

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

**SITUAÇÃO, NECESSIDADE DE DESENVOLVIMENTO, CONCEPÇÃO DE
CONFIGURAÇÃO E PERSPECTIVAS DE AEROGERADORES DE PEQUENO
PORTE A SEREM UTILIZADOS NO BRASIL**

Considerando especialmente a configuração construtiva e
o uso de materiais para componentes de aerogeradores de pequeno porte

Oliver Lütz

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2006

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

**SITUAÇÃO, NECESSIDADE DE DESENVOLVIMENTO, CONCEPÇÃO DE
CONFIGURAÇÃO E PERSPECTIVAS DE AEROGERADORES DE PEQUENO
PORTE A SEREM UTILIZADOS NO BRASIL**

Considerando especialmente a configuração construtiva e
o uso de materiais para componentes de aerogeradores de pequeno porte

Oliver Lütz
Engenheiro Ambiental
Administrador de Empresas

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS,
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2006

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lírio Schaeffer

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Prof. Dr. Klaus-Dieter Lietzmann

Prof. Dr. Erwin Francisco Tochtrop Junior

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

Dedico a Carina Deffenti
E aos meus pais Franz-Josef e Karin Lütz

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Aos professores LÍRIO Schaeffer e Klaus-Dieter Lietzmann pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Dominik Fröhler, Andreas Lietzmann, Claudio Machado, Erwin Tochtrop, Jorge Almeida, Hildo Fuchs e Christoph Frenkel pelas sugestões e observações valiosas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
INTRODUÇÃO	1
1. SISTEMA ENERGÉTICO NO BRASIL.....	3
1.1 A situação da política energética no Brasil	3
1.2 Situação do uso de fontes de energia regenerativa no Brasil	4
1.3 Potenciais de energia eólica no Brasil	6
1.4 Geração de energia com aerogeradores comparada com usinas convencionais.....	7
1.5 Áreas de aplicação da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte.....	7
1.6 Eletrificação rural	9
1.7 Desenvolvimentos técnicos necessários	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: ESTADO DA TECNOLOGIA E DO USO DE MATERIAIS NOS AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE	13
2.1 Definição de aerogeradores de pequeno porte para a geração de energia elétrica	13
2.2 Princípios de construção e uso de materiais em aerogeradores de pequeno porte	15
2.3 Mercado internacional no segmento de aerogeradores de pequeno porte.....	19
2.3.1 Fabricantes e faixas de potência no mundo	19
2.3.2 Tendências e preços.....	21
2.4 Mercado nacional, projetos de pesquisa e estado da tecnologia.....	22
2.5 Causas principais de avarias de aerogeradores de pequeno porte	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PARTICULARIDADES METEOROLÓGICAS, DA TÉCNICA DE SISTEMA E SÓCIO-ECONÔMICAS E AS EXIGÊNCIAS RESULTANTES PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE EM USO NO BRASIL	27
3.1 Pré-requisitos relevantes para o uso de aerogeradores de pequeno porte no Brasil	27
3.1.1 Condições climáticas	27
3.1.1.1 Temperatura.....	27
3.1.1.2 Umidade do ar	28
3.1.1.3 Vento	29
3.1.1.4 Areia no fluxo do ar.....	32
3.1.1.5 Irradiação solar	33
3.1.1.6 Teor do sal no ar	34
3.1.2 Pré-requisitos técnicos do sistema e tipos de operação	34

3.1.2.1	Aerogeradores de pequeno porte como simples carregadores de baterias.....	34
3.1.2.2	Rede ilhada com aerogerador e gerador a óleo diesel sem bateria	36
3.1.2.3	Rede ilhada com operação paralela de aerogerador de pequeno porte e gerador a óleo diesel	37
3.1.2.4	Aerogeradores de pequeno porte em redes ilhadas combinando energia fotovoltaica e eólica.....	38
3.1.2.5	Modernas soluções técnicas para eletrificação descentralizada com aerogeradores de pequeno porte	39
3.1.2.6	Aerogeradores de pequeno porte na operação na rede	41
3.1.3	Particularidades sócio-econômicas.....	42
3.2	Exigências específicas aos aerogeradores de pequeno porte para o Brasil	43
3.2.1	Exigências à tecnologia de materiais.....	43
3.2.2	Necessidades construtivas	46
3.2.3	Exigências quanto à regulação e comando.....	49
3.2.4	Reivindicações à tecnologia de produção, aos custos de produção e viabilidade econômica	50
3.2.5	Comprovante de potência do aerogerador de pequeno porte	51
4.	CONCEPÇÃO DE CONFIGURAÇÃO DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE AJUSTADO ÀS CONDIÇÕES DE LOCAÇÃO NO SISTEMA MODULAR.....	52
4.1	Pás e rotor	52
4.2	Concepção do gerador	54
4.3	Unidade de gerenciamento de operação e regulação do sistema.....	56
4.4	Sistema de mastro e dispositivo de montagem.....	58
4.5	Sistema de frenagem.....	60
4.6	Monitoramento do estado através da transmissão de dados à longa distância	60
4.7	Caixa para gôndola e unidade de gerenciamento da operação	61
4.8	Operabilidade e segurança operacional	62
4.9	Diagrama em bloco referente a concepção do projeto de um novo aerogerador de pequeno porte.....	63
5.	PESQUISAS PRÓPRIAS REFERENTES À TECNOLOGIA DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE	64
5.1	Estação de ensaio para o fornecimento descentralizado de energia, em Großschirma, Alemanha	64
5.1.1	Condições básicas e objetivo	64
5.1.2	Estrutura e funcionamento.....	65
5.1.3	Avaliação das experiências operacionais com um aerogerador de pequeno porte	67
5.1.4	Interpretação e conclusão da fase de teste de três anos	69
5.2	Projeto de pesquisa para o desenvolvimento ulterior da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte, na UFRGS, Porto Alegre, Brasil	70
5.2.1	Pré-requisitos e objetivos	71
5.2.2	Avaliação das conclusões atuais.....	75

6.	PERSPECTIVAS	80
6.1	Demanda e necessidade de aerogeradores de pequeno porte e de estações híbridas no Brasil.....	80
6.2	Perspectivas e prognósticos do desenvolvimento do mercado internacional.....	80
6.3	Oportunidades empresariais através da produção nacional de um moderno aerogerador de pequeno porte.....	82
7.	DISCUSSÃO	84
8.	CONCLUSÕES	87
	ANEXOS.....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Potencial eólico e distribuição das velocidades médias anuais do vento no Brasil.....	6
Figura 2:	Grau de eletrificação no Brasil.....	10
Figura 3:	Componentes e caminho da transformação de energia de um aerogerador de pequeno porte típico	13
Figura 4:	Componentes e estrutura esquematizada de um aerogerador de pequeno porte.	14
Figura 5:	Representação de diversos tipos de aerogeradores de pequeno porte, exemplos selecionados	17
Figura 6:	Vista geral do mercado dos fabricantes e das faixas de potência de aerogeradores de pequeno porte	20
Figura 7:	Custos de aerogeradores de pequeno porte em função de sua potência nominal (sem considerar os custos com transporte, montagem e se for o caso com importação).....	22
Figura 8:	Causas principais de avarias de aerogeradores.....	24
Figura 9:	Médias Anuais de Temperatura.....	28
Figura 10:	Trajetória média anual da umidade relativa do ar de locais selecionados no Brasil, representando diferentes regiões (período de medição: 1984-2005)	29
Figura 11:	Velocidades médias do vento medidas na altura de 30 m em locais geograficamente diferentes no Rio Grande do Sul (período de medição: 2002-2005).....	31
Figura 12:	Representação comparativa das velocidades do vento medidas de duas estações de medição na costa do Estado do Ceará (período de medição 2002-2004)	31
Figura 13:	Número médio de dias com areia no fluxo do ar em diferentes cidades litorais brasileiras (período de medição: 1985-2005)	32
Figura 14:	Mapas de irradiação solar global média mensal para o território brasileiro a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000	33
Figura 15:	Diagrama em bloco de um sistema simples de carga de bateria com aerogerador de pequeno porte	35
Figura 16:	Diagrama em bloco de um aerogerador de pequeno porte com gerador síncrono na operação em rede ilhada	36
Figura 17:	Diagrama em bloco de uma solução de rede ilhada com energia eólica e óleo diesel, com operação paralela de aerogerador e gerador a óleo diesel	37
Figura 18:	Esquema de um sistema de rede ilhada fotovoltaico-eólico.....	39
Figura 19:	Pequeno sistema ilhado com potência AC e componentes DC acoplados	40

