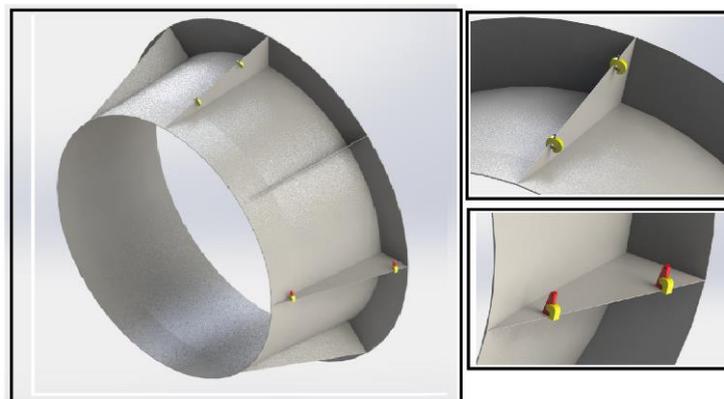


Figura 4.22 - Imagem mostra (a) os pontos de amarração no difusor com aplicação dos Pega-Chapas, (b) em detalhe os Pega-Chapas Verticais e (c) ilustração em detalhe dos Pega-Chapas Horizontais.



Figura 4.23 - Vista frontal, lateral e superior com o posicionamento dos acessórios de amarração



Figura 4.24 – Ilustração do esquema de amarração do conjunto gerador com difusor que deve utilizar os Pega-Chapas, lingotes, ganchos e travessão.

Tabela 4.5 – Especificações requeridas para cada componente utilizado na amarração do difusor para o içamento

Equipamento	Exigências	Fabricantes Referência	Quantidade
Pega-Chapa Vertical	Capacidade de carga mínimo do par $\geq 16$ ton Intervalo de abertura: 0-65 mm	Columbus McKinnon RUD	1 par
Pega-Chapa Horizontal	Capacidade de carga mínimo do par $\geq 8$ ton Intervalo de abertura: 0-65 mm	Columbus McKinnon RUD	2 pares
Travessão	Capacidade de carga $\cong 40$ ton Mais de 4 ponto de amarração Comprimento $\cong 5$ m	Movikraft RUD	1
Manilha	Carga de Trabalho $\geq 8$ ton Diâmetro do Corpo	QualityFix Columbus McKinnon	12
Ganchos	Trava de Segurança Carga de Trabalho $\geq 8$ ton	CableMax Tecnotextil QualityFix	12
Lingas	Capacidade de trabalho $\geq 8$ ton Número de Ramais (máx) = 2 Ângulo de içamento menor que $70^\circ$	RUD ACRO CableMax	Duplo - 2 Simples 2

Para garantir a segurança na utilização desse acessório de amarração de carga, existem algumas observações importantes. De acordo com RUD (2014), a chapa deve estar plenamente encaixada no pega-chapas, como mostrado na figura 4.24. Além disso, quando o acessório for horizontal, o componente deve ser sempre utilizado em pares.



Figura 4.25- Ilustração do posicionamento da chapa e do acessório  
(Fonte: RUD, 2014)

Sempre posicione os pega-chapas no menor lado da chapa, observando o centro de massa, como mostrado nas figuras 4.25 e 4.26, respectivamente. Por fim, utilizar sempre pares de pega-chapas do mesmo modelo.

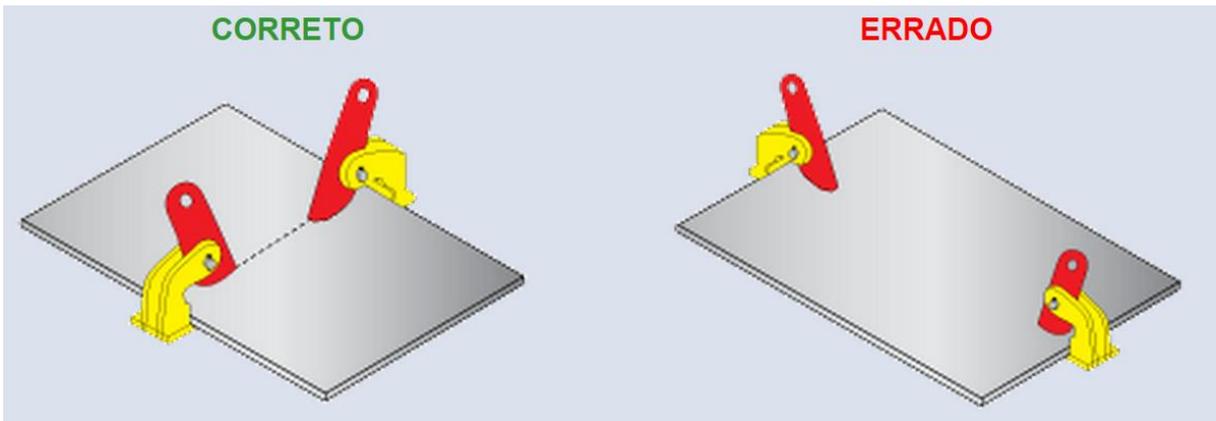


Figura 4.26 - Ilustração do posicionamento da chapa e do acessório de acordo com as dimensões da carga. (Fonte: RUD, 2014)

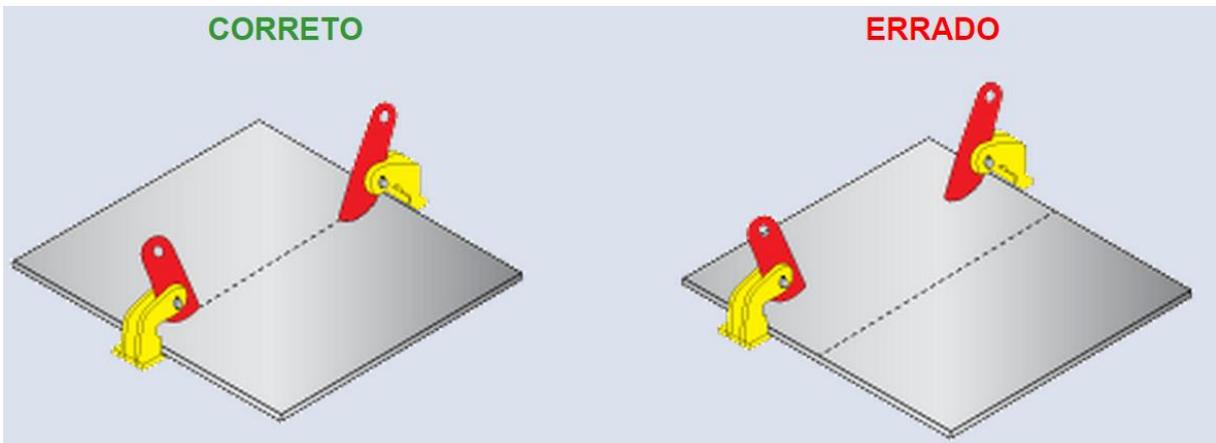


Figura 4.27 - Ilustração do posicionamento da chapa e do acessório de acordo com o centro de massa da carga. (Fonte: RUD, 2014)

## 5 FIXAÇÃO DA TURBINA HIDROKINÉTICA

Outro aspecto importante para implementação da turbina hidrocínética é a sua fixação dentro do rio, de modo a garantir seu funcionamento seguro e eficiente. Este aspecto é tratado neste capítulo.

Assim como no caso da estrutura mecânica, é possível fazer uma analogia com a tecnologia eólica *offshore* ou a tecnologia de turbinas maremotriz, pois todas tem características estruturais e princípios de funcionamento muito semelhantes. Isto posto, pode-se fazer um estudo dessas tecnologias e adequá-las a realidade encontrada pela turbina do Projeto Tucunaré.

A partir das características topográficas determinadas para o local da instalação da turbina do Projeto Tucunaré, da velocidade do escoamento e das forças atuantes no conjunto gerador, pode-se citar alguns dos métodos de fixação da turbina a fim de usufruir do grande potencial energético remanente a jusante da usina hidrelétrica

### 5.1 ADVERSIDADE NA IMPLEMENTAÇÃO DE TECNOLOGIAS OFFSHORE

O mar é o local onde são instaladas turbinas eólicas *offshore* e turbinas maremotriz. Este é um ambiente extremamente hostil, que demanda cuidados extras com a turbina, com a estrutura de sustentação, com a fundação, para que haja um nível de confiabilidade suficientemente alto para que a instalação seja bem sucedida e duradoura. Alguns dos efeitos proporcionados pelo mar são:

- Correntes variáveis;
- Corrosão;
- Abrasão;
- Exigência de boa vedação;
- Minimizar efeitos de cavitação;
- Dificuldade na intervenção humana;
- Interligação com a rede elétrica.

