

# Treinamento Básico

## Controle de Turbina Eólica

Eng. Ronaldo Silva

**RJS Engenharia & Consultoria**

Jun/2016 – Ver. 0.1

# Índice

1. Objetivo
2. Turbinas por Arranjo
3. Tipos de Instalação
4. Tipos de Turbinas
5. Partes Principais, Rendimento e Vida Útil
6. Potencial Eólico e Densidade Típica do Vento de Viabilidade
7. Normas mais comuns
8. Características dos Controles
9. Parâmetros de Controle mais comuns
10. Curvas & Função Transferência (GS)
11. Referências de Consulta
12. Outras Informações

## 1. Objetivo

O propósito desse treinamento é apresentar aos usuários as características principais das turbinas eólicas e discorrer sobre as formas e estratégias de controles mais comuns, que possam contribuir para o aperfeiçoamento dos profissionais do setor, o bom funcionamento dos equipamentos e garantir maior produtividade ininterrupta nos parques eólicos, tendo em vista o crescimento acelerado da geração eólica nos últimos anos no Brasil.

## 2. Turbinas por Arranjo

Esse tópico visa apresentar os 2 tipos de arranjos mais comuns das turbinas eólicas instaladas no Brasil e comentar um pouco sobre cada um deles.

### a) Gerador acionado diretamente pelo eixo da turbina ( Figura 1 )

Comentário: Esse tipo de arranjo possui a vantagem de não empregar multiplicador de engrenagens no acoplamento entre a turbina e o gerador. Porém, em virtude disso, o gerador tende a ser um pouco maior ( tamanho físico ), ocupando um espaço maior na dentro da Nacele da turbina. A Wobben utiliza bastante este arranjo.

## 2. Turbinas por Arranjo ( continuação )

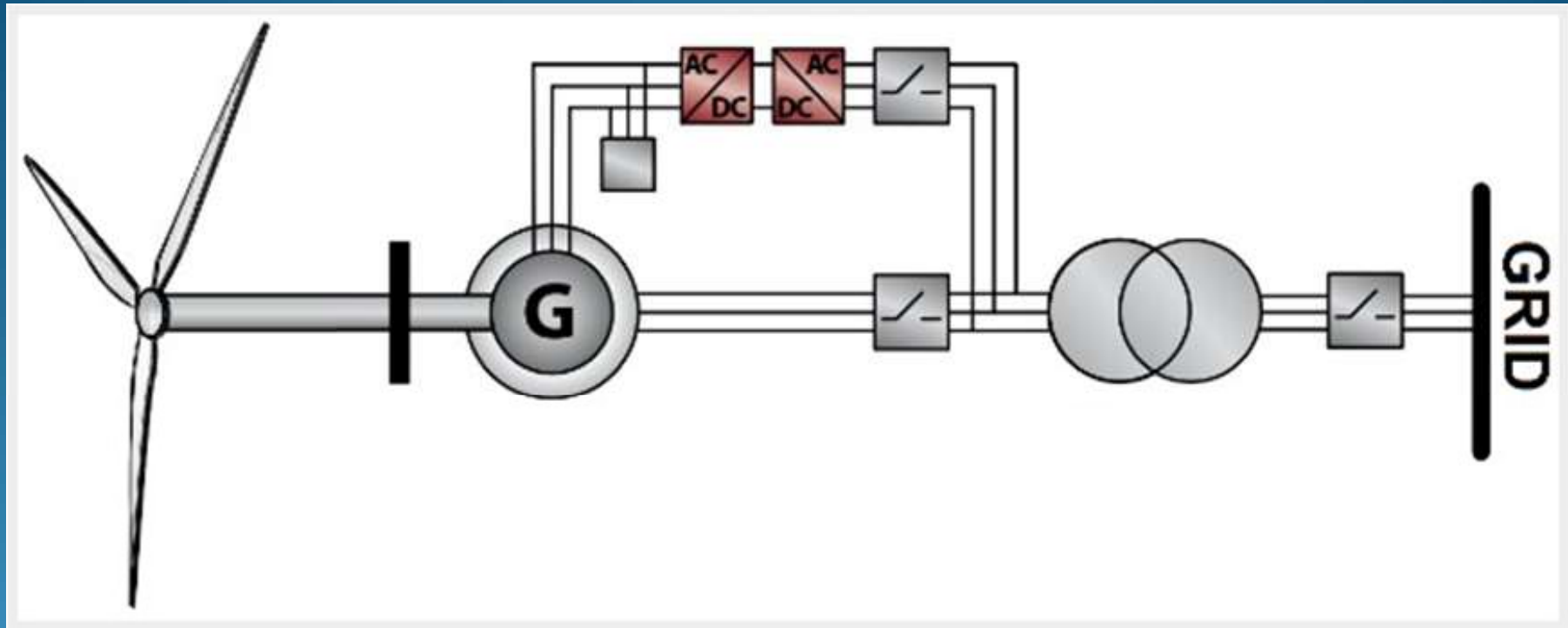


Figura 1 – Turbina Eólica – Gerador acionado diretamente pelo eixo da turbina

## 2. Turbinas por Arranjo ( continuação )

- b) Gerador acionado pelo eixo da turbina , com emprego de multiplicador ( Figura 2 )

Comentário: Esse tipo de arranjo possui a vantagem de empregar geradores com rotações mais altas, reduzindo seu tamanho físico e também a quantidade de pólos. O contra-tempo no caso é o próprio multiplicador de engrenagens no acoplamento entre a turbina e o gerador, que demanda manutenção periódica e implica em alguma perda de eficiência do conjunto. A General Electric utiliza bastante este arranjo.

## 2. Turbinas por Arranjo ( continuação )

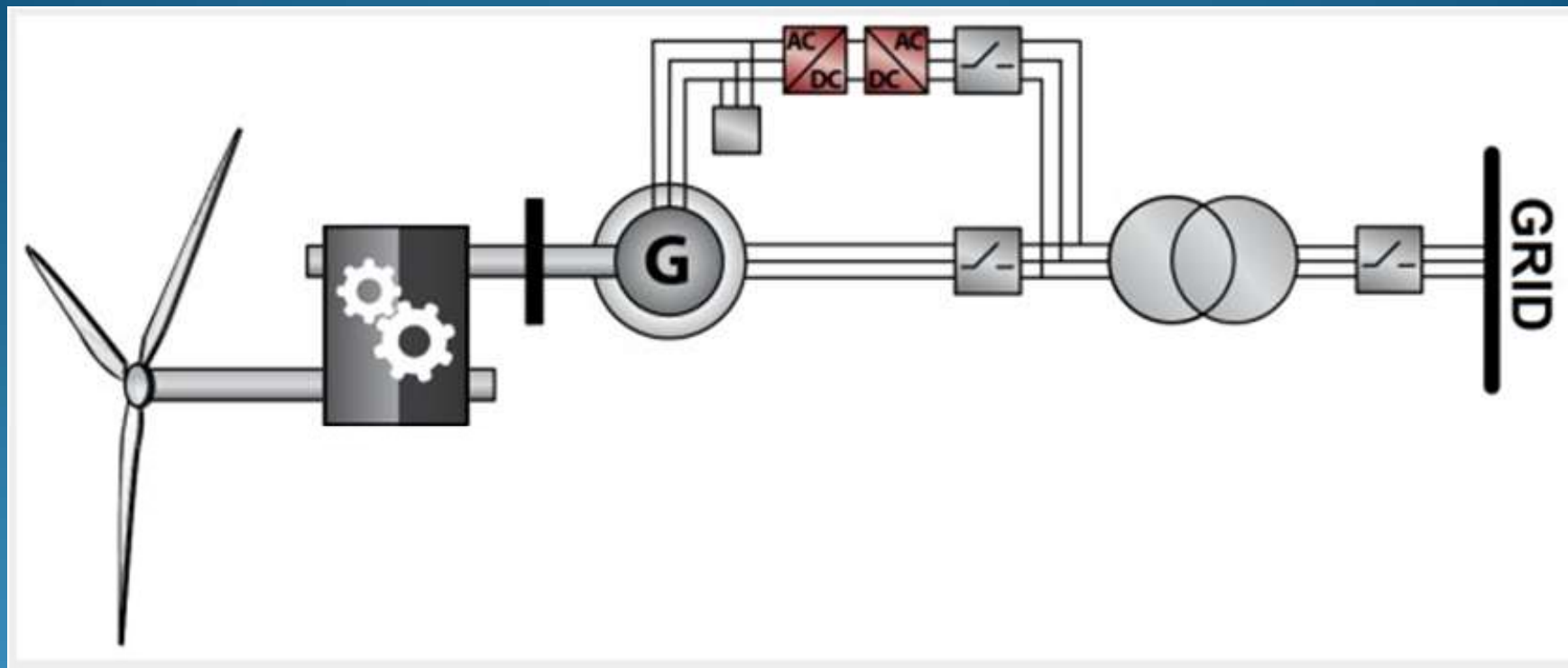


Figura 2 – Turbina Eólica – Gerador acionado pelo eixo da turbina via multiplicador de engrenagens

### 3. Tipos de Instalação

Existem 2 tipos de instalação das turbinas eólicas, que são denominadas conforme a seguir:

a) On-Shore – Turbinas instaladas em terra, no continente ( Figura 3 )

PS: No Brasil predominam as instalações On-Shore ( em terra ).