Figura 20:	Sistema híbrido, estruturado de forma modular, ampliável, com componentes AC acoplados para as opções de operação ilhada ou paralela à rede sob as diferentes condições de rede elétrica.....	41
Figura 21:	Representação esquemática de um aerogerador de pequeno porte na operação paralela à rede.....	42
Figura 22:	Influência de obstáculos anteriores na direção principal do vento sobre aerogeradores de pequeno porte.....	59
Figura 23:	Sistema de Condition Monitoring para elevar a segurança operacional e de abastecimento, reduzindo ao mesmo tempo os custos operacionais através de uma manutenção orientada pelo estado.....	61
Figura 24:	Diagrama em bloco de um novo aerogerador de pequeno porte.....	63
Figura 25:	Esquema do sistema da estação de ensaio “Auter”, em Großschirma, Alemanha.....	66
Figura 26:	Sistema híbrido de ensaio completamente instalado com aerogerador de pequeno porte (altura do cubo de 7 m à esquerda e de 13 m à direita) e mastro de medição para o registro de velocidade do vento, direção do vento, temperatura e pressão do ar.....	67
Figura 27:	Desgaste das sapatas do freio de disco depois de 13 meses de operação.....	72
Figura 28:	Erros do sistema de frenagem do aerogerador e peso dos erros para a operação do sistema.....	72
Figura 29:	Sistema de frenagem do aerogerador de pequeno porte <i>Inventus</i>	73
Figura 30:	Mistura dos materiais das sapatas dos freios de disco de aerogeradores de pequeno porte uma cinta de freio padrão.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Capacidade de Geração do Brasil.....	3
Tabela 2:	Classificação de aerogeradores e dimensionamento típico	15
Tabela 3:	Possibilidades do controle de potência e do número de aerogeradores de pequeno porte.....	18
Tabela 4:	Uso de materiais na construção de aerogeradores de pequeno porte.....	19
Tabela 5:	Países produtores de aerogeradores de pequeno porte e a sua oferta de máquinas	20
Tabela 6:	Fabricantes brasileiros de aerogeradores de pequeno porte	23
Tabela 7:	Projetos nacionais de pesquisa e de desenvolvimento dos últimos cinco anos na área da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte	23
Tabela 8:	Falhas de material típicas em componentes de aerogeradores de pequeno porte e as suas conseqüências para o estado operacional	25
Tabela 9:	Temperaturas mais altas medidas no Brasil	28
Tabela 10:	Classificação das cargas sobre um aerogerador de pequeno porte	44
Tabela 11:	Exigências aos materiais a serem utilizados especificamente nos componentes na construção de aerogeradores de pequeno porte e as possibilidades correspondentes na seleção de materiais	44
Tabela 12:	Exigências a configuração construtiva dos componentes de aerogeradores de pequeno porte no uso no Brasil	46
Tabela 13:	Propriedades gerais de materiais compostos reforçados por fibra para pás de rotor	52
Tabela 14:	Propriedades específicas de materiais compostos reforçados por fibras para rotores de aerogeradores.....	52
Tabela 15:	Possibilidades de combinação das classes de gerador selecionadas para aumentar a potência do sistema de aerogeradores.....	55
Tabela 16:	Possibilidades da orientação da direção do vento de aerogeradores de pequeno porte.....	57
Tabela 17:	Análise avaliativa dos princípios de construção de freios de disco para aerogeradores de pequeno porte	76
Tabela 18:	Mercados de crescimento, a médio e longo prazo, para o fornecimento descentralizado de energia na base do uso de recursos regenerativos.....	81
Tabela 19:	Linha de produtos de uma empresa fictícia no ramo de negócio de aerogeradores de pequeno porte e mercado de vendas nacional.....	82
Tabela 20:	Concepção de sistema para um novo aerogerador de pequeno porte, habilitado para sistemas híbridos, adaptada às exigências locais brasileiras	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

AC	Corrente alternada
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
cf.	Conforme
CLP	Controlador lógico programável
c_p	Coefficiente de potência
DC	Corrente contínua
EPI	Energia, Projetos e Investimentos Ltda.
FAPERGS	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul
FV	Fotovoltaica
G	Gerador eólico
ICMS	Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços
IPI	Imposto sobre produtos industrializados
N	Norte
NE	Nordeste
NUTEMA	Núcleo Tecnológico de Energia e Meio Ambiente
P	Potência
p.ex.	por exemplo
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
S	Sul
SC	Santa Catarina
SE	Sudeste
SP	São Paulo
t	Tempo
TIR	Taxa interna de retorno
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UV	ultravioleta
VPL	Valor presente líquido

Unidades

°	Grau
°C	Grau Celsius
A	Ampère
Hz	Hertz
kg	Quilograma
m	Metro
N	Newton
Pa	Pascal
rpm	Rotações por minuto
s	Segundo
V	Volt
W	Watt

RESUMO

Objeto do presente trabalho é a análise dos fundamentos técnicos, do uso de materiais, da configuração construtiva e das causas principais de avaria de aerogeradores de pequeno porte existentes para a geração de energia elétrica, dos pré-requisitos locais e das exigências resultantes para a aplicação desta tecnologia no Brasil. Avalia-se ainda a concepção do projeto de um novo aerogerador de pequeno porte adaptado às exigências locais.

Para a introdução temática, discute-se de forma resumida a situação da política energética e a situação do uso de energias regenerativas, especialmente da energia eólica, bem como as possibilidades de uso de aerogeradores de pequeno porte para a eletrificação rural no Brasil.

Sob o fundamento da análise da situação nacional e internacional da tecnologia e do uso de materiais em aerogeradores de pequeno porte, são examinados, no segundo capítulo, os pré-requisitos específicos meteorológicos, técnicos do sistema e sócio-econômicos para o uso de aerogeradores de pequeno porte no Brasil. É discutido ainda as exigências resultantes da configuração construtiva, da técnica da regulação e à seleção de materiais.

Baseados nas análises acima, desenvolve-se no terceiro capítulo a concepção do projeto detalhado, específico em relação aos componentes de um novo aerogerador de pequeno porte, em sintonia com as exigências à colocação desta tecnologia no mercado brasileiro com sucesso. Neste contexto, pode-se recorrer a pesquisas próprias, especialmente à análise da fase de teste de três anos de um aerogerador de pequeno porte no âmbito de um sistema híbrido em Großschirma (Alemanha), bem como ao projeto de pesquisa e de desenvolvimento para a otimização de componentes individuais, especialmente do sistema de frenagem e do monitoramento de dados à distância de aerogeradores de pequeno porte, cujos resultados são documentados no quarto capítulo.

Concluindo, são analisadas as perspectivas do uso de aerogeradores de pequeno porte, bem como do desenvolvimento do mercado nacional e internacional, bem como as oportunidades de negócio resultantes da máquina projetada.

ABSTRACT

The aim of this work is the analysis of the technical bases, the material usage, the constructive lay-out and the main failure causes' existing small wind power plants for electricity generation, the local prerequisites and resulting demands for the successful application of this technology in Brazil as well as the outline conception of a new small wind turbine adapted to the local requirements.

For the thematic introduction the situation of energy policy and the degree of utilisation of regenerative energies, particularly the wind energy as well as the ranges of application of small wind power plants for the rural electrification in Brazil will be resumed.

On the basis of the analysis of the national and international state-of-the-art and material use for small wind power plants the specific meteorological, system technical and socio-economic prerequisites for the use of small wind power systems in Brazil are examined and arising from it the demands on the constructive lay-out, the flow technology design and the material choice are explained in the second chapter.