#### 5.1.1 Correntes Variáveis

Segundo Fraenkel (2002), as cargas dinâmicas e transitórias geradas pelo mar são complexas. Os problemas estruturais causados por interações entre as ondas e correntes, mudanças de direção das correntes, as variações de pressão estática e a velocidade em toda a coluna de água vertical impõem efeitos dinâmicos sobre as pás do rotor e, portanto, sobre a estrutura, seja em turbinas eólicas *offshore* ou em turbinas hidráulicas convencionais.

Esses efeitos dinâmicos que atuam nos elementos de sustentação da turbina, exigem não apenas o estudo estático, mas também o estudo de rigidez e de resistência à fadiga da estrutura (Hau, 2006).

### **5.1.2 Corrosão**

De acordo com Frauches-Santos (2014), a corrosão é a deterioração de um material por ação química, física ou eletroquímica. É um processo espontâneo que está constantemente transformando os materiais metálicos e não-metálicos de modo que a durabilidade e o desempenho destes são afetados.

No caso estudado, a ação eletrolítica é a mais comum, pois os metais estão expostos a um eletrólito, onde ocorrem as reações anódicas e catódicas, causando deterioração do metal. Tais eletrólitos podem ser a água, o ar atmosférico umido, solo.

A corrosão em uma superfície gera rachaduras e áreas de concentração de tensão. Assim, a combinação de danos por fadiga devido a concentração de tensões e a progressão da corrosão vão comprometer a vida de qualquer elemento mecânico. Utiliza-se, assim, métodos de proteção de corrosão, entre eles: os revestimentos, os inibidores de corrosão, a proteção catódica e anódica, polarização. A aplicação desses métodos de proteção contra corrosão amplia as opções de materiais utilizáveis para fabricação da turbina e do difusor, já que a exigência da anticorrosividade do próprio material seria muito menor.

### **5.1.3 Abrasão**

A erosão por abrasão é um processo que ocorre devido ao efeito abrasivo de partículas diversas transportadas pelo escoamento que passam pela turbina. A intensidade da abrasão depende das condições do fluxo e das partículas presentes, mas, assim como a corrosão, gera rachaduras e áreas de concentração de tensão, as quais contribuem para a diminuição da vida útil da turbina.

### **5.1.4 Vedação**

O ambiente subaquático é uma das adversidades mais relevante. A penetração de água no interior da carcaça certamente comprometerá o funcionamento do sistema. O furo onde passa o eixo de transmissão é inevitável, por isso, uma solução de vedação é necessária nesse local para impedir a entrada de água. Como exemplo, pode-se citar a vedação por meio de gaxetas, retentores, selos mecânicos, bombas de caixa blindada.

Diante dessa adversidade, foi realizado um estudo específico e detalhado de selos mecânicos e pressurização da nacele para turbinas hidrocínicos por Quixadá (2014).

### **5.1.5 Cavitação**

Segundo Mehmood (2012), cavitação ocorre no escoamento de um fluido em alta velocidade, provocando uma queda de pressão brusca na superfície do corpo, conseqüentemente, há formação de bolhas de vapor. O fenômeno de cavitação começa quando a pressão estática do fluido cai e fica menor que a pressão de vapor.

A pressão do fluido tem dois componentes, estática e dinâmica. A pressão dinâmica é função da velocidade de escoamento e a pressão estática é a pressão de fluido. A formação de bolha de vapor ou da ebulição é uma função da pressão estática. A cavitação ocorre principalmente perto das pás da turbina que se movimentam mais rapidamente. A razão é que o aumento dos efeitos dinâmico locais que gera uma queda da pressão estática.

A formação de bolhas durante a cavitação não é o verdadeiro problema, mas sim o colapso destas bolhas. Os resultados desses colapsos são ondas de pressão de alta frequência que provocam erosões na superfície das pás. Pequenas bolhas apenas danificar a superfície da lâmina e não causam queda de eficiência, entretanto grandes bolhas podem reduzir a eficiência da turbina por perturbar o fluxo do fluido, causando separação.

A cavitação pode ser evitado através da concepção das pás da turbina, de modo que seja projetada para evitar que a pressão estática não alcance valores menores que os da pressão de vapor. Isto pode ser conseguido controlando o número de cavitação. Número de cavitação é expresso como (Mehmoood, 2012):

$$\sigma_c = \frac{(P_f - P_v)}{0.5\rho U^2}$$

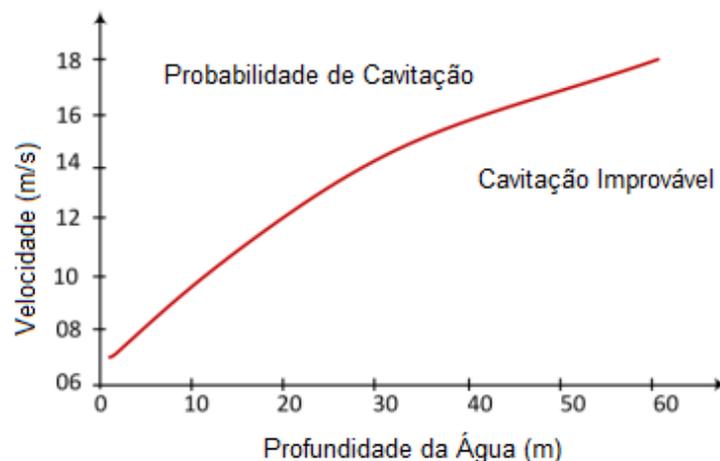


Figura 5.1 - Velocidade necessária para o início da cavitação em função da profundidade da água. (Fonte: adaptado de Fraenke, 2002)

Onde,  $P_f$  é a pressão a jusante,  $P_v$  é a pressão de vapor,  $\rho$  é a densidade do fluido e  $U$  é a velocidade do fluido. Quanto maior for o valor de  $\sigma_c$ , significa que a cavitação tem pequena probabilidade de ocorrer, e vice-versa. O mesmo princípio é ilustrado na figura 5.1 em termos da probabilidade de cavitação como uma função da velocidade e da profundidade da da água (Fraenke, 2002).

### 5.1.6 Difícil Intervenção Humana

Para quaisquer máquina ou sistema mecânico interrupções por razões técnicas reduzem drasticamente o tempo de trabalho real da turbina, afetando os custos e investimentos do projeto,

assim, confiabilidade se torna um requisito fundamental. Para turbinas hidrocinéticas não é diferente, especialmente em tecnologias *offshore*, em que o ambiente adverso pode atrasar ainda mais efeitos corretivos. Portanto, sistema de energia que operam no mar precisa ser suficientemente robusta e confiável para funcionar por longos períodos sem a intervenção humana.

Para Fraenkel (2002), o intervalo de manutenção de sistemas de energia renováveis marinhos de qualquer tipo tem de ser cinco anos ou mais, porque o custo de operações *offshore* necessária para realizar a manutenção ou substituição de componentes é muito maior do que para uma tecnologia *onshore* equivalente. Por isso, vale a pena investir no projeto e na escolha de materiais para se alcançar vidas operacionais longas para os componentes.

### 5.1.7 Infraestrutura Elétrica

De acordo com Hau (2006), a infraestrutura elétrica de grandes parques eólicos *offshore* é relativamente complexa em relação ao sítio em terra. Mesmo que a parte eletrotécnica seja igual, o ambiente de trabalho e suas adversidades exigem soluções diferentes. Entre os vários aspectos, três deles são fundamentais:

- A confiabilidade do sistema e o nível da sua redundância devem ser aumentados;
- Custos elevados dos componentes elétricos e mecânicos especiais para o ambiente de trabalho hostil, além da montagem e da instalação, propriamente ditos;
- Os limites geográficos que envolvem o conjunto gerador, o *GRID* e os grande centros urbanos.

Para aplicação de turbinas eólicas, é muito comum a deposição periódica de pedras ou mantas de concreto para prender e isolar os cabos no fundo do mar.