### 3. Tipos de Instalação ( continuação )



Figura 3 – Parque Eólico em terra – Instalação On-Shore – Situação majoritária no Brasil

### 3. Tipos de Instalação ( continuação )

b) Off-Shore – Turbinas instaladas no mar, fora do continente ( Figura 4 )

PS: Na Europa por exemplo, é comum a ocorrência de parques eólicos em alto-mar – Instalação Off-Shore.

### 3. Tipos de Instalação ( continuação )



Figura 4 – Parque Eólico em alto-mar - Instalação Off-Shore – Situação comum na Europa

## 4. Tipos de Turbinas

Existem 2 tipos de turbina eólicas, conforme descrito abaixo:

a) Turbina de Rotação Fixa

b) Turbina de Rotação Variável ( pás da hélice com ângulos ajustáveis )

PS: Atualmente no Brasil, a ocorrência mais comum é de turbinas de rotação variável.

## 5. Partes Principais Turbina Eólica, Rendimento e Vida Útil

No slide a seguir veremos as partes principais de uma turbina eólica.

O acesso à uma turbina eólica dá-se da seguinte forma:

- a) Pela torre, através de escada e/ou elevador
- b) Por via aérea, com uso de helicóptero, descendo em cima da Nacele ( situação mais comum em instalações Off-Shore )
- c) Por lancha ou catamarã, em instalações Off-Shore

## 5. Partes Principais Turbina Eólica, Rendimento e Vida Útil ( continuação )

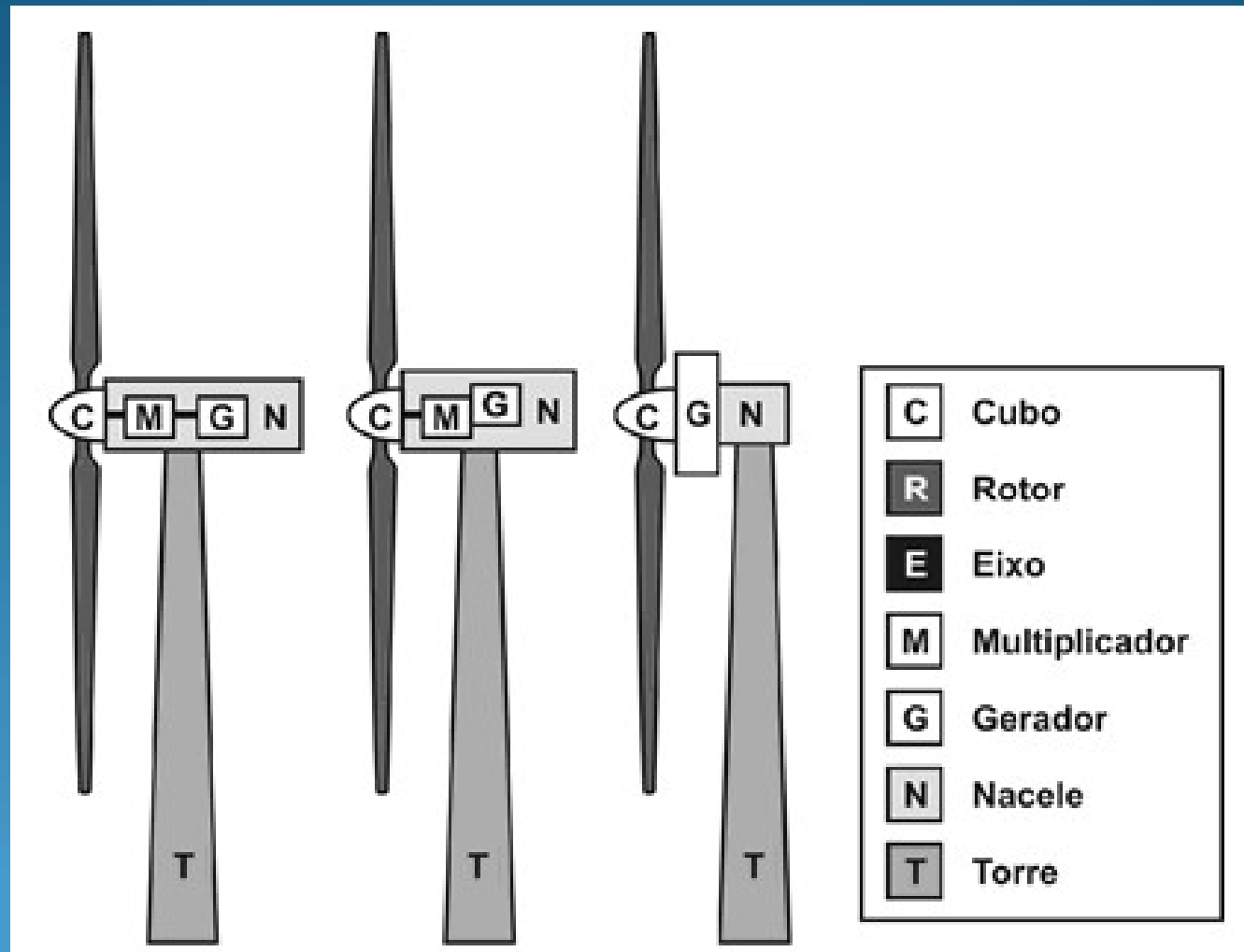


Figura 5 – Partes Principais de uma Turbina Eólica - Externo

## 5. Partes Principais Turbina Eólica, Rendimento e Vida Útil ( continuação )

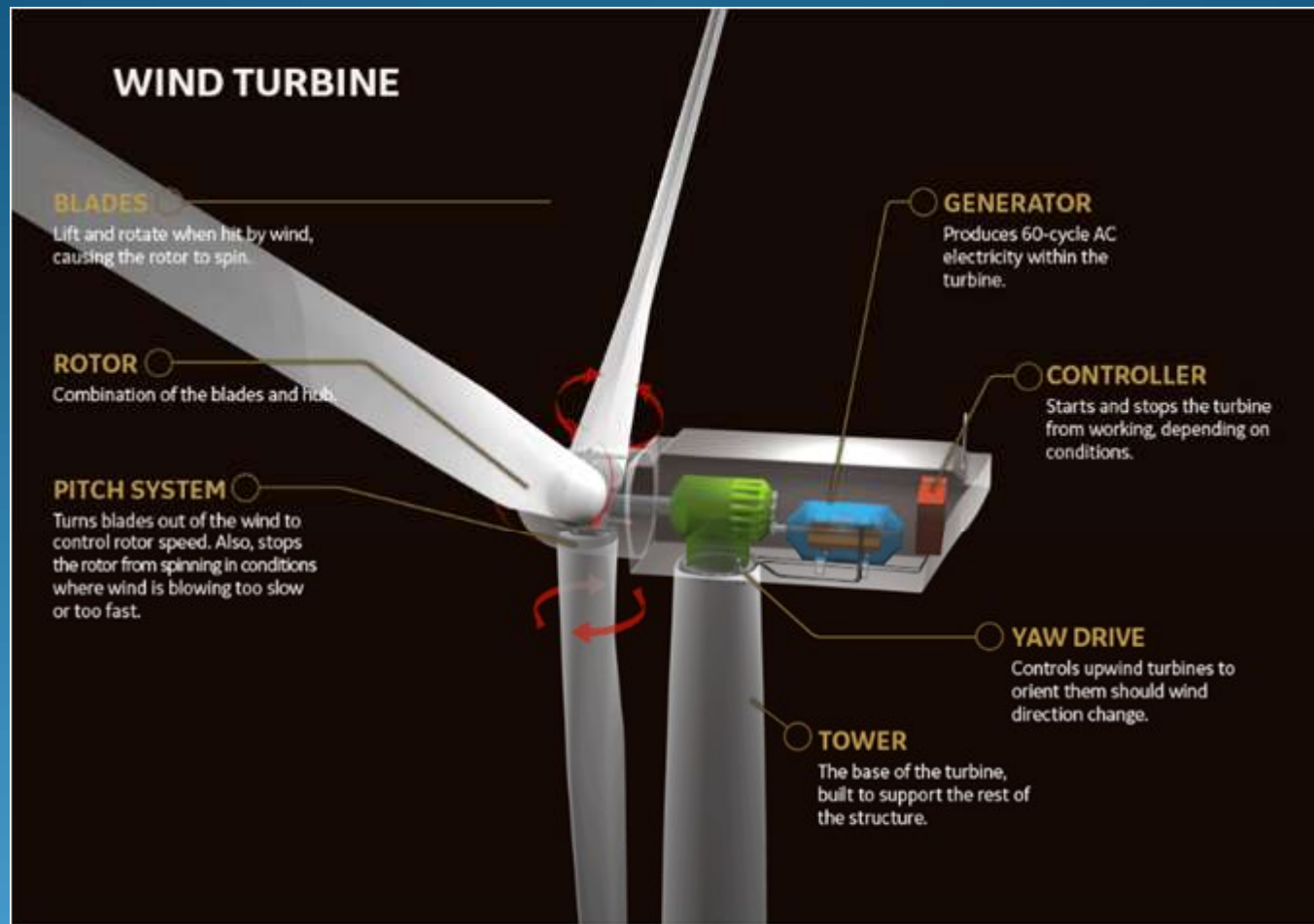


Figura 5 – Partes Principais de uma Turbina Eólica – Externo (continuação)

DICA: Clique ou copie o link abaixo em seu navegador para ver a imagem acima em modo “animado”.

