



## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UM GERADOR EÓLICO COM PÁS COMPÓSITAS**

Por,

**Antenor Timo Pinheiro de Almeida**

**Micael Martins da Silva**

**Brasília, 29 de junho de 2011.**

**UNIVERSIDADE DE BRASILIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UNIVERSIDADE DE BRASILIA**

**Faculdade de Tecnologia**

Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UM GERADOR EÓLICO COM PÁS COMPÓSITAS

POR,

**Antenor Timo Pinheiro de Almeida**

**Micael Martins da Silva**

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

### Banca Examinadora

Prof. Flamínio Levy Neto, UnB / ENM (Orientador)

Prof. Antônio Cesar Pinho Brasil Junior, UnB / ENM

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira, UnB / FGA

Brasília, 29 de junho de 2011

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço primeiramente a meus pais, Mozart e Elisabeth, por todo o tempo de dedicação incondicional, tempo esse dedicado a melhor formação possível de seus filhos. Agradeço as minhas irmãs, minha sobrinha e toda a família pela dedicação e compreensão dos momentos de ausência. E a todos os amigos que me deram total apoio nessa aventura de formação como engenheiro.*

*Agradeço a todos os amigos de “autódromo”, os quais tem grande contribuição na minha formação. Agradeço também ao Cefas, por ter compartilhando tanto conhecimento ao longo desses anos de formação e ao apoio neste projeto. E também a toda equipe da Veloztech.*

*Muito obrigado aos meus amigos de curso, por tantas horas de “biblio, salinha, e outros”, por tanto conhecimento aprendido e difundido. E a todos os colegas de curso.*

*Agradeço ao “Antena”, grande parceiro de vários trabalhos, inclusive esse.*

*Muito obrigado aos mestres e doutores, e a todos os funcionários do departamento de engenharia mecânica da UnB, os quais tem contribuição fundamental em mais essa vitória.*

*Aos esquecidos, deixo aqui também o meu muito obrigado, pois sem dúvidas todos tem a sua contribuição em minha vida.*

*Micael Martins Silva*

*Agradeço aos meus pais, Norton e Simone, pelos anos de dedicação e apoio em minha formação, por me ampararem nos momentos de tristeza e por exaltarem minhas conquistas. A minha irmã Marília por suportar minhas brincadeiras e a minha irmã Carolina pelos anos de amizade e companheirismo.*

*Agradeço a todos os funcionários da Veloztech por toda a ajuda durante este projeto.*

*Obrigado a meus colegas de UnB, em especial ao meu amigo “Mica” pelos anos de convivência e trabalhos realizados em conjunto. Aos funcionários do departamento de Engenharia Mecânica por toda a ajuda nesses 5 anos de graduação.*

*Antenor Timo*

*“O vento e as ondas estão sempre a favor do navegador habilidoso”*  
*Edward Gibbon*

---

## **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo principal detalhar a etapa de fabricação de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte, identificando os passos da fabricação das pás com reforço em fibra de vidro e montagem do aerogerador bem como comparar o funcionamento do gerador utilizando pás em fibra de vidro em um primeiro momento e em fibra de carbono em um segundo momento. Verificou-se ao final do trabalho que as pás em fibra de carbono obtiveram um melhor resultado, gerando energia a velocidades inferiores as pás em fibra de vidro.

---

## **ABSTRACT**

This paper aims to detail the main stage of manufacture of a horizontal axis wind small turbine, identifying the steps in the manufacture of blades with reinforced fiberglass and assembly of the turbine, and to compare the operation of the generator using bladesfiberglass in the first instance and carbon fiber in a second time. There was the end of the work that the blades of carbon fiber obtained a better result, generating power at lower speeds the blades of fiberglass.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1	ESTADO DA ARTE – TURBINAS EÓLICAS EXISTENTES NO MERCADO.....	3
2.1.1	Turbinas eólicas de eixo horizontal .....	3
2.1.2	Turbinas eólicas de eixo vertical .....	5
2.2	PARTES DE UMA TURBINA EÓLICA .....	6
2.3	O VENTO .....	7
2.3.1	O vento em um aspecto global.....	7
2.3.2	O vento no Distrito Federal .....	8
2.4	CONTROLE DE POTÊNCIA E VELOCIDADE DAS TURBINAS EÓLICAS .....	10
2.4.1	Controle por estol .....	10
2.5	MATERIAIS COMPÓSITOS .....	10
2.5.1	Matriz de Compósitos.....	11
2.5.2	Reforço de Compósitos .....	15
2.5.3	Micromecânica de compósitos estruturais – Frações de volume e massa.....	17
2.6	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	19
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>31</b>
3.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS PÁS .....	31
3.2	MONTAGEM DO AEROGERADOR.....	50
3.3	GERADOR E CAIXA MULTIPLICADORA .....	58
<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS.....</b>	<b>59</b>
4.1	RESULTADOS COM PÁS EM FIBRA DE VIDRO.....	63
4.2	RESULTADOS COM PÁS EM FIBRA DE CARBONO .....	64
4.3	ANÁLISE DE CUSTO .....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

# **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1. Turbina de eixo horizontal .....	4
Figura 2.2. Custo por KW instalado em função do diâmetro .....	5
Figura 2.3. Turbina eólica de eixo vertical [http://www.dforcesolar.com/pt/turbinas-eolicas/] .....	6
Figura 2.4. Vista do interior de uma carcaça de TEEH .....	7
Figura 2.5. Velocidade média trimestral do vento no Brasil. ....	9
Figura 2.6 Sistema de controle por estol .....	10
Figura 2.7 Estrutura molecular de um poliéster (spsystems, 2003) .....	13
Figura 2.8Laminação manual - SAINT-GOBAIN-VETROTEX .....	21
Figura 2.9 - Laminação à pistola - SAINT-GOBAIN-VETROTEX .....	22
Figura 2.10 - Máquina SMC - SAINT-GOBAIN-VETROTEX.....	23
Figura 2.11 – Moldagem à vacuo - (MENDONÇA, 2005) .....	25
Figura 2.12 – Moldagem por pressão - (MENDONÇA, 2005) .....	25
Figura 2.13 – Moldagem em autoclave - (MENDONÇA, 2005) .....	25
Figura 2.14 - Processo de prensagem a quente e/ou a frio - SAINT-GOBAIN-VETROTEX.....	26
Figura 2.15 - Processo de BMC - SAINT-GOBAIN-VETROTEX .....	27
Figura 2.16 - Processo de laminação contínua - SAINT-GOBAIN-VETROTEX .....	28
Figura 2.17 - Processo RTM - SAINT-GOBAIN-VETROTEX .....	29
Figura 2.18 - Processo de enrolamento filamentar - SAINT-GOBAIN-VETROTEX .....	29
Figura 2.19 - Processo de pultrusão - SAINT-GOBAIN-VETROTEX.....	30
Figura 2.20 - Processo de centrifugação - SAINT-GOBAIN-VETROTEX.....	30
Figura 3.1 – Tecido de fibra de vidro .....	32
Figura 3.2 – Massa do tecido fibra de vidro .....	32
Figura 3.3 – Recuperação do molde .....	32
Figura 3.4 – Detalhe do reparo no molde .....	33
Figura 3.5 – Aplicação do desmoldante .....	33
Figura 3.6 – Massa dos moldes .....	33
Figura 3.7 – Corte dos modelos das pás .....	34
Figura 3.8 – Massa das fibras .....	34

Figura 3.9 – Massa de resina e adição do catalisador .....	35
Figura 3.10 – Laminação .....	36
Figura 3.11 – Aplicação de resina no molde e no tecido de fibra de vidro .....	36
Figura 3.12 – Término do processo de laminação .....	36
Figura 3.13 – Cura na bolsa de vácuo .....	37
Figura 3.14 – Pressão de sucção .....	37
Figura 3.15 – Peças curadas .....	38
Figura 3.16 – Massa das peças curadas .....	38
Figura 3.17 – Corte do excesso das peças .....	39
Figura 3.18 – Pesagem dos resíduos cortados .....	39
Figura 3.19 – Processo de emenda das partes.....	40
Figura 3.20 – Desmolde e pesagem das pás .....	40
Figura 3.21 – Marcação para o posicionamento da haste .....	41
Figura 3.22 – Determinação do volume de poliuretano.....	41
Figura 3.23 – Volume compostos A e B de poliuretano.....	42
Figura 3.24 – Corte e lixamento das soldas do tubo das hastes .....	42
Figura 3.25 – Posicionamento para a expansão do poliuretano .....	43
Figura 3.26 – Pás prontas e montadas no gerador .....	43
Figura 3.27 – Detalhe da fixação das pás por parafuso .....	45
Figura 3.28 – Lixamento das pás.....	45
Figura 3.29 – Pintura da pás .....	45
Figura 3.30 – Pesagem da 3 <sup>a</sup> pá.....	46
Figura 3.31 – Pesagem da 2 <sup>a</sup> pá.....	46
Figura 3.32 – Pesagem da 1 <sup>a</sup> pá.....	47
Figura 3.33 – Gerador montado 1 .....	47
Figura 3.34 – Gerador montado 2.....	47
Figura 3.35 – Nacele do aerogerador.....	51
Figura 3.36 – Pico da torre .....	52
Figura 3.37 – Peça adaptadora.....	52
Figura 3.38 – Montagem da peça adaptadora no pico da torre .....	53
Figura 3.39 – Fabricação da peça adaptadora.....	53

Figura 3.40 – Furação da base com mancal no centro de usinagem .....	54
Figura 3.41 – Detalhe do furo do cubo .....	54
Figura 3.42 – Haste direcional.....	55
Figura 3.43 – Gerador eólico montado .....	55
Figura 3.44 – Gerador eólico montado com a peça adaptadora.....	56
Figura 3.45 – Gerador eólico montado na torre sem as pás .....	56
Figura 3.46 – Gerador eólico montado na torre com as pás .....	57
Figura 3.47 – Gerador eólico no prédio SG09.....	57
Figura 3.48 Especificações do motor/gerador da Bosch.....	58
Figura 4.1 - Gerador montado na cobertura do SG9.....	59
Figura 4.2 - Gerador montado na picape .....	60
Figura 4.3 - Circuito montado para a aquisição dos dados .....	60
Figura 4.4 - Torre para teste .....	61
Figura 4.5 – Detalhe da fixação, orelhas antes de serem soldadas .....	61
Figura 4.6 – Fixação da torre na picape utilizando cordas .....	62
Figura 4.7 – Circuito elétrico montado no gerador.....	62

# **LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1 - Detalhes AirBreeze .....	4
Quadro 2.2 - Detalhes Whisper 100 .....	4
Quadro 2.3 - Detalhes Whisper 200 .....	4
Quadro 2.4 - Detalhes Skystream 3.7 .....	5
Quadro 2.5 - Detalhes Whisper 500 .....	5
Quadro 2.6 - Fonte: MUSETTI NETO, 1999c.....	14
Quadro 3.1 – Massa das peças curadas.....	38
Quadro 3.2 – Massa dos resíduos cortados.....	39
Quadro 3.3 – Massa das pás sem o material de núcleo.....	40
Quadro 3.4 – Massa das pás com poliuretano .....	43
Quadro 3.5 – Massa das pás com acabamento .....	46
Quadro 3.6 – Massa das pás em fibra de carbono .....	48
Quadro 3.7 – Dados do processo de fabricação.....	48
Quadro 3.8 – Fração volumétrica com $vv = 0\%$ .....	48
Quadro 3.9 – Fração volumétrica com $vv = 1\%$ .....	49
Quadro 3.10 – Fração volumétrica com $vv = 3\%$ .....	49
Quadro 3.11 – Fração volumétrica com $vv = 5\%$ .....	49
Quadro 3.12 – Valores médios estimando o $vv$ .....	50
Quadro 4.1 - Tensão gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina. ....	63
Quadro 4.2 - Potência gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina. ....	63
Quadro 4.3 - Tensão gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina. ....	64
Quadro 4.4 - Potência gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina. ....	64
Quadro 4.5 – Custo da fabricação das pás em fibra de vidro .....	66
Quadro 4.6 – Custo da turbina eólica da UnB .....	66

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$U$	Velocidade do vento	[m/s]
$W$	Potência	[J/s]
$f$	Latitude	[°]
$M$	Massa	[°]

## Símbolos Gregos

$\rho$	Massa específica	[m <sup>3</sup> /kg]
$\omega$	Velocidade angular	[rad/s]
$v$	Volume	[cm <sup>3</sup> ]

## Subscritos

$\infty$	Propriedade antes do disco do rotor
$c$	Compósito
$v$	Vazios
$f$	Fibra
$m$	Matriz

## Siglas

HAWT	Horizontal-axis wind turbine
VAWT	Vertical-axis wind turbine

RTM	Resin Transfer Moulding
SCM	Supply Chain Management
BMC	Bulk Molding Compound
PVA	Polyvinyl alcohol
SMC	Sheet Molding Compound
BS	Bordo Superior
BI	Bordo Inferior
SI	Sistema Internacional
PU	Poliuretano
CNC	Computer Numerical Control

ABMACO Associação Brasileira de Materiais Compósitos

# 1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia renováveis vem sendo, cada vez mais, pauta de discussões sobre o futuro do parque energético do Brasil e do mundo. O maior interesse no assunto vem acompanhado de pesquisas que preveem o futuro esgotamento das fontes energéticas não renováveis, como o petróleo, carvão mineral e gás natural. O Brasil possui um dos maiores programas de energia renovável do mundo, incentivando o crescimento e estruturação deste mercado no país.

Uma das alternativas para o quadro energético brasileiro é a energia eólica. Foram os dinamarqueses os pioneiros na utilização de aerogeradores como fonte de energia comercial. Em 1976 eles instalaram a primeira turbina eólica ligada à rede elétrica pública. Tal fato, abriu os olhos do mundo para o potencial deste mercado e nos 35 anos que passaram, a energia eólica passou de promessa para algo rentável.

O potencial eólico brasileiro é bastante considerável e aponta para possibilidades e dimensões de aerogeradores variados. Grandes parques eólicos estão sendo montados no litoral do Brasil, com rotores de turbinas que variam de 30 a 80 metros de diâmetro, por outro lado, o uso de geradores eólicos de pequeno porte, principalmente em regiões isoladas, onde a dificuldade de se chegar a rede de transmissão é maior, vem se mostrando uma solução eficiente(WIND FORCE, 2003).

Apesar do domínio das turbinas eólicas de grande porte no cenário da energia eólica, há um esforço significativo em andamento para o desenvolvimento de geradores de pequeno porte, com potência inferior a um megawatt (MW). Os desenvolvedores desses pequenos geradores afirmam que, em número suficiente, as pequenas turbinas podem ser tão eficientes quanto às de grande porte.

Aerogeradores de pequeno porte estão ao alcance econômico das pequenas empresas, agricultores e proprietários, e por estarem mais próximos ao chão têm sua instalação e manutenção facilitadas. Pequenas turbinas podem ser colocadas perto de onde pessoas vivem e trabalham, reduzindo assim a dependência da rede pública.

Projetados para locais onde grandes turbinas são impraticáveis, esses aerogeradores de pequeno porte são divididos em dois tipos: de eixo horizontal (HAWTs), semelhantes aos grandes sistemas de multi-MW que aproveitam o vento de um sentido, devendo ser reorientados quando o vento muda de direção, e turbinas eólicas de eixo vertical (VAWTs), que têm rotores que podem ser girados pelo vento de qualquer direção.

Diante do cenário do quadro elétrico brasileiro e do desenvolvimento cada vez mais frequente de geradores de pequeno porte, este trabalho tem como objetivo a fabricação de pás compósitas, bem como a montagem e testes de campo de um gerador eólico de pequeno porte, com eixo horizontal, potência nominal de 200 W e com controle passivo de rotação por estol. Foram produzidas três pás de resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, com núcleo de poliuretano.

O relatório se inicia com uma retratação teórica sobre materiais compósitos, especialmente a resina de poliéster reforçada com fibra de vidro, utilizada na fabricação das pás da turbina eólica. Posteriormente enfoca a fabricação das pás propriamente ditas, detalhando todos os processos de fabricação e as dificuldades encontradas. Também enfatiza a montagem do gerador, ensaios da turbina eólica e análises dos dados obtidos. Ao final a conclusão trará as considerações acerca dos resultados do trabalho realizado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESTADO DA ARTE – TURBINAS EÓLICAS EXISTENTES NO MERCADO

Aero geradores, ou turbinas eólicas, são máquinas que capturam energia cinética do vento e a transforma em energia mecânica. Normalmente estas máquinas são utilizadas para a geração de energia elétrica através de acoplamento com geradores, mas também, aero geradores podem ser utilizados em sistemas de bombeamento ou outros sistemas mecânicos.

As turbinas eólicas são classificadas quanto à sua forma construtiva:

- Turbinas eólicas de eixo horizontal,
- Turbinas eólicas de eixo vertical.

E quanto à sua potência nominal:

- Pequeno Porte (até 50 KW de potência),
- Médio Porte (potência de 50 a 1000KW), e
- Grande Porte (acima de 1MW de potência).

A pesquisa e análise do estado da arte são de grande importância no projeto em questão, uma vez que se deseja ter um produto final viável e competitivo no mercado existente. Primeiramente, determina-se que a turbina a ser projetada será de eixo horizontal.

#### 2.1.1 Turbinas eólicas de eixo horizontal

As turbinas de eixo horizontal precisam manter-se perpendiculares à direção do vento para capturarem o máximo de energia. Este tipo de turbina é o mais usado atualmente, especialmente nas instalações de maior potência para produção de energia elétrica, onde o gerador é instalado no alto junto à turbina, como pode ser visto na figura (2.1).

Cataventos de pequeno porte (até 5 KW de potência) são apresentados a seguir. Eles têm um custo variado entre R\$2.500,00 e R\$38.000,00 que é diretamente proporcional à potência e ao diâmetro do rotor.