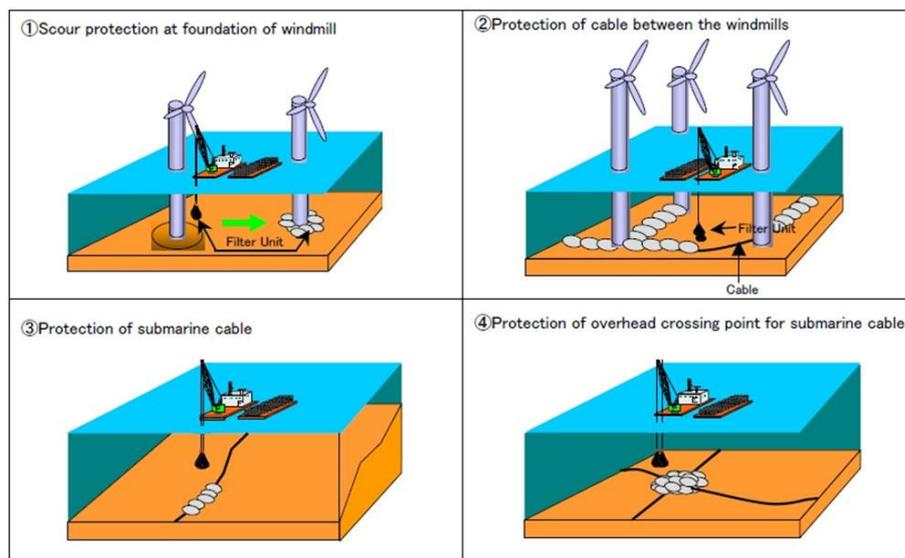


Figura 5.2 - Ilustração do procedimento de proteção dos cabos submersos em uma fazenda de turbinas eólicas.

(Fonte: Westislay Tidal, 2014)

## 5.2 ALTERNATIVAS DE FIXAÇÃO DE TURBINAS OFFSHORE

O potencial energético do aproveitamento do escoamento natural dos fluidos- seja do mar, dos rios, dos ventos- tem sido muito valorizado. Ao redor do mundo, o interesse na implementação dessa tecnologias cresce. Porém, em cada sítio uma realidade diferente é encontrada, o que exige o aprimoramento dos métodos de fixação das turbinas ou o desenvolvidos de novas técnicas. Cada uma dessas técnica tem vantagens e desvantagens que variam de acordo com as especificidades do sítio, por exemplo, da profundidade da água, do tamanho da estrutura da turbina, do ambiente de trabalho, da confiabilidade do projeto.

Dos tipos conhecidos, é importante citar (DNV/RisØ, 2002):

- Base de Gravidade
- Monopile
- Tripé
- Flutuante

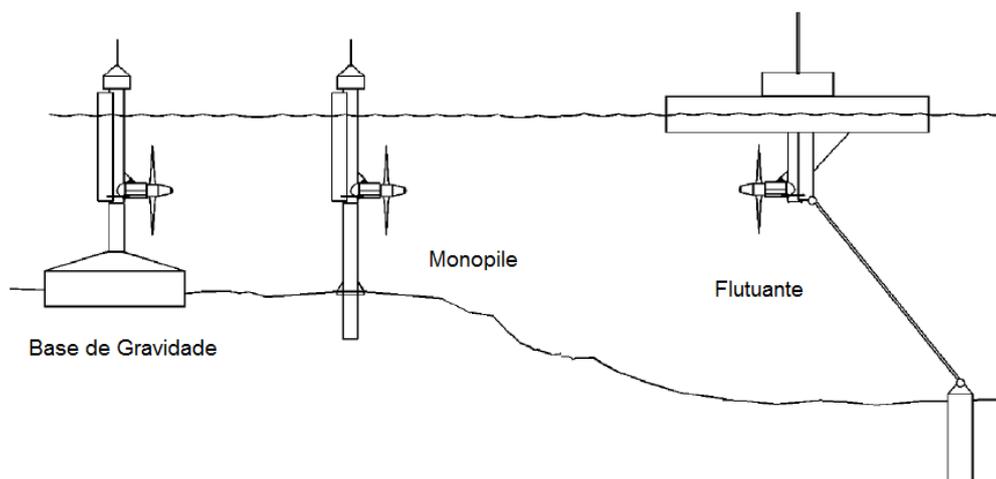


Figura 5.3 - Ilustração de três tipos de fixação aplicados para turbinas maremotriz mar.  
(Fontes: adaptado de *Power from marine currents* - Fraenkel, 2002)

### 5.2.1 Base de Gravidade

Método mais econômico para águas rasas de até 10 metros. Neste, uma compartimento de concreto é fabricado e posicionado na água. Por meio de enchimento dessa “caixa” com areia, há uma alteração da sua densidade e, conseqüentemente, da força que fixa a estrutura. Essa estrutura pode ser feita de aço, porém é preciso atentar para os efeitos corrosivos e abrasivos. Um exemplo de base de gravidade é mostrado na figura 5.4.

Devido a profundidade reduzida, ações de manutenção e remoção são feitas sem grande esforço comparado aos outros tipos de bases. Com relação a vibração, a base de gravidade é uma estrutura rígida.



Figura 5.4 - Peça da base de gravidade de uma turbina *éolica offshore*.  
(No Tíree Array, 2011)

## 5.2.2 Monopile

Uma solução relativamente simples e que requer pouca preparação do leito do mar ou do rio. Para estrutura de aço, com um martelo hidráulico, uma perfuração de 10 a 20 metros de profundidade é suficiente para a colocação do tubo de aço que irá sustentar a estrutura. O tubo pode ter um diâmetro de até 4 metros, dependendo do caso. É possível, também, construir uma estrutura monopile de concreto.

Para se fazer a conexão entre a estrutura de sustentação e a turbina, dois métodos são conhecidos: a conexão de flange e a ligação por solda. A conexão de flange tem instalação rápida e fácil, porém, deve ser suficientemente forte para suportar cargas extremas e a fadiga. Já a ligação por solda, aplicável ao aço, é muito resistente, mas o fato da soldagem ser submersa dificulta o processo e o torna mais caro. Por fim, é necessário fazer um tratamento superficial para minimizar os efeitos corrosivos que o aço pode sofrer, aumentando a vida útil da estrutura.

É uma solução de baixo custo, rápida instalação, para águas mais suaves e que, do ponto de vista vibracional, é um sistema “macio”, reduzindo os efeitos com carga de fadiga. A grande restrição é com relação a profundidade da água, indicada para no máximo 25 metros de acordo com a corrente.



Figura 5.5 – Turbina maremotriz dupla com base *monopile* da Siemens  
(Fonte: Siemens United Kingdom, 2014)

### 5.2.3 Tripé

A base em tripé é bem conhecido e muito aplicada. Consiste em um tubo circular de aço central suportado por três pilhas de aço engastadas no leito do rio. O engastamento é feito por tubos de aços mais finos cravados a uma profundidade de até 20 metros. Essa formação estrutural promove uma transferência de forças de compressão e de tração apenas.

A conexão entre o tubo circular central e a carcaça da turbina, assim como a base monopile, pode ser por meio de uma flange suficientemente forte ou da ligação por solda. Deve-se, também, selecionar um tratamento superficial para minimizar os efeitos danosos da corrosão.



Figura 5.6 – Turbina maremotriz da Rolls Royce com base tipo tripé.  
(Westislay Tidal, 2014)

Entre as vantagens desse conceito, tem-se que a disposição de tripé permite tubos de diâmetro menor e garante uma estabilidade considerável, tornando-se uma solução adequada para maiores profundidades de água. Em contrapartida, é uma estrutura que exige preparação do solo, o que encarece a instalação.

### 5.2.4 Flutuante

Segundo Fraenkel (2002), o conjunto flutuador consiste no posicionamento do rotor acoplado sob uma embarcação flutuante ancorada. Normalmente, esse dispositivo flutuante é essencialmente usado em águas profundas para sistemas *offshore*. O ambiente adverso do mar torna a amarração e a ancoragem trabalhos tecnicamente difíceis, em contrapartida, a instalação ou a remoção de um sistema flutuante é relativamente rápida e, portanto, versátil e barata. No rio, a amarração tem um processo diferente, já que o escoamento só tem uma direção, porém o fluxo pode ser mais intenso.

A tecnologia utilizada pela indústria de petróleo e gás *offshore* de amarração de plataformas pode contribuir para o desenvolvimento dessa solução. Nesse sistema, há uma grande componente da força ascendente de tração sobre os pontos de fixação, além da grande componente horizontal gerada pelo

escoamento. Além disso, quando a turbina é colocada em um rio, o flutuador acomoda o sistema sempre onde estão as maiores velocidades do escoamento, próximos a superfície.



Figura 5.7 - Turbina maremotriz dupla com flutuador da Bluetec (Bluewater – Power by People, 2014)

### 5.3 MÉTODO DE FIXAÇÃO APLICADO

Atualmente, uma das maiores demandas do mercado é a eficiência. Eficiência na produção de energia significa a busca por melhoria do aproveitamento dos insumos energéticos e diminuição do desperdício. Nesse caso, pode se descrever eficiência como a quantidade de energia produzida relativa ao tempo de vida do projeto, da instalação, de manutenção. Para uma avaliação comparativa criteriosa, seria necessário um estudo mais detalhado para avaliar o custo/benefício de cada uma das tecnologias, porém os custos envolvendo a instalação do sistema flutuante são menores, pois não precisa de fundação. Já os outros sistemas exigem uma infraestrutura robusta e fixa.