[https://www.gerenewableenergy.com/content/dam/gepower-renewables/global/en\\_US/images/body-images/onshore-wind/GE-turbine.gif](https://www.gerenewableenergy.com/content/dam/gepower-renewables/global/en_US/images/body-images/onshore-wind/GE-turbine.gif)

## 5. Partes Principais Turbina Eólica, Rendimento, Vida Útil ( continuação )

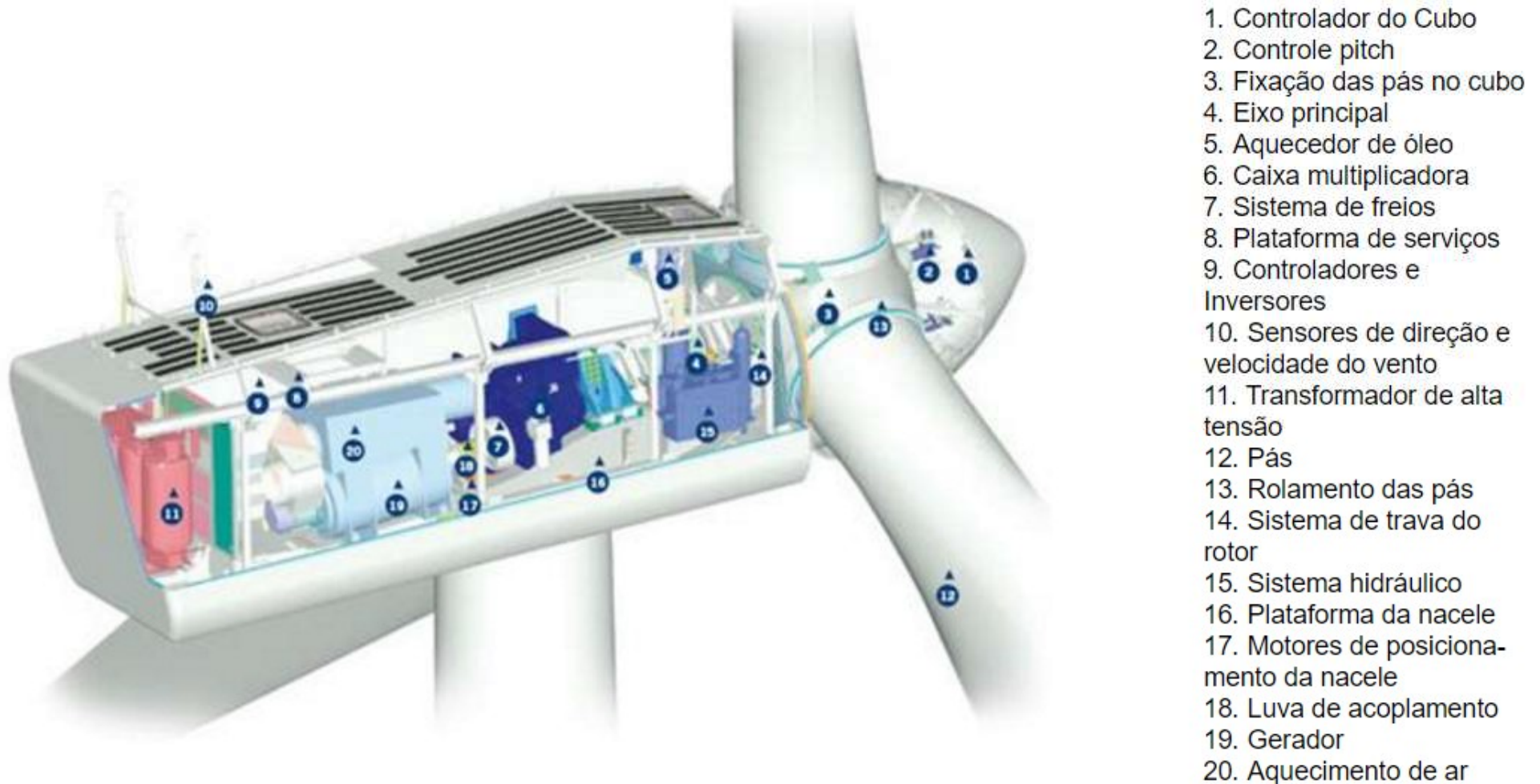


Figura 6 – Partes Principais de uma Turbina Eólica – Interior da Nacela



## 5. Partes Principais Turbina Eólica, Rendimento e Vida Útil

O rendimento típico e vida útil de uma turbina eólica seguem as referências abaixo:

- a) Rendimento Médio: 30% com variações para mais ou para menos
- b) Vida Útil: 20 anos

## 6. Potencial Eólico e Densidade Típica do Vento

Nos slides a seguir, um resumo do potencial eólico nacional, chamado por alguns profissionais do setor de “inventário de ventos”.

Como poderá ser observado, as regiões Nordeste e Sul possuem grande potencial de geração eólica e são justamente estas regiões que concentram a grande totalidade dos parques eólicos.

A região Sudeste também possui bom potencial, ainda inexplorado.

a) Densidade Típica do Vento para viabilidade de geração eólica:

$$\rho_{ar}=1,225 \text{ kg/m}^3$$

## 6. Potencial Eólico e Densidade Típica do Vento ( continuação )

### b) Potencial

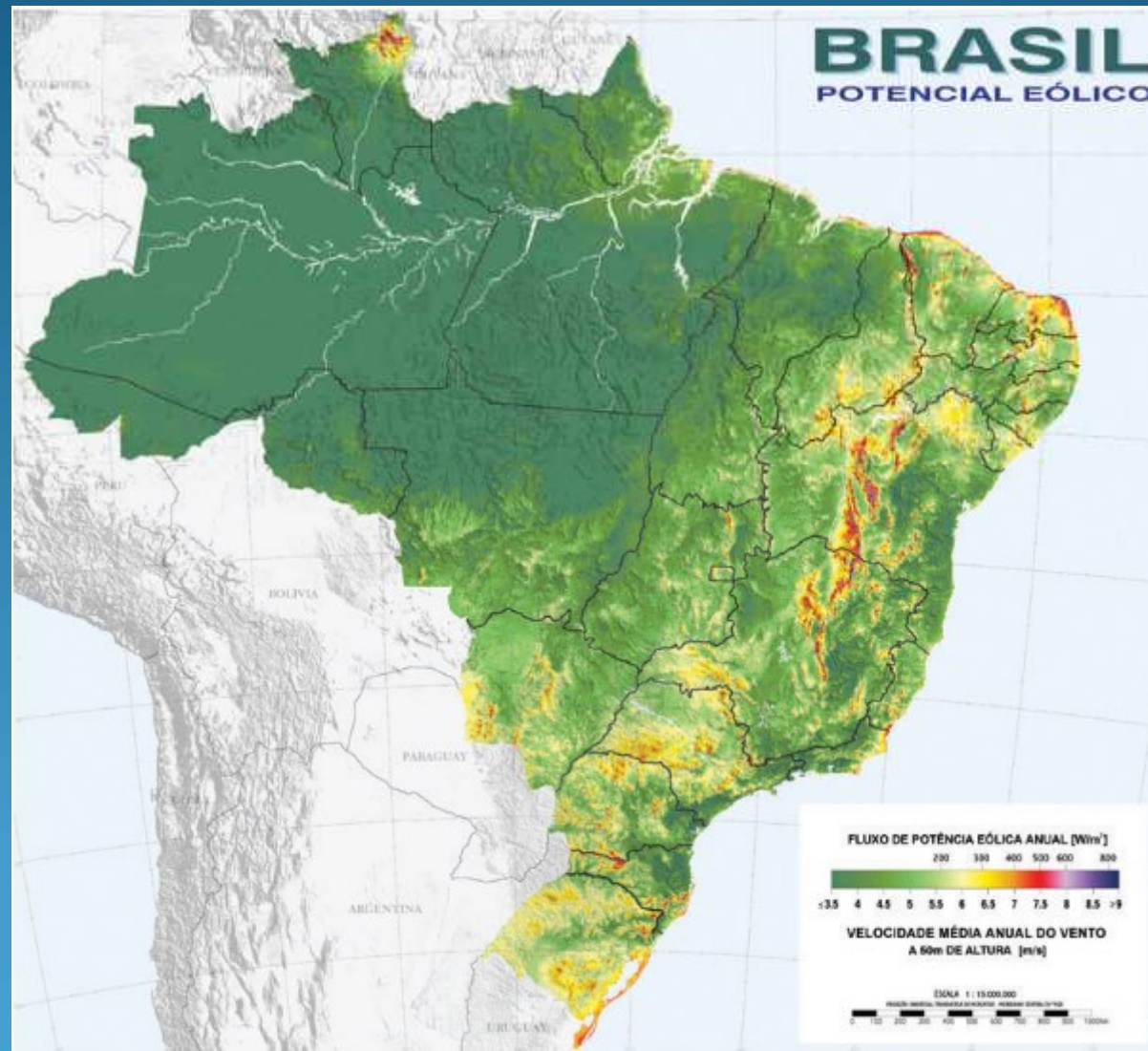


Figura 7 – Potencial Eólico Brasil – Velocidade Média do Vento à 50 mts de Altura em m/s