Based on this in the third chapter a detailed, component specific outline conception of a new small wind power generator, with the demands to the successful placing of this technology on the Brazilian market, is developed. Thereby can be hearken back to own examinations, particularly the analysis of a three-year test stage of a small wind power plant in conjunction with the hybrid system in Großschirma (Germany) like also the research and development project for the optimization of individual components, especially the braking system and the data remote monitoring of wind turbines whose results are documented in the fourth chapter.

In conclusion, the prospects of the use of small wind power plants as well as the national and international market trend and the enterprise chances arising from it of the designed plant are analysed.

INTRODUÇÃO

É internacionalmente incontestado que o uso de energias regenerativas terá futuramente uma importância decisiva no fornecimento de energia elétrica para a população bem como sua importância econômica. Uma participação essencial na geração de energia será fundamental o uso da energia eólica.

No mercado internacional, há algum tempo é oferecido um grande número de diversos modelos de aerogeradores de pequeno porte para a geração de energia, produzidos até agora em quantidades diversas, porém, geralmente, pequenas. Estes sistemas fornecem predominantemente cargas para baterias. Devido ao seu equipamento eletro-técnico, por um lado, não são apropriados para modernos sistemas híbridos de fornecimento descentralizado e, por outro lado, os atuais preços específicos do tamanho destes sistemas encontram-se em nível duas ou até três vezes maior de que os aerogeradores de grande porte de hoje. Por último, a sua maturidade técnica não corresponde de longe à dos aerogeradores modernos atuais para a operação paralela à rede.

Atualmente, o desenvolvimento de aerogeradores de grande porte, na faixa de megawatt é levado adiante naturalmente no mais alto nível técnico e com os mais modernos materiais e ferramentas enquanto, até agora, não se investiu um esforço de desenvolvimento correspondentemente grande para sistemas pequenos.

O desenvolvimento de grupos de componentes para aerogeradores de pequeno porte a serem utilizados em estações descentralizadas complexas de fornecimento de energia é necessário porque estas máquinas devem operar por grandes períodos de uso (horas de operação) sem avarias.

Especialmente a eletrificação de regiões que até agora e também no futuro não são abastecidos com energia elétrica da rede, requer estações de fornecimento de energia independente na base da tecnologia de sistemas híbridos. Dependendo dos potenciais de energia regenerativa regionalmente existentes, é sensato o uso de energia solar, hídrica, de biomassa e eólica em combinação com sistemas de armazenagem (sistemas de bateria) e pequenos geradores a óleo diesel.

O uso da energia eólica para estas estações é de especial interesse econômico. Isto tem como pré-requisito aerogeradores de pequeno porte com segurança operacional na base de

componentes e grupos de componentes de materiais de alta performance e, no entanto, de baixo custo, e o monitoramento dos estados operacionais.

Como existe, especialmente no Brasil, grande demanda por fornecimento descentralizado de energia com pequenos sistemas autônomos, foi iniciado no começo de 2005 no âmbito de uma cooperação entre o *Centro de Tecnologia* da *UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul* e a empresa *EPI - Energia, Projetos e Investimentos Ltda.*, parte do grupo empresarial alemão *eab technology group*, um projeto de pesquisa tendo como objetivo o desenvolvimento de um moderno aerogerador de pequeno porte especialmente para o mercado brasileiro, podendo-se recorrer à experiência de muitos anos da empresa alemã na área da energia eólica e, particularmente, aproveitar a estação de ensaio híbrido para o fornecimento descentralizado de energia eólica, em Großschirma (Saxônia, Alemanha), de propriedade da empresa. Ao mesmo tempo, o projeto de pesquisa é apoiado pela FAPERGS pelo lado brasileiro.

No presente trabalho, são elucidadas as condições específicas básicas para o uso de aerogeradores de pequeno porte para a geração de energia, um aerogerador adequado aos pré-requisitos locais é delineado, os resultados próprios de pesquisa e desenvolvimento são documentados, bem como são apresentadas as necessidades do mercado e as perspectivas desta tecnologia.

1. SISTEMA ENERGÉTICO NO BRASIL

1.1 A situação da política energética no Brasil

A capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil girava em torno de 100 GW no fim de 2005. Aproximadamente 77% da geração interna baseiam-se na energia hídrica, o restante provém quase exclusivamente de usinas termelétricas na base de carvão e gás, bem como de dois geradores nucleares (Tabela 1). Devido a jazidas recentemente exploradas no país e ao gasoduto da vizinha Bolívia¹ a participação de centrais geradoras térmicas deve provavelmente crescer de forma considerável nos próximos anos.

Tabela 1: Capacidade de Geração do Brasil
ANEEL, 2006

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	187	98.888	98.581	0,11
Central Geradora Eolielétrica	10	31.000	28.550	0,03
Pequena Central Hidrelétrica	259	1.366.076	1.327.911	1,43
Central Geradora Solar Fotovoltaica	1	20	20	0
Usina Hidrelétrica de Energia	149	71.636.580	69.631.048	74,98
Usina Termelétrica de Energia	870	24.222.254	19.777.716	21,30
Usina Termonuclear	2	2.007.000	2.007.000	2,16
Total	1.478	99.361.818	92.870.826	100

A base de fontes de energia para o auto-abastecimento (participação de cerca de 6 GW) está, em compensação, bem mais diversificada por causa de sua ligação com os setores agrícola e industrial e inclui antes de tudo o uso de materiais residuais orgânicos.

O mercado brasileiro de energia elétrica encontra-se há alguns anos num forte processo de mudança. Do setor de fornecimento originalmente de monopólio do Estado, deve surgir, após a conclusão da reestruturação, uma área de serviços amplamente privatizada, liberalizada e orientada para a competição. No entanto, a privatização está quase parada nos últimos anos depois da venda de diversas empresas de distribuição e atualmente exclui expressamente a área de geração, ainda dominada pelo Governo Federal. (GTZ, 2004; IIEC, 2004).

¹ Este gasoduto atravessa o sul do Brasil, atingindo também as regiões de grande população e industrializadas de São Paulo.

Desde 1996, concede-se a produtores independentes de energia e auto-produtores o direito de atuação. Produtores independentes, bem como auto-produtores possuem acesso livre ao sistema integrado nacional e às redes das distribuidoras pagando taxa de uso.² O limite de consumo para a escolha livre do fornecedor é de 3.000 kW.

Auto-produtores podem, com autorização especial, trocar entre si energia elétrica e vender energia elétrica excedente às distribuidoras locais. No entanto, nem no caso dos produtores independentes nem no caso dos auto-produtores, existe uma obrigação legal das operadoras da rede para receber a energia elétrica oferecida (WINROCK INTERNATIONAL, 2002).

Na lei 10.438 do ano de 2002, o programa PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) foi introduzido, prevendo em duas fases a compra de energia elétrica de operadores de sistemas que utilizam energia regenerativa (eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa) e que fornecem a eletricidade gerada ao sistema integrado nacional. O foco do programa inclui uma participação de mercado maior de produtores independentes que não são administrados por concessionárias do abastecimento público (WADE, 2004).

Respectivamente 1.100 MW de aerogeradores, de pequenas centrais hidrelétricas e de centrais geradoras de biomassa, devem começar a operar na primeira fase até o fim de 2008 e fornecer energia elétrica ao sistema integrado nacional durante 20 anos por preços de compra de energia definidos. Na segunda fase, a ser iniciada depois de alcançar o objetivo de 3.300 MW, outros empreendimentos devem ser realizados para garantir no prazo de vinte anos uma participação de energias regenerativas³ de 10% da demanda anual por energia elétrica (MME, 2002).

1.2 Situação do uso de fontes de energia regenerativa no Brasil

O uso de energias regenerativas possui tradicionalmente uma grande importância na geração de energia elétrica, bem como no fornecimento rural de energia no Brasil (por exemplo, através de pequenos aerogeradores para sistemas mecânicos de bombeamento d'água) e já é bastante usado. Nos últimos tempos, os esforços para a exploração de energias

² No entanto, mostra-se problemático para os pequenos fornecedores de energia elétrica que o acesso ao nível de distribuição ainda não foi regularizado.