Figura 2.1. Turbina de eixo horizontal

### AirBreeze

AirBreeze	
<b>Diâmetro do rotor</b>	1,17 m
<b>Peso</b>	5,9 kg
<b>Vento para início de geração</b>	2,68 m/s
<b>Potência nominal</b>	200 watts a 12,5 m/s
<b>KWh/mês</b>	38 kWh/mês a 5,4 m/s
<b>PREÇO</b>	R\$ 2.490,00

Quadro 2.1 - Detalhes AirBreeze

### Whisper 100

Whisper 100	
<b>Diâmetro do rotor</b>	2,1 m
<b>Peso</b>	21 kg
<b>Vento para início de geração</b>	3,4 m/s
<b>Potência nominal</b>	900 watts a 12,5 m/s
<b>KWh/mês</b>	100 kWh/mês a 5,4 m/s
<b>PREÇO</b>	R\$ 9.290,00

Quadro 2.2 - Detalhes Whisper 100

### Whisper 200

Whisper 200	
<b>Diâmetro do rotor</b>	2,7 m
<b>Peso</b>	30 kg
<b>Vento para início de geração</b>	3,1 m/s
<b>Potência nominal</b>	1000 watts a 11,6 m/s
<b>KWh/mês</b>	200 kWh/mês a 5,4 m/s
<b>PREÇO</b>	R\$ 11.190,00

Quadro 2.3 - Detalhes Whisper 200

### Skystream 3.7

Skystream 3.7	
<b>Diâmetro do rotor</b>	3,72 m
<b>Peso</b>	77 kg
<b>Vento para início de geração</b>	3,5 m/s
<b>Potência nominal</b>	1,8KW contínuo a 9,4 m/s; 2,6KW pico a 14 m/s
<b>KWh/mês</b>	500 KWh/mês a 6.5 m/s
<b>PREÇO</b>	<b>R\$ 20.350,00</b>

Quadro 2.4 - Detalhes Skystream 3.7

### Whisper 500

Whisper 500	
<b>Diâmetro do rotor</b>	4.5 m
<b>Peso</b>	70 kg
<b>Vento para início de geração</b>	3,4 m/s
<b>Potência nominal</b>	3000 watts a 10.5 m/s
<b>KWh/mês</b>	900 KWh/mês a 6.5 m/s
<b>PREÇO</b>	<b>R\$ 37.990,00</b>

Quadro 2.5 - Detalhes Whisper 500

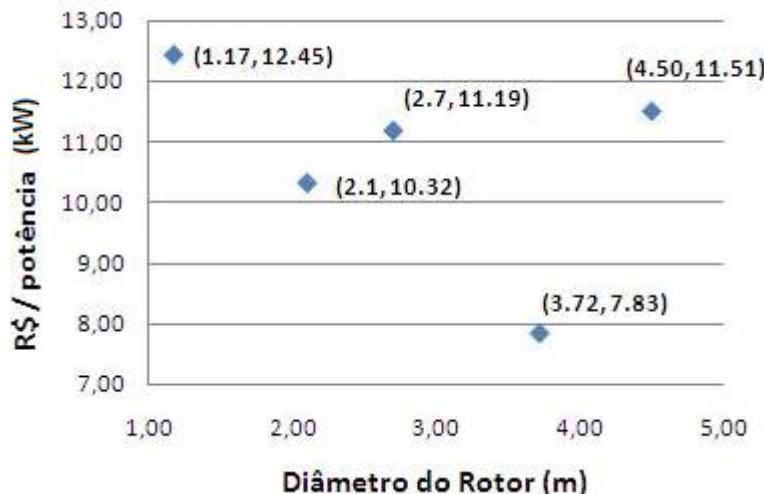


Figura 2.2. Custo por KW instalado em função do diâmetro

O projeto de turbina apresentado neste trabalho tem potência de 200 W e raio de 1,1853 metros, mostrado mais adiante. Pretende-se manter o preço para essa turbina abaixo de R\$9.290,00 para ser competitiva no mercado.

#### 2.1.2 Turbinas eólicas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical não necessitam de mecanismos direcionais. Têm a vantagem do gerador e transmissão serem instalados no solo. As turbinas Darrieus e Savonius são exemplos.

A turbina de Savonius por ter uma velocidade do rotor baixa, é usada em bombeamento e moagem. Tem possibilidade de controle de torque com regulação da passagem de ar entre as pás. Usa um rotor que não é estritamente de arraste, mas tem a característica de pá com grande área para interceptar o vento. Isto significa mais material e problemas com a força do vento para grandes velocidades, o que provoca um momento que deve ser suportado pela pá e que deve ser absorvido na base da torre, mesmo com o rotor parado. A vantagem dessa turbina é a facilidade de sua construção (Custódio, 2009).

A turbina de Darrieus, por ter uma velocidade alta no rotor, é utilizada na produção de energia elétrica, movendo-se mais rápido do que o vento. A figura abaixo nos mostra um exemplo.



Figura 2.3. Turbina eólica de eixo vertical

## 2.2 PARTES DE UMA TURBINA EÓLICA

As turbinas eólicas possuem três componentes básicos, o rotor com as pás, a gôndola (nacelle) e a torre. Na gôndola ficam os principais componentes tais como o gerador elétrico, caixa multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, sistema de freios, sistema de controle e mecanismos de giro da turbina.

O rotor apresenta geralmente, um conjunto de três pás, podendo ter controle passivo ou ativo das mesmas para operar numa determinada rotação. Um multiplicador de velocidades de engrenagens é utilizado na maioria das turbinas, pois o eixo que transmite o torque gerado pelas pás possui uma rotação baixa. Após, o multiplicador é conectado ao gerador elétrico que transforma a energia mecânica em elétrica. Os geradores elétricos utilizados nas turbinas podem ser síncrono ou assíncrono, utilizado em sistemas de rotação variável e apropriado para trabalhar com rotação constante, respectivamente (Wenzel, 2007).

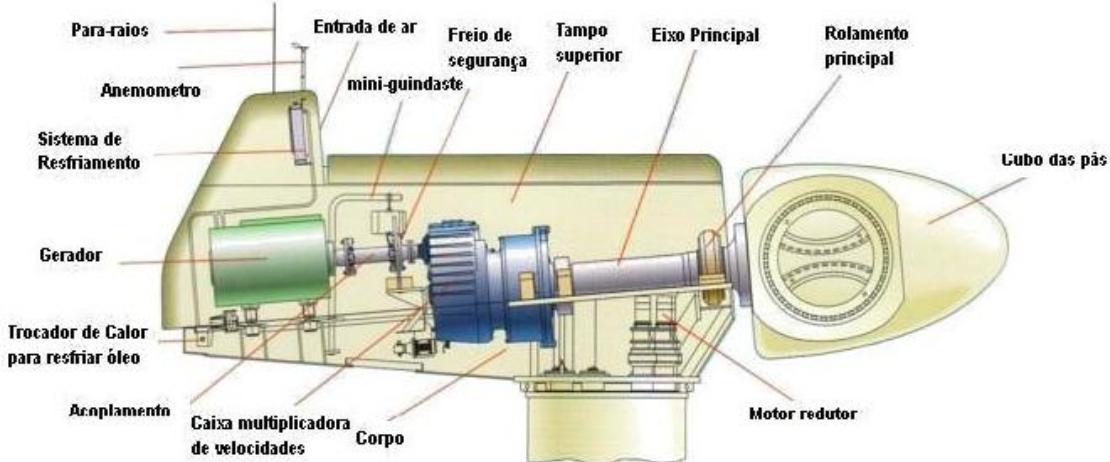


Figura 2.4. Vista do interior de uma carcaça de TEEH

## 2.3 O VENTO

O conhecimento do comportamento do vento é essencial para estudos de viabilidade econômica do aproveitamento da energia eólica num determinado local. O valor médio anual da velocidade do vento pode variar apreciavelmente de ano para ano. Em geral consideram-se necessários registros durante um período mínimo de cerca de cinco anos para caracterizar satisfatoriamente o clima.

### 2.3.1 O vento em um aspecto global

O vento resulta do desigual aquecimento da superfície da Terra pela radiação solar. Esse aquecimento depende da latitude (é máximo nas regiões equatoriais e mínimo nas regiões polares), da época do ano, da hora do dia, da natureza da superfície (água, terra) e da existência de nuvens. A direção do vento é afetada pela componente horizontal da aceleração de Coriolis, à qual está associada uma força mássica fictícia de módulo:

$$a_c = 2 \cdot U \cdot w \cdot \sin(f), \quad (1)$$

sendo,

$a_c$  = aceleração de Coriolis,

$U$  = a velocidade do vento,

$f$  = a latitude,

$w$  = a velocidade angular da Terra.

Esta força é perpendicular à própria velocidade do vento e naturalmente tende a encurvar as linhas de corrente.

O resultado é um padrão global de circulação atmosférica de grande escala à superfície da Terra. A falta de uniformidade da superfície (oceano, continentes, grandes ilhas) leva a que estes padrões globais sejam perturbados por variações de menor escala (centenas ou milhares de quilômetros). Da interação (extremamente complexa e não linear) de todos estes efeitos e variações, resulta um comportamento caótico, a que está associada à dificuldade em prever o estado do tempo em cada local com mais do que alguns dias de antecedência. Há, no entanto, características médias que permitem estabelecer diferenças climáticas entre regiões distintas.

A uma escala ainda menor, a presença de montes e montanhas altera a distribuição espacial do vento, estando em geral associadas às zonas mais altas a maiores valores da velocidade do vento. As zonas costeiras são normalmente ventosas, em resultado do aquecimento desigual da superfície do mar e da terra. Quando a temperatura do mar é maior do que a da terra, ocorre uma circulação superficial de ar local da terra para o mar, com ar mais quente a subir sobre mar e ar mais frio a descer sobre a terra. Como a terra aquece e arrefece mais rapidamente do que o mar, esta circulação atmosférica tende a inverter-se do dia para a noite e a repetir-se diariamente.

A turbulência atmosférica produz oscilações numa escala de tempo ainda menor, inferior a alguns minutos, sendo particularmente importantes por perturbarem o funcionamento da turbina eólica os turbilhões cuja dimensão característica é da ordem de grandeza do comprimento das pás do rotor (Custódio, 2009).

### **2.3.2 O vento no Distrito Federal**

O DF, em relação ao nordeste do país, é um local que não é tão privilegiado quanto ao seu potencial eólico. Em alguns lugares do nordeste, pode-se verificar velocidades médias anuais maiores que 9 m/s. Uma vez que a potência extraída de uma turbina eólica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade, percebe-se que o nordeste é o local de melhor aproveitamento das turbinas eólicas no Brasil.

Ainda assim, o DF apresenta condições de vento viáveis para a implantação de pequenas instalações. A velocidade média trimestral do vento no Brasil é disposta da seguinte maneira:

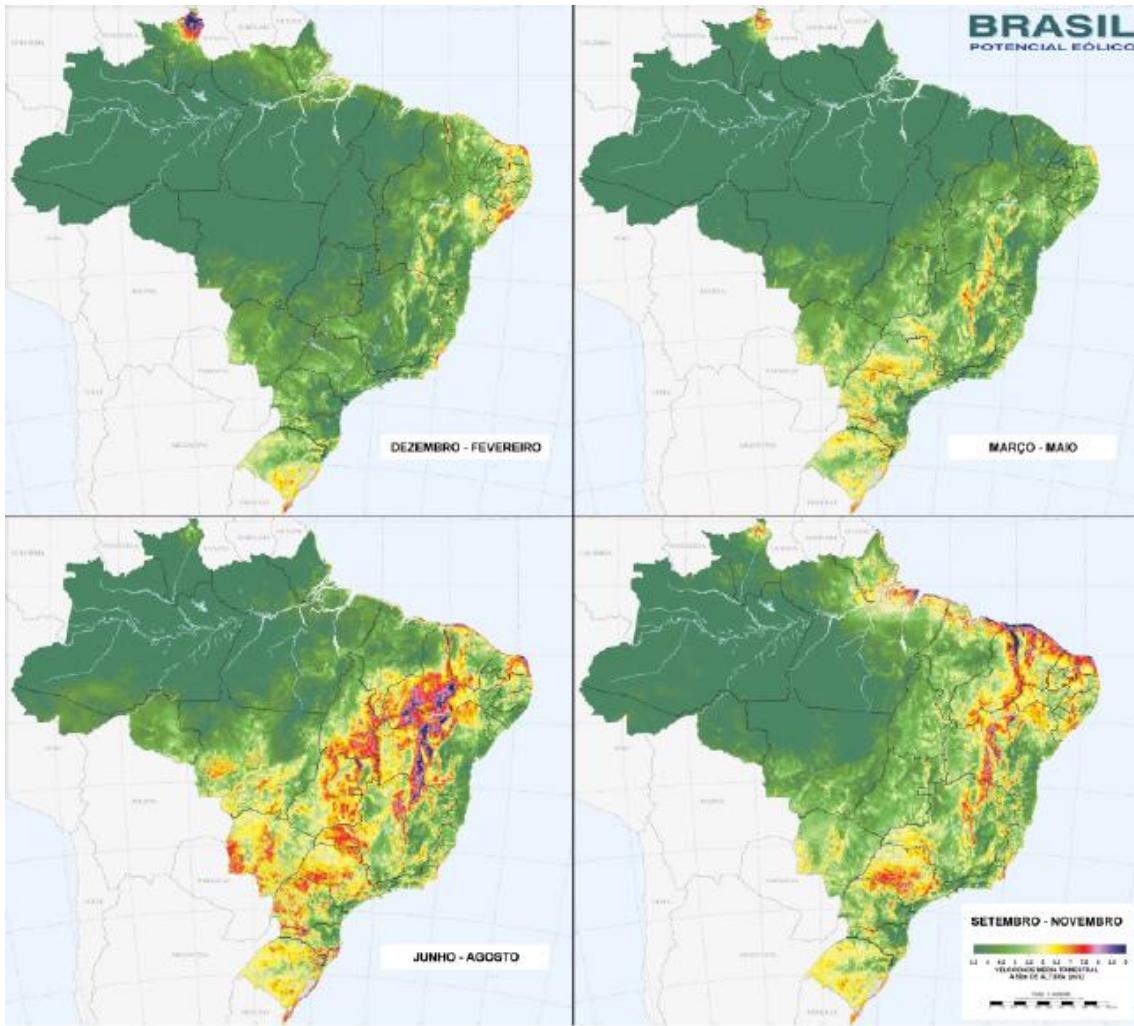


Figura 2.5. Velocidade média trimestral do vento no Brasil.

Para o DF, podemos constatar as seguintes velocidades médias de acordo com o período do ano:

- Dezembro – Fevereiro:  $U_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$
- Março – Maio:  $U_{\infty} = 5,0 \text{ m/s}$
- Junho – Agosto:  $U_{\infty} = 6,5 \text{ m/s}$
- Setembro – Novembro:  $U_{\infty} = 5,0 \text{ m/s}$

Percebe-se que há uma variação razoável da média de velocidade de vento para cada período do ano. Fazer uma turbina que funcione eficientemente sob todas estas condições seria inconveniente, já que para adaptar as pás da turbina para todas as velocidades também geraria perdas significantes para todas as velocidades. Para efeito de cálculo, usa-se a média de velocidade mais alta para obter a média de potência extraída.

## 2.4 CONTROLE DE POTÊNCIA E VELOCIDADE DAS TURBINAS EÓLICAS

A pá do rotor de uma turbina eólica tem um perfil especialmente projetado que é similar aos usados para as asas dos aviões, de forma que as forças aerodinâmicas geradas ao longo do perfil convertam a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Com a velocidade do fluxo de ar aumentando, as forças aerodinâmicas aumentam com a segunda potência e a energia extraída aumenta com a terceira potência da velocidade do vento. Faz-se necessário então um controle de potência do rotor efetivo.

### 2.4.1 Controle por estol

É um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas e não podem ser giradas em torno do seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de tal maneira que para velocidades de ventos maiores que a nominal, o fluxo em torno do perfil da pá do rotor se descola da superfície (estol), ou seja, o fluxo se afasta da superfície da pá, fazendo com que o escoamento se descole da superfície da pá.

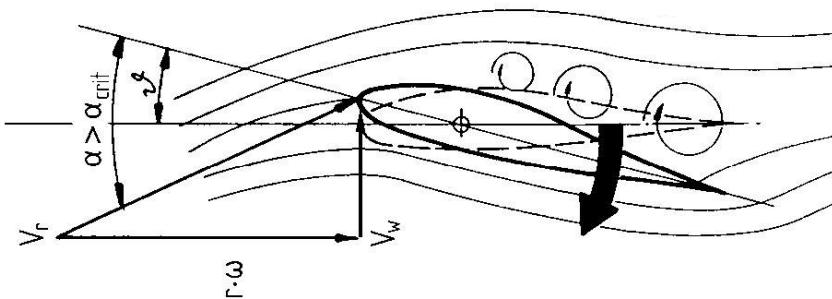


Figura 2.6 Sistema de controle por estol

Para evitar que o estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria a potência do rotor repentinamente, as pás possuem uma torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento do estol.

Estes sistemas possuem as seguintes vantagens:

- Estrutura de cubo do rotor simples;
- Menos manutenção devido a um número menor de peças móveis;
- Autocontrole da potência.

## 2.5 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são formados por uma estrutura de reforço inserida em uma matriz. Pode-se considerar, de maneira geral, um compósito como sendo um material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem de tal forma que é obtida uma melhor combinação de propriedades. O reforço geralmente é feito a partir de fibras, que apresentam alta resistência à tração, enquanto a matriz tem a função de

manter as fibras unidas, permitindo que as tensões sejam transferidas da matriz para as fibras, resultando no material reforçado. Tecnologicamente, esses compósitos reforçados com fibra são os mais importantes, pois apresentam alta resistência e rigidez em relação ao seu peso (CALLISTER, 2002).

A fibra de vidro é o reforço mais utilizado em compósitos de matriz polimérica por diversas razões: é facilmente produzida, pode ser utilizada através do emprego de diversas técnicas de fabricação, produz materiais com alta resistência específica, e quando associada com diferentes resinas, possui uma inércia química que torna o compósito útil para aplicações em meio a uma variedade de ambientes corrosivos (CALLISTER, 2002).

O compósito é projetado de modo que as cargas mecânicas a que a estrutura está submetida no serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades dependem da matriz, do reforço, e da camada limite entre os dois, chamada de interface. Desta forma, há muitas variáveis a considerar ao projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), o tipo de reforço (fibras ou partículas), suas proporções relativas, a geometria do reforço, método de cura e a natureza da interface. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente controlada a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias sob as quais será usado (GIBSON, 1994).

O uso do reforço contínuo da fibra confere um caráter direcional (anisotropia) às propriedades dos compósitos. O material compósito é mais resistente quando a força aplicada é paralela ao sentido das fibras (sentido longitudinal) e menos resistente quando é perpendicular às fibras (sentido transversal). Na prática, a maioria das estruturas está sujeita a cargas complexas, necessitando o uso de fibras orientadas em diversos sentidos (OCHOLA et al., 2004).

Para avaliar o desempenho total dos materiais compósitos, é essencial conhecer, individualmente, o papel da matriz do material, visto que os danos iniciais em um compósito são controlados pelo trincamento da matriz, que por sua vez depende de suas propriedades mecânicas (KHAN et al., 2002).

### **2.5.1 Matriz de Compósitos**

As resinas que são usadas como matrizes em compósitos reforçados com fibras podem ser classificadas em dois tipos, termorrígidas e termoplásticas, de acordo com a influência da temperatura nas suas características (PILATO e MICHNO, 1994).

Termoplásticos, como os metais, amolecem com o aquecimento e eventualmente fundem, endurecendo novamente com o resfriamento. Nylon e polipropileno são exemplos típicos de resinas termoplásticas (PILATO e MICHNO, 1994).

Materiais termorrígidos (ou termofixos) são formados por uma reação química interna onde a resina e endurecedor, ou resina e iniciador, são misturados e então sofrem uma reação química não reversível para formar um produto duro e infusível (PILATO e MICHNO, 1994).

Os sistemas de resinas para uso em materiais compósitos requerem as seguintes características: boas propriedades mecânicas, adesivas e de tenacidade, e boa resistência à degradação ambiental (LAPIQUE e REDFORD, 2002).

A característica mais importante da resina matriz é a capacidade de absorver energia e reduzir as concentrações de tensões, pelo fornecimento de tenacidade à fratura ou ductilidade, maximizando a tolerância a danos de impacto e o tempo de durabilidade do compósito (PILATO e MICHNO, 1994).

O desempenho termo-mecânico, esperado dos compósitos, é governado pela resistência das resinas ao calor (PILATO e MICHNO, 1994). Deste modo, espera-se que a resina da matriz forneça características ótimas ao compósito, dentro da faixa de temperatura recomendada.