Com relação aos custos que dizem respeito a manutenção, considerando um mesmo conjunto gerador com vida, a mobilidade e a rapidez na remoção da turbina do rio dada pelo sistema flutuante são muito vantajosas para se realizar procedimentos de inspeção e manutenção. Por outro lado, os sistemas estáticos (tripe, base de gravidade e *monopile*) são projetados para passarem longos períodos de tempo sem qualquer intervenção, logo, há uma diminuição dos custos relativos a esse processo.

Outra demanda do mercado é produtividade. Para um mesmo conjunto gerador, o flutuador garante que o sistema estará acomodado sempre próximo a superfície do rio, ou seja, a turbina estará posicionada onde estarão as maiores de velocidade do escoamento, conseqüentemente, haverá maior aproveitamento da energia ali disponível. Já os sistemas estáticos se mantêm fixos, assim, sua produtividade é afetada de acordo com o nível do rio.

### 5.3.1 Concepções do Sistema de Fixação Anteriores

As condições de projeto encontradas a jusante da UHE de Tucuruí são detalhadas na tabela 5.1. Estas condições tem influência direta no concepção de qualquer sistema que seja projetado.

Tabela 5.1 - Condições de Projeto

Condição de Projeto	Valor
Diâmetro do rotor	10 m
Velocidade de corrente (U)	2,5 m/s
Velocidade de corrente mínima - $U_{\min}$	1,5 m/s
Velocidade de corrente máxima - $U_{\max}$	4,0 m/s
Nível Máximo em Cheia - $N_{\max}$	40 m
Nível Mínimo em Seca - $N_{\min}$	15 m

(Fonte: Brasil, 2012)

De acordo com o Relatório Parcial do Projeto Tucunaré (2012), a concepção inicial considerava difusores com perfil NACA no centro e o NACA 4412 nas laterais, com ângulos de ataque iguais a  $15^\circ$  e  $30^\circ$ , respectivamente. Os difusores seriam montados em pilares instalados no leito do rio. Além disto, os rotores seriam ligados à estrutura do difusor por um eixo horizontal. Assim, toda essa estrutura (difusor, eixo horizontal central e turbinas) se deslocaria verticalmente, guiada pelos pilares, a fim de que os rotores trabalhassem sempre à uma profundidade constante em relação à lamina d'água, como mostrado da figura 5.8.

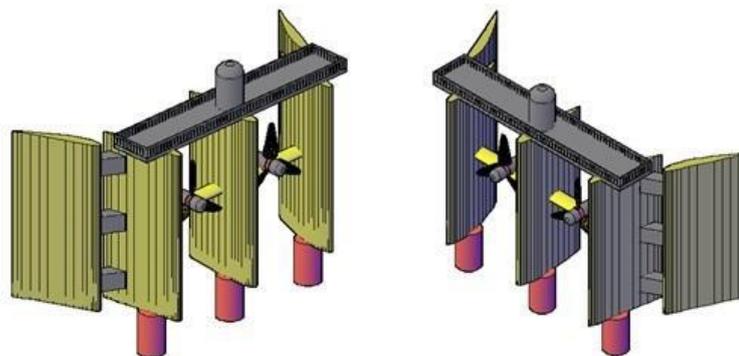


Figura 5.8 - Concepção inicial da fixação das turbina e difusores

Posteriormente, houve uma variação da proposta inicial por questões estruturais. A concepção inicial resultava em grandes momentos torcionais sobre os perfis aerodinâmicos do difusor. Este esforço somado aos esforços flexionais e axiais dificultava o dimensionamento para perfis de aço estrutural comercial. Assim, incluiu-se uma viga de ligação na base do difusor para anular o esforço de torção no perfil, como pode ser visto na figura 5.9.

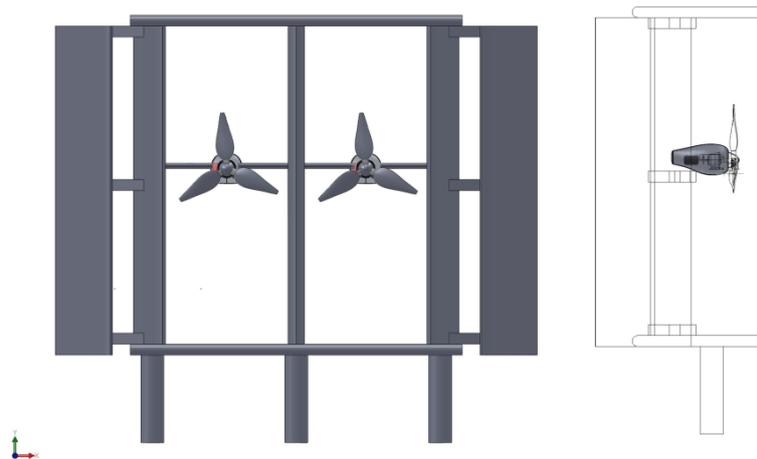


Figura 5.9 - Vista frontal e lateral com as variações do sistema de geração concebido inicialmente

Segundo o Relatório Parcial do Projeto Tucunaré (2012), esta concepção continuava esbarrando nas dificuldades de dimensionamento de pilares e fundação, visto que o peso da estrutura essencial para o dimensionamento de fundações do tipo base de gravidade adaptadas a estruturas sujeitas a momentos fletores consideráveis, por exemplo, barragens. Além disto, os custos de construção, transporte e instalação estimados eram elevados.

A fim de buscar uma alternativa a concepção Pilar-Difusor, ou seja, a construção de difusor integrado a estrutura de sustentação, optou-se pela concepção do difusor e turbina independente aos pilares de sustentação. Esta concepção mais simples permite maior liberdade a instalação do difusor ótimo, tanto do ponto de vista de geometria como do peso. Nesta concepção, o difusor possui a única função hidrodinâmica, como mostrado na figura 5.10.

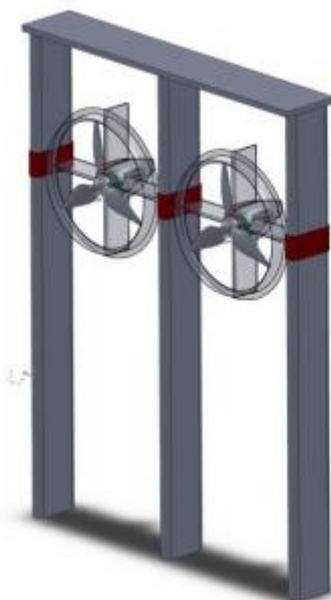


Figura 5.10 - Nova concepção que integra o difusor a estrutura de sustentação.

Este tipo de concepção estática da instalação da turbina hidrocinética foi preterido, apesar das boas características estruturais. Ao final de diversas avaliações, as concepções com pilares apresentaram uma limitação conceitual: a localização da turbina hidrocinética por pilares é definitiva. Erros de avaliação hidrológica na fase inicial e a fase de fundamento seriam um grandes riscos para a execução do projeto.

Outra proposta foi uma concepção flutuante, com o intuito de proporcionar mais flexibilidade quanto ao fundeamento da turbina hidrocinética. Nesta proposta o sistema rotor é suportado por um catamarã com flutuadores. A mobilidade desta estrutura tem implicações em facilitar o transporte do porto de construção até seu ponto de fundeamento utilizando as vias fluviais da região.

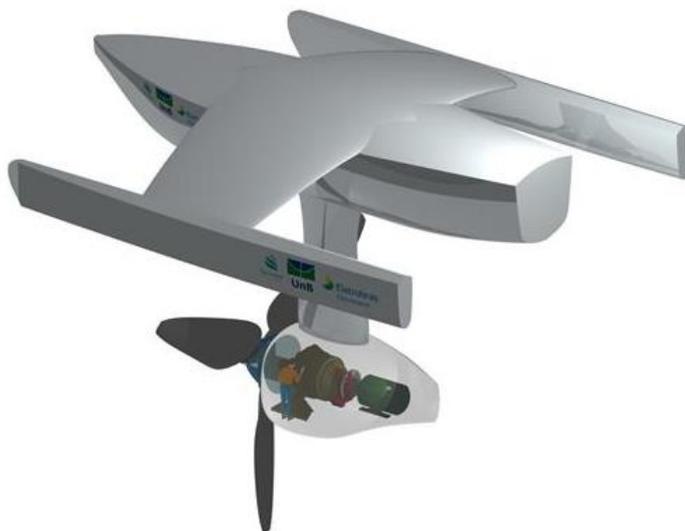


Figura 5.11 - Concepção tipo flutuador

Por fim, foi proposto uma concepção do tipo flutuador com içamento independente. Esta concepção foi motivada pelos aumento de custo na construção de um módulo adicional de operação e manutenção além dos modos geradores.