³ Neste cálculo, as grandes centrais hidrelétricas estão excluídas.

regenerativas (especialmente, solar, eólica e biomassa) na área de pesquisa e de desenvolvimento, bem como na concretização orientada para a aplicação aumentaram consideravelmente. Nos centros urbanos e industrializados, os recursos regenerativos abundantemente existentes, no entanto, ainda são de pequena importância.

Apesar de boas até excelentes condições de energia eólica (conforme o capítulo seguinte), o seu uso para a geração de energia elétrica ainda encontra-se no princípio. No início do ano de 2006, a potência total instalada⁴, distribuída por poucas localidades, predominantemente no Nordeste do Brasil, foi de apenas 29 MW (ANEEL, 2006). No entanto, a maior parte de áreas, ricas em vento, já estão bem registradas e documentadas. Desde 2002, existe um Atlas de vento nacional e para os Estados do Ceará, do Paraná e do Rio Grande do Sul também, com dados mais detalhados, elaborados na base de medições de vento locais.

O Brasil dispõe igualmente de recursos de biomassa abundantes que hoje já correspondem quase a um quarto de consumo de energia primária e com aproximadamente 2% da produção de energia elétrica. No entanto, o uso atualmente muitas vezes não ocorre de forma sustentável, por exemplo, queimando carvão vegetal sem reflorestamento sistemático.

Um exemplo conhecido para outro tipo de aproveitamento de biomassa, é o programa Proálcool existente desde meados dos anos 70 para a substituição de petróleo para setor de transporte por álcool na base de cana de açúcar. No entanto, até hoje a produção do combustível álcool depende de subvenções do Estado, pois o preço do petróleo não aumentou o necessário para alcançar uma sustentabilidade do combustível alternativo etanol.

Outro projeto para a substituição de petróleo teve o seu início em 2005. Através de um teor mínimo legalmente prescrito de biodiesel no combustível diesel comum, deve-se alcançar gradativamente uma participação de 5% até 2010.

O uso de biogás⁵ como gerador de energia está tornando-se crescentemente um importante tema (especialmente na área da auto-produção industrial). Vem sendo utilizado até hoje quase que exclusivamente bagaço com três quartos das usinas de biomassa geradoras de energia elétrica (total de 2,5 MW) (GTZ, 2004).

⁴ Aqui não é considerado o uso de aerogeradores de pequeno porte para a geração de energia elétrica cuja quantidade e potência instalada não é estatisticamente registrada, porém, pode ser estimada baixa.

⁵ Por exemplo: Gás do tratamento de águas residuais, gás de depósitos para o lixo domiciliar ou biogás da criação de animais.

Devido à sua localização próxima ao equador, o Brasil apresenta em todas as regiões do país também condições de irradiação solar boas e até excelentes. A irradiação média diária varia entre 4,5 kWh/m² na costa do estado do Paraná a 6,3 kWh/m² (conforme também capítulo 3.1.1.5) no interior do Nordeste (ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2003).

Um uso elétrico solar aconteceu nos últimos anos principalmente no âmbito do programa federal PRODEEM, no entanto, num nível baixo. Devido à falta de densidade do mercado e à falta de manutenção, a percentagem de paragem de sistemas fotovoltaicos é muito alta no Brasil.

1.3 Potenciais de energia eólica no Brasil

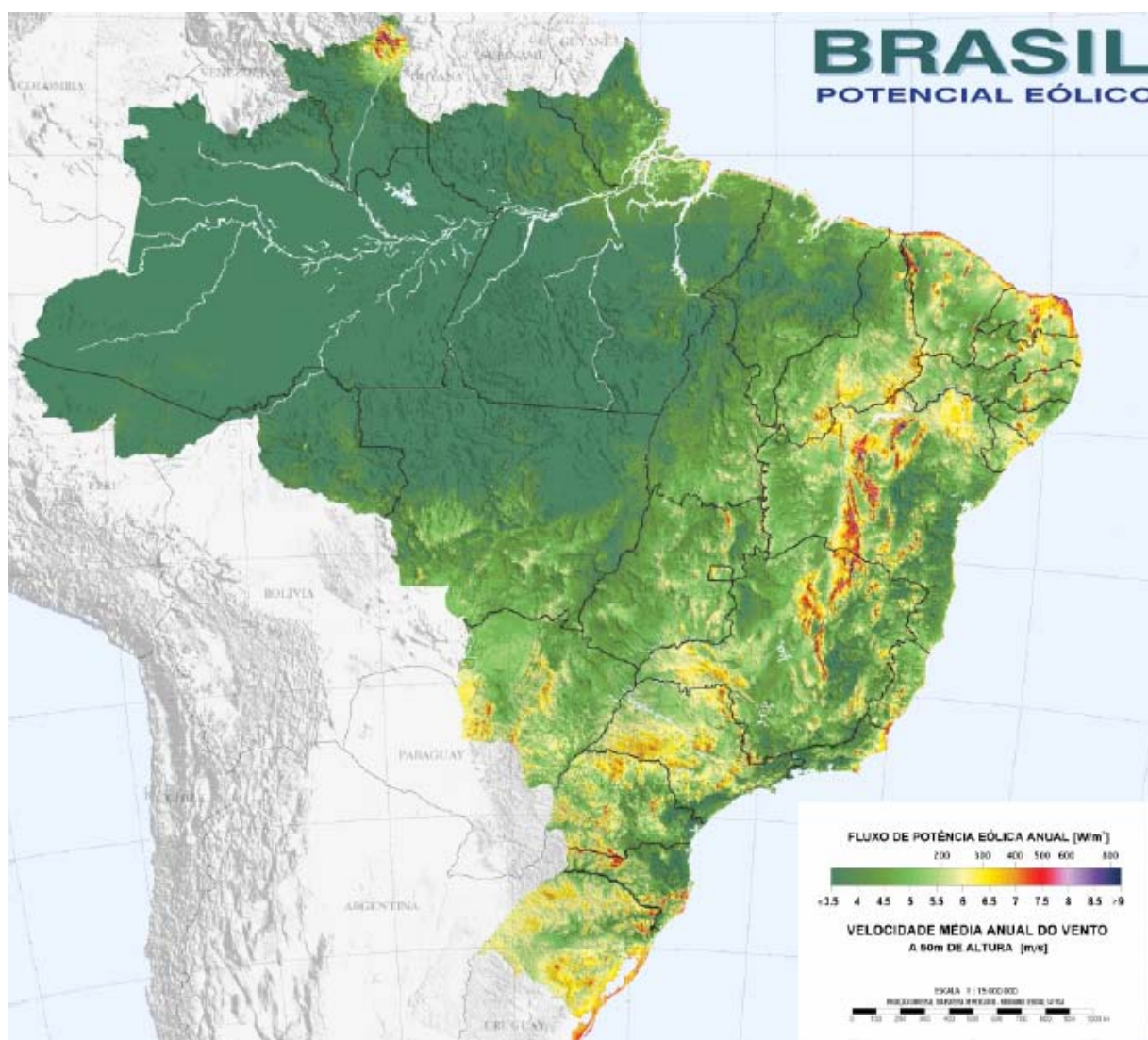


Figura 1: Potencial eólico e distribuição das velocidades médias anuais do vento no Brasil
ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, 2000

O potencial teórico de geração em todo o Brasil é estimado em mais que 140 GW, e em 272 TWh anuais, a quantidade de energia elétrica a ser gerada por energia eólica (ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, 2000).

As áreas costeiras no Norte e no Nordeste, onde velocidades médias do vento de 8m/s ou mais são medidas numa altura de 50m, são adequadas de forma excelente para o uso da energia eólica. Informações mais pormenorizadas referentes às velocidades do vento são documentadas no capítulo 3.1.1.4..