Embora existam vários tipos de resinas usadas em compósitos para indústria, a maioria das partes estruturais é feita principalmente com resina termofixa, ou seja, que necessitam de uma reação de cura. Dentre essas resinas a poliéster, vinil éster e epóxi são as mais utilizadas. Daremos uma maior atenção à resina a de poliéster, pois foi a resina utilizada na fabricação das pás do aerogerador motivador deste relatório.

## **Resina fenólica**

São obtidas a partir da reação de um fenol (fenol, cresol ou xilenol) com um aldeído (aldeídofórmico). Estas resinas foram uma das primeiras a serem utilizadas, na fabricação das peças em compósitos sendo que possuem boa resistência à abrasão, choque, ataque químico, elevadas temperaturas, além de excelentes propriedades elétricas.

## **Resina Epóxi**

Dependendo da estrutura química da resina epóxi e do agente iniciador de reação utilizados, há a possibilidade de numerosos modificadores de reação. É possível obter-se dureza, resistência química a solventes, propriedades mecânicas, elevada resistência à tração, fadiga, calor, além de propriedades elétricas excelentes. Da mesma forma, as diversas resinas epóxi existentes no mercado, quando aditivadas com a larga variedade de agentes de cura possibilitam sua utilização em uma série de processos de fabricação de peças.

São citadas aqui três das principais reações de cura que podem ocorrer com a utilização de resinas epóxi: reações epóxi amina; epóxi anidro e a homopolimerização epóxi por ácidos catalisados de Lewis, porém dentre estas a cura mais usual são as que utilizam aminas.

As resinas epóxi apresentam como característica diferenciada de outras resinas, baixa contração e forte poder adesão. Suas propriedades mecânicas e suas qualidades elétricas possibilitam sua utilização na fabricação de capacitores, encapsulamento de resistores, isoladores de alta tensão, moldagem de motores, retificadores e transformadores. A resina mais utilizada no mercado tem sido aquela obtida pela reação de bisfenol A e epicloridrina, produzindo diglidicil éter do bisfenol A.

### **Resina éster vinílica ou vinilester**

A resina vinilester é o resultado da adição de resinas epóxi com um ácido acrílico ou metacrílico. As principais propriedades deste grupo de resinas são boas qualidades mecânicas, excelente resistência à fadiga e à corrosão, isto é, possuem excelente resistência ao ataque químico, podendo ser utilizadas em ambientes ácidos ou alcalinos.

Com a adição de aditivos especiais pode-se produzir resina auto-extinguível.



As resinas éster vinílicas são assim denominadas por possuírem os grupos ésteres adjacentes aos grupos vinílicos.

## **Resina de Poliéster**

As pás fabricadas para o gerador eólico motivador deste relatório foram feitas utilizando uma matriz de poliéster e por isso, essa matriz receberá uma atenção especial.

As resinas poliéster são produzidas a partir da reação de um álcool, como glicol, e um ácido di-básico, obtendo-se como produto poliéster e água (spsystems, 2003).

A Figura 2.7 mostra a estrutura molecular de um poliéster.

Muitas resinas poliéster são viscosas, consistindo de líquidos claros de uma solução de poliéster em um monômero que é normalmente estireno. A adição de estireno em quantidades acima de 50% ajuda a produzir uma resina de fácil manuseio pela redução da viscosidade (MARGOLIS, 1986).

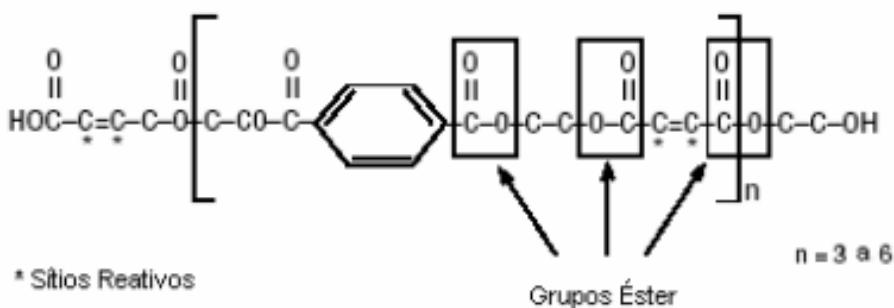


Figura 2.7 Estrutura molecular de um poliéster (spsystems, 2003)

Outros tipos de resina poliéster podem ser encontradas de acordo com o tipo de base a ser utilizada. O Quadro (2.6) apresenta as matérias-primas utilizadas e a aplicação das resinas obtidas a partir destas matérias-primas.

Tipos de resina	Ácidos ou Anidridos Insaturados	Ácidos ou Anidridos Saturados	Glicóis	Monômeros	Aplicações
Ortoftálicas	Anidrido Maleico	Anidrido Ftálico	Propilenoglicol Etilenoglicol	Estireno	- Semi-rígidas: barcos, perfis industriais, placas onduladas; - Rígidas: vernizes (liner), prepregs.
Isoftálicas	Anidrido Maleico	Anidrido Isoftálico	Propilenoglicol Dietilenoglicol	Estireno	- Gel coats; - Tanques de armazenamento; - Resistência química; - Prepregs Low Profile.
Tereftálicas	Anidrido Maleico	Anidrido Tereftálico	Propilenoglicol	Estireno	- Peças com resistência química melhorada.
Tetrahidroftálicas	Anidrido Maleico	Anidrido Tetrahidroftálico	Propilenoglicol	Estireno	- Vernizes (liner); - Depósitos de alimentos.
Bisfenólicas	Ácido Fumárico	Anidrido Ftálico	Bisfenol A	Estireno	- Anti-corrosivos.
Resinas de Ácido Tetracloroftálico	Anidrido Maleico	Anidrido Tetracloroftálico	Etilenoglicol	Estireno	- Resistente ao fogo
Resinas de Ácido Het	Anidrido Maleico	Ácido Het	Propilenoglicol Dietilenoglicol	Estireno	- Auto-extinguível; - Anticorrosivo.
Resina de Metacrilato de Metila	Anidrido Maleico	Anidrido Ftálico	Polipropilenoglicol	Estireno + MMA	- Peças automobilísticas; - Placas, cúpulas (domos.)
Resina de Fta. Dialilo	Anidrido Maleico	Anidrido Ftálico	Polipropilenoglicol	Ftalato de Dialilo	- Prepega.

Quadro 2.6 - Fonte: MUSSETTI NETO, 1999c.

### Agentes de Cura da Resina a Poliéster

O endurecimento da resina termofixa, que compõe o compósito, efetua-se na presença de um iniciador de cura, que é geralmente um peróxido orgânico ou um hidroperóxido, que normalmente é utilizado na proporção de 1 a 3% do peso total da mistura resina + monômero.

Existem também os aceleradores de reação ou catalisadores propriamente ditos, cuja função é auxiliar no início da decomposição dos iniciadores, a fim de acelerar o processo de cura.

Os iniciadores de reação têm por objetivo levar a molécula de poliéster a um nível energético que possibilite a reação de copolimerização, os iniciadores de reação devem ser solúveis no monômero e não reagir com o mesmo.

Os aceleradores químicos dependem, portanto, dos iniciadores utilizados e podem ser:

-Sais metálicos de metais pesados como sais de cobalto como naftenato de cobalto e octoato de cobalto;

-Aminas terciárias dimetilanilina (DMA), dietilanilina (DEA) ou dimetilparatoluidina (DMTP);

- Agentes redutores.

Pode-se ter também, sistemas catalíticos que se utilizem de inibidores de reação, sendo os mais frequentemente utilizados a hidroquinona, o terciobutilpirocatecol, o butilparacresol e a benzoquinona.

A seguir, serão citados os principais tipos de reforços aplicados na produção de compósitos.

### **2.5.2 Reforço de Compósitos**

No compósito, o reforço é o material que combinado à matriz polimérica determina propriedades como aumento da resistência e rigidez das estruturas. Os tipos de materiais que podem ser usados na fabricação do reforço dos compósitos são muitos, sendo que a fibra de vidro é a mais empregada. A escolha do material de reforço não se faz aleatoriamente, necessita-se de um estudo para verificar qual seria o melhor reforço para determinado produto, analisando as peculiaridades de cada tipo de reforço e as características almejadas para o produto final, bem como os custos agregados à produção.

#### **Fibra de vidro**

O material mais utilizado como reforço na composição de materiais compostos são as fibras de vidro, foi inclusive o material utilizado como reforço das pás do gerador estudado neste relatório, somando mais ou menos 90% do uso em resinas termofixas. Devido aos seus atributos favoráveis é usado em praticamente todos os segmentos industriais, como indústrias civil, elétrica, automobilística, aeronáutica, etc.

Obtidas através da fusão e fibrerização de diversos óxidos metálicos, é a proporção e natureza deste que define o tipo de fibra de vidro produzido. A diferenciação das fibras de vidro se dá por uma letra, sendo as principais a fibra de vidro E (composta a partir de alumínio, cálcio e silicatos de boro), destinada a produtos que necessitem de alta resistência mecânica elétrica, e a fibra de vidro S (composta de magnésio e silicatos de alumínio), empregadas quando se requer alta resistência mecânica.

As fibras de vidro, em geral, não são os reforços mais utilizados a toa, elas apresentam uma série de características favoráveis que fazem com que se opte por elas. Tais propriedades são:

- alta resistência mecânica;

- resistência à tração superior a quase todos os metais;
- boa resistência ao impacto;
- baixa absorção de água;
- resistência química à maioria dos microorganismos;
- baixo coeficiente de dilatação térmica;
- excelentes propriedades elétricas;
- fácil moldagem das peças;
- baixo custo;
- incombustibilidade;
- permite a obtenção de materiais translúcidos.

### **Fibra de aramida**

Popularmente conhecida como Kevlar® (nome de propriedade da Du Pont®), a aramida passou a ser utilizada na década de 70. Trata-se de um composto orgânico, sendo uma poliamida aromática do tipo politereftalato de polifenilendiamina. Sua produção se dá pelas técnicas padrões têxteis, havendo de acordo com o seu processo de produção dois tipos distintos de aramida: as fibras de baixo módulo e as de alto módulo de elasticidade.

As fibras de aramida possuem baixa densidade, alta resistência à tração e possibilitam a criação de estruturas altamente resistentes ao impacto. Usada na fabricação de coletes a prova de balas e em substituição ao aço em pneus radiais, as propriedades da aramida, vieram a consagrá-la também como reforço na produção de compósitos para a indústria automobilística, aeronáutica, marítima, etc.

### **Fibras metálicas**

Em relação às fibras de vidro, apresentam algumas desvantagens, como alta densidade e principalmente o preço.

As fibras metálicas podem ser obtidas mediante diferentes técnicas como, por exemplo, o laminado trefilado. As principais fibras metálicas são: ferro, aços inoxidáveis, níquel, cobalto, cobre, alumínio, prata e ouro. As duas principais características gerais destes materiais são: a resistência à corrosão e a condutividade elétrica, mas tendo cada uma suas próprias peculiaridades.

### **Fibras de boro**

O boro é detentor de propriedades bastante próprias, sendo um elemento metálico, semicondutor de energia, duro e com alta temperatura de fusão. Iniciada nos anos 60, a fabricação de fibras de boro se dá pela disposição deste em sua fase de vapor em um filamento

de wolfranio, este o qual é aquecido eletricamente em atmosfera de hidrogênio, passando posteriormente por uma série de reatores onde se obtém o boro.

## Fibras de carbono

Inicialmente, era destinada apenas a projetos aeroespaciais, porém com a rápida evolução da tecnologia, as fibras de carbono, hoje, são utilizadas praticamente por todos os setores industriais.

As principais características das fibras de carbono são: seu alto módulo de elasticidade, baixo coeficiente de dilatação térmica e alta condutividade térmica. Porém, mesmo com tantos bons atributos, este produto apresenta alguns problemas como diferença de potencial em contato com outros metais e baixa resistência ao impacto.

### 2.5.3 Micromecânica de compósitos estruturais – Frações de volume e massa

Umas das principais vantagens da micromecânica, a qual basicamente é uma técnica de homogeneização, é permitir o cálculo das propriedades elásticas de um compósito a partir das propriedades elásticas de seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

O parâmetro principal indicativo da constituição de um laminado é a proporção relativa entre fibra e matriz.

Ocorre que durante os processos de fabricação é mais fácil o uso da medição das massas relativas, enquanto os valores teóricos de propriedades usados no projeto são calculados em termos de fração de volume (MENDONÇA, 2005).

As relações de massa e volume descrevem-se pelas seguintes formulações:

$$v_c = v_f + v_m + v_v, \text{ e} \quad (2)$$

$$m_c = m_f + m_m, \quad (3)$$

onde

$v_c$  = volume do compósito;

$v_f$  = volume de fibras;

$v_m$  = volume de matriz;

$v_v$  = volume de vazios;

$m_c$  = massa do compósito;

$m_f$  = massa de fibra;

$m_m$  = massa de matriz.

Então pode-se definir as frações volumétricas  $V_f$  e  $V_m$ , como sendo as frações volumétricas de fibras e de matriz, respectivamente. E  $M_f$  e  $M_m$  sendo respectivamente as frações mássicas de fibra e de matriz. Assim descrevem-se as seguintes relações

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, \quad (4)$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c}, \quad (5)$$

$$V_c = \frac{v_v}{v_c}, \quad (6)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c}, \quad (7)$$

$$M_m = \frac{m_m}{m_c}. \quad (8)$$

Para um compósito de dois componentes tem-se:

$$V_f + V_m + V_v = 1 \text{ e } M_f + M_m = 1 \quad (9)$$

A densidade (massa/volume) do compósito pode ser definida reescrevendo a equação (3) como sendo:

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m. \quad (10)$$

Dividindo a equação (10) por  $v_c$ , obtém-se:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m. \quad (11)$$

De forma geral, para um compósito de vários componentes, tem-se:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^{nc} \rho_i V_i, \quad (12)$$

onde  $nc$  é o número de componentes do compósito.

Sabendo os valores das propriedades da fibra e da matriz, os volumes relativos destes são usados como pesos na definição da propriedade do composto. Essa relação é chamada de regra da mistura.

Normalmente, na fabricação de compósitos estruturais, trabalhando-se com impregnação manual e fazendo-se a cura em bolsa de vácuo consegue-se  $V_f$  de aproximadamente de 50%, e utilizando pré-impregnados, bem como se empregando bolsa de vácuo e autoclave durante a cura, tem-se  $V_f \approx 70\%$ . Já na fabricação de compósitos não estruturais e utilizando-se impregnação manual, ou com jateamento de resina e fibras picadas,

sem a utilização de bolsa de vácuo ou autoclave durante a cura, pode-se obter compósitos com  $V_f \approx 30\%$  (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

Na manufatura de materiais compósitos por impregnação manual, a massa das fibras a serem usadas deve sempre ser determinada e registrada antes do início da laminação da peça desejada. Ao término da fabricação da peça, ou seja, após a cura do componente, obtém-se a massa do componente, através da pesagem da peça. Assim tem-se a massa total. Pode-se então determinar a massa da matriz através da equação (3). Tendo esses três valores, a massa do compósito,  $m_c$ , a massa de matriz,  $m_m$ , a massa de fibra,  $m_f$ , e conhecendo as propriedades dos materiais utilizados, como densidade da matriz e da fibra, pode-se calcular as frações em massa, e obter as frações volumétricas.

A vantagem adicional deste procedimento é que, após se conhecer a massa de fibra a ser usada em uma peça, pode-se fazer uma estimativa razoável de quanta resina deve, necessariamente, ser preparada, e evitar desperdícios (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

## 2.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Existem diversos processos de fabricação de componentes de materiais compósitos. Cada processo de fabricação mostra-se mais adequado a uma situação específica. Os aspectos considerados que levam a escolha do método mais adequado são:

- Custo de fabricação – leva em consideração o custo do equipamento, do treinamento, da mão-de-obra, da matéria-prima, do espaço utilizado, entre outros custos relacionados ao processo de fabricação completo.
- Produtividade - esse aspecto que leva em consideração a quantidade de peças a serem produzidas. Se é uma produção em série de grande quantidade, utilizada principalmente em indústrias, ou se é uma produção de pequena quantidade, ou então produção de peças unitárias como protótipos e modelos.
- Dimensão – peças de maiores dimensões como cascos de barcos, carrocerias de caminhões, tanques e reservatórios necessitam de processos de produção distintos de peças pequenas.
- Volume relativo de fibra – alguns métodos de fabricação são mais adequados a produção de peças com baixa porcentagem de fibras. Outros processos conseguem naturalmente altas proporções de fibra na composição do compósito.
- Repetibilidade - Processos manuais tendem naturalmente a uma menor repetibilidade e a uma maior variabilidade na dimensão e qualidade das peças produzidas. Diferentemente dos processos automatizados.

Segundo a ABMACO, Associação Brasileira de Materiais Compósitos, os processos de fabricação mais utilizados no país são:

- Spray-up (laminação por pistola) que é utilizado em 59% dos meios de fabricação;
- Hand-lay-up ( laminação manual) com 14% ;
- Laminação continua e derramamento com 7% cada método;
- Vaccum bag, pultrusão e filamento winding tem apenas 1% cada método;

Nos processos abertos encontram-se a laminação manual e a laminação a pistola.

Entre os processos considerados fechados existem a moldagem a vácuo, prensagem a quente e a frio, e injeção de resina (RTM). Existem também os processos considerados compostos como os de prensagem (SCM) e os de prensagem a quente (BMC).

A seguir tem-se a explicação de cada um dos métodos.

### **Laminação manual (*Hand Lay Up*)**

Um dos mais simples e antigos processos de fabricação de fibras de vidro. De baixo custo, quase não requer equipamentos específicos, sendo empregados apenas os seguintes equipamentos:

- roletes para compactação de laminados;
- facas, espátula e tesoura;
- pistola para a aplicação de *gel coat*;
- molde;
- pincéis;
- desmoldantes;
- dosadores;
- balança.

Antes de se iniciar o processo de laminação manual, deve-se realizar a preparação do molde, limpando-o e aplicando o desmoldante, que pode ser cera de carnaúba ou álcool polivinílico (PVA).

Feita em molde aberto e contra este, devendo ser a superfície do molde coberta com *gel coat* a pincel ou pistola, caso seja desejado um acabamento mais aprimorado. A resina líquida, em geral poliéster insaturado, é combinada no molde com fibras de vidro, dando origem a uma peça moldada e resistente, equivalente à combinação de concreto com reforço de barras de aço. Para o assentamento das fibras, remoção de bolhas e reforço da espessura, são aplicadas com pincel ou rolete, várias camadas de resina. Geralmente, não são recomendadas mais de três

aplicações de manta, pois o excesso da resina de reforço pode vir a ocasionar exotermia, que leva ao empengamento da peça, queima do *gel coat* e esbranquiçamento da fibra.

Em alguns casos, pode se fazer necessário o uso de materiais de núcleo, a fim de aumentar a rigidez, diminuir o peso, ou conferir flutuabilidade para a peça. Neste caso, a incorporação destes materiais deve ser feita com extremo cuidado, sendo os materiais mais indicados para tal a madeira balsa, a espuma rígida de poliuretano e a colmeia.

As vantagens da laminação manual são a sua simplicidade, o baixo investimento, a facilidade de se fazer mudanças no projeto e a possibilidade de laminação no campo, porém mesmo diante de tantas vantagens, algumas desvantagens devem ser levadas em consideração, como o grande número de mão-de-obra necessária, a dependência da qualidade do modelador para a boa condição do produto e o fato de apenas uma superfície ser acabada, pois neste tipo de laminação, apenas um dos lados fica liso, ficando o outro rugoso.