## 6. Potencial Eólico e Densidade Típica do Vento ( continuação )

### b) Potencial ( cont. )







REGIÃO	INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADES					INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
	VENTO [m/s]	ÁREA [km <sup>2</sup> ]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]	VENTO [m/s]	ÁREA (CUMULATIVA) [km <sup>2</sup> ]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [GW]	ENERGIA ANUAL [TWh/ano]
	6 - 6,5	11460	22,92	0,13	25,58	>6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	>6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,60	0,20	11,33	> 7 m/s	6420	12,84	26,45
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	>7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,30	4,65	>8	1454	2,91	7,96
	>8,5	551	1,10	0,35	3,31	>8,5	551	1,10	3,31
	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	>6	245105	490,21	649,50
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	>6,5	98516	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,20	83,73	> 7 m/s	37526	75,05	144,29
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	>7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3068	6,18	0,30	15,91	>8	3958	7,92	21,13
	>8,5	870	1,74	0,35	5,23	>8,5	870	1,74	5,23
	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	>6	50752	101,50	120,83
	6,5 - 7	8101	16,20	0,17	23,65	>6,5	9642	19,26	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,20	4,79	> 7 m/s	1541	3,08	5,42
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,60	>7,5	146	0,29	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,30	0,03	>8	6	0,01	0,03
	>8,5	0	0,00	0,35	0,00	>8,5	0	0,00	0,00
	6 - 6,5	114688	229,38	0,13	255,99	>6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,60	0,17	135,15	>6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,20	39,64	> 7 m/s	14869	29,74	54,93
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	>7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,30	3,06	>8	891	1,78	4,84
	>8,5	297	0,59	0,35	1,78	>8,5	297	0,59	1,78
	6 - 6,5	121798	243,60	0,13	271,86	>6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	>6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,20	32,40	> 7 m/s	11379	22,76	41,11
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	>7,5	1943	3,89	8,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,30	1,61	>8	370	0,74	1,95
	>8,5	57	0,11	0,35	0,34	>8,5	57	0,11	0,34
	<b>TOTAL BRASIL ESTIMADO</b>					>6	667391	1334,78	1711,62
						>6,5	231746	463,49	739,24
						> 7 m/s	71735	143,47	272,20
						>7,5	21676	43,35	100,30
						>8	6679	13,36	35,93
						>8,5	1775	3,55	10,67

Figura 8 – Potencial Eólico Brasil por Regiões

## 7. Normas mais comuns

Abaixo, uma relação-resumo das normas mais comuns para trabalho, operação, controle e projeto em turbinas eólicas:

### a) Quanto à segurança

- NR-10 – Trabalho em Sistemas e Instalações de Eletricidade
- NR-33 – Trabalho em Ambientes Confinados
- NR-35 – Trabalho em Altura

## 7. Normas mais comuns ( continuação )

### b) Quanto ao Controle e Projeto

- IEC-61131 – Linguagens de Programação de Controladores Digitais ( Conversor Eólico AC/DC )
- IEC-61400 – Requisitos para projeto e desenvolvimento de turbinas eólicas e seus componentes

## 8. Características dos Controladores

Um Controlador Digital de Turbina Eólica na verdade é um Conversor AC/DC, dispositivo eletrônico de potência que converte tensão alternada em contínua ( e vice-versa ), dotado de uma CPU integrada de onde são parametrizados as dinâmicas de controle.

Ele lembra em certa medida os famosos inversores de frequência de motores elétricos e também reguladores de tensão de geradores.

## 8. Características dos Controladores

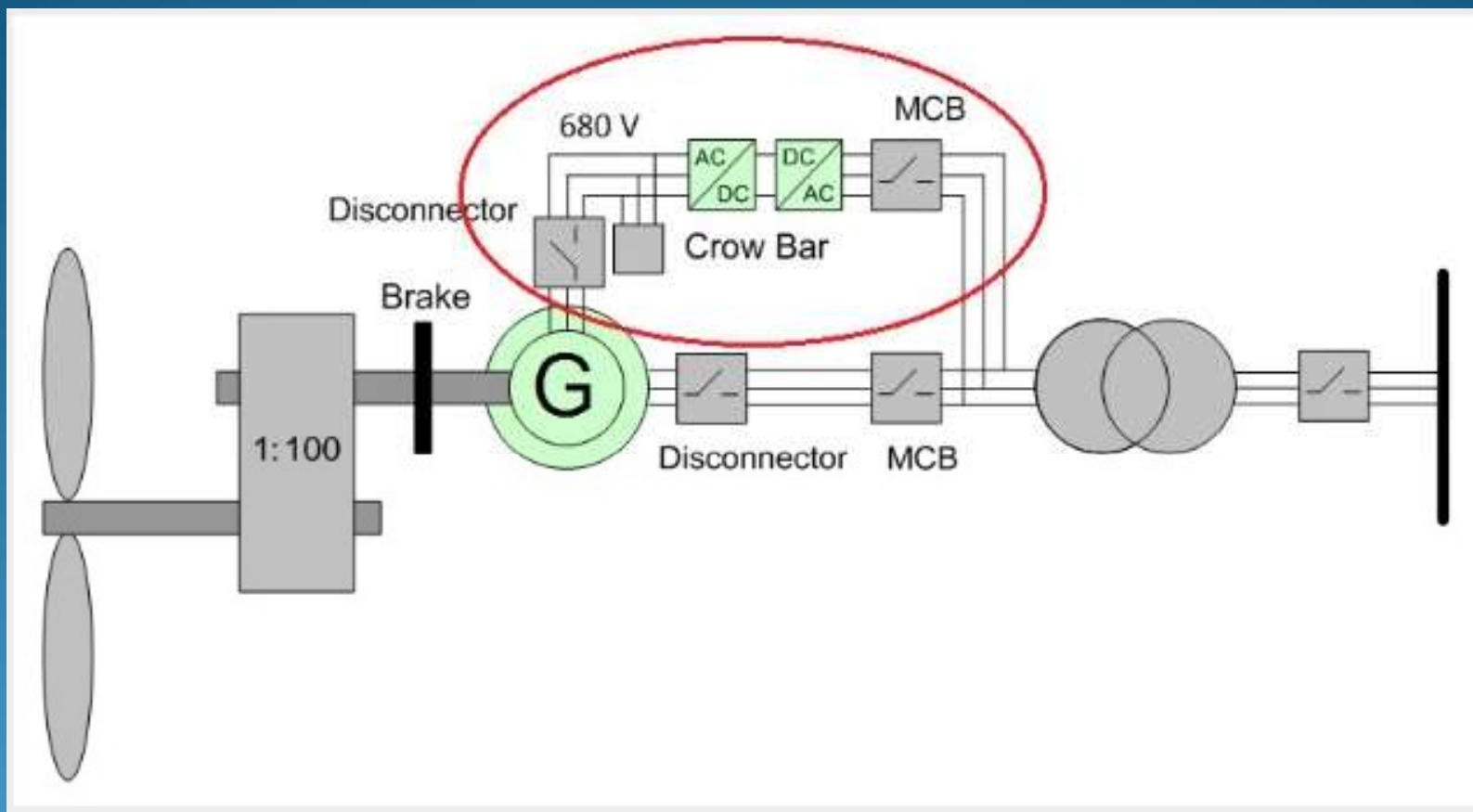


Figura 9 – Arranjo Simplificado do Conversor Eólico AC/DC conectado ao gerador



## 8. Características dos Controladores ( continuação )

Como ele controla energia cinética variável ( velocidade e força inconstante do vento ) absorvida pela hélice da turbina, as compensações são realizadas através das estratégias de controle programadas na CPU.

As compensações dessa inconstância da fonte de energia primária ( vento ) sentidas no eixo da turbina são realizadas através do ajuste da polaridade e modulação das amplitudes dos sinais de tensão/frequencia, ajuste dos angulos das pás ( pitch control ), incremento / decremento de velocidade angular ( rad/s ) através do ajuste de posição do rotor móvel do gerador, controle da frequência de rotação ( Hz ), etc.

## 8. Características dos Controladores ( continuação )

Ele é conectado ao gerador através de um TP/TC e atua no sistema de modo a permitir o sincronismo do gerador com a rede ( GRID ), respeitando os requisitos previstos no sub-módulo 3.6 do ONS ( conexão a rede básica ).