1.4 Geração de energia com aerogeradores comparada com usinas convencionais

Considerando as conseqüências prognosticadas do aquecimento do clima, o aerogerador é uma alternativa aceitável à geração de energia tradicional, pois não emite poluentes relevantes para clima e meio ambiente. Na geração de energia convencional em termelétricas, formam-se através da transformação químico-física de fontes de energia fósseis poluentes e gases causadores do efeito estufa como CO₂, NO_x, SO_x e poeira bem como calor de escape que tem que ser utilizado de outra forma ou ser emitido ao meio ambiente. De acordo com um laudo sobre a redução de CO₂- no setor de energia através do uso de energias regenerativas, serão economizadas 895 gramas CO₂ por quilowatt-hora de energia elétrica gerada (FRAUNHOFER INSTITUT, 2005).

Uma outra vantagem de um aerogerador é seu possível aproveitamento no fornecimento de energia descentralizado ou autárquico em regiões afastadas do mundo porque a fonte de energia eólica não precisa ser transportada para a locação escolhida e a instalação de sistemas de pequeno porte traz poucos gastos. Usinas elétricas convencionais são inflexíveis em relação ao fornecimento de combustível por causa da infra-estrutura ausente e aos altos custos de aquisição das instalações necessárias.

Além disso, a utilização da energia eólica e de outras fontes regenerativas pode assegurar o futuro fornecimento de energia também nos países em desenvolvimento.

1.5 Áreas de aplicação da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte

Pequenos aerogeradores (conforme capítulo 2.1) são especialmente adequados para o abastecimento básico com energia elétrica de consumidores individuais e/ou grupos de

consumidores na operação ilhada, como domicílios, comunidades, fazendas ou complexos turísticos, mas também na operação conectada à rede (operação paralela) para reduzir os custos com energia elétrica. A seleção específica dos aerogeradores de pequeno porte depende sempre da demanda por potência, da situação local e das exigências dos consumidores em relação à energia elétrica gerada.

Às áreas de aplicação de aerogeradores de pequeno porte pertencem especialmente:

- Abastecimento ilhado autárquico (máquinas isoladas e sistemas híbridos);
- Aquecimento e produção de água quente;
- Dessalinização de água marinha;
- Operação paralela à rede;
- Elevação de água com bombas eólicas ou através do acionamento elétrico de bombas.

Existem poucas exigências em relação à qualidade da energia elétrica, isto é, à constância de frequência e voltagem, e, conseqüentemente, à complexidade do sistema no uso como aquecimento elétrico em edifícios ou no aquecimento de água industrial e na dessalinização de água marinha. Assim, um aquecimento eólico (cuja aplicação no Brasil, devido às condições climáticas, só fará sentido nos planaltos do sul) está indicado especialmente onde já há um armazém-tampão com um meio (água ou óleo) para o armazenamento da energia ou um termoacumulador em combinação com um aquecimento, no qual um cartucho de aquecimento elétrico pode ser instalado diretamente, que por sua vez será conectado diretamente ao aerogerador. Esta alternativa de suporte de aquecimento é vantajosa porque no período de aquecimento, nos meses de outono e de inverno, predomina o vento mais rico em energia, economizando adicionalmente combustível. No caso da dessalinização de água marinha, que ganhará futuramente importância devido à crescente carência de água potável no mundo, a energia elétrica é utilizada para operar as bombas. Estas bombas rotativas necessitam de aproximadamente 10-15 kW de potência por metro cúbico de água potável para superar a perda de pressão através do diafragma que serve para retirar o sal (HAU, 1996).

A alimentação da rede afirmou-se somente nos últimos anos através da aplicação de comutadores especialmente configurados para as características de potência de aerogeradores de pequeno porte que alimentam de forma confiável com energia elétrica uma rede pública, uma rede ilhada ou uma bateria. Antes, os comutadores solares utilizados fracassavam devido à constante alteração da oferta de energia causada por rajadas de vento.

Outra área de aplicação, e futuramente a mais importante, de aerogeradores de pequeno porte é o abastecimento ilhado. Nos países em desenvolvimento e recentemente industrializados, tais sistemas têm importância existencial para a população. Especialmente como sistema híbrido em combinação com aerogeradores e/ou módulos fotovoltaicos, pequenos sistemas hidrelétricos, bem como geradores a óleo diesel, um abastecimento com energia elétrica necessário e confiável pode ser garantido através do armazenamento intermediário em baterias no caso de demanda autárquica.

1.6 Eletrificação rural

Devido ao seu tamanho territorial, à sua baixa densidade populacional em vastas partes do país e à pobreza grave nas regiões rurais, o Brasil continua apresentando um elevado grau de comunidades e domicílios não eletrificados (IEA, 2002).⁶

De acordo com estimativas, 2 a 2,5 milhões de domicílios (correspondendo a uma proporção da população de aproximadamente 7 por cento) não possuem acesso ou conexão à rede elétrica regional. Somente 214 de 5507 municípios brasileiros podem apresentar um grau de eletrificação de 100 por cento (ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL, 2003).

O grau de eletrificação mais baixo pode ser encontrado nas áreas rurais no Norte e Nordeste do país. Mas também nos Estados do Sul (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná), observam-se mais de 130.000 domicílios não eletrificados nas áreas rurais (grau de eletrificação total de cerca de 91%), representando, assim, uma demanda de acesso (cf. Figura 2).

Neste contexto, as taxas são consideravelmente mais baixas na área rural com 71% que em regiões urbanas (97,4%). Em alguns Estados, o abastecimento é especialmente subdesenvolvido. Assim nos Estados do Norte, Acre e Amazonas, mais que 70% dos domicílios não possuem ligação elétrica (GTZ, 2004).

Para melhorar a eletrificação no campo, foi iniciado o programa "Luz para Todos" (conforme Anexo A), em novembro de 2003.⁷ De acordo com este, todas as 12 milhões de

⁶ Não-eletrificação deve ser entendido literalmente neste contexto porque, na maioria das vezes, nem um gerador a óleo diesel está disponível para o auto-abastecimento elementar e para demandas básicas (por exemplo, a operação de um rádio). Comunidades devem ser interpretadas como comunidades locais cujos moradores muitas vezes moram dispersados, porém, não necessariamente dispõem de propriedade individual da terra.

peças sem conexão à rede elétrica devem ser abastecidas com energia elétrica até 2008. O programa é coordenado pelo Ministério de Energia com a participação da Eletrobrás e das empresas controladas por esta (MME, 2003).

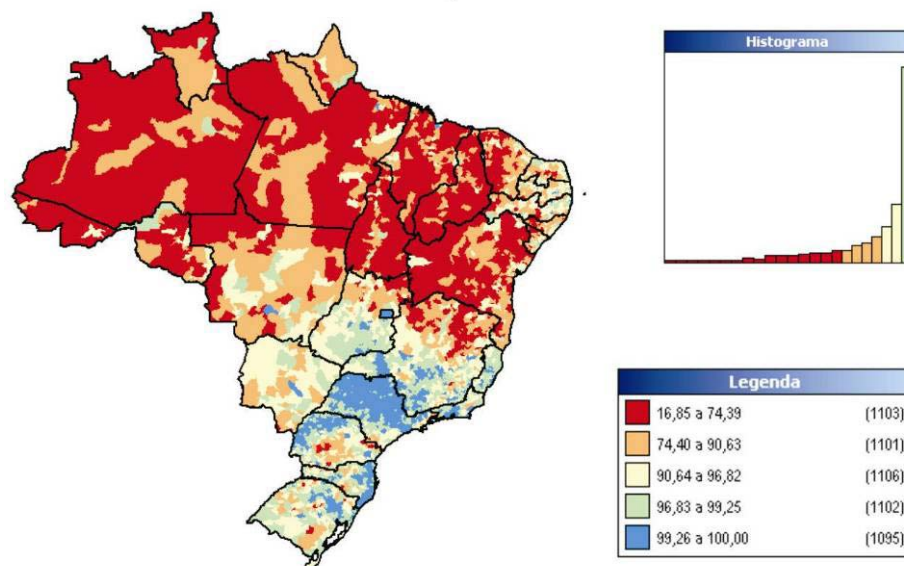


Figura 2: Grau de eletrificação no Brasil
ATLAS DO DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL, 2003

A eletrificação deve acontecer através da extensão da rede, de sistemas de geração descentralizados com redes ilhadas ou de sistemas individuais, devendo ser utilizado nestes especialmente energias renováveis, além de uma produção de energia elétrica na base de diesel. Para uma ponderação econômica, servem valores de custos regionalizados. Caso estes sejam ultrapassados, as alternativas à extensão da rede serão incluídas (GTZ, 2004).