Este método de laminação, geralmente, é utilizado em peças de formato simples.

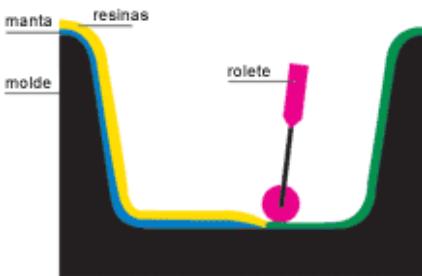


Figura 2.8 - Laminação manual - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

### Laminação à pistola (*Spray-up*)

Este processo consiste na aplicação simultânea de resina e fibras de vidro sobre o molde, tal aplicação se faz via equipamentos especiais denominados pistolas laminadoras, as quais cortam as fibras de vidro em tamanhos pré-determinados antes de sua aplicação sobre o molde. Antes do início do processo de laminação à pistola, deve-se realizar a preparação do molde, sua limpeza e a aplicação do desmoldante, bem como feito na laminação manual. Trata-se de um processo de molde aberto feito contra ele, onde o *gel coat* deve ser aplicado para, posteriormente, se aplicar a mistura de resina e fibras de vidro. A espessura final é obtida através de várias passagens sucessivas da pistola, sendo que a primeira demão deve ser de resina pura, e as passadas posteriores constituídas da mistura resina/fibra de vidro. A cada etapa de laminação, a peça deve ser roletada e reacomodada no molde, e a cada aplicação de 4 mm, deve haver um intervalo no processo. A pistola de laminação precisa ser calibrada para que possam ser aplicadas as quantidades desejadas de fibra de vidro.

Assim como na laminação manual, apenas um lado da peça fica liso. Há um custo de mão-de-obra relativamente alto e a qualidade depende do laminador, mas os custos de produção também são baixos e a laminação à pistola apresenta algumas vantagens em relação à manual,

como: maior rendimento produtivo, melhores resultados para peças mais complexas, menor número de perdas e a possibilidade de lamination de peças maiores.

Sendo um derivado do processo manual, a lamination à pistola é indicada na fabricação de peças médias a grandes que possuam formato simples e somente uma face regular, sendo muito empregada em lanchas, piscinas e banheiras de acrílico.

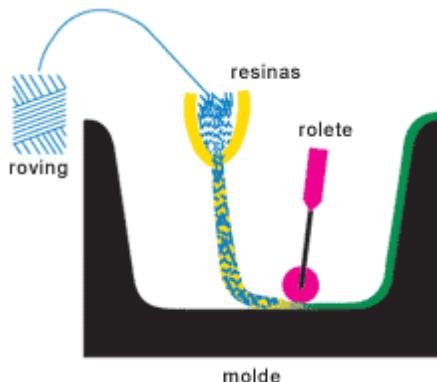


Figura 2.9 - Lamination à pistola - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

### ***Sheet Molding Compound (SMC)***

Nos anos 60 ocorreu um grande crescimento industrial que trouxe junto de si uma grande necessidade de se obter grandes produções de peças em compósitos. Na indústria automobilística principalmente, este fenômeno se fez bastante presente, acontecendo um grande desenvolvimento nos processos de moldagem de compostos reforçados com fibra de vidro. Consequentemente, a indústria de resinas de poliéster também progrediu, havendo maior significância no setor de sistemas de espessamento de resinas, o que possibilitou a fabricação dos SMC (*Sheet Molding Compound*).

O processamento do SMC possui três etapas: preparação da pasta-matriz, conformação do pré-impregnado e prensagem ou injeção da peça final.

- Preparação da pasta-matriz - A pasta-matriz é uma mistura de resina poliéster altamente reativa, com aditivos diversos, como por exemplo: catalisador, agente desmoldante, pigmentos, cargas minerais e agente espessante. Esta combinação de componentes é feita em um tanque acoplado a um misturador. Após a mistura, a pasta-matriz final deve apresentar viscosidade de 15.000- 30.000 cp para que, na etapa seguinte, possa ocorrer a impregnação das fibras de vidro.

- Conformação do pré-impregnado - Nesta etapa, dá-se a impregnação das fibras de vidro pela pasta-matriz. Por processo contínuo, a pasta-matriz é bombeada à máquina de SMC com 1 a 2% de agente espessante, daí, a pasta-matriz é distribuída de maneira uniforme em duas folhas com um filme suporte.

É importante que a esteira e o picotador estejam em sincronia, para que caia sobre a pasta-matriz do primeiro filme suporte a quantidade certa de *rovings* picado. O segundo filme

suporte com resina é então colocado sobre a fibra picada, para o material ser passado por rolos compactadores de temperatura e pressão controladas, visando a total impregnação das fibras de vidro.

Por fim, o SMC é embobinado e envolto por um filme que evite a evaporação do estireno. Pra que sejam atingidos os valores adequados de viscosidade, a pasta-matriz é colocada em uma câmara de maturação de 4 a 7 dias.

- Prensagem ou injeção da peça final - A etapa final do processo de produção do SMC pode ser feita tanto por moldagem via compressão, como por injeção.

A moldagem por compressão é feita em prensas hidráulicas capazes de exercer pressão de 50 a 70 kgf/cm<sup>2</sup>. Para grandes produções são usados moldes de aço com cromo, já para produções menores são aplicados metais menos rígidos. As mantas pré-impregnadas de SMC são recortadas, pesadas e postas sobre o molde aquecido a mais ou menos 150° C, cobrindo de 50 a 80% da área deste. O material irá preencher todo o molde em função da pressão hidráulica aplicada, devendo curar-se a peça por 2 a 4 minutos.

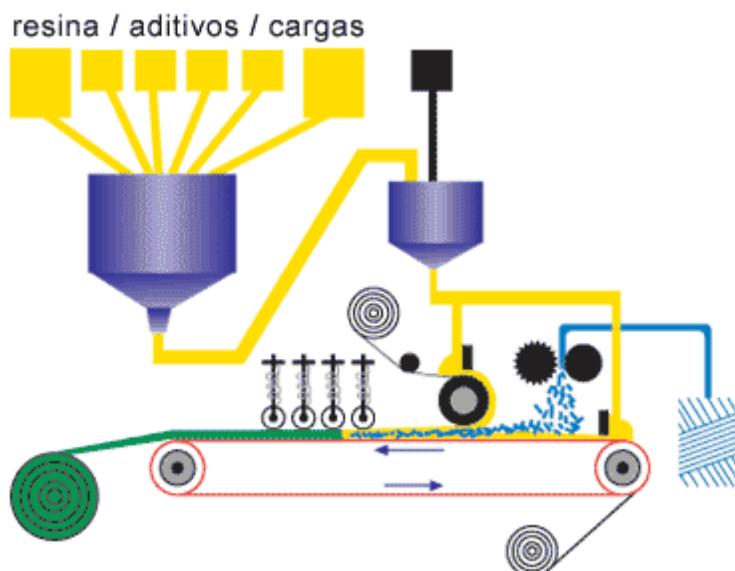


Figura 2.10 - Máquina SMC - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

#### Vantagens do SMC

Na Europa e nos Estados Unidos, o material SMC conseguiu grande espaço principalmente na indústria automobilística. Este mercado foi conquistado pelo SMC devido a algumas propriedades vantajosas para esta indústria, as quais podem ser resumidas basicamente em:

- Larga flexibilidade de design;
- Grande resistência a impactos;
- Alta resistência mecânica;
- Baixo peso;
- Resistência à corrosão;

- Boas propriedades elétricas;
- Bom nível de acabamento superficial;
- Facilidade de pintura;
- Boa adaptabilidade a processos automáticos;
- Possibilidade da colocação de insertos metálicos;
- Processo de produção ecológico.

### **Processo de moldagem por membrana (*Vacuum Bag*)**

O processo de moldagem a vácuo constitui um refinado do processo manual no qual a superfície externa do composto é recoberta por uma membrana e, com o uso de vácuo ou de pressão externa se consegue:

- A melhoria de qualidade da superfície externa;
- A remoção do excesso de resina, no caso de moldagem molhada. Isso representa aumento na resistência do composto pelo aumento do volume relativo de fibras;
- Expulsão de bolhas de ar aprisionadas. Esse ar, se deixado, pode em alguns casos, chegar a 5% em volume. Com o processo de expulsão, chega-se a valores como 0,1% do composto curado.

Os processos de moldagem por membrana são dos mais antigos. É comum dividi-lo em três tipos:

- Moldagem a vácuo;
- Moldagem a pressão;
- Moldagem em autoclave.

Os processos não são necessariamente excludentes, pelo contrário, são em geral utilizados em conjunto. Os processos de moldagem a vácuo e a pressão são análogos. As principais etapas do processo à vácuo são:

- Cobrir o moldado com uma película separadora perfurada, para evitar a adesão com as demais membranas;
- Cobrir a película separadora com camadas de material poroso, para permitir o fluxo de ar e a saída do excesso de resina;
- Posicionar uma tira de junta, ou de um material que isole a passagem de ar, logo após a borda do moldado;
- Cobrir o conjunto com uma película de plástico, formando uma bolsa;
- Aplicar lentamente o vácuo enquanto se posiciona a bolsa plástica sobre o moldado, retirando-se o excesso de ar;

- Manter o conjunto sob pressão ou vácuo até que a cura se complete, a temperatura ambiente ou em forno.

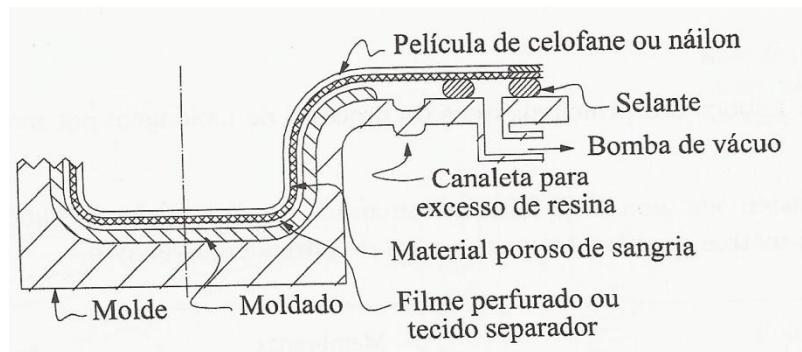


Figura 2.11 – Moldagem à vacuo - (MENDONÇA, 2005)

O processo por autoclave é o padrão aplicado na indústria aeroespacial. É usado na fabricação com pré-impregnados, embora, em geral, possa ser usado com qualquer tipo de fibra nos processos molhados.

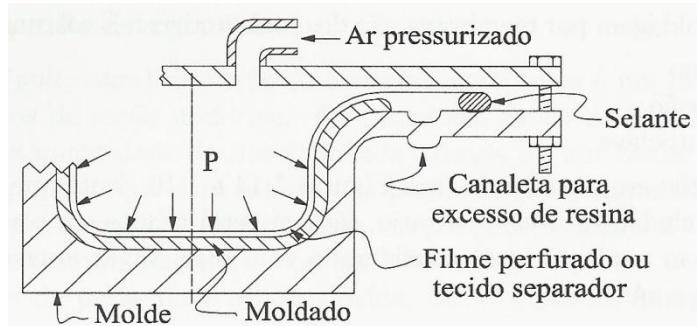


Figura 2.12 – Moldagem por pressão - (MENDONÇA, 2005)

Autoclave é simplesmente um vaso de pressão aquecido, no qual todo o conjunto é submetido a um ciclo especificado de temperatura e pressão para a cura. As pressões aplicadas ficam na faixa de 0,25Mpa a 0,7Mpa (2,5atm a 7,0atm).

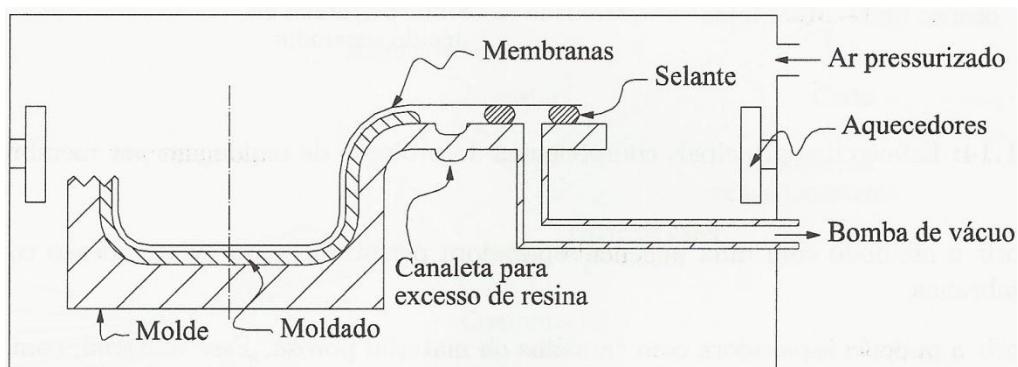


Figura 2.13 – Moldagem em autoclave - (MENDONÇA, 2005)

## Processo de prensagem a quente ou frio

Indicado para grandes produções em série, onde se deseja obter 1.000 a 10.000 peças por ano, como por exemplo: cadeiras, caixas de distribuição de eletricidade e bandejas.

O processo ocorre da seguinte forma. Coloca-se o reforço em todo o contorno da cavidade do molde e sobre este a resina, aplica-se então força, exercendo uma pressão sobre o conjunto, possibilitando assim a obtenção da peça. Esta compressão pode ser feita a frio ou a quente. No processo a frio, a polimerização é obtida à temperatura ambiente, enquanto na compressão à quente são utilizadas altas temperaturas e tem-se um ciclo de moldagem mais rápido do que aquele a frio.

A resina usualmente utilizada neste processo é a resina poliéster de alta reatividade e pode-se adicionar cargas minerais para redução de custo e aumento de dureza.

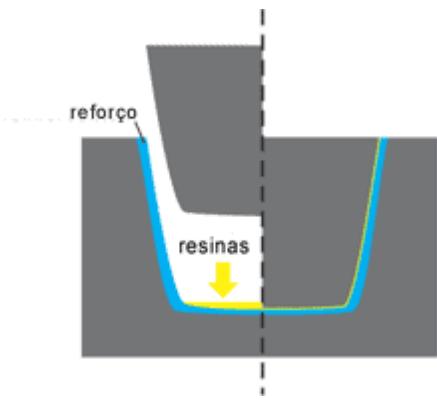


Figura 2.14 - Processo de prensagem a quente e/ou a frio - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

## Bulk Molding Compound (BMC)

O BMC é um composto de resina poliéster insaturado, com catalisador, cargas minerais, fibras de vidro picadas, pigmentos e outros aditivos. Tal composto é usado para fabricar peças que necessitem de boa estabilidade dimensional, acabamento superficial e boas características elétricas e mecânicas, sendo empregado principalmente na indústria elétrica de isoladores, chaves de contato e caixas de produtos elétricos.

O processo de produção do BMC possui duas etapas: preparação do composto e prensagem ou injeção da peça final.

- Preparação do composto - Com exceção do reforço (fibra de vidro), as cargas minerais, o catalisador, a resina poliéster e os outros componentes da fórmula neste estágio inicial de preparação são pré-misturados num misturador sigma à alta velocidade, para que se forme a pasta-matriz. Não devendo atingir temperatura superior a 40° C, a pasta-matriz tem de ser inteiramente homogeneizada durante esta parte inicial do processo. Depois, adiciona-se o reforço à pasta-matriz e reduzindo-se a velocidade do misturador, a fórmula agora completa é novamente misturada, objetivando garantir a impregnação e o não desmanche do reforço.

Depois de realizada a homogeneização, o composto é retirado do misturador e embalado com um filme protetivo para que não aconteça a evaporação do estireno.

- Prensagem ou injeção da peça final - A etapa final do processo de fabricação do BMC pode ser feita de duas maneiras, por prensagem ou injeção. A prensagem é o método mais empregado, devendo ser feita em uma prensa que possa aplicar uma pressão entre 50 e 70 kgf/cm<sup>2</sup>, usando-se moldes de aço com cromo duro para grandes produções e moldes de metal macio para escalas menores. Neste processo, o BMC é pesado e colocado sobre o molde aquecido (aproximadamente 150° C), devendo cobrir de 50 a 80% do molde. A pressão faz com que material flutue, preenchendo todo o espaço entre a matriz e a punção. Deve-se exercer sobre a peça uma pressão positiva constante, a qual curará a peça por tempo determinado pela espessura requerida da peça. Por fim, realizar-se-á o ajuste da reatividade do sistema, a polimerização da resina, para então a peça ser desmoldada e colocada num berço para seu resfriamento.

Ao contrário do SMC, no processo BMC não é necessário recorrer à etapa de aumento da viscosidade, isto é, a etapa de espera, por vezes denominada de maturação.

Pode-se obter pelo processo de BMC peças com maior teor de carga, e ou reforço, e peças consideradas mais complexas em relação ao desenho, tais como: faróis dianteiros de carros, estojo para equipamentos elétricos entre outros.

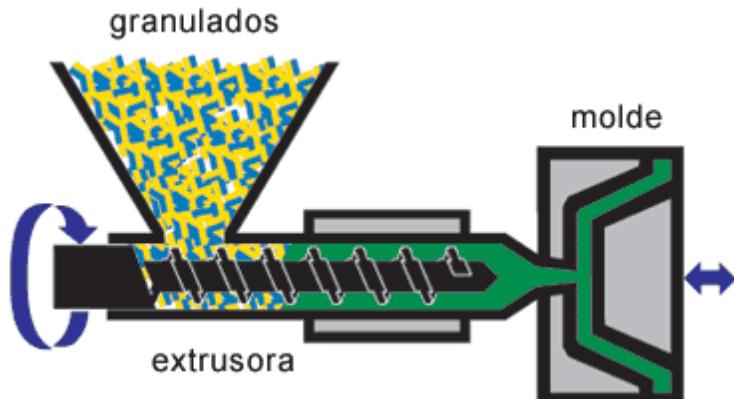


Figura 2.15 - Processo de BMC - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

## Laminação contínua

O processo de laminação contínua é utilizado para aplicações no setor de construção civil como a produção de telhas onduladas e telhados de estufas em configurações lisas e onduladas.

O processo descreve-se da seguinte forma. Numa primeira etapa deve-se impregnar com resina o reforço sendo usualmente utilizados *rovings* cortados ou contínuos sobre um filme de transporte. Na sequência, faz-se um sanduíche deste material sobreposto sobre um filme, colocando-se um segundo filme. A moldagem ocorrerá de forma progressiva dentro de uma

estufa com o auxílio dos chamados moldes de perfil. No final da estufa há o corte das bordas laterais e o corte transversal no tamanho desejado, sendo antes os filmes de transporte retirados e rebobinados.

A velocidade típica dos equipamentos de lamination contínua é da ordem de 5 a 15 m/min, dependendo da largura da chapa, que não deve ultrapassar 3 metros.