Pela norma IEC-61131, o controle de uma turbina eólica é enquadrado como “processo”.

Os modos de controle mais comuns, passíveis de programação na maioria dos conversores eólicos de mercado são:

## 8. Características dos Controladores ( continuação )

- a) Controle de Passo ( Pitch Control ) – Consiste no ajuste automático do ângulo das pás quando o Set-Point de potência programado no controlador ( conversor ) encontra-se fora do ponto desejado. Isso ocorre justamente pela variação da velocidade do vento ( acima ou abaixo da velocidade nominal de operação ) que colide com a hélice da turbina. Este controle também ajuda a manter a frequência ( Hertz ) constante e também é empregado na ocasião do sincronismo.

## 8. Características dos Controladores ( continuação )

- b) Controle de Estol “Ativo” – Consiste num controle de passo mais discreto, que visa preservar a potência, através de ajustes sutis, quando da mudança das características do vento, como exemplo, um vento muito acima ou abaixo da velocidade nominal ou um vento vertical-diagonal ao eixo da turbina, criando um “descolamento” do vento em relação a superfície da hélice, com perda de sustentação e aumento das forças de arrasto, que prejudicam a potência absorvida no eixo e consequentemente a produção energética.

## 8. Características dos Controladores ( continuação )



Figura 10 – Exemplo de Conversor Eólico dedicado de mercado

## 8. Características dos Controladores ( continuação )

- c) Controle de Velocidade ( rad/s ) – Consiste num controle de incremento e/ou decremento da velocidade periférica ( angular ) da hélice, através do ajuste da posição do rotor variável do gerador ( soma e/ou subtração de velocidades angulares ). Este tipo de rotor, diferentemente das aplicações convencionais que empregam geradores com rotor fixo é comum em aero-geradores. Este tipo de controle é bastante utilizado em regime de cargas à vazio,ilhado e também na ocasião do sincronismo do gerador a rede.

## 8. Características dos Controladores ( continuação )

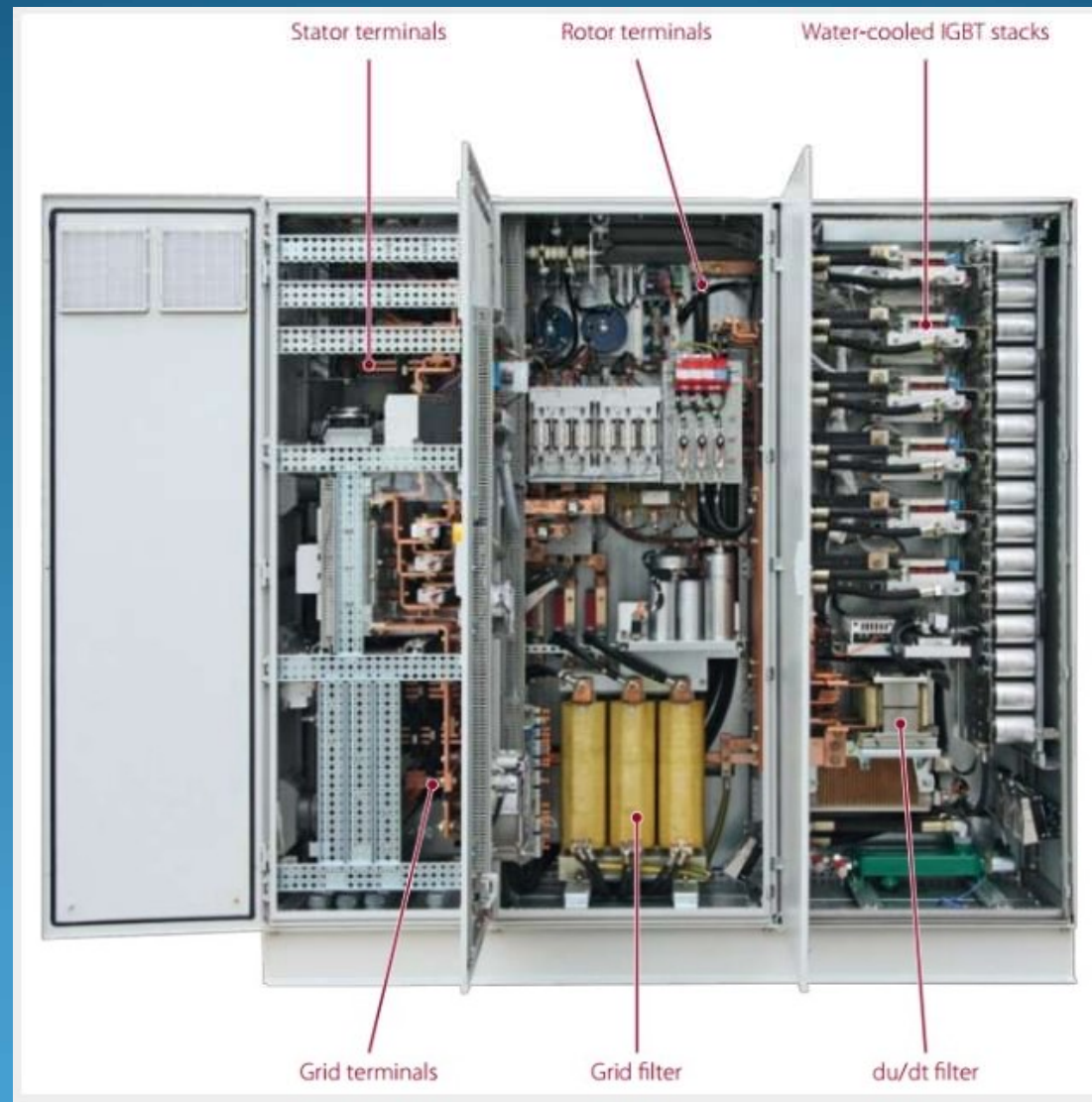


Figura 11 – Exemplo de Gabinete Completo de Conversor Eólico, incluindo Trafo e IGBT's

## 8. Características dos Controladores ( continuação )

Além dos modos de controle anteriormente mencionados, o Conversor Eólico também desempenha outras estratégias de controle importantes para a boa operação em paralelo com a rede, estratégias estas também com finalidades colaborativas e protetivas para com a rede, tais como:

- a) Compensação de Potência Reativa ( Var )
- b) Compensação por Falta Assimétrica de Potência
- c) Controle de Yaw
- d) Controle e Proteção em regime de tempestade ( storm protection )
- e) Controle de Torque/Frenagem
- f) Etc



## 9. Parâmetros de Controle mais comuns

Abaixo um resumo dos parâmetros de controle mais comuns, ajustáveis na maioria dos conversores eólicos do mercado.

Alguns conversores poderão ter todos ou parte destes parâmetros, isso varia de fabricante para fabricante, de igual forma os termos, nomenclaturas e unidades empregadas aos parâmetros poderão ser diferentes.

Uma parametrização criteriosa das dinâmicas de controle é fundamental para se alcançar o máximo rendimento possível da aplicação, garantindo assim uma produção energética ininterrupta e sem sobressaltos.

## 9. Parâmetros de Controle mais comuns ( continuação )

- a) Parâmetros de Controle PID Off-line - operação à vazio – desconectado da rede
- b) Parâmetros de Controle PID On-line Paralelo - operação com carga – conectado à rede
- c) Parâmetros de Controle PID On-line Ilhado – alimentação de carga radial
- d) Rotação Nominal da Turbina – em RPM ou Rad/Seg ( ou ainda, PU )
- e) Potência Nominal do Gerador – Em Kw ou PU
- f) Rampa de Carga – Em Seg ou Kw/Seg
- g) Relação de Transmissão ( Gear Box ) – Ex. 1:100 ou 1:1 ( sem Gear Box )
- h) Parâmetros de leitura de rotação no eixo ( Tacogerador; Encoder; Roda de Pólos) – unidade à definir dependendo do instrumento ou PU

## 9. Parâmetros de Controle mais comuns ( continuação )

- i) Proteção por Sub ou Sobre-Velocidade (TRIP) – Em RPM ou Rad/Seg
- j) Proteção por sobre-temperatura dos IGBT's e Trafo de Potência – Em °C
- k) Ajuste das Correntes mín e máx de campo/excitação – Em Ampére ou PU
- l) Ajuste das Tensões mín e máx de campo/excitação – Em Volt ou PU
- m) Rampa de Desaceleração – Em Seg ou Kw/Seg
- n) Proteção contra potência-reversa ( “motorização” ) – Em %
- o) Parâmetros de Controle de Passo ( Pitch Control Curve )
- p) Parâmetros de Controle de Torque/Frenagem – Em Nm
- q) Relação de TP/TC de entrada do conversor – Ex. 1:5