1.7 Desenvolvimentos técnicos necessários

Para usar e comercializar com sucesso um pequeno aerogerador no Brasil (e, em geral, nos países recentemente industrializados e de desenvolvimento em todo o mundo), a tecnologia desta máquina deve ser ajustada às possibilidades técnicas locais e, no entanto,

⁷ Decreto 4.873, de 11.11.2003, que se refere à lei 10.438 (art. 14 e 15). O projeto sucede ao programa "Luz no Campo" administrado pela Eletrobrás o qual no prazo de quatro anos deveria ter abastecido cerca de um milhão de domicílios e edifícios rurais com energia elétrica. O programa, porém, não trouxe o sucesso desejado por causa dos recursos de incentivo concedidos somente na base de empréstimos a empresas concessionárias e cooperativas rurais.

corresponder ao mesmo tempo ao estado internacional da tecnologia de aerogeradores modernos de classe de MW.

A exigência principal é a maior confiabilidade possível tendo ao mesmo tempo a menor manutenção possível porque os custos com viagens para pessoal qualificado poderiam chegar conforme as circunstâncias rapidamente à faixa do custo da máquina. Outra exigência essencial representa a resistência contra areia e poeira. Todos os componentes devem ser protegidos a longo prazo contra a penetração destas. Para locações próximas à costa, deve-se considerar a exposição ao ar úmido e de alto teor de sal.

O peso da gôndola, bem como o dispositivo de instalação devem ser dimensionados de tal forma que o transporte e a montagem sejam possíveis com recursos simples. A faixa de temperatura para a maquinaria deve ser ajustada às condições meteorológicas extremas locais.

Para o desenho da máquina e a configuração dos componentes e da tecnologia do sistema, definem-se os seguintes objetivos de desenvolvimento:

- Preço específico baixo;
- Universalmente utilizável em diferentes redes;
- Possibilidade de integração em redes descentralizadas;
- Alta resistência e confiabilidade;
- Grande vida útil tendo longos ciclos de manutenção;
- Boa maneabilidade sem conhecimentos especializados;
- Montagem simples no local;
- Alto nível de segurança;
- Baixa produção de ruídos.

Para reduzir o preço total da máquina abaixo do preço de mercado médio de aerogeradores estrangeiros comparáveis, prevê-se uma construção integral compacta da gôndola, a utilização de um gerador assíncrono de baixo custo e o uso de tecnologias de produção próprias para a produção em série.

Além disso, a máquina será configurada para o acoplamento simples com redes ilhadas de AC, bem como para o uso em redes integradas comuns. A capacidade do sistema para aplicações descentralizadas deve ser alcançada através de uma operação paralela com um comutador de energia elétrica de bateria, o qual assumirá tanto a regulação da voltagem quanto a regulação da frequência e do número de rotações. O uso da energia eólica em conjunto com sistemas de baterias ou com pequenos geradores a óleo diesel e sistemas

fotovoltaicos é de grande importância especialmente para a instalação de redes ilhadas, bem como para a conexão a redes fracas, oferecendo vastas possibilidades de eletrificação.

O desenvolvimento de um novo produto industrial ou a sua modificação é um processo baseado em divisão de trabalho do qual participam geralmente os mais diversos departamentos (por exemplo, desenvolvimento, controle de qualidade, marketing, controle) da respectiva instituição.

O desenho e a configuração de um novo aerogerador de pequeno porte para o mercado brasileiro, limita-se, por isso, no âmbito do presente tese, à exposição e à avaliação dos contextos mais importantes, conclusões e resultados de ensaios em relação ao desenvolvimento da máquina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: ESTADO DA TECNOLOGIA E DO USO DE MATERIAIS NOS AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

2.1 Definição de aerogeradores de pequeno porte para a geração de energia elétrica

Aerogeradores transformam a força do vento em energia elétrica, a qual é fornecida à rede pública de energia (operação paralela à rede) ou a redes ilhadas autárquicas (operação em rede ilhada). A transformação acontece de modo que a energia cinética do vento provoca um movimento rotativo no rotor do aerogerador (transformação da energia cinética em energia mecânica) que é passada para um gerador, onde é transformada em energia elétrica. A figura a seguir (Figura 3) ilustra o caminho da transformação de energia através da vista detalhada de um aerogerador de pequeno porte (aqui sem caixa).

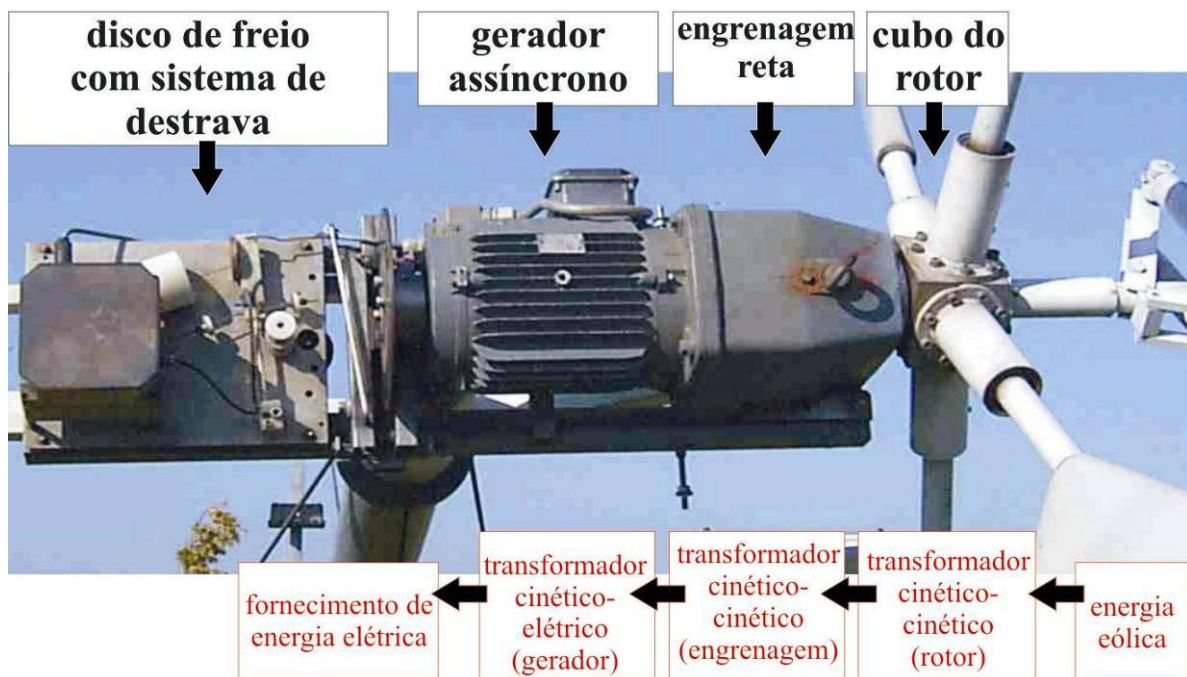
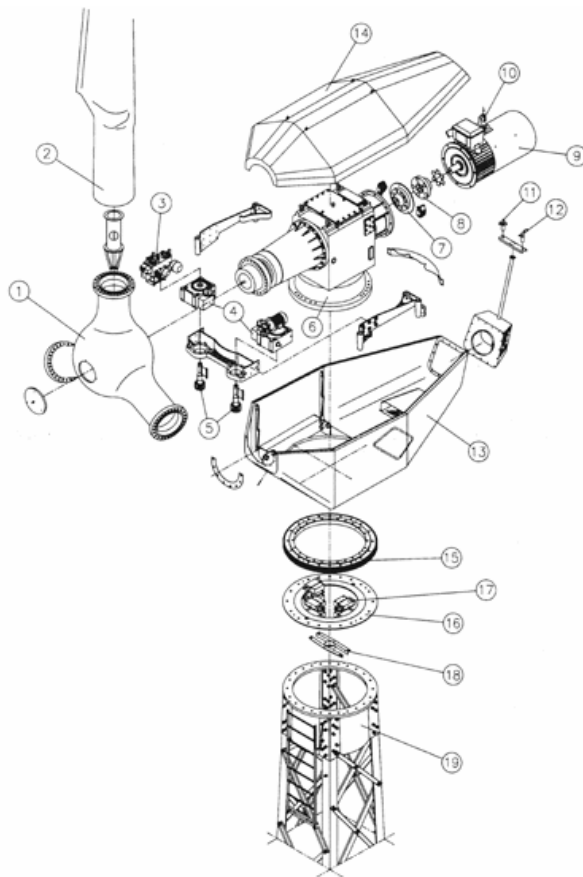


Figura 3: Componentes e caminho da transformação de energia de um aerogerador de pequeno porte típico

A Figura 4 apresenta, além disso, a estrutura total principal e os componentes individuais de um aerogerador de pequeno porte típico.