Figura 5.12 - Tipo flutuador com içamento independente

A principal desvantagem desta concepção está na dimensão do sistema de içamento. O sistema de içamento eleva o difusor parcialmente emerso, ou seja, ao menos as pás do rotor emergem, logo, o sistema de içamento deve se elevar acima do nível d'água de cerca de 7,50 metros. Os dois sistemas necessitam de uma superestrutura com alto alcance em altura. Outra dificuldade está no sistema de içamento que necessita erguer um conjunto de quase 20 toneladas. Quando o difusor estiver imerso, dois contrapesos de cerca de 10 toneladas estariam elevada a alguns metros do nível d'água, afetando a estabilidade da embarcação.

### **5.3.2 Conclusão Parcial**

Avaliando as propostas existentes para a implantação da turbina hidrocínética do Projeto Tucunaré, incluindo as diversas vantagens e limitações de cada sistema, e, principalmente a aplicabilidade no caso estudado de cada sistema de fixação, optou-se pelo método que utiliza uma embarcação flutuante ancorada.

Esse projeto não pretende desenvolver o projeto do flutuador, mas sim avaliar as exigências intrínsecas que o sistema de fixação implementado deve seguir, principalmente para superar as adversidades do ambiente de trabalho.

Foram citados anteriormente alguns pontos que merecem atenção quando esta tecnologia é aplicada em alto mar. No caso, apesar do rio ser um ambiente menos hostil, também se deve tomar medidas para minimizar os efeitos adversos que podem comprometer o sistema. A corrosividade, por exemplo, apesar de ser muito menos preocupante, existe e pode afetar o projeto. Assim, pensar em um material ou um tratamento superficial, como a proteção catódica, na estrutura do flutuador é importante.

Das diversas adversidades, duas em especial, devem ser citadas para o caso: abrasão, vedação. A vedação, como estudado por Quixadá (2014), é um fator determinante para o sucesso do projeto. Uma boa vedação contribuirá para o bom funcionamento da turbina e para a vida útil dos componentes eletromecânicos. Com relação a abrasão, as velocidades relativamente altas do rio podem maximizar bastante os efeitos abrasivos sofridos pela estrutura da turbina e do difusor, assim, os cuidados contra a erosão devem ser ainda maiores para evitar danos irreversíveis ao conjunto. As medidas preventivas contra a abrasão devem começar na escolha do material de fabricação ou do tratamento superficial.

Para o projeto do flutuador, deve-se prever também a variação do nível da água. Isto é, deve ser feito um estudo do sistema que une o flutuador a fundação no leito do rio, pois, caso o rio esteja no seu nível máximo e o cabo não seja suficientemente grande, o conjunto pode ser tracionado para o fundo do rio e imergir. Levando em conta essa tração mutável, deve ser desenvolvido também um sistema variável que proporcione um contra-peso para balancear esta força. Na aplicação do Projeto Tucunaré, a vantagem é que esta variação do nível da água é controlada e previsível, já que o rio muda apenas com a quantidade de chuva e com a vazão de água na saída da UHE de Tucuruí.

## 6 MONTAGEM DA TURBINA HIDROcinÉTICA

Para facilitar a montagem do conjunto da turbina, elaborou-se um roteiro com os passos que devem ser seguidos. Além disso, serão detalhados alguns cuidados que devem ser tomados para que a turbina trabalhe com máximo desempenho e haja um prolongamento da sua vida útil.

### 6.1 CUIDADOS COM A MONTAGEM

Todos os elementos mecânicos que fazem parte do projeto da turbina, fabricados ou selecionados, devem ser cuidadosamente posicionados e instalados. Grande parte dos cuidados específicos e relativos aos elementos mecânicos selecionados, como o motor, a caixa multiplicadora, o freio, estão dispostos nos seus respectivos manuais. Por outro lado, é fundamental dar diretrizes com relação a montagem do conjunto, principalmente ao elementos que proporciona a sustentação e a interligação do sistema, o chassi e os eixos, respectivamente. Sendo assim, deve-se ter atenção redobrada no posicionamento, nos gabaritos e na fabricação deste componente base para evitar vibrações, esforços e até falhas indesejadas.

Na fabricação do eixo e do chassi, as tolerâncias geométricas, como retitude, planeza, circularidade e cilindridade, são muito importantes. Quanto ao conjunto, a atenção deve estar voltada para desvios de orientação e posição também, pois muitos se interrelacionam. Pode-se citar, por exemplo:

1. Paralelismo
2. Perpendicularidade
3. Inclinação
4. Concentricidade
5. Coaxialidade
6. Batimento

### 6.2 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM

Para facilitar a montagem da turbina, elaborou-se um roteiro com os passos que devem ser seguidos. A montagem foi dividida em duas etapas: montagem interna e externa. Esta divisão se fez necessária devido as incertezas do projeto da nacela, que ainda não foi finalizado. Assim, na montagem externa, partiu-se do princípio que o chassi já está posicionado dentro da nacela.

#### **Etapa 1: Montagem Interna**

1º passo: Posicionamento do redutor no chassi.

O primeiro passo da montagem consiste no posicionamento do redutor, para isto, deve-se instalar também o mancal principal. Os parafusos de fixação do redutor e do mancal devem ser gabaritados, garantindo a concentricidade e a coaxialidade do eixo de saída do redutor com o furo do mancal principal. Uma boa montagem deste elemento certamente prologará a vida útil dos componentes, além de minimizar os efeitos vibracionais indesejados. A figura 6.1 ilustra o primeiro passo.

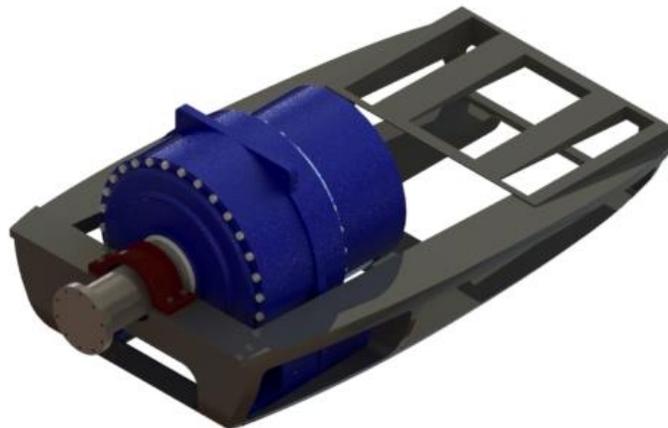


Figura 6.1 - Redutor posicionado no chassi

2º passo: Posicionamento do conjunto de freio.

Além dos cuidados com a montagem dos componentes do freio, que devem ser dispostos pelo fabricante, deve-se também atentar na montagem da interligação do módulo central do freio ao eixo de entrada do redutor e ao eixo de saída do motor. No caso, além das atribuições de frenagem, cabe ao componente do freio fazer a ligação entre motor e redutor, tornando sua instalação fundamental para alcançar um rendimento mais próximo ao de projeto. Assim, as tolerâncias geométricas devem ter amplitude reduzida.

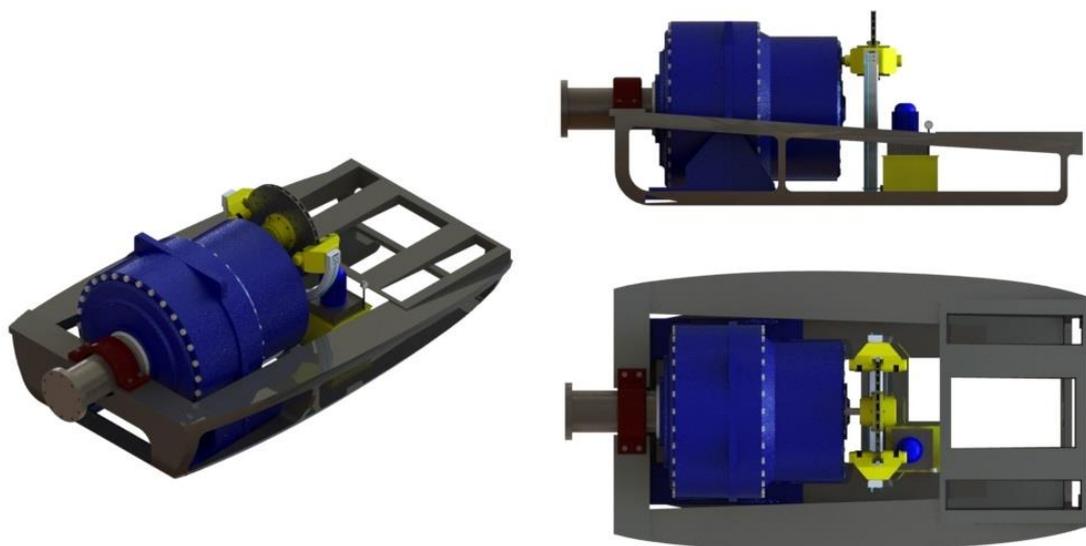


Figura 6.2 - Ilustração do posicionamento do freio no chassi.