## 9. Parâmetros de Controle mais comuns ( continuação )

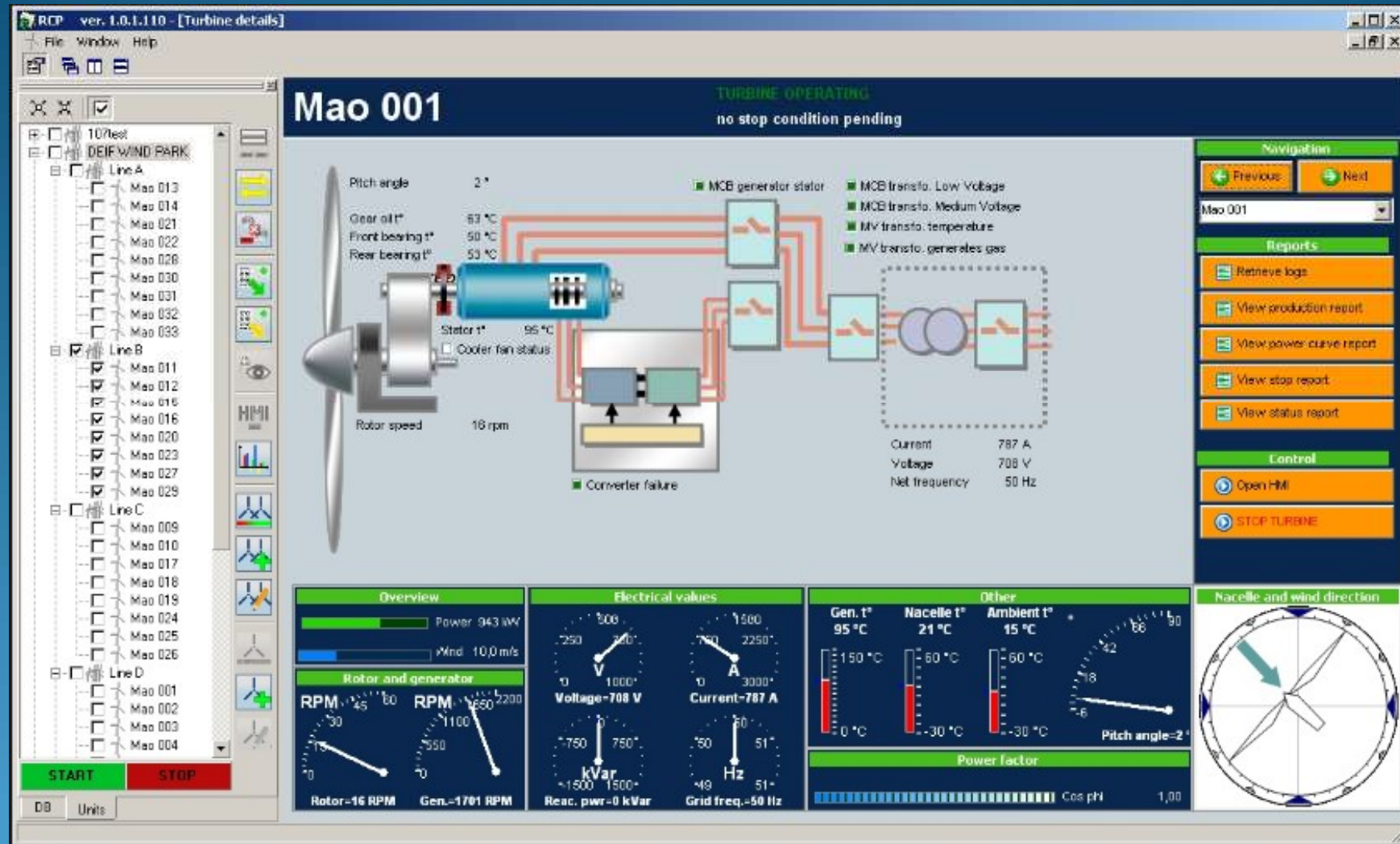


Figura 12– Aspecto de um software de controle e monitoração conversor eólico

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS )

Existem 2 tipos de curvas típicas de potência para conversores eólicos, conforme descrito abaixo:

- a) Curva de Potência x Velocidade do Vento - m/s ( em alguns casos, Km/h )
- b) Curva de Potência x Rotação da Turbina - em RPM ou Rad/Seg

A maioria dos conversores de mercado aceitam em sua programação a escolha do tipo de curva, ficando a critério do programador / aplicação a mais adequada em cada caso.

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - continuação

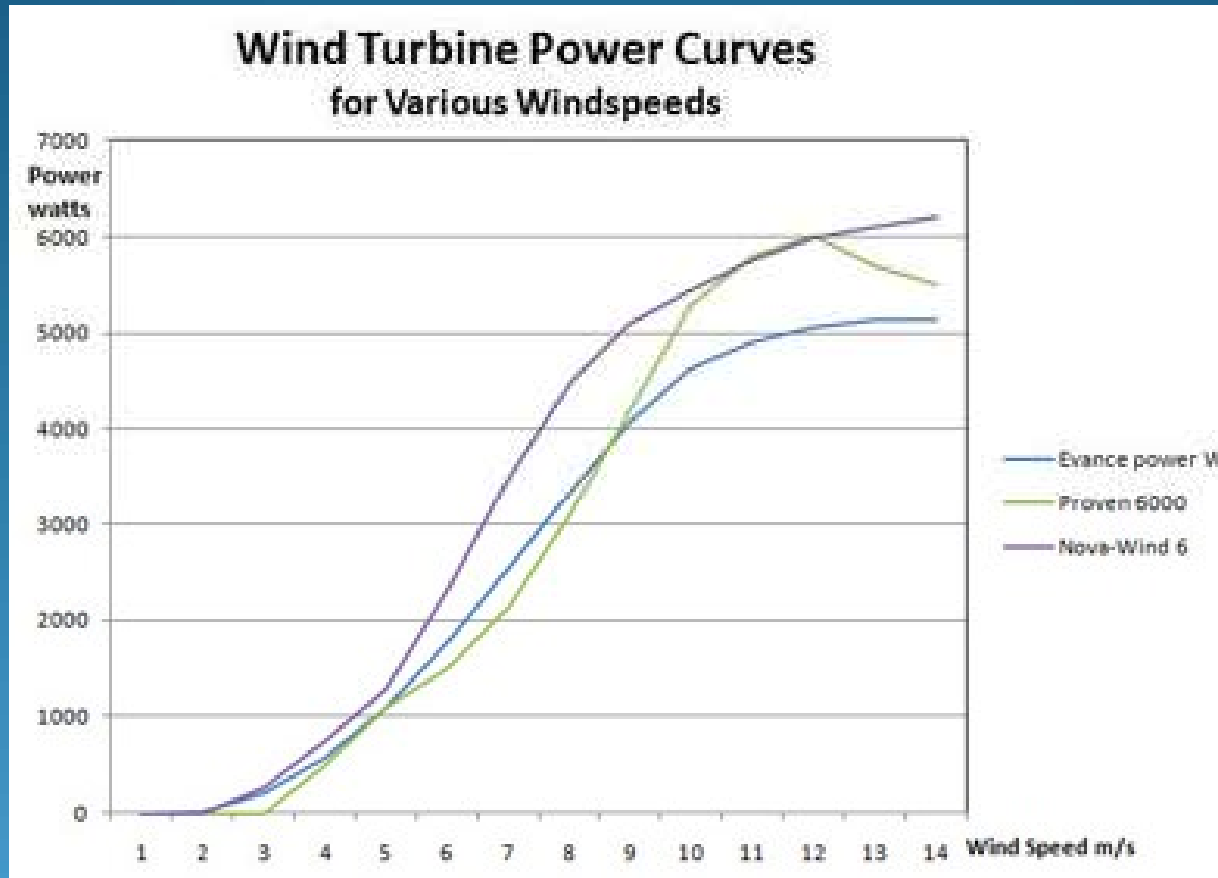


Figura 13– Curva Típica de Potência *versus* Velocidade do Vento ( em m/s ou Km/h )

Nota: A velocidade do vento é sempre aquela considerada na altura do cubo da hélice.