- 1 – Cubo do rotor
- 2 – Pás do rotor
- 3 – Sistema hidráulico
- 4 – Sistema de posicionamento da nacela
- 5 – Engrenagem de posicionamento
- 6 – Caixa multiplicadora de rotação
- 7 – Disco de freio
- 8 – Acoplamento do gerador elétrico
- 9 – Gerador elétrico
- 10 – Sensor de vibração
- 11 – Anemômetro
- 12 – Sensor de direção
- 13 – Nacela, parte inferior
- 14 – Nacela, parte superior
- 15 – Rolamento de posicionamento
- 16 – Disco de freio de posicionamento
- 17 – Pastilhas de freio
- 18 – Suporte do cabo de força
- 19 – Torre

Figura 4: Componentes e estrutura esquematizada de um aerogerador de pequeno porte. CRESESB, 2002

A energia cinética do vento aumenta com a terceira potência de sua velocidade. A razão disso é que a energia cinética aumenta de forma linear com a densidade do ar e com a segunda potência da velocidade. Quando a velocidade do ar cresce, corre ainda adicionalmente mais massa por unidade de tempo pela área perpassada pelo rotor. Este fluxo de massa do ar cresce linearmente com a velocidade, o que leva como resultado a uma proporcionalidade da energia eólica com a terceira potência da velocidade do vento.

Devido ao forte aumento da energia eólica no caso de velocidades de vento crescentes, locais ricos em vento são especialmente interessantes.

Na velocidade nominal do vento, o aerogerador produz a sua potência nominal. Esta é sempre maior que a velocidade do vento de configuração e encontra-se geralmente entre 12 m/s e 16 m/s. Acima da velocidade nominal do vento, a potência do sistema é mantida constante pois, caso contrário, as cargas sobre todos os componentes do sistema continuariam crescendo levando a sobrecargas. No caso de velocidades muito altas do vento (geralmente a partir de 25 m/s) a máquina é desligada, girada para fora do vento (colocada de forma com que as pás do rotor não sejam movimentadas) ou é completamente deitada (sobre o solo), para evitar danos.

Na literatura, aerogeradores são distinguidos normalmente de acordo com a classificação apresentada na Tabela 2. Assim, aerogeradores de pequeno porte possuem uma potência nominal de até 30 kW, bem como um diâmetro do rotor de até 15m.

Tabela 2: Classificação de aerogeradores e dimensionamento típico
LEHMANN, KOENEMANN, 2005

Classe	Potência [kW]	Massa [kg]	Diâmetro do rotor [m]	Altura do cubo [m]
Aerogerador industrial	>500	>40.000	>45	>50
Aerogerador pequeno	<500	<40.000	<45	<50
Aerogerador Médio	<100	<9.000	<20	<35
Mini-aerogerador	<30	<1000	<15	<25
Micro-aerogerador	<1	<50	<3	<10

2.2 Princípios de construção e uso de materiais em aerogeradores de pequeno porte

Aerogeradores de pequeno porte são divididos em dois grandes grupos, como representado na Figura 5. Por um lado, há os aerogeradores, utilizados principalmente nos EUA, para transformar energia eólica em trabalho mecânico. Por causa do seu momento de rotação de arranque alto, estas máquinas são apropriadas especialmente para máquinas de trabalho como bombas de êmbolo e térmicas, serras e moinhos. O moinho holandês, espalhado nas planícies e nas regiões costeiras até algumas décadas atrás, foi utilizado como acionamento por engrenagem ou transmissão por correia para instalações de moagem ou outras máquinas. O aerogerador com asas à vela e os “Windmills” (amplamente divulgados nos EUA) são utilizados como acionamento de bombas alternativas para extrair água potável ou água subterrânea. Através de um eixo de manivela, a energia de rotação das asas é transformada em trabalho elevatório e transmitida à bomba alternativa através de um sistema de alavancas instalado na torre de treliça. A grande desvantagem destes “Windmills” é que o aerogerador deve ser posicionado diretamente em cima da locação de extração que, geralmente, se encontra na planície ou em vales onde via de regra não predominam situações de vento favoráveis.

O segundo grupo de aerogeradores transforma energia eólica em eletricidade através de um gerador. A energia elétrica pode ser armazenada com a ajuda de acumuladores, ser transportada através de linhas de transmissão ou ser transformada nas formas de energia necessitadas no local. Hoje em dia a maioria dos aerogeradores baseia-se neste tipo. Podem ser erguidos em quase todas as locações e evitando assim perdas da transmissão de energia

por causa da resistência na linha. As máquinas de alta velocidade⁸ com 2 a 4 pás e eixo horizontal são o tipo de construção talvez mais comum porque se aproximam mais do valor ótimo de c_p ⁹ 0,59, podendo realizar por causa disso um aproveitamento maximizado da energia eólica. Outra vantagem da utilização de máquinas de alta velocidade é que os geradores só começam a operar com alto número de rotações necessitando nenhuma ou uma pequena multiplicação da transmissão. Além disso, devido a quantidade reduzida de pás, comparando-se com máquinas que possuem quatro, dispêndio e custos são menores.

Para ambos os grupos principais de aerogeradores de pequeno porte existe um grande número de princípios de construção (cf. Figura 5).

Uma outra característica (de distinção) importante é o tipo de controle de potência e do número de rotações (cf. Tabela 3) que também torna-se visível na configuração construtiva e no desenho das máquinas. Na tabela a seguir, as diferentes possibilidades de concretização técnica são resumidas de forma avaliativa. A maioria dos aerogeradores de pequeno porte trabalha por motivos de segurança com uma combinação de vários sistemas para o controle de potência e do número de rotações.

⁸ Como máquinas de alta velocidade denominam-se aerogeradores cuja velocidade de rotação nas pontas das pás de rotor é na operação normal 6 a 12 vezes maior que a velocidade do vento atual.

⁹ O valor c_p resulta da proporção entre a potência mecânica do aerogerador e a do fluxo de ar imperturbado, definindo assim o grau de eficiência do sistema. No máximo, 59,3 % da energia eólica podem ser transformados em trabalho mecânico (GASCH, 1991).