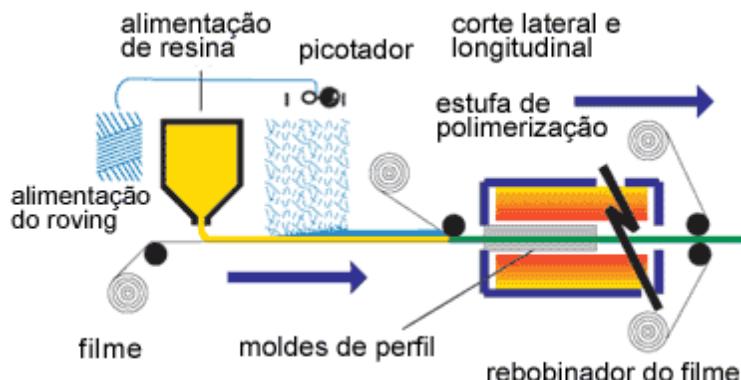


Figura 2.16 - Processo de lamination contínua - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

### **Resin Transfer Moulding (RTM)**

O processo de injeção de resina (RTM) permite a moldagem de componentes com forma complexa e área de superfície grande com um bom acabamento de superfície em ambos os lados, caracterizando-se ainda por permitir um alto ciclo de produção, uniformidade de espessura, apresentando uma perda pequena de matéria-prima, melhoria ambiental (possui baixa emissão de monômero de estireno), encapsulamento de buchas e nervuras e a utilização de cargas minerais.

É empregado em muitas aplicações de transporte, como por exemplo, cabines de caminhão, tratores e colheitadeiras.

O processo descreve-se da seguinte forma. Os reforços são colocados no interior do molde, previamente, antes de fechá-lo e travá-lo firmemente. A cavidade do molde que é rígido e fechado tipo punção matriz, pode possuir um ou vários pontos de injeção para a introdução da resina juntamente com cargas minerais e aditivos. Podem ser utilizados neste processo, resinas poliésteres, epóxi, fenólicas e acrílicas. Podem ser usadas resinas de baixa retração neste processo, para melhorar o acabamento de superfície e aparência.

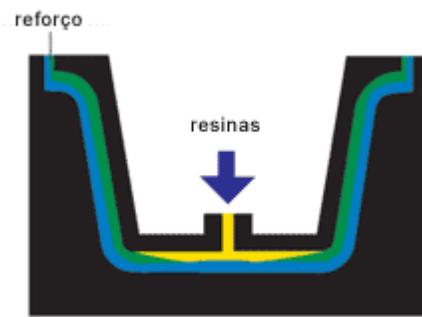


Figura 2.17 - Processo RTM - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

### **Enrolamento filamentar (*Filament winding*)**

O processo enrolamento filamentar é utilizado quando se deseja obter produtos ocos, como tubos, canos, tanques e reservatórios.

Neste processo, os reforços, geralmente filamentos contínuos de fibra de vidro (*rovings*), estão dispostos em prateleiras também conhecidas como gaiolas, onde são desenrolados e impregnados com a resina e aditivos por meio de imersão completa ou por cilindro de transferência. Os filamentos impregnados são então enrolados em várias camadas sobre um mandril rotativo, sendo então posteriormente encaminhados para a polimerização ou cura, que se faz em fornos ou com luzes infravermelhas sempre com o mandril em rotação.

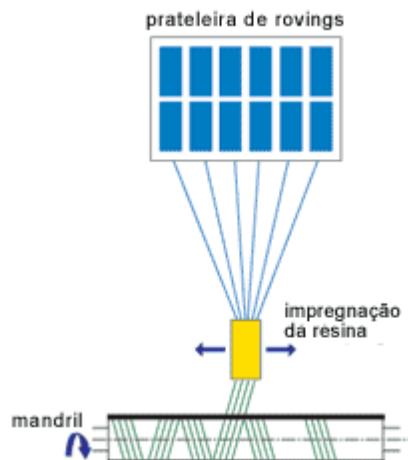


Figura 2.18 - Processo de enrolamento filamentar - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

### **Pultrusão**

O processo de pultrusão é um processo em contínuo, que consiste em impregnar com resina o reforço (fibra de vidro provenientes de *rovings* ou mantas), tracionando o material, fibra de vidro+resina, para dentro de moldes aquecidos. A mistura fibra/resina tomará a geometria do molde, sendo que a temperatura do molde ativará o iniciador de reação presente na mistura, ocorrendo desta forma o *crosslink* polimérico conforme o perfil. O perfil curado é então cortado no comprimento desejado.

A impregnação pode se dar por imersão em cubas de impregnação, contendo resina aditivada com iniciador e desmoldante ou por processo de injeção da mistura resina/aditivos diretamente no molde, sendo o primeiro o mais usual.

Os reforços são baseados principalmente nos *rovings* diretos dispostos de maneira a proporcionarem um reforço longitudinal. Outros tipos de reforços são mantas de fios contínuos ou tecidos que proporcionam o reforço transversal e também os véus de acabamento superficial.

O molde para conformação de perfis pultrudados deve ser construído em metal, sendo que o mesmo pode ser ainda cromado para aumentar sua vida útil e facilitar a desmoldagem.

A pultrusão pode produzir perfis, ocos ou maciços, de diferentes formatos. Dependendo do desenho e do formato, a taxa de vidro utilizada varia de 30 a 70% do peso. Perfis pultrudados são usados em diversas aplicações, como nas áreas elétrica, de corrosão, de construção e mercados de bens de consumo.

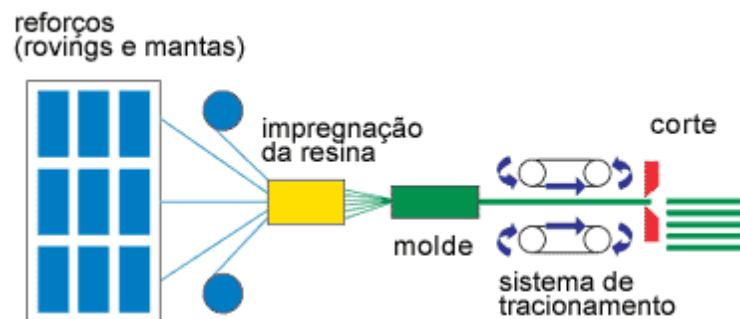


Figura 2.19 - Processo de pultrusão - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

## Centrifugação

O processo de centrifugação é utilizado para obter estruturas ocas de grandes diâmetros, como por exemplo, tubos e tanques para instalações químicas, petrolíferas e alimentícias, mas também tem sido utilizado para a produção de postes para iluminação elétrica e telefonia.

O processo ocorre da seguinte maneira. O reforço e a resina com aditivos são introduzidos num molde metálico rotativo e cilíndrico, e, sob o efeito da força centrífuga, a resina impregna o reforço. A velocidade de rotação aumenta até que a velocidade de moldagem é atingida, sendo que esta depende de diversos fatores tais como natureza do reforço, espessura e diâmetro da peça, tipo e viscosidade da resina dentre outros.

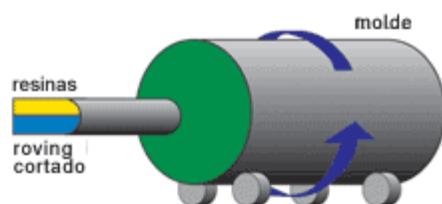


Figura 2.20 - Processo de centrifugação - SAINT-GOBAIN-VETROTEX

## 3 DESENVOLVIMENTO

Este projeto utilizou para efeito de ensaio de potência um aerogerador fabricado em um projeto de graduação anterior, idealizado pelos alunos Gustavo de Carvalho Sousa e Tiago Bermudez Souto de Oliveira. Para que o ensaio fosse possível, foram realizadas inúmeras adaptações e também a fabricação das pás em fibra de vidro. Diante desta informação, dá-se continuidade ao relatório, mostrando as etapas de fabricação das pás em fibra de vidro.

### 3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS PÁS

Este tópico descreve detalhadamente todas as etapas do processo de fabricação das pás, com reforço em fibra de vidro, do gerador eólico de pequeno porte. O processo será descrito com uma enumeração passo a passo.

As peças foram fabricadas na empresa VELOZTECH – Engenharia de Competição, situada no Autódromo Internacional de Brasília - Nelson Piquet, na cidade de Brasília, Distrito Federal. O tecido em fibra de vidro foi fornecido pelo professor orientador Flamínio Levy Neto, do departamento de engenharia mecânica da Universidade de Brasília. A empresa VELOZTECH cedeu o espaço físico, máquinas, equipamentos e materiais necessários para a fabricação.

#### 1º Passo

A primeira etapa realizada consistiu na determinação da gramatura do tecido de fibra de vidro. O tecido fornecido foi medido e apresentou as seguintes dimensões:

- Comprimento: 4m;
- Largura: 1,32m;
- Massa: 2,526kg.

Com as dimensões e os dados de massa do tecido, determinou-se a gramatura do tecido que é de 480g/m<sup>2</sup>.



Figura 3.1 – Tecido de fibra de vidro



Figura 3.2 – Massa do tecido fibra de vidro

## 2º Passo

O molde continha algumas imperfeições que poderiam levar a deformidades geométricas do modelo a ser retirado, e também poderiam comprometer a integridade do molde, principalmente no momento da retirada da peça moldada do molde.

O defeito foi corrigido com a aplicação de massa plástica e no remodelamento, através do lixamento da superfície coberta com massa plástica.



Figura 3.3 – Recuperação do molde



Figura 3.4 – Detalhe do reparo no molde

### 3º Passo

Após a recuperação do molde, foi aplicada cera desmoldante a fim de facilitar a retirada da peça moldada, e manter a integridade física do molde. Foram aplicadas cinco camadas de cera em cada parte do molde.



Figura 3.5 – Aplicação do desmoldante

### 4º Passo

Os moldes foram pesados após o processo de enceramento. As massas obtidas foram:

- Bordo superior: 1,862kg;
- Bordo inferior: 1.544kg.

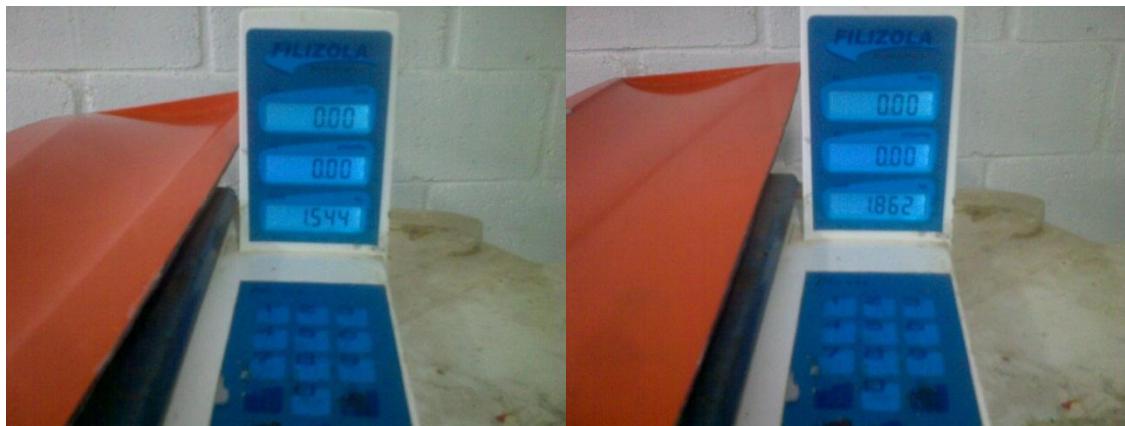


Figura 3.6 – Massa dos moldes

## 5º Passo

Com os moldes prontos, partiu-se para a próxima etapa. Realizou-se o corte da fibra de vidro com uma dimensão maior que a pá, seguindo a geometria do molde. Foi definido que as pás teriam duas camadas de reforço de fibra de vidro, portanto cortou-se 12 partes da fibra de vidro, no formato do contorno da pá.



Figura 3.7 – Corte dos modelos das pás

## 6º Passo

Foi adotado um procedimento de nomeação para cada lado das pás. Tal denominação foi adotada para facilitar todo o processo de fabricação e evitar uma possível troca de peças fabricadas. Denominaram-se as pás como 1<sup>a</sup> pá, 2<sup>a</sup> pá e 3<sup>a</sup> pá. Onde cada lado de cada pá foi denominado como bordo superior (BS) e bordo inferior (BI).

Antes do início da laminação das pás, as fibras de vidro a serem laminadas foram pesadas para se realizar a regra da mistura. Outro procedimento adotado também antes do início da laminação foi o preparo da bolsa de vácuo, onde se colocou a fita selante para a vedação da bolsa de vácuo.



Figura 3.8 – Massa das fibras

A matriz utilizada foi a resina de poliéster fabricada pela RECHHOLD, modelo Polylite® 10228-10. Então a resina foi pesada, e adicionou-se o catalisador na proporção de 1% em massa. O catalisador utilizado é do tipo MEKP fabricado pela MAXI RUBBER, modelo MB-005.

Após a adição do catalisador, misturou-se bem a mistura contendo a resina de poliéster e o catalisador, a fim de se obter uma mistura homogênea.

A figura (3.9) ilustra esse passo.

#### 7º Passo

Com todos os aparatos necessários para a laminação prontos e preparados, tais como, fibra cortada, matriz preparada, bolsa de vácuo montada, deu-se início a laminação de cada lado de cada pá. Primeiramente foi colocada resina no molde e em seguida colocada a primeira camada do tecido de fibra de vidro.

Após a impregnação da primeira camada do tecido de fibra de vidro, foi colocada a segunda camada de tecido de fibra de vidro que foi impregnada com o auxílio de um pincel.



Figura 3.9 – Massa de resina e adição do catalisador



Figura 3.10 – Laminação



Figura 3.11 – Aplicação de resina no molde e no tecido de fibra de vidro

Todo este procedimento teve que ser realizado antes gelificação da resina. O tempo de gel da resina utilizada, com a mistura do catalisador a 1% em proporção é de 10 a 15 minutos a temperatura de 25°C.

Com as duas camadas de tecido de fibra de vidro impregnadas de resina, os moldes foram colocados na bolsa plástica para a cura a vácuo.



Figura 3.12 – Término do processo de laminação



Figura 3.13 – Cura na bolsa de vácuo

O valor de pressão de succção médio obtidos na fabricação das três pás, foi de 550 mmHg, como indicado no manômetro de pressão, que convertido para unidades do Sistema Internacional equivale a 0,073 Mpa.



Figura 3.14 – Pressão de succção

#### 8ºPasso

A cura foi realizada a temperatura ambiente. As peças ficaram submetidas ao vácuo durante 4 horas. Após esse período de cura, a pressão de succção foi desativada, as peças foram retiradas da bolsa plástica, e posteriormente foram sacadas do molde.



Figura 3.15 – Peças curadas

Todas as peças sacadas foram pesadas e identificadas. As massas obtidas estão listadas no quadro (3.1).

Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10	3a pá		2a pá		1a pá	
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior
Partes das pás sem acabamento(g)	304	320	266	244	284	272

Quadro 3.1 – Massa das peças curadas



Figura 3.16 – Massa das peças curadas

#### 9º Passo

Tendo as partes de cada pá já curadas e identificadas, foi realizada uma marcação acompanhando o contorno de cada lado das pás para a retirada do composto em excesso. O corte foi realizado com uma ferramenta pneumática que utiliza um disco de corte. Após o corte de cada lado, as partes foram novamente pesadas. Os valores obtidos são listados no quadro (3.2).

Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10	3a pá		2a pá		1a pá	
	Bordo	Bordo	Bordo	Bordo	Bordo	Bordo

	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Partes das pás sem acabamento(g)	178	196	180	184	176	178
Massa dos resíduos(g)	118	118	78	54	104	86

Quadro 3.2 – Massa dos resíduos cortados



Figura 3.17 – Corte do excesso das peças

#### 10º Passo

Com as partes prontas, partiu-se para o procedimento de juntar as partes, o bordo superior com o bordo inferior de cada pá.

A junção foi feita com o *roving* de fibra de vidro. As partes de cada pá foram colocadas no molde, bordo superior e bordo inferior. Cortou-se o *roving* no comprimento do perímetro da pá, e impregnou-o com resina de poliéster. Juntaram-se os moldes e os fixaram com sargentos, os quais exerceram força entre os moldes.



Figura 3.18 – Pesagem dos resíduos cortados

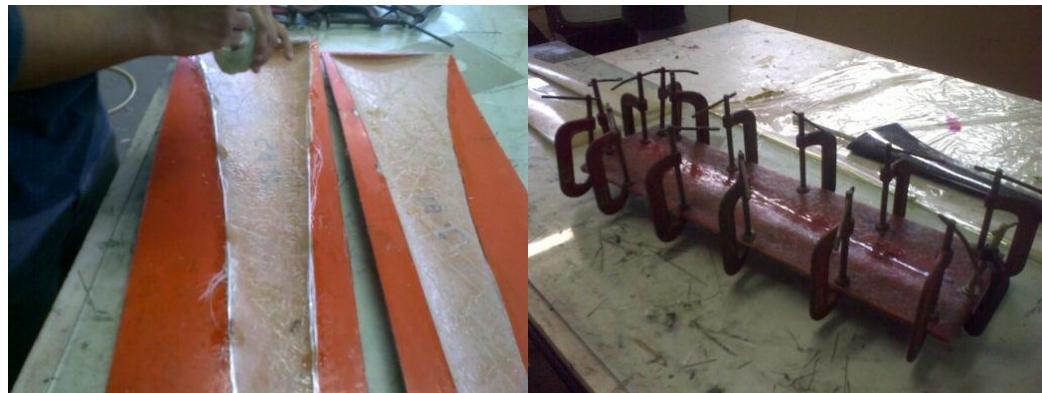


Figura 3.19 – Processo de emenda das partes

A cura da resina foi de 4 horas. Após o período de cura, o molde foi aberto e a pá foi retirada. Os excessos de fibra e resina foram retirados. Esse procedimento foi repetido nas três pás. Após as três pás estarem prontas, elas foram novamente pesadas. Os dados obtidos apresentam-se no quadro (3.3).

Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10	3a pá		2a pá		1a pá	
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior
Massa de roling (g)	6		2		4	
Massa de resina (g)	14		12		6	
Massa da pá sem PU e sem acabamento(g)	388		378		378	

Quadro 3.3 – Massa das pás sem o material de núcleo



Figura 3.20 – Desmolde e pesagem das pás

## 11º Passo

A próxima etapa do processo de fabricação das pás do gerador eólico de pequeno porte consistiu no preenchimento do núcleo das pás. O material escolhido para o preenchimento foi a espuma de poliuretano.

Foi feita uma abertura no molde ( $\phi 16\text{mm}$ ) com o diâmetro da haste de alumínio, que une a pá com cubo do gerador. Esse furo serviu como canal para o enchimento do núcleo de cada pá com a mistura do composto de poliuretano.

Antes do enchimento das pás, foi realizado um teste para ter conhecimento do fator de expansibilidade do composto de poliuretano que seria utilizado. Primeiramente foi realizada uma mistura com os compostos A e B de poliuretano, com 20 ml de cada parte. Para o teste de expansibilidade do PU, o molde foi coberto com um saco plástico a fim de se manter a integridade física do molde, já que a espuma de poliuretano tem características adesivas. A mistura foi preparada e injetada no molde, que foi fixado com sargentos. Após 30 minutos o molde foi aberto e verificou-se que o composto de poliuretano expandiu-se preenchendo em torno de 40% em volume, do volume total.