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - continuação

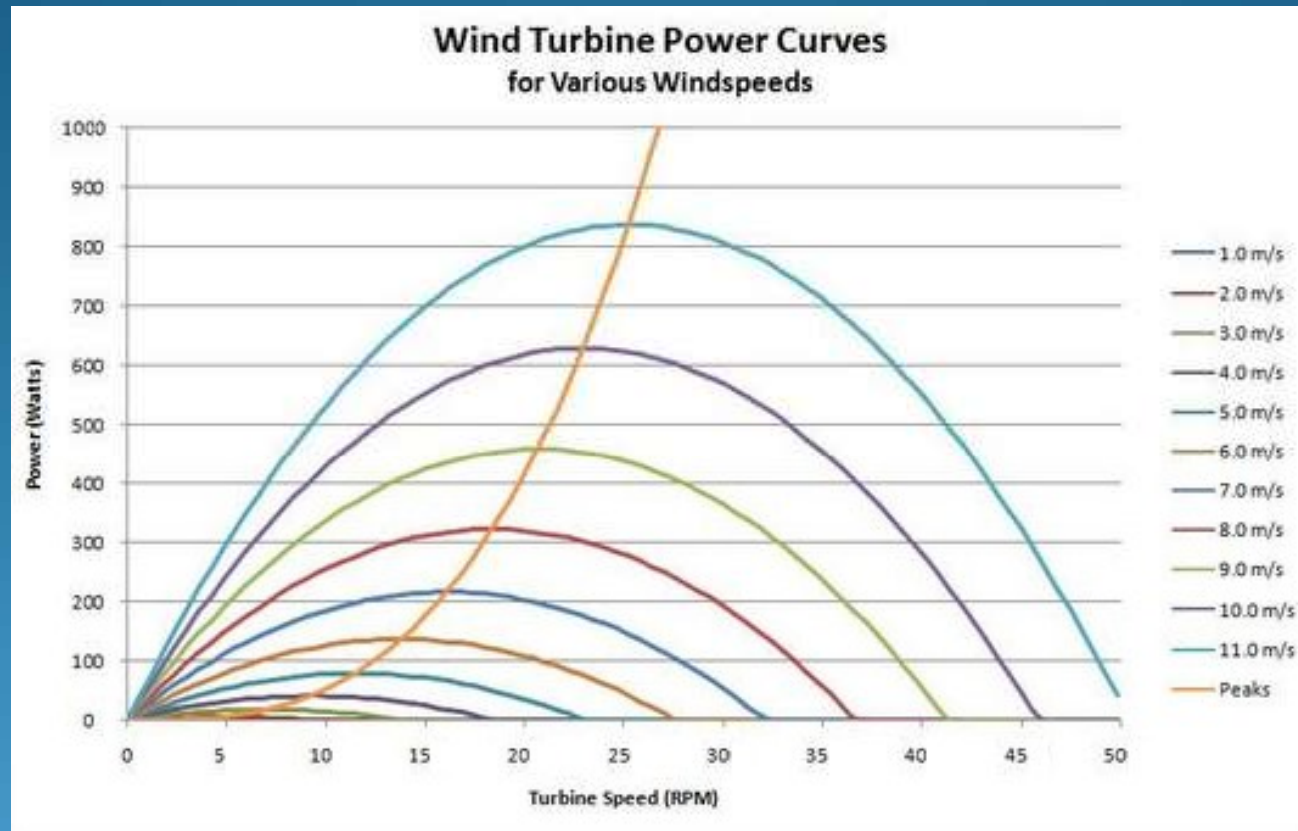


Figura 14– Curva Típica de Potência *versus* Rotação da Turbina ( em RPM ou Rad/Seg )

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - Continuação

A seguir, veremos exemplos das funções de transferência (GS) comuns aos conversores e aero-geradores de mercado. Todas as funções de transferência aqui apresentadas estão no formato **IEEE**, sendo passíveis de simulação em softwares com bibliotecas que aceitem os padrões desta norma ( basta consultar o TAG da função de transferência antes da simulação na biblioteca **IEEE** do software a ser utilizado, injetando degraus de carga a partir de 5% na entrada do GS por exemplo ).

Existem inúmeras funções de transferências relacionadas ao assunto, como exemplo modelos para as funções de excitação, relacionados ao torque, etc. Aqui daremos ênfase apenas aos modelos associados a turbina e ao controle.