3º passo: Posicionamento do motor.

O terceiro passo da montagem consiste no posicionamento do motor. Os parafusos de fixação do motor também devem ser gabaritados, garantindo a concentricidade e a coaxialidade do eixo de saída do motor com o módulo central do freio. Uma boa montagem deste elemento certamente prologará a vida útil dos seus componentes internos, além de minimizar os efeitos vibracionais indesejados. A figura 6.3 ilustra o primeiro passo. Torna-se opcional a utilização de calços de borrachas para diminuição de possíveis ruídos de vibrações gerados pela própria máquina.

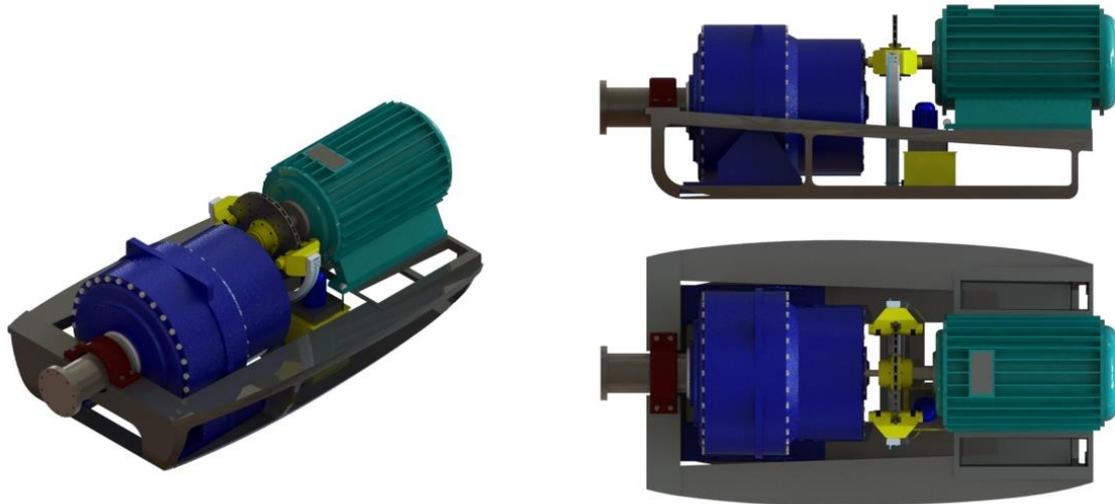


Figura 6.3 - Posicionamento do motor no chassi.

4º passo: Instalação da espinha do chassi.

Este é um elemento estrutural muito importante e deve ser montado com atenção para manter a integridade e a proteção aos conjuntos eletromecânicos.

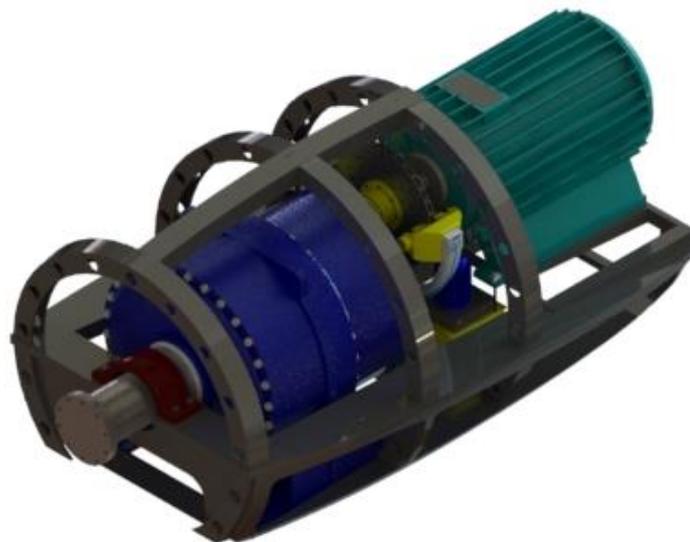


Figura 6.4 - Montagem final da estrutura interna da nacela da turbina.

## Etapa 2: Montagem Externa

1º passo: Montagem dos selos mecânicos.

Tratando da parte exterior da turbina, deve-se acoplar ao eixo de saída do redutor o selos mecânicos, como mostrado na figura 6.5.



Figura 6.5 - Detalhe do selo mecânico.

2º passo: Montagem do hub.

O *hub* é um componente que ficará exposto as adversidades do escoamento, logo, deve ser bem fixado para que não haja falhas que comprometam as pás, o conjunto da necele, o difusor e os suportes.



Figura 6.6 - Montagem do hub a nacele através do eixo do redutor.

3º passo: Montagem das pás ao hub.

Também são componentes externos e expostos as adversidades, além disto, são elementos de alto rendimento e que sofrerão esforços variáveis intensos, portanto devem ser bem fixados. Por se tratarem de peças fundamentais para o projeto, deve-se tomar máximo cuidado durante a instalação e a movimentação das pás para não as comprometer.

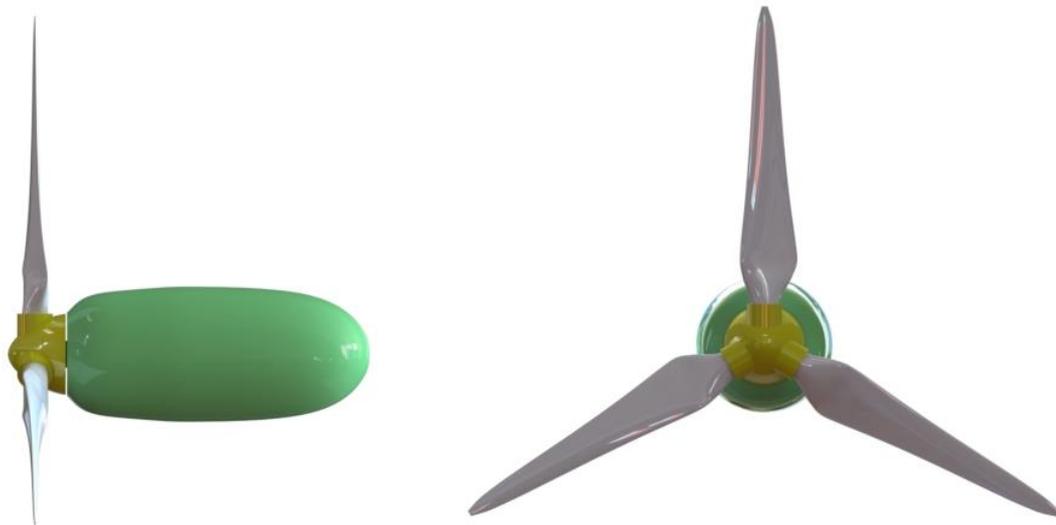
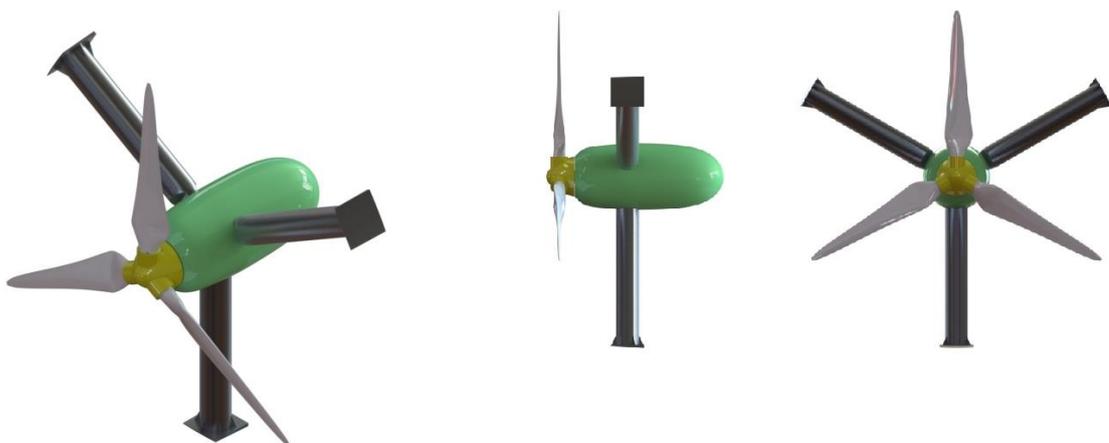


Figura 6.7 - Pás montadas no hub.