Figura 3.21 – Marcação para o posicionamento da haste



Figura 3.22 – Determinação do volume de poliuretano

O procedimento foi repetido, agora utilizando uma quantidade de 60 ml de cada composto do poliuretano. Após a abertura do molde foi verificado que houve o preenchimento completo do modelo da pá. Sendo então tal medida utilizada para o preenchimento dos núcleos das pás.



Figura 3.23 – Volume compostos A e de poliuretano

As hastes de alumínio foram cortadas. O tubo de alumínio para as hastes tem o diâmetro de 15.875mm (5/8") e foi reaproveitado. Foi necessário cortar as partes emendadas ao tudo e fazer o lixamento das soldas.



Figura 3.24 – Corte e lixamento das soldas do tubo das hastes

Foram abertos os furos nas pás, por onde se encaixou as hastes de alumínio. As pás foram colocadas uma de cada vez no molde. As hastes de alumínio foram posicionadas em suas corretas posições, tais dimensões foram retiradas de uma pá feita em fibra de carbono do projeto anterior a esse. O molde foi fechado e preso com sargentos para fixar e pressionar o molde. A injeção do poliuretano ocorreu pela haste de alumínio. A injeção foi realizada de forma rápida, já que quando se realiza a mistura dos compostos de poliuretano, A e B, a reação de expansão se realiza rapidamente em um tempo médio, aferido anteriormente a injeção final nas pás, entre trinta e quarenta segundos. Após a injeção, o molde foi posicionado de forma inclinada a fim de promover uma melhor distribuição do PU injetado. Esperou-se um tempo de trinta minutos antes da abertura do molde. Tempo esse necessário para a expansão do poliuretano.

Após a abertura do molde as pás encontravam praticamente prontas. No quadro (3.4) a seguir segue os dados de massa obtidos.



Figura 3.25 – Posicionamento para a expansão do poliuretano



Figura 3.26 – Pás prontas e montadas no gerador

Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10	3a pá		2a pá		1a pá	
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior
Massa da pá sem PU e sem acabamento (g)		388		378		378
Massa da haste (g)		84		84		84
Massa sem Poliuretano (g)		472		462		462
Massa com Poliuretano (g)		586		580		594

Quadro 3.4 – Massa das pás com poliuretano

#### 12º Passo

A próxima etapa a ser executada foi à realização da furação das hastes para a fixação junto à nacelle do aerogerador. O posicionamento foi feito da seguinte maneira:

- Colocou-se a pá juntamente ao rotor;
- Posicionou-se a pá com um ângulo de ataque de zero graus;
- Fez uma marcação na haste da pá, e no rotor, criando assim uma referência entre as peças;
- Com o auxílio de um transferidor fez-se uma marcação do ângulo de 5,5°, e marcou-se essa posição;
- Novamente colocou-se a pá no rotor, e posicionou-a na referência de ângulo zero, e girou-a para a posição de 5,5°;
- Com o auxílio de uma furadeira, fez um furo de ø5mm, na haste, o qual seria utilizado para a fixação através de parafuso, assim fixando a pá no cubo;

O procedimento listado acima repetiu-se nas outras duas pás restantes.

Devido a diferença de posição da furação existente no rotor, as pás foram referenciadas, tendo cada pá a sua posição correta no rotor.

Na figura (3.27), pode-se perceber a fixação por parafuso da haste no rotor.

### 13º Passo

A última etapa do processo de fabricação das pás consistiu no acabamento das pás.

A primeira ação realizada foi o lixamento das peças. Após o lixamento foi aplicada uma demão de tinta branca, e posteriormente duas demãos de tinta preta em cada uma das pás.

Após a pintura, as pás foram pesadas. Sendo esses os valores finais de massa das pás. O quadro (3.5) indica os valores.

Após a pintura as pás foram montadas junto à nacelle. O quadro (3.7) mostra todos os dados obtidos durante o processo de fabricação das pás.



Figura 3.27 – Detalhe da fixação das pás por parafuso



Figura 3.28 – Lixamento das pás



Figura 3.29 – Pintura da pás

Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10	3a pá		2a pá		1a pá	
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior
Massa das pás com tinta (g)	610		606		632	

Quadro 3.5 – Massa das pás com acabamento

Com os dados se pode calcular a densidade do composto  $\rho_c$ . Primeiramente estimou-se um volume de vazios  $v_v$  com tendo o valor de zero. Então se calculou a densidade do compósito e a fração volumétrica de fibras  $V_f$ , para cada peça fabricada, 1<sup>a</sup> pá BS e BI, 2<sup>a</sup> pá BS e BI, e 3<sup>a</sup> pá BS e BI. Os cálculos se repetiram estimando o volume de vazio em 1%, 3% e 5%. E então encontrou os valores da fração volumétrica de fibra, e densidade do compósito para cada situação. Os valores encontram-se nos quadros (3.8), (3.9), (3.10) e (3.11).



Figura 3.30 – Pesagem da 3<sup>a</sup> pá



Figura 3.31 – Pesagem da 2<sup>a</sup> pá



Figura 3.32 – Pesagem da 1<sup>a</sup> pá

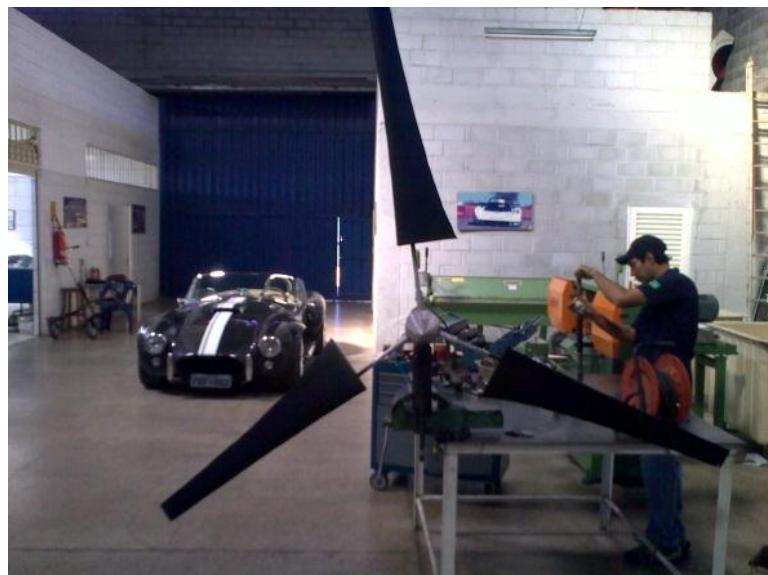


Figura 3.33 – Gerador montado 1

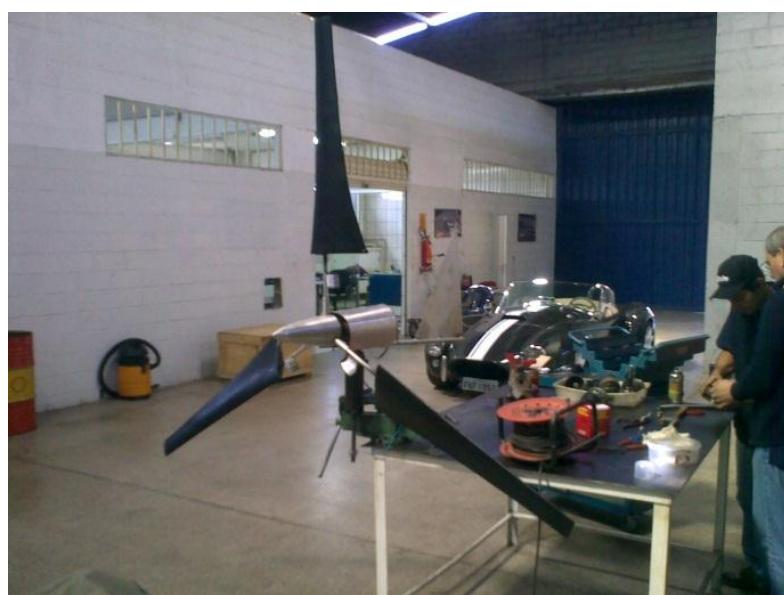


Figura 3.34 – Gerador montado 2

	Pás em Fibra de Carbono			
	3a	2a	1a	Total
Massa das pás (g)	490	458	448	1396

Quadro 3.6 – Massa das pás em fibra de carbono

Catalisador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10 Núcleo de Poliuretano	3 <sup>a</sup> pá		2 <sup>a</sup> pá		1 <sup>a</sup> pá	
	Bordo	Bordo	Bordo	Bordo	Bordo	Bordo
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Massa de fibra(g)	200	192	166	162	206	174
Massa de resina(g)	120	132	98	100	104	-
Massa total(g)	320	324	264	262	310	248
Partes das pás sem acabamento(g)	304	320	266	244	284	272
Massa dos resíduos(g)	118	118	78	54	104	86
Massa das partes das pás sem acabamento(g)	178	196	180	184	176	178
Massa de roving (g)	6		2		4	
Massa de resina (g)	14		12		6	
Massa da pá sem PU e sem acabamento(g)	388		378		378	
Massa da haste (g)	84		84		84	
Massa sem Poliuretano (g)	472		462		462	
Massa com Poliuretano (g)	586		580		594	
Massa das pás com tinta (g)	610		606		632	

Quadro 3.7 – Dados do processo de fabricação

Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10 Núcleo de Poliuretano	Volume de vazio estimado de 0% - $\nu_v$						Fibra (g/cm <sup>3</sup> )	Resina (g/cm <sup>3</sup> )		
	3a pá		2a pá		1a pá					
	Bordo	Inferior	Bordo	Inferior	Bordo	Inferior				
Massa de fibra(g)	200	192	166	162	206	174	2.5	1.2		
Massa das partes das pás sem acabamento(g)	304	320	266	244	284	272				
Massa de resina (g)	104.00	128.00	100.00	82.00	78.00	98.00				
Volume de fibra - $v_f$ (cm <sup>3</sup> )	80.00	76.80	66.40	64.80	82.40	69.60				
Volume de matriz - $v_m$ (cm <sup>3</sup> )	86.67	106.67	83.33	68.33	65.00	81.67				
volume do compósito - $v_c$ (cm <sup>3</sup> )	166.67	183.47	149.73	133.13	147.40	151.27				
Fração volumétrica de fibra - $V_f$	0.480	0.419	0.443	0.487	0.559	0.460				
Porcentagem de fibra no compósito (%)	48.0	41.9	44.3	48.7	55.9	46.0				
Densidade do compósito - $\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.82	1.74	1.78	1.83	1.93	1.80				

Quadro 3.8 – Fração volumétrica com  $\nu_v = 0\%$

Volume de vazio estimado de 1% - $v_v$								
Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10 Núcleo de Poliuretano	3a pá		2a pá		1a pá		Fibra (g/cm³)	Resina (g/cm³)
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior		
Massa de fibra(g)	200	192	166	162	206	174	2.5	1.2
Massa das partes das pás sem acabamento(g)	304	320	266	244	284	272		
Massa de resina (g)	104.00	128.00	100.00	82.00	78.00	98.00		
Volume de fibra - $v_f$ (cm³)	80.00	76.80	66.40	64.80	82.40	69.60		
Volume de matriz - $v_m$ (cm³)	86.67	106.67	83.33	68.33	65.00	81.67		
volume do compósito - $v_c$ (cm³)	168.35	185.32	151.25	134.48	148.89	152.79		
Fração volumétrica de fibra - $V_f$	0.475	0.414	0.439	0.482	0.553	0.456		
Porcentagem de fibra no compósito (%)	47.5	41.4	43.9	48.2	55.3	45.6		
Densidade do compósito - $\rho_c$ (g/cm³)	1.81	1.73	1.76	1.81	1.91	1.78		

Quadro 3.9 – Fração volumétrica com  $v_v = 1\%$

Volume de vazio estimado de 3% - $v_v$								
Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10 Núcleo de Poliuretano	3a pá		2a pá		1a pá		Fibra (g/cm³)	Resina (g/cm³)
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior		
Massa de fibra(g)	200	192	166	162	206	174	2.5	1.2
Massa das partes das pás sem acabamento(g)	304	320	266	244	284	272		
Massa de resina (g)	104.00	128.00	100.00	82.00	78.00	98.00		
Volume de fibra - $v_f$ (cm³)	80.00	76.80	66.40	64.80	82.40	69.60		
Volume de matriz - $v_m$ (cm³)	86.67	106.67	83.33	68.33	65.00	81.67		
volume do compósito - $v_c$ (cm³)	171.82	189.14	154.36	137.25	151.96	155.95		
Fração volumétrica de fibra - $V_f$	0.466	0.406	0.430	0.472	0.542	0.446		
Porcentagem de fibra no compósito (%)	46.6	40.6	43.0	47.2	54.2	44.6		
Densidade do compósito - $\rho_c$ (g/cm³)	1.77	1.69	1.72	1.78	1.87	1.74		

Quadro 3.10 – Fração volumétrica com  $v_v = 3\%$

Volume de vazio estimado de 5% - $v_v$								
Catalizador MEKP = 1% Resina Polylite 10228-10 Núcleo de Poliuretano	3a pá		2a pá		1a pá		Fibra (g/cm³)	Resina (g/cm³)
	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior	Bordo Inferior	Bordo Superior		
Massa de fibra(g)	200	192	166	162	206	174	2.5	1.2
Massa das partes das pás sem acabamento(g)	304	320	266	244	284	272		
Massa de resina (g)	104.00	128.00	100.00	82.00	78.00	98.00		
Volume de fibra - $v_f$ (cm³)	80.00	76.80	66.40	64.80	82.40	69.60		
Volume de matriz - $v_m$ (cm³)	86.67	106.67	83.33	68.33	65.00	81.67		
volume do compósito - $v_c$ (cm³)	175.44	193.12	157.61	140.14	155.16	159.23		
Fração volumétrica de fibra - $V_f$	0.456	0.398	0.421	0.462	0.531	0.437		
Porcentagem de fibra no compósito (%)	45.6	39.8	42.1	46.2	53.1	43.7		
Densidade do compósito - $\rho_c$ (g/cm³)	1.73	1.66	1.69	1.74	1.83	1.71		

Quadro 3.11 – Fração volumétrica com  $v_v = 5\%$

Pode-se observar que todas as peças fabricadas obtiveram frações volumétricas próximas da esperada, ou seja,  $V_f \approx 50\%$ . Analisando os dados pode-se perceber que o laminado do bordo inferior da 1<sup>a</sup> pá obteve valores de fração volumétrica de fibra acima de 50% em todas as estimativas de volume de vazios, assim comprovando um processo de fabricação adequado. O quadro (3.12) exibe os valores médios encontrados de fração volumétrica de fibra, de porcentagem de fibra no compósito e a densidade média. É exibido também um valor médio de considerando todas as peças fabricadas. O valor médio da fração volumétrica de fibra é de 46,4%, e a densidade média das lâminas fabricadas é de 1,776 g/cm<sup>3</sup>, assim comprovando um processo de fabricação adequado.

	Valores médios considerando $v_v$				
	0%	1%	3%	5%	Média
<b>Fração volumétrica de fibra - <math>V_f</math></b>	0.475	0.470	0.460	0.451	0.464
<b>Porcentagem de fibra no compósito (%)</b>	47.5	47.0	46.0	45.1	46.4
<b>Densidade do compósito - <math>\rho_c</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.817	1.799	1.763	1.726	1.776

Quadro 3.12 – Valores médios estimando o  $v_v$

### 3.2 MONTAGEM DO AEROGERADOR

O conjunto mecânico do redutor já existia do projeto anterior a esse. As partes existentes eram:

- Rotor;
- Caixa multiplicadora, com relação de 1:15;
- Gerador de energia;
- Base com mancal;
- Capa protetora;
- Torre para teste.

A figura (3.34) exibe o conjunto mecânico do aerogerador.

Inicialmente o teste do gerador seria realizado em uma estação estática, a fim de reproduzir com fidelidade as condições reais de operação. O local escolhido foi o prédio do SG09, do departamento de engenharia mecânica, localizado no Campus Universitário Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

No teto do prédio havia uma torre, que no momento não encontrava nenhuma utilização. Tal torre tem uma altura aproximada de três metros de altura. Que juntamente com a altura do

prédio do SG09, totaliza uma altura em torno de dez metros de altura. Essa torre foi escolhida para a montagem do gerador eólico de pequeno porte.



Figura 3.35 – Nacelle do aerogerador

Para realizar a montagem do gerador no local escolhido, seria necessário fazer uma adaptação na base de fixação do gerador eólico, para fixá-lo no alto da torre.

Para a adaptação foi utilizado os seguintes materiais:

- Tubo com diâmetro externo de 76,2 mm (3’’), com chapa soldada contendo a furação do cubo (4 x 98 mm);
- Arruela com 76,2 mm de diâmetro e furo central de 20,5 mm de diâmetro, para ser soldada no tubo;
- Barra rosqueada de 19 mm de diâmetro (3/4’’);
- Arruela para rosca de 19 mm (3/4’’);
- Duas porcas para rosca de 19 mm (3/4’’);

Para se fazer a peça para adaptar a fixação do gerador na torre, era necessário se ter as dimensões do pico da torre, local onde seria feita a fixação da peça adaptadora. Então coletou-se as dimensões do pico da torre e a desenhou em software CAD (SolidWorks). A figura (3.35) exibe o pico da torre, as linhas de esboço representam as bases da treliça vão da base até o pico da torre.

Tendo o conhecimento do pico da torre, partiu-se para o esboço da peça adaptadora. Foi definido que a adaptação seria móvel, ou seja, poderia ser montada ou desmontada a qualquer momento. Tendo essa definição, foi desenhado um esboço e montagem da peça adaptadora para fixação do gerador eólico na torre.

A peça adaptadora foi feita com um tubo de 76,2 mm de diâmetro e com comprimento de 200 mm. Esse tubo foi aproveitado da torre para testes existente. Na parte inferior recebeu uma arruela, de 76,2 mm diâmetro externo com um furo de 20,5mm de diâmetro no centro, soldada.

Na parte superior recebeu uma chapa com uma furação de 4 x 98 mm de diâmetro, para a fixação na base com mancal. O tubo recebeu um furo de 12 mm de diâmetro o qual tem a função de servir de passagem para o fio que estará conectado ao gerador. A figura (3.37) exibe a peça adaptadora. A figura (3.38) exibe a montagem da peça adaptadora juntamente ao pico da torre. Então a peça adaptadora foi fabricada.