# 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - Continuação

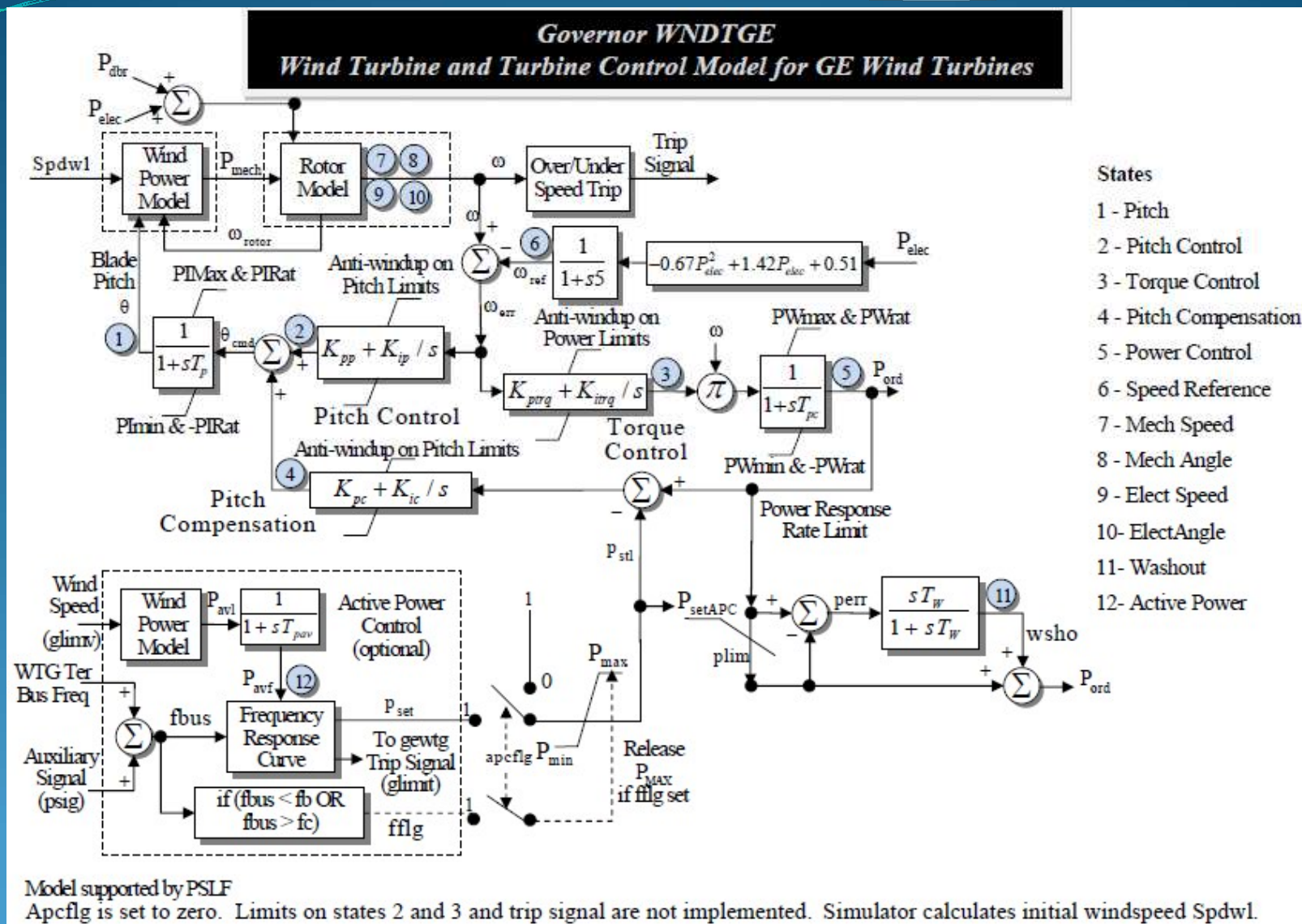


Figura 15– Função de Transferência Turbina & Controlador

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - Continuação

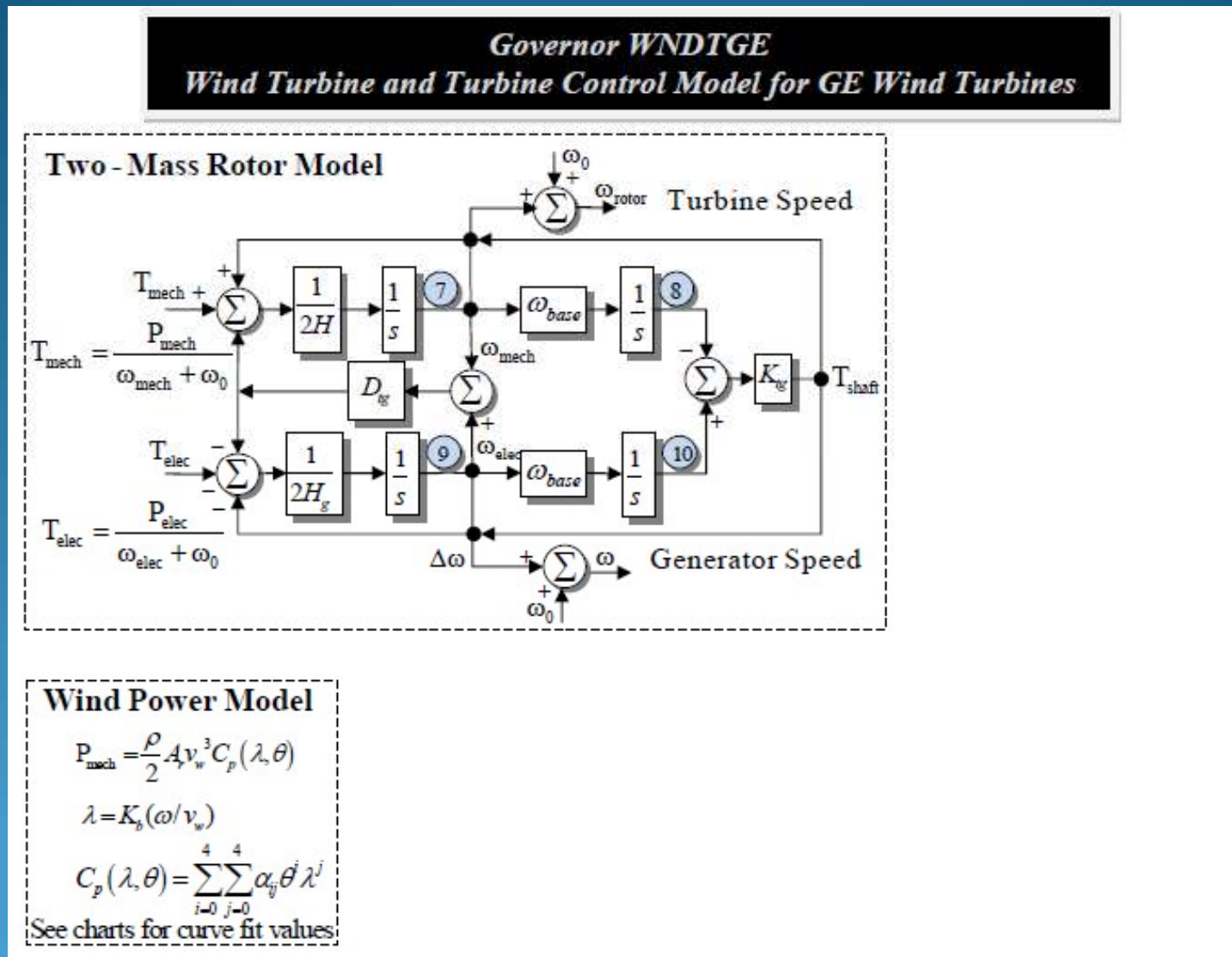


Figura 15– Função de Transferência Turbina & Controlador (continuação)

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - Continuação

Observando-se atentamente a função da transferência da figura 15, nota-se do lado direito a descrição dos “estados” ( ou modos ) de operação da turbina / conversor eólico ( Ex. Pitch Control, Power Control, Pitch Compensation, Torque Control, etc ).

Para simular estes estados de funcionamento no software simulador, basta injetar algum degrau em uma das entradas ( ou combinação de 2 ou mais entradas ) do GS.

As entradas aparecem do lado esquerdo do GS.

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - Continuação

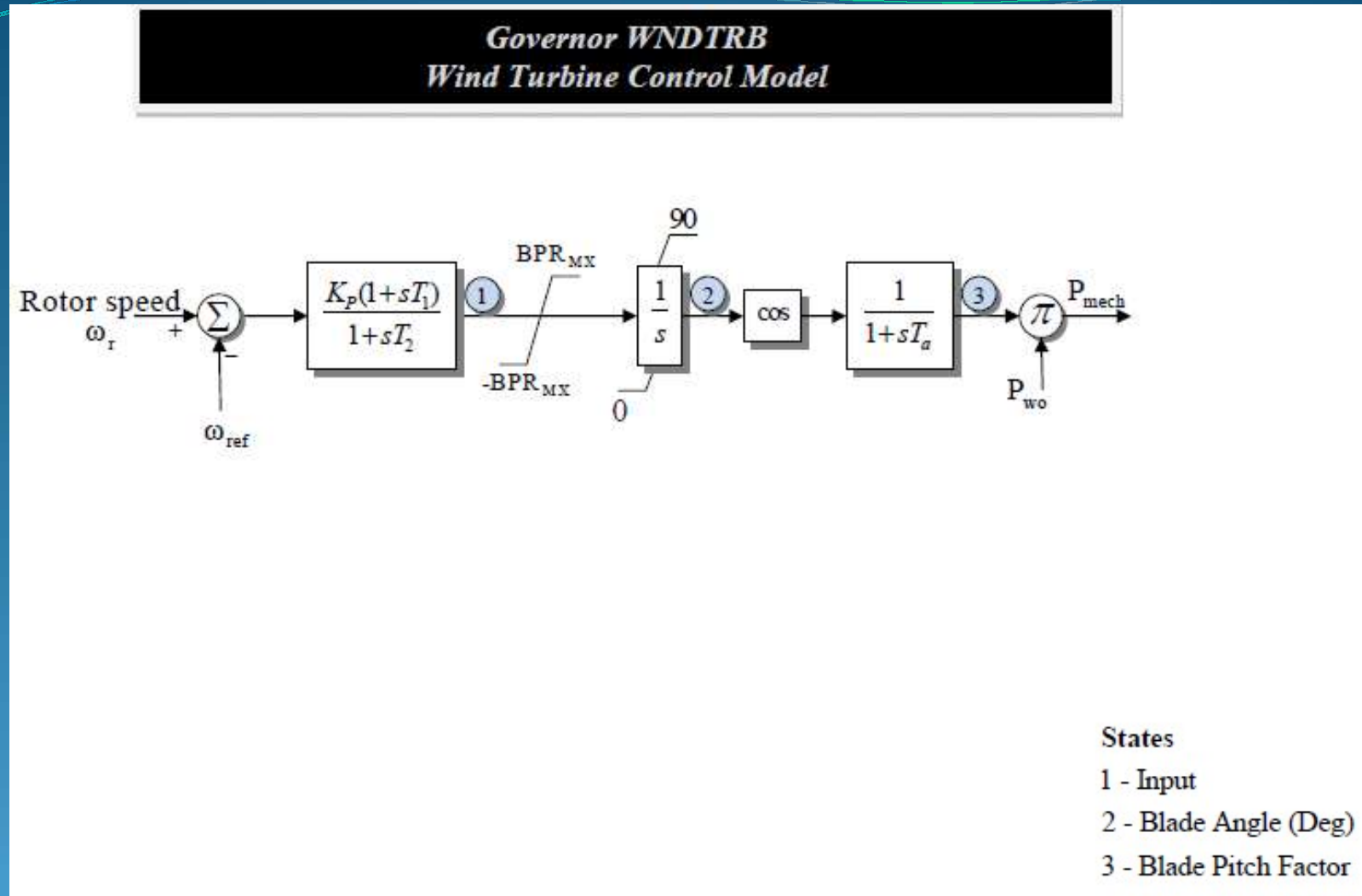


Figura 16– Função de Transferência de um Controlador de Turbina Eólica

## 10. Curvas & Função de Transferência ( GS ) - Continuação

Aqui a mesma situação do GS da figura 15, os “estados” do lado direito ( apenas 3 ) e as entradas da função de transferência do lado esquerdo.

Neste caso da figura 16, é bem mais simples observar as entradas, por se tratar de um GS mais discreto.

Aqui no caso, temos apenas 2 entradas, conforme abaixo:

- a) Rotor Speed, expresso em  $\omega_r$  ( velocidade angular real – Rad/Seg )
- b)  $\omega_{ref}$  ( velocidade angular de referência ou simplesmente Set-Point )

## 11. Referências de Consulta

- Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica - [www.abeeolica.org.br](http://www.abeeolica.org.br)
- CEPEL Eletrobras - <http://www.cepel.br/>
- Woodward - Wind Power Control - <http://www.woodward.com/WindConverters.aspx>
- GE Wind Power - <https://www.gerenewableenergy.com/wind-energy.html>
- WEG Aero-Geradores - <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Aerogeradores/Aerogeradores>
- Wobben ENERCON – [www.wobben.com.br](http://www.wobben.com.br)

## 12. Outras Informações

### Sobre o Autor:

Ronaldo Silva é Engenheiro Consultor no Segmento Industrial e de Automação, com 20 anos de experiência ( 1996-2016 ). No tocante ao segmento eólico, participou do projeto de nacionalização do Sistema de Controle CONCYCLE<sup>®</sup> da Woodward Brasil para um projeto da Alstom Wind ( ~600 turbinas eólicas ). Além das atividades no Brasil, a experiência envolveu uma temporada na fábrica global de Conversores Eólicos da Woodward em Kempen, na Alemanha em 2013. Na ocasião, participou da montagem de um gabinete completo de conversor eólico, testes, além de treinamentos relacionados ao controle e tipos de aplicações distintas envolvendo turbinas eólicas, entre outros. É engenheiro responsável da **RJS Engenharia & Consultoria**, prestando serviços de consultoria especializada, treinamentos e projetos para clientes no Brasil e no Exterior.

## 12. Outras Informações (continuação)

>>> Direitos de Cópia, Blog, LinkedIn e Contato

Direitos de Cópia: O uso, reprodução total ou parcial entre outros das informações contidas neste documento é autorizado pelo Autor, desde que mencionado a origem e autoria.

Blog Técnico do Autor - <https://automacaoetecnologia.wordpress.com/>

LinkedIn do Autor - <http://br.linkedin.com/pub/ronaldo-josé-da-silva/60/360/b76/>

WhatsApp: +55 (19) 97405-5572

E-mail: [ronaldo-jsilva@outlook.com](mailto:ronaldo-jsilva@outlook.com)



OBRIGADO POR SUA ATENÇÃO !!!