4º passo: Instalação dos suportes.

Com a turbina suportada, os suportes projetados devem ser adicionados ao conjunto. É um procedimento que requer muita atenção e habilidade, visto que são peças grandes que irão passar por processos de soldagem suspensas do chão e em posições complexas. Da mesma forma, deve-se tomar muito cuidado com o posicionamento das barras roscadas e os fixadores, para evitar folgas e garantir o aperto. Nesta etapa, o silicone de poliuretando deve ser aplicado nos furos na nacele de passagem dos suportes para criar uma barreira de vedação.



5º passo: Montagem do conjunto ao difusor.

Com a turbina e os suportes elevados, devem ser posicionados no difusor. Este é o passo mais complexo, pois é um trabalho minucioso e com grandes massas envolvidas, também passarão por processos de soldagem suspensas do chão e em posições não usuais. As etapas de soldagem nas bases devem ser precisas e bem feitas para garantir a integridade do projeto. Deve-se atentar para a concentricidade entre a turbina e o difusor, além das angulações dos suportes.



Figura 6.8 - Vista frontal do conjunto difusor-turbina.

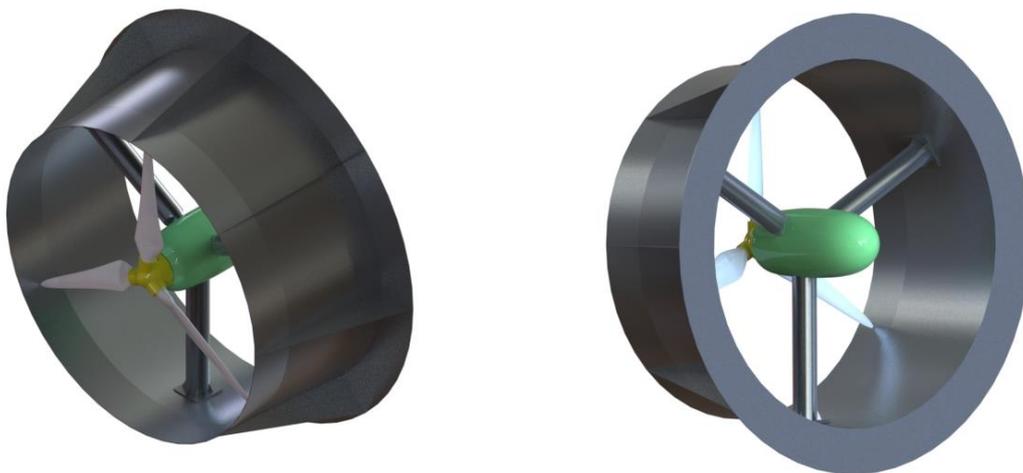


Figura 6.9 - Ilustração da montagem final.

## 7 CONCLUSÃO

Em um projeto de grande porte, como o do Projeto Tucunaré, a inclusão das considerações de montagem, manutenção e instalação são muito importantes, como pode ser visto ao longo do trabalho. Um bom planejamento desses aspectos pode aumentar a eficiência e a vida útil da máquina, além de gerar economias consideráveis, um fator essencial, visto que é uma tecnologia que está se desenvolvendo.

Com o objetivo básico de permitir que a turbina consiga chegar ao local de instalação e entre em funcionamento, na primeira etapa, foi realizada uma análise das alternativas de transporte da turbina, um estudo que dá diretrizes para a movimentação desta carga com segurança e um estudo das tecnologias aplicáveis para fixação do conjunto gerador no leito do rio. Foi feito, ainda, uma análise crítica da implementação e fabricação do difusor, visto que sua inclusão pode causar alterações nas questões relacionadas ao transporte, a montagem e a instalação, além de um projeto de suportes para adaptar a turbina a inclusão do difusor.

Primeiramente, foi realizada uma análise crítica da implementação do difusor ao conjunto gerador e um estudo de materiais para fabricação do mesmo. Para uma tecnologia que exige altos níveis de produtividade e eficiência, o difusor se torna uma peça fundamental. Ele consegue elevar a geração de energia consideravelmente. Com relação ao material de fabricação, foram apresentadas as propriedades mecânicas e físicas de quatro materiais distintos. Dentre as diversas considerações, pode-se destacar que os aços apresentam excelente resistência mecânica, porém uma massa específica elevada, exigindo uma estrutura mais robusta. Já o alumínio e a fibra de vidro, por outro lado, apresentam uma massa específica reduzida, mas as propriedades mecânicas não são tão boas quando comparadas com as dos aços. Outra característica importante é a resistência a corrosão, e nesse ponto o aço AISI 4340 é o pior. Foi realizado também um estudo dos esforços sofridos pelo difusor avaliando o comportamento da estrutura fabricada com os diferentes materiais citados, além de uma análise econômica para fabricação desta peça. Por fim, pode-se concluir que a implementação do difusor é válida na busca por maior eficiência e produção de energia. Além disto, decidiu-se pela utilização do alumínio naval 5052 como material base, o qual atendia as exigências do projeto, principalmente por ter boas propriedades mecânicas, massa específica baixa e custo final inferior aos demais. Deve ser dito que o compósito alcançou resultados muito parecidos com o alumínio, porém há muitas incertezas com relação ao seu comportamento, principalmente devido ao porte da estrutura.

A outra fase, era projetar os suportes de sustentação da turbina no difusor. O processo de criação foi feito a partir de um conceito pré-existente e simplificado, evoluindo até o modelo adotado. A grande dificuldade foi conceber parte de uma peça com indefinições das outras partes do projeto, como por exemplo, o projeto da nacela que não foi finalizado. Para os suportes, também de alumínio naval 5052, pensou-se em uma concepção que utilizasse métodos de fabricação simplificados, além de fixação por solda e barras roscadas. Isto certamente traria redução de custos ao projeto final.

Com relação ao transporte, pode-se observar que existem diversas alternativas para que o conjunto chegue até o local de instalação. As variáveis de custo do transporte, dimensões da carga e peso da carga, trecho percorrido são fundamentais para tal. Essa decisão é atrelada a montagem do conjunto. Transportar peças grandes e complexas torna o processo difícil e caro, entretanto, transportar peças menores, levando em conta a montagem no local de instalação, permite uma maior flexibilidade. No

caso, foram estimadas as variáveis desconhecidas e utilizados os parâmetros conhecidos para simular um orçamento. Isto foi feito para que no futuro seja possível estimar um intervalo do custo cobrado por uma transportadora, assim, quando o projeto da turbina estiver em fase final, prestes a ser executado, será possível coletar antecipadamente as informações corretas e prever os custos do frete da turbina.

Para a movimentação de carga, primeiramente, foram estimadas todas as características fundamentais da carga necessárias para o desenvolvimento de um “plano *rigging*”. Em seguida, foi mostrado como se deve proceder em um içamento de forma segura e uma descrição dos procedimentos que devem ser tomados durante a descida da turbina, levando em conta os momentos críticos. Além disso, foi feito um estudo dos acessórios que poderiam ser aplicados para o caso. Por fim, foi especificado um método que pode ser usado no Projeto Tucunaré com pega-chapas, já que com esse equipamento não seria necessário fazer alterações estruturais no difusor.

Na fase final, tratou-se dos métodos de fixação da turbina. Foram apresentadas algumas das tecnologias aplicadas em turbinas eólicas e de maré que podem ser adaptadas ao caso do Projeto Tucunaré. Além disso, foram listadas uma série de adversidade que as turbinas *offshore* enfrentam, já que, apesar de o mar ser um ambiente mais hostil que o rio, apresentam características muito semelhantes. Concluiu-se, então, que o sistema flutuante é mais indicado para o caso e que no projeto de dimensionamento deste sistema de fixação deve-se atentar aos cuidados relacionados ao ambiente de trabalho (abrasividade, vedação).