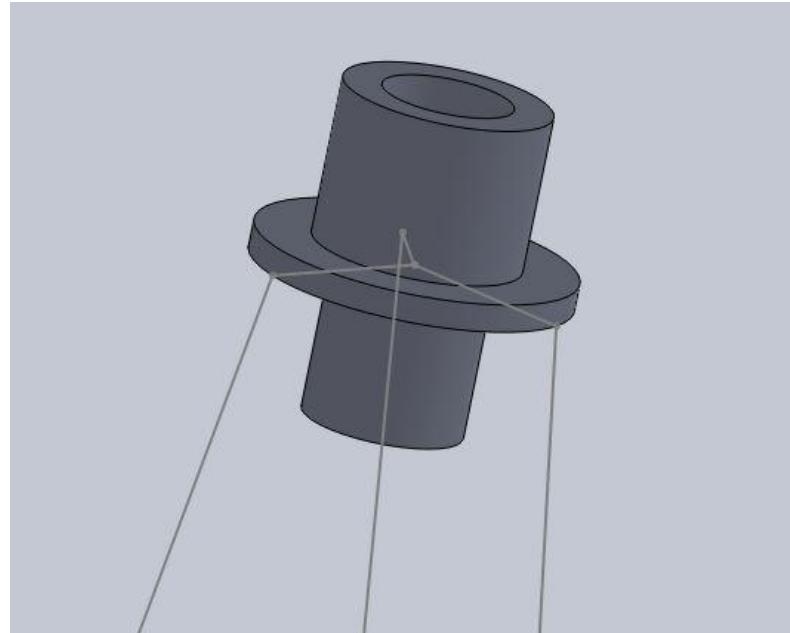


Figura 3.36 – Pico da torre

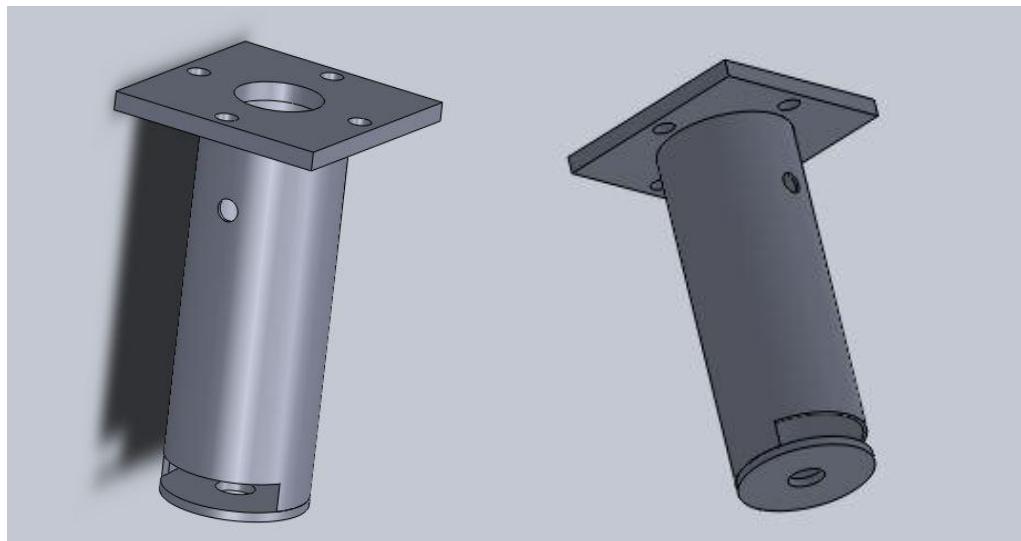


Figura 3.37 – Peça adaptadora

Outro aspecto que mereceu atenção foi a posição do cabo de energia que estaria ligado ao gerador. Como o gerador ficaria montado na torre, e devido a constante mudança da direção do vento, seria necessário um posicionamento do cabo de forma que ele não viesse a se enrolar na torre, podendo assim ocasionar um rompimento do cabo. Determinou que o cabo de energia passaria pela posição de rotação da nacelle, ou seja, na base com mancal. O centro do mancal tinha um pino maciço em aço. Foi necessário realizar a furação do mesmo para a passagem do

cabo. Para realizar esse furo, o conjunto mecânico foi desmontado. A base com o mancal foi posicionada e fixada no centro de usinagem CNC, modelo FV-1000 da marca FREELER, e foi realizada e executada a programação computacional de furação. A figura (3.40) detalha a fixação o processo de furação da base com mancal. Já figura (3.41) detalha o furo no centro do cubo.

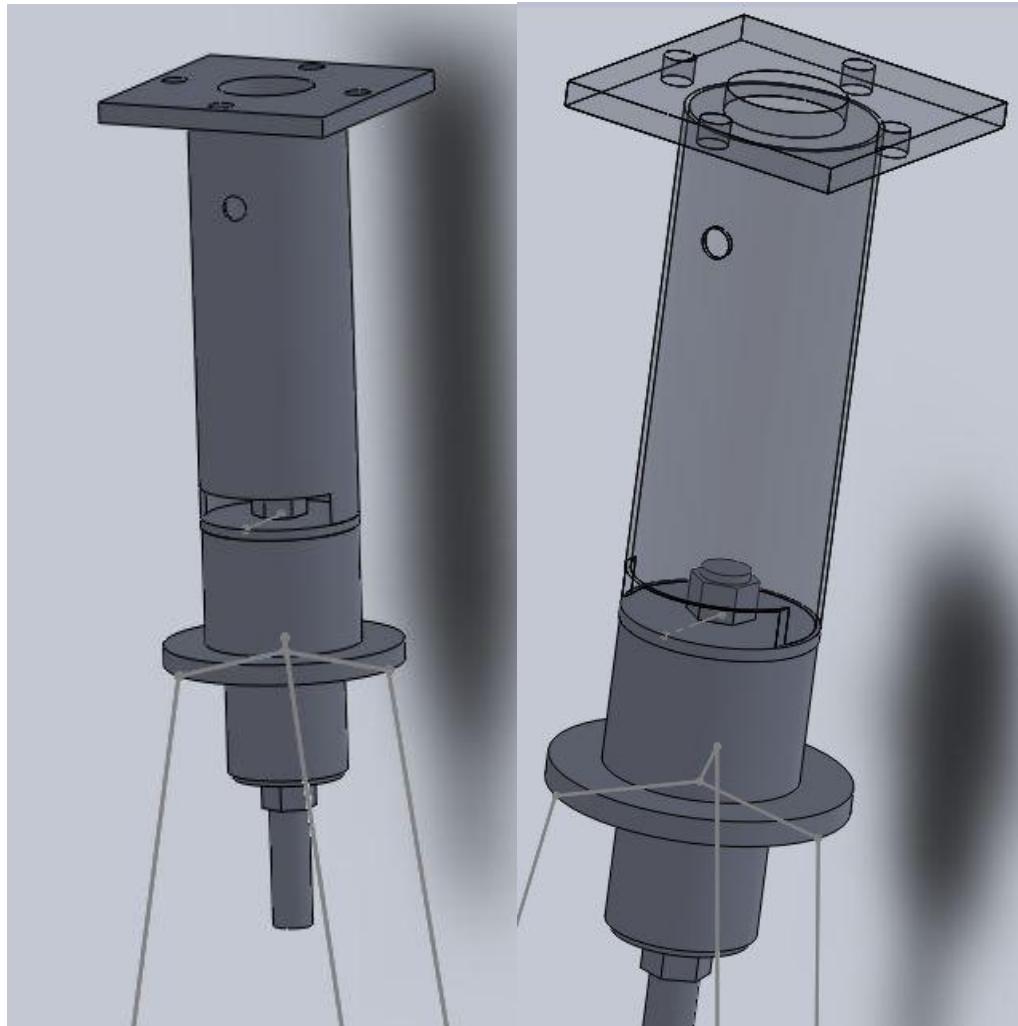


Figura 3.38 – Montagem da peça adaptadora no pico da torre



Figura 3.39 – Fabricação da peça adaptadora



Figura 3.40 – Furação da base com mancal no centro de usinagem

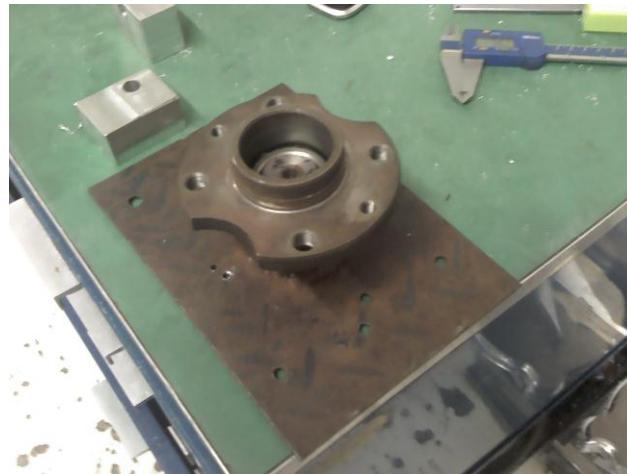


Figura 3.41 – Detalhe do furo do cubo

Após a furação da base com o mancal, o conjunto mecânico foi montado.

Foi fabricada também uma nova haste direcional, figura (3.42). Foi utilizada uma chapa de alumínio de 1,5 mm de espessura com o formato triangular. A chapa foi soldada em tubo de alumínio de 22,5 mm de diâmetro externo. Na ponta oposta a qual foi soldada a haste direcional, foi inserido uma bucha com um furo rosulado para a fixação junto à nacele.

Com todas as partes e peças prontas, o gerador eólico foi montado. Primeiramente montou-o de maneira a verificar todos os componentes. Como exibido nas figuras (3.43) e (3.44). Após essa verificação, montou-se o gerador eólico na torre localizada no prédio SG09 na UnB, como mostrado nas figuras (3.45), (3.46) e (3.47).

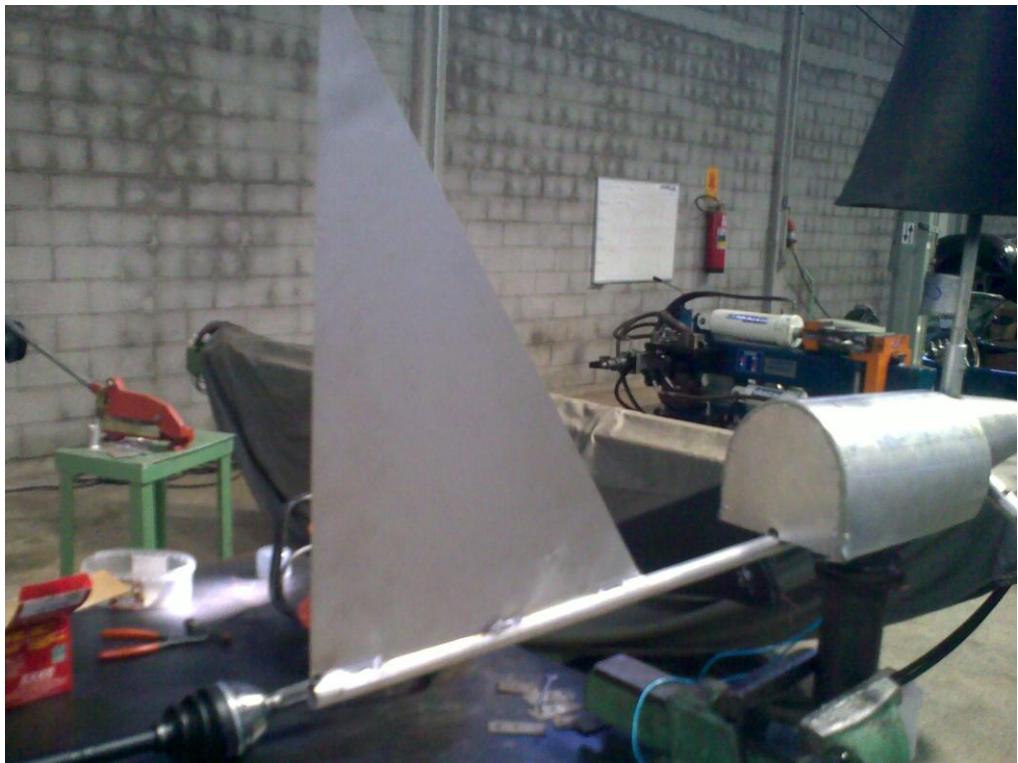


Figura 3.42 – Haste direcional



Figura 3.43 – Gerador eólico montado



Figura 3.44 – Gerador eólico montado com a peça adaptadora

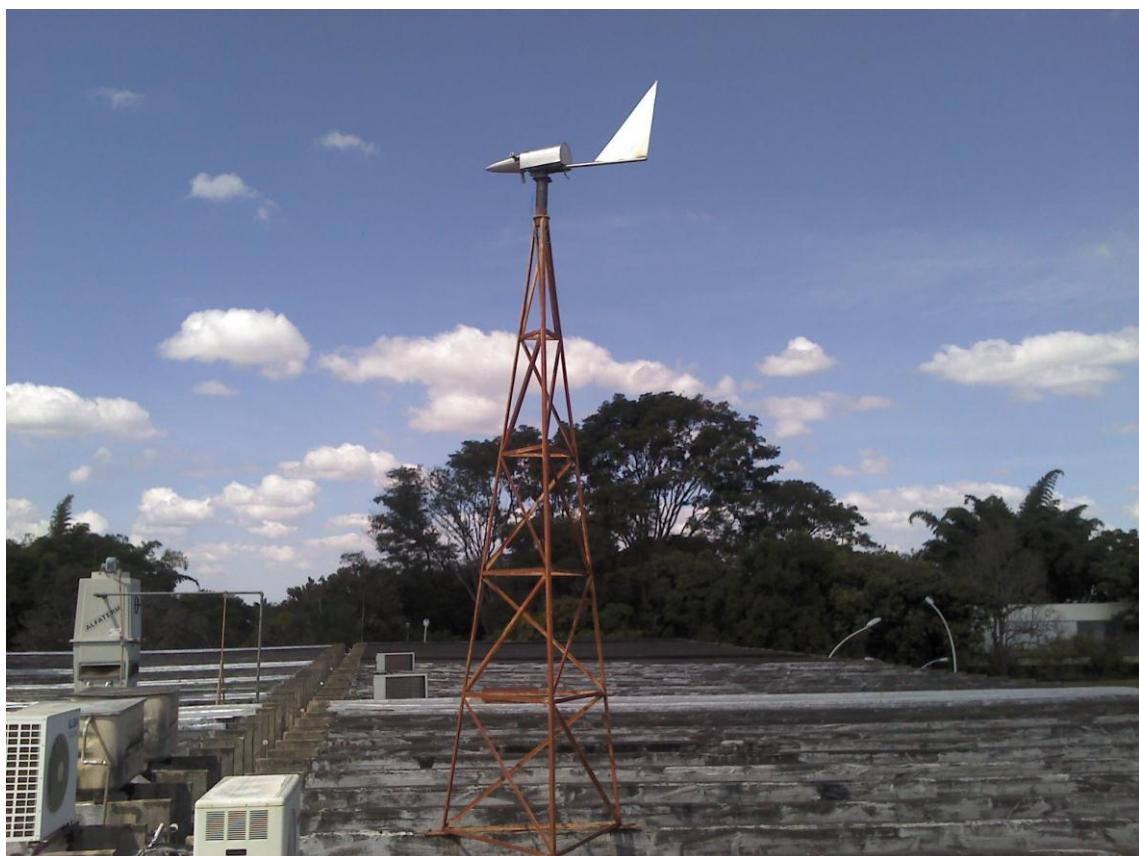


Figura 3.45 – Gerador eólico montado na torre sem as pás



Figura 3.46 – Gerador eólico montado na torre com as pás



Figura 3.47 – Gerador eólico no prédio SG09

### 3.3 GERADOR E CAIXA MULTIPLICADORA

O gerador utilizado no aerogerador é da marca BOSCH e é detalhado no catálogo da empresa. Seu código é GPB F 006 KM0 60E.

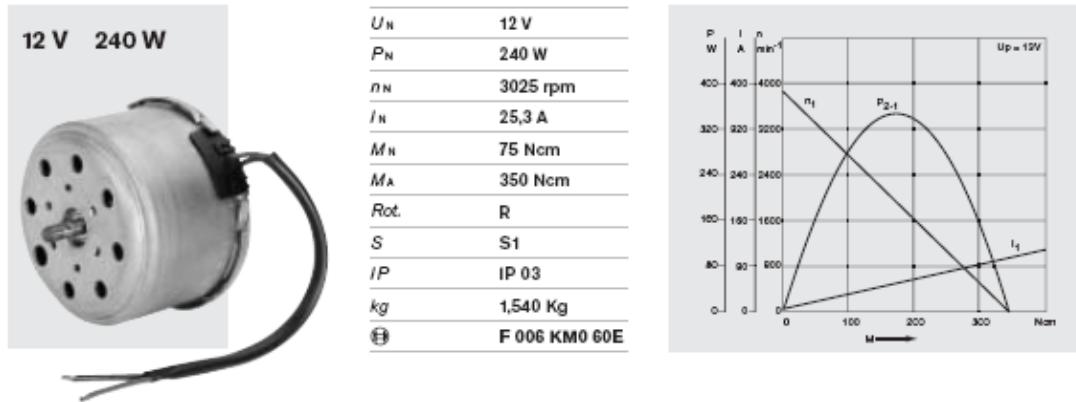


Figura 3.48 Especificações do motor/gerador da Bosch.

Para gerar 200 W de potência, é necessário que haja um torque de aproximadamente 65 N·cm, ou 0,65 N·m. O torque de entrada nas pás terá que ser maior, já que haverá uma caixa multiplicadora com eficiência  $\eta$  que transfere o torque ao gerador. Esta caixa multiplicadora deverá ter relação de aproximadamente 1:10 já que a rotação nominal do gerador é quase 10 vezes maior que a do cata-vento. No entanto, a caixa multiplicadora utilizada na fabricação do aerogerador deste trabalho foi uma com a relação de multiplicação de 1:15. O que acarreta em um aumento do torque para a rotação do rotor da turbina.

## 4 TESTES E RESULTADOS

O objetivo do teste de potência realizado foi de averiguar a potência produzida pelo gerador a partir da variação da velocidade do vento que passa por ele. O teste foi realizado com as pás em fibra de vidro e com as pás em fibra de carbono, cedidas pelo professor Flamínio, para efeito de comparação.

O planejamento inicial, para o teste de potência do gerador eólico construído, era de ser realizado na cobertura do SG9, prédio da engenharia mecânica – UnB, extraíndo dados de velocidade do vento da estação meteorológica da Engenharia Elétrica, que fica bem próxima ao prédio da mecânica. Mas ao ser montado na cobertura do SG9, o torque obtido com o vento encontrado aquela altitude, aproximadamente 10 metros, não foi suficiente para movimentar o rotor do gerador eólico, e por essa razão, uma nova forma de se obter os dados de potência precisou ser idealizada.



Figura 4.1 - Gerador montado na cobertura do SG9

A forma que pareceu mais coerente, e acessível financeiramente, de se resolver o problema encontrado no teste de potência inicial, na cobertura do SG9, foi a de se posicionar o gerador acima de um carro estilo picape, assim como na figura (4.2), e então variar a velocidade do carro, obtendo um vento unidirecional e sendo então possível a aquisição dos dados de potência através de um voltímetro montado assim como no circuito mostrado na figura (4.3). Com estes resultados, pode-se extrair a potência do gerador usando a fórmula:

$$P = R \cdot i^2 \quad (13)$$

onde,

$P$  = potência em watts,

$R$  = resistência em ohms, e

$i$  = corrente em amperes.



Figura 4.2 - Gerador montado na picape

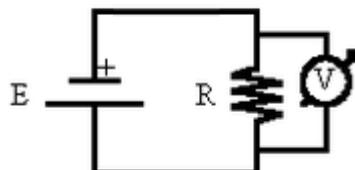


Figura 4.3 - Circuito montado para a aquisição dos dados

Para os testes simulando o vendo, ou seja, com a turbina montada sobre a picape, foi necessário construir uma nova torre. Para a construção da torre utilizou-se um tubo de 76,2 mm de diâmetro externo, onde em sua ponta soldou-se duas orelhas com um furo de 13 mm de diâmetro os quais seriam usados para fixar a nacelle junto a torre. Também foi soldadas alças na torre para a fixação da mesma no carro. Tais alças foram usadas para fixar as cordas e servir de passagem para o cabo de energia do gerador elétrico. A figura (4.4) exibe a torre para testes.

Após a fabricação da torre, a torre foi montada na picape, fixada e montou-se o esquema elétrico para a coleta de dados. As figuras (4.6) e (4.7) exibe a torre montada na picape, juntamente com o circuito elétrico montado.

Para conhecimento da velocidade instantânea, foi utilizado aparelho de GPS e o velocímetro do veículo.



Figura 4.4 - Torre para teste



Figura 4.5 – Detalhe da fixação, orelhas antes de serem soldadas



Figura 4.6 – Fixação da torre na picape utilizando cordas

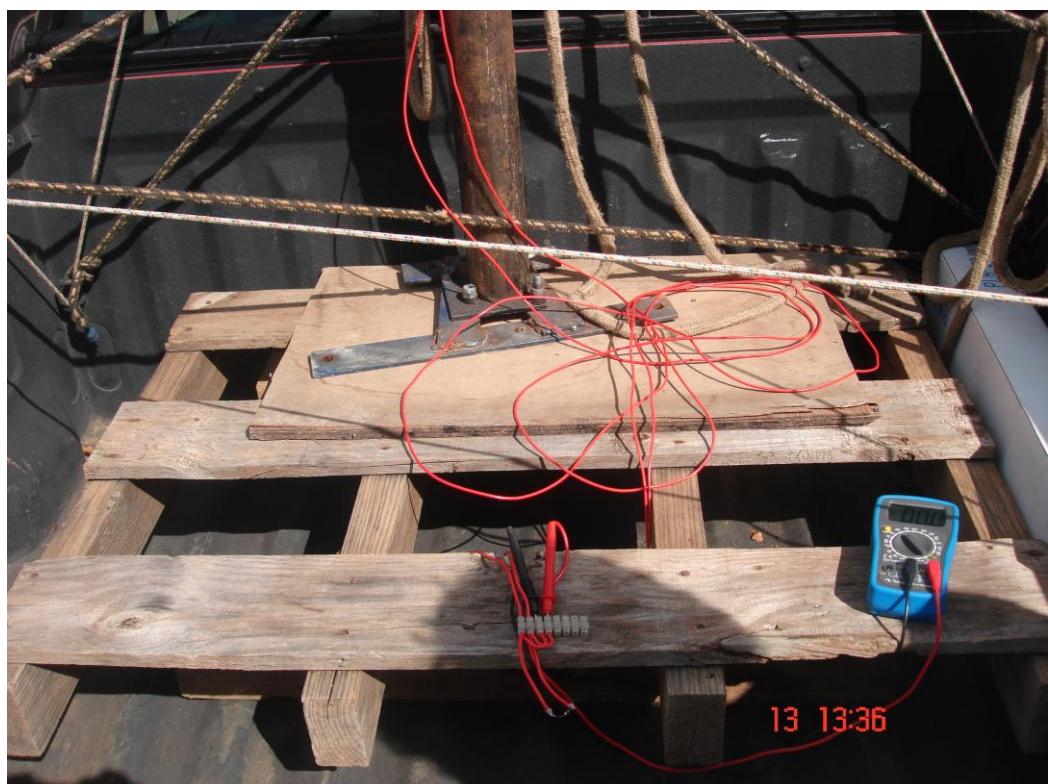


Figura 4.7 – Circuito elétrico montado no gerador

## 4.1 RESULTADOS COM PÁS EM FIBRA DE VIDRO

Resultados de potência para valores médios de tensão, e resistência R de 1,9 ohms:

Pás em Fibra de Vidro	
Velocidade do Vento (m/s)	Tensão (V)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1,41
6	1,6
7	2,4
8	18

Quadro 4.1 - Tensão gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina.

Pás em Fibra de Vidro	
Velocidade do Vento (m/s)	Potência (W)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	1
6	1,3
7	3
8	170,5

Quadro 4.2 - Potência gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina.

Do gráfico (4.1) podemos extrair que para velocidades de vento abaixo de 4 m/s o torque mínimo para que o rotor gire e comece a gerar energia não é alcançado. A partir dessa velocidade, 4 m/s, que se observa um registro de potência do gerador. Somente com velocidades do vento superiores a 7 m/s que se começa efetivamente a produzir uma potência satisfatória.

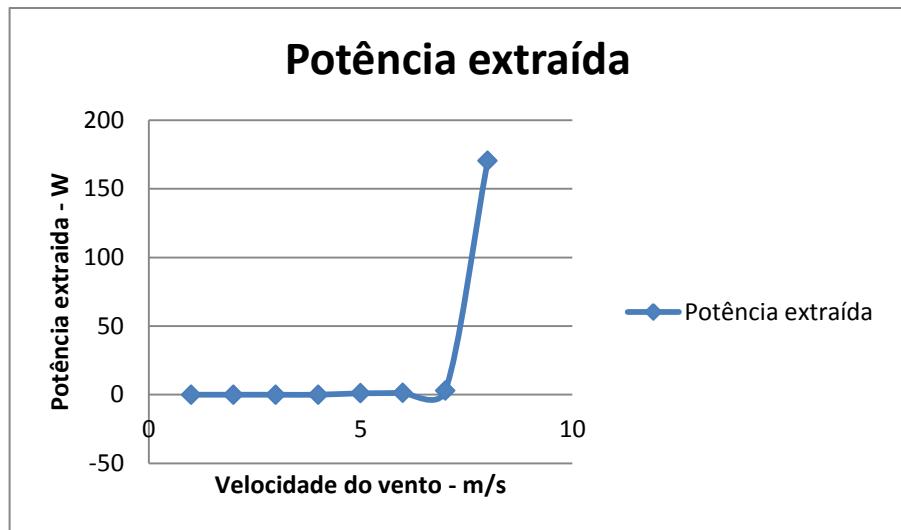


Gráfico 4.1 - Potência gerada em função da velocidade do vento para pás em fibra de vidro.

## 4.2 RESULTADOS COM PÁS EM FIBRA DE CARBONO

Resultados de potência para valores médios de tensão, e resistência R de 1,9 ohms:

Pás em Fibra de Carbono	
Velocidade do Vento (m/s)	Tensão (V)
1	0
2	0
3	0
4	10
5	17
6	18,2
7	18,9
8	19

Quadro 4.3 - Tensão gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina.

Pás em Fibra de Carbono	
Velocidade do Vento (m/s)	Potência (W)
1	0,00
2	0,00
3	0,00
4	52,63
5	152,11
6	174,34
7	188,01
8	190,00

Quadro 4.4 - Potência gerada correspondente a cada velocidade medida durante o teste da turbina.

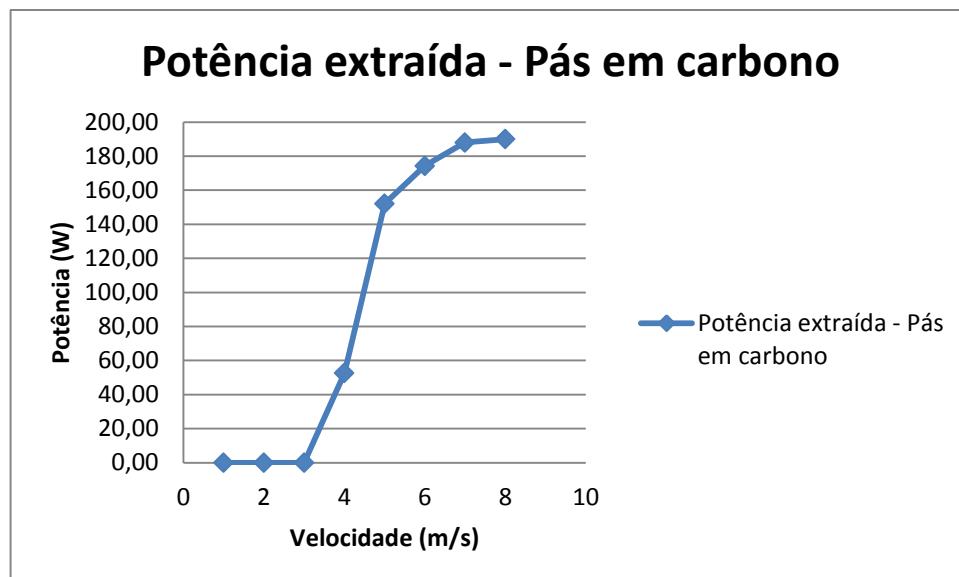


Gráfico 4.2 - Potência gerada em função da velocidade do vento para pás em fibra de carbono.

Retira-se do gráfico (4.2) que o gerador montado com pás em fibra de carbono começou a gerar energia com ventos a uma velocidade inferior ao gerador montado com fibra de vidro. O peso inferior dás pás em fibra de carbono minimiza o torque inicial do rotor, e com isso, o gerador consegue gerar energia com velocidades de vento menores.

O torque inicial alto também pode ser justificado devido aos seguintes fatores:

- Desalinhamento dos eixos.
- Caixa multiplicadora utilizada, 1:15, não foi a especificada de projeto de 1:10.

### 4.3 ANÁLISE DE CUSTO

Foi realizada uma análise de custo do aerogerador com a utilização das pás em fibra de vidro. Os valores utilizados foram cotados nas empresas dos seus respectivos segmentos de mercado. O custo das pás em fibra de vidro, considerando os materiais utilizados e mão-de-obra para fabricação ficou em torno de R\$ 400,00 o que demonstra um valor mais acessível, quando comparado com a fabricação das pás em fibra de carbono. O quadro (4.5) exibe os valores de custos dos materiais das pás em fibra de vidro.

Pode-se observar que o valor da turbina eólica tem um preço convidativo quando se comparada a outras turbinas encontradas no mercado. O valor da turbina com as pás em fibra de vidro tem um valor de R\$ 1843,23. Já se considerando uma nova caixa multiplicadora com a relação de 1:10. O que de fato é bastante atrativo.

Pode-se perceber uma queda significativa de preço da atual turbina, quando comparada com a turbina utilizando as pás em fibra de carbono. O valor do aerogerador com a utilização das pás em fibra de carbono é de R\$ 3000,00.

Análise de custo		
Fabricação das pás		
Fibra de vidro	R\$ 36.50 /Kg	R\$ 40.15
Resina poliéster	R\$ 20.00/kg	R\$ 13.08
Poliuretano	R\$ 40.00 /Kg	R\$ 40.00
Tubo de alumínio	R\$ 20.00/6m	R\$ 5.00
Mão-de-obra	R\$ 300.00	R\$ 300.00
<b>Total</b>		<b>R\$ 398.23</b>

Quadro 4.5 – Custo da fabricação das pás em fibra de vidro

Análise de custo	
Turbina eólica - UnB	
Gerador	R\$ 182.00
Pás	R\$ 398.23
Multiplicador	R\$ 563.00
Estrutura	R\$ 400.00
Outros	R\$ 300.00
<b>Total</b>	<b>R\$ 1,843.23</b>

Quadro 4.6 – Custo da turbina eólica da UnB

## 5 CONCLUSÃO

Os dados de vento do mapa eólico, apresentado neste trabalho no tópico 2.3.2, mostram ventos em Brasília para o mês de julho com velocidade média de 6 m/s. Verificou-se que os dados do tópico 2.3.2 são provenientes de uma estação meteorológica que está a 50 metros de altura, isso explica o por quê de não ter-se encontrado tal velocidade no teste realizado na torre na cobertura do SG9, que fica a 10 metros de altura. Caso fosse possível testar o gerador a uma altura próxima de 50 metros, se conseguiria um rendimento superior já que se encontraria ventos com velocidade média de 6 m/s.

Um dos principais parâmetros analisado no processo de fabricação de materiais compósitos é a fração volumétrica de fibras. Tal aspecto leva em consideração o volume de fibras, o volume da matriz polimérica e o volume de vazios. Os valores da fração volumétrica de fibras determina a resistência do compósito, e permite a comparação com os valores esperados de projeto. A escolha do método de fabricação leva em consideração aspectos como: a fração volumétrica de fibras, a produtividade, a repetibilidade e o custo.

O método adotado para a fabricação das pás do aerogerador de pequeno forte foi o processo de moldagem a vácuo. Tal método propicia, de acordo com a literatura, valores de fração volumétrica de fibras próximos de 50%. Pode-se concluir que o procedimento de fabricação das pás em fibra de vidro foi adequado. Sua comprovação é demonstrada pelos valores obtidos da fração volumétrica de fibras. De acordo com a estimativa do volume de vazios de 0%, 1%, 3% e 5%, obteve-se um valor médio global da fração volumétrica de fibras, o qual leva em consideração todos os valores da estimativa, de 46,4% de fibras no compósito final. Mas pode observar que valores superiores a 50% foram obtidos, como se observa em uma das partes da 1<sup>a</sup> pá, a qual atingiu valores de 55,9% com a estimativa de 0% de volume de vazios, e 53,1% com a estimativa de 5% de volume de vazios. A densidade média global dos laminados foi de 1,776 g/cm<sup>3</sup>. Tais dados encontrados validam o processo de fabricação.

Os testes realizados com o aerogerador demonstraram alguns pontos que merecem atenção. Foi verificado um desalinhamento de eixos, e uma fixação inadequada para o gerador elétrico. Sugere-se um novo projeto mecânico para o conjunto. Outro ponto que se mostra inadequado ao projeto é a caixa multiplicadora de velocidades que tem relação especificada de 1:15, onde o projeto inicial do aerogerador determina uma relação de velocidades angulares entre o rotor e o gerador elétrico de 1:10. Com a atual caixa multiplicadora, com relação de 1:15, um alto torque de acionamento do gerador é requerido, o que exige maiores velocidades de ventos para o início da geração de energia.

O valor máximo de potência encontrado com a utilização das pás em fibra de vidro foi de 170,5W com a velocidade do vento de 8 m/s. Já com as pás em fibra de carbono obteve-se um valor máximo de 190W a 8 m/s de velocidade de vento. Tal diferença se deve ao maior valor de massa do rotor com as pás em fibra de vidro. Somando-se as três pás tem-se um valor de 1,848 Kg. Uma alternativa seria esses valores seria utilizar as pás sem a adição de tinta como acabamento, que teria uma massa total de 1,760 Kg. Totalizando uma diferença de 0,088 kg. Aproximadamente 5% em peso. Com a utilização das pás em fibra de carbono, o peso do rotor é de 1,396 Kg, o que representa 75,5% do peso das pás em fibra de vidro.

Para a obtenção de valores mais detalhados de potência, sugere-se a realização de testes em uma estação estática, com a aquisição de dados, por períodos prolongados. Tanto dados de potência como dados de velocidade do vento instantânea. Sugere também testes em túnel de vento, onde pode-se definir detalhadamente a velocidade do vento, para se analisar o ângulo de ataque, o controle por estol e a potência gerada.

Pode-se concluir que a turbina eólica utilizando as pás em fibra de vidro torna-se uma alternativa muito atrativa quando comparada com turbina utilizando pás em fibra de carbono. O aerogerador de pequeno porte da UnB mostra-se muito competitivo com as turbinas comercializadas no mercado. A turbina tem um valor de 61% da mesma turbina utilizando pás em fibra de carbono.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABBOTT, I. H.; VON DOENHOFF, A. E.. Theory of Wind Sections, 1959
- Airfoil Investigation Database, 2009. [www.worldofkrauss.com](http://www.worldofkrauss.com)
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E.. Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 2001
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2009. [www.creesesb.cepel.br/](http://www.creesesb.cepel.br/)
- CUSTÓDIO, R.. Energia Eólica Para Produção de Energia Elétrica, Eletrobrás, 2009
- GO.natura Energia Pura, 2009. [www.gonature.com.br](http://www.gonature.com.br)
- HANSEN, M.. Aerodynamics of Wind Turbines, 2<sup>a</sup> edição, Earthscan, 2008
- PIGGOTT, H.. Windpower Workshop, Centre for Alternative Technology Publications
- WENZEL, G. M.. Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal, PUCRS, Porto Alegre, 2007
- CALLISTER, Jr., 2002, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, ed. 5, Rio de Janeiro, LTC.
- MARGOLIS, J. M., 1986, “Properties and performance requirements” in Advanced Thermoset Composite Industrial and Commercial Applications, New York, Ed.Van Nostrand Reinhold, pp. 74-107.
- GIBSON R. F., 1994, Principles of Composite Material Mechanics. 1 ed. New York, Mc Graw Hill.
- OCHOLA, R. O., MARCUS, K., NURICK, G. N., FRANZ, T., 2004, “Mechanical behavior of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates”, Composite Structures, v.63, pp. 455-467.
- KHAN M. Z. S., SIMPSON G., TOWNSEND C. R., 2002, “A comparasion of the mechanical properties in compression of two resin systems”, Materials Letters, v. 52, pp. 173-179.
- PILATO, L. A., MICHNO, M. J., 1994, Advanced Composite Materials, New York, Springer-Velag.
- D O S S I É T É C N I C O, Fabricação de peças em fibra de vidro (compósitos), Allan George A. Jaigobind, Lucia do Amaral, Sammay Jaisingh, Instituto de Tecnologia do Paraná
- LEVY NETO, FLAMÍNIO, PARDINI, LUIZ CLAUDIO, Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo, Edgar Blücher, 2006.
- MENDONÇA, PAULO DE TARSO R., Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise. Barueri, SP, Manole, 2005.

## **7 ANEXOS**

---

**Anexo I      Materiais utilizados e equipamentos      70**

---

## **Materiais Utilizados e Equipamentos**

Aqui se listam todos os materiais utilizados no processo de fabricação das pás do aerogerador.

Materiais:

- Cola plástica universal, marca ANJO;
- Cera desmoldante, marca EMBRAWAX;
- Resina poliéster instaura, modelo POLYLITE 10228-10, marca RECHHOLD;
- Catalizador MEKP, modelo MB-005, marca MAXI RUBBER;
- Fibra de vidro, gramatura de 480g/m<sup>2</sup>;
- Fita selante, marca GENERAL SEALANTS;
- Filme perfurado;
- Plástico;
- Espuma de poliuretano compostos A e B, marca VI FIBERGLASS;
- Tinta spray uso geral preto fosco, marca COLORGIN;
- Tinta spray uso geral branco, marca SUVINIL;
- Parafuso M5 0,8x30 mm, marca CISER;
- Parafuso M12 1,25x25mm, marca CISER;
- Porca ¾”, marca CISER;
- Porca M5, marca CISER;
- Arruela ¾”, marca NCS;
- Barra rosqueada ¾” x 1000mm, marca CISER;
- Conector barra sindal cabo de mm, marca INTERNEED;
- Cabo flexível 1,5mm, marca NAMBEI.

Equipamentos:

- Balança de precisão, modelo PLURIS-6/15, marca FILIZOLA;
- Bomba de vácuo, modelo AJ 100.6/AR-60, marca PASEM;
- Manômetro de pressão, marca PASEM (mm-hg);
- Pincel, marca TIGRE;
- Reservatório plástico

- Centro de usinagem, modelo FV-1000, marca FREELER;
- Furadeira, modelo DW508S, marca DEWALT;
- Maquina de solda, modelo MIG VI-250, marca WHITE MARTINS;
- MAQUINA DE SOLDA, modelo HELIARC 355, marca ESAB;
- Multímetro, modelo ET1110 DMM, marca MIMIPA;
- Lixadeira, modelo não identificado, Black & Decker;
- Chaves de fenda, chaves de boca de diversos tamanhos, alicates de pressão e de corte;
- Brocas de diversos tamanhos.