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- P. L. Fraenkel. Power from marine currents. Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2002; vol. 216, 1: pp. 1-14.
- Det Norske Veritas,; Wind Energy Department, Risø National Laboratory. Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Edition. Copenhagen, 2002.
- Grady M. Isensee, Hayder Abdul-Razzak. Modeling and Analysis of Diffuser Augmented Wind Turbine, Proceedings of International Journal of Energy Science; IJES Vol.2 Iss.3 2012 PP.84-88.
- N. Mehmood, Z. Liang, J. Khan. Study of NACA 0015 for Diffuser Design in Tidal Current Turbine Applications, IJE TRANSACTIONS C: Aspects Vol. 25, No. 4, (December 2012) 373-380.
- N. Mehmood, Z. Liang and J. Khan. Diffuser Augmented Horizontal Axis Tidal Current Turbines, Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 4(18): 3522-3532, 2012.
- CALLISTER, William D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- M. C. Capella, C. A. Soufen , G. V. Correia, O. S. Grizola, C. A. F. Pintão, M. Imaizumi. Propriedades mecânicas em laminados fibras de vidro e fibra de carbono em resina epóxi, 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 04 a 08 de Novembro de 2012, Joinville, SC, Brasil.
- Molded Fiber Glass Companies [s.d.]. MFG. Acesso em 3 de junho de 2014, disponível em <http://www.moldedfiberglass.com/>
- Grupo Gonçalves Dias S/A [s.d.]. GGD *Metals*. Acesso em 4 de junho de 2014, disponível em <http://www.ggdmetals.com.br/>
- MatWeb. [s.d.]. *MatWeb - Material Property*. Acesso em 3 de junho de 2014, disponível em [www.matweb.com](http://www.matweb.com).
- GERDAU [s.d.]. Catálogo de Aços Catálogo e Liga. Acesso em 3 de junho de 2014, disponível em <http://www.moldedfiberglass.com/>
- Associação Brasileira do Aço Inoxidável. [s.d.]. ABINOX. Acesso em 3 de junho de 2014, disponível em <http://www.abinox.org.br/>.
- The A to Z of Materials [s.d.]. AZoM – E-Glass. Acesso em 3 de junho de 2014, disponível em <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=764>.
- Windlens [s.d.]. Acesso em 14 de junho de 2014, disponível em <http://windlens.com/>.
- HAU, Erich. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2ª edição. Berlin: Springer, 2006.
- Agência Nacional de Transporte Terrestre [s.d.]. ANTT. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.antt.gov.br/>.
- Ministério do Transporte [s.d.]. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.transportes.gov.br/>.
- Agência Nacional de Transportes Aquaviários [s.d.]. ANTAQ. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.antaq.gov.br/>.
- Google Maps [s.d.]. GOOGLE. Acesso em 01 de outubro de 2014, disponível em <https://www.google.com/maps/@-2.2390443,-49.2435244,7z/>.
- INFRAERO CARGO [s.d.]. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://tecanet.infraero.gov.br/infraerocargo/>.
- Norma Regulamentadora. NR 12: – Segurança No Trabalho Em Máquinas E Equipamentos – Portaria MTE n.º 1.893, de 09 de dezembro de 2013 , Brasil.
- Norma Regulamentadora. NR 11: – Transporte, Movimentação, Armazenagem E Manuseio De Materiais – Portaria SIT n.º 82, de 01 de junho de 2004, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8400: Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas - Comitê Brasileiro de Mecânica e Comissão de Estudo de Pontes Rolantes. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. - PETROBRAS. N-1965: Movimentação de Carga, Inspeção, Manutenção e Operação de Equipamentos Terrestres - Comissão de Normalização Técnica e Grupo Especial de Movimentação de Carga. Rio de Janeiro, 2013.

PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. - PETROBRAS. N-2869: Segurança em Movimentação de Carga - Comissão de Normalização Técnica e Segurança Industrial. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 2408: Cabos de aço para uso geral - Requisitos mínimos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 4309: Guindastes - Cabo de aço - Critérios de inspeção e descarte - Comitê Brasileiro de Navios, Embarcações e Tecnologia Marítima e Comissão de Estudo de Acessórios de Amarração e Movimentação de Cargas a Bordo: ABNT, 1984.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17893:2004: *Steel wire ropes -- Vocabulary, designation and classification*.

Codo, M. A., W. Casarim. Equipamentos de Elevação e Transporte. Ordem de serviço de higiene segurança e medicina do trabalho, International Paper do Brasil Ltda, 2007.

Frauches-Santos, C.; Albuquerque, M. A.; Oliveira, M. C. C.; Echevarria, A. A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos. Rev. Virtual Quim., 2014, 6 (2), 293-309. Data de publicação na Web: 20 de dezembro de 2013, disponível em <http://www.uff.br/rvq>.

SENAI/CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão). CPM - Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção: Noções Básicas de Amarração, Sinalização e Movimentação de Cargas. Espírito Santo, 1996.

Roncetti, Eng. Leonardo. Planos de rigging: A importância de bons projetos de içamento para segurança e racionalização das obras, 2010. Acesso em 22 de maio de 2014, disponível em <http://www.rigger.com.br/?cat=7>.

Quixadá, R. F. Estudo de selo mecânico para turbinas hidrocínéticas. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2014.

CIMAF. Manual Técnico de Cabos. Brasil, 2014.

ESAB. Apostila de Soldagem MIG/MAG. Brasil, 2014.

RUDENKO, N. Máquinas de Elevação e Transporte, Rio de Janeiro: Ed. Técnicocientífica, 1976.

Brasil Antonio Cesar Jr. Pinho [et al.] Concepção Inicial do Hidrogerador [Relatório] : Relatório Técnico / UnB/Eletronorte Projeto TUCUNARÉ. - Brasília : [s.n.], 2012.

Projeto Tucunaré P&D. Aproveitamento de Energia Hidrocínética em Águas Vertidas e Turbinadas: Caderno de Especificações da Unidade de Geração Hidrocínética HTUC 01. Brasília, 16 de maio de 2014.

Cabos de Aço CableMAX [s.d.]. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.cabosdeacocablemax.com.br/>.

RUD Brasil [s.d.]. Acesso em 26 de maio de 2014, disponível em <http://www.rud.com.br/>.

FUSOPAR [s.d.]. Acesso em 07 de novembro de 2014, disponível em <http://www.fusopar.com.br/produtos/>.

Lovatto, Marco Leonardelli. Trem: mobilidade rápida, eficiente e confiável. Publicação: 20 de junho de 2012. Disponível em: <http://trilhos.maodupla.org/2012/06/20/trem-mobilidade-eficiente/>, acessado em 16 de maio de 2014.

Windpower Engineering & Development. When is a barge faster than a truck? Publicação: 5 de Outubro de 2011. Disponível em: <http://www.windpowerengineering.com/construction/when-is-a-barge-faster-than-a-truck/>, acessado em 16 de maio de 2014.

van der Linden, R. S. Acidente Itaquerão 27/11/13 – Guindaste LR-11350. Publicação: 29 de novembro de 2013. Disponível em: <http://artigostecnicosbvd1.blogspot.com.br/2013/11/acidente-itaquerao-271113-guindaste-lr.html>, acessado em 16 de maio de 2014.

REPIAN. Olhal Correto para o Molde Publicação: 4 de Junho de 2012. Disponível em: <http://www.repian.com.br/olhal-correto-para-o-molde/>, acessado em 18 de maio de 2014.

Columbus McKinnon Brasil [s.d.]. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.cmdobrasil.com.br/>.

Westislay Tidal. Installation Methodology Turbines. Disponível em: <http://www.westislaytidal.com/technology.html>, acessado em 16 de maio de 2014.

No Tiree Array. Visit to Off shore Windfarms in Morecombe Bay: Alternatively as gravity type foundations deployed on the Thornton Bank Array (30Km off the Belgian Coast). Disponível em: <http://www.no-tiree-array.org.uk/?p=1157>, acessado em 16 de maio de 2014.

Siemens United Kingdom [s.d.]. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.siemens.co.uk/>.

- Bluewater – Power by People [s.d.]. New Energy. Acesso em 16 de maio de 2014, disponível em <http://www.bluewater.com/new-energy/>.
- BRASIL. Resolução N° 318, de 05 de Junho de 2009. Estabelece limites de pesos e dimensões para circulação de veículos de transporte de carga e de transporte coletivo de passageiros em viagem internacional pelo território nacional. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/>.
- FLEURY, P.F., FIGUEIREDO, K., WANKE, P. (org.). Logística Empresarial: A Perspectivas Brasileira. Coleção COPPEAD de Administração. São Paulo: Atlas, 2000.
- PARMAR, R.S. Welding Processes and Technology Khanna Publishers 1995.
- CORAINI, R. Soldagem Gmaw Robotizada De Alumínio: Influência do Tipo de Chanfro, Tecimento e Sentido de Laminação na Distorção. Unesp – Bauru, 2009.

## **9 ANEXOS**

### **9.1 ANEXO 1: DESENHOS DE FABRICAÇÃO**