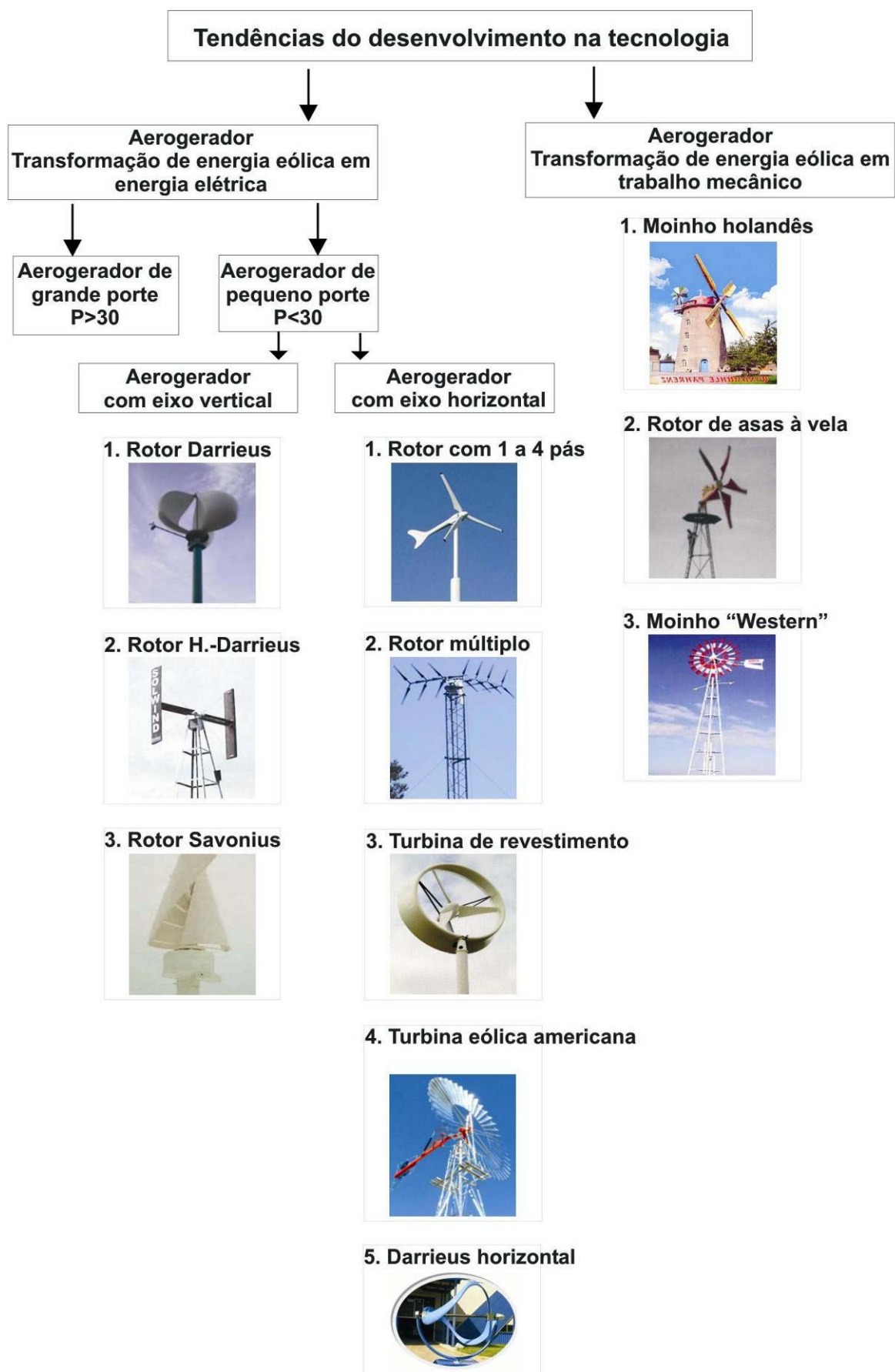


Figura 5: Representação de diversos tipos de aerogeradores de pequeno porte, exemplos seleccionados

Tabela 3: Possibilidades do controle de potência e do número de aerogeradores de pequeno porte
LÜTZ, 2005

Tipo de controle da potência e do número de rotações	Funcionamento	Avaliação
stall	Mecanismo auto-regulador do rompimento da corrente nas pás do rotor	<ul style="list-style-type: none"> - de baixo custo e pouca manutenção porque não são necessários partes móveis no rotor e nenhum sistema de controle complicado; - mau comportamento de partida no caso de ventos fracos; - cargas altas sobre as pás do rotor e o mastro
ativo stall	Mecanismo regulador ativo do rompimento da corrente nas pás do rotor	<ul style="list-style-type: none"> - variações no vento podem ser compensadas - em caso de tempestade, as pás podem ser viradas com o canto posterior para frente
pitch	Ajuste ativo do ângulo das pás de rotor à velocidade do vento	<ul style="list-style-type: none"> - posição das pás de rotor continuamente otimizada para a potência - bom comportamento de partida no caso de ventos fracos - cargas relativamente fracas sobre as pás do rotor e a torre - construção e regulação complexa e conseqüentemente cara - manutenção permanente necessária
passivo pitch	Ajuste passivo do ângulo das pás de rotor através de um sistema de molas que mantém as pás de rotor, apoiadas de tal forma que podem ser giradas, de forma ótima para a potência no vento	<ul style="list-style-type: none"> - além das mesmas vantagens do ajuste ativo do ângulo das pás de rotor, este procedimento não necessita de um sistema complexo de regulação e de pouca manutenção, sendo assim de baixo custo
Mecanismo de inclinação do rotor	quando a velocidade do vento aumenta, o rotor entra numa posição quase horizontal (a assim chamada posição de helicóptero)	<ul style="list-style-type: none"> - construção simples sem regulação - de baixo custo e pouca manutenção - alta proteção contra tempestades
Curto-circuito do gerador	Curto-circuito do gerador para frear as pás de rotor no caso de velocidades e números de rotação altas demais	<ul style="list-style-type: none"> - instalações adicionais desnecessárias - de baixo custo e pouca manutenção - não é apropriado para frenagens regulares em combinação com um regulador de carga utilizado freqüentemente como (segundo) freio de emergência
Girar para fora do vento	Um cata-vento lateral provoca que, no caso de velocidade do vento crescente, o rotor do sistema seja pressionado para fora da direção do vento	<ul style="list-style-type: none"> - baixos custos do sistema - construção simples - faixa ampliada de trabalho

Tão diversificada quanto os princípios de construção e funcionamento é também a utilização de materiais em aerogeradores de pequeno porte. A Tabela 4 apresenta uma seleção de materiais possíveis e já utilizados para os principais componentes das máquinas. O objetivo de desenvolvimento e configuração é sempre encontrar um meio-termo sensato entre funcionalidade, peso, resistência contra corrosão, vida útil e preço.

Tabela 4: Uso de materiais na construção de aerogeradores de pequeno porte baseado em ANCONA, 2001

Componentes principais	Componentes individuais	Materiais
Fundação	Fundação Placa da fundação Pesos de ancoragem	concreto concreto aço galvanizado a fogo concreto
Torre	Corpo da torre Flange da torre Conexões parafusadas Ancoragem da torre Dispositivo de montagem Cabos	aço de construção galvanizado a fogo concreto madeira aço galvanizado a fogo aço galvanizado a fogo aço inox cabos de aço galvanizado a fogo aço galvanizado a fogo cobre
Rotor	Pás de rotor Cubo	resina de poliéster resina de epoxi poliamida materiais compostos reforçados por fibra aço inox madeira aço para melhoramento (CrNiMo) aço fundido
Caixa da máquina	Caixa e catavento Eixo principal Rolamento Caixa multiplicadora Freio de disco Acoplamento Gerador Conexões parafusadas	resina de poliéster resina de epoxi poliamida fibra de vidro plástico reforçado por fibras de carbono aço galvanizado a fogo alumínio madeira aço para melhoramento (CrNiMo) aço fundido aço para melhoramento (CrNiMo) aços sem desgaste e resistentes contra calor aços para melhoramento materiais fundidos aços resistentes contra calor e pressão aço galvanizado a fogo aço inox aço galvanizado
Eletrônica	Transformador e sistemas de ligações	cobre plásticos aço de construção

2.3 Mercado internacional no segmento de aerogeradores de pequeno porte

2.3.1 Fabricantes e faixas de potência no mundo

O mercado internacional de pequenos aerogeradores concentra-se hoje por parte dos fabricantes em máquinas com potência nominal de até 5 kW. A participação destas faixas de

potência no mercado total de fabricantes é de cerca de 67 por cento (cf. Figura 6). Em princípio, o número de fabricantes se reduz com a crescente potência das turbinas.

O Brasil está representado com quatro fabricantes de máquinas na faixa até 5 kW. Nas faixas de potência mais altas não existem nem fabricantes nacionais nem sul-americanos (cf. Tabela 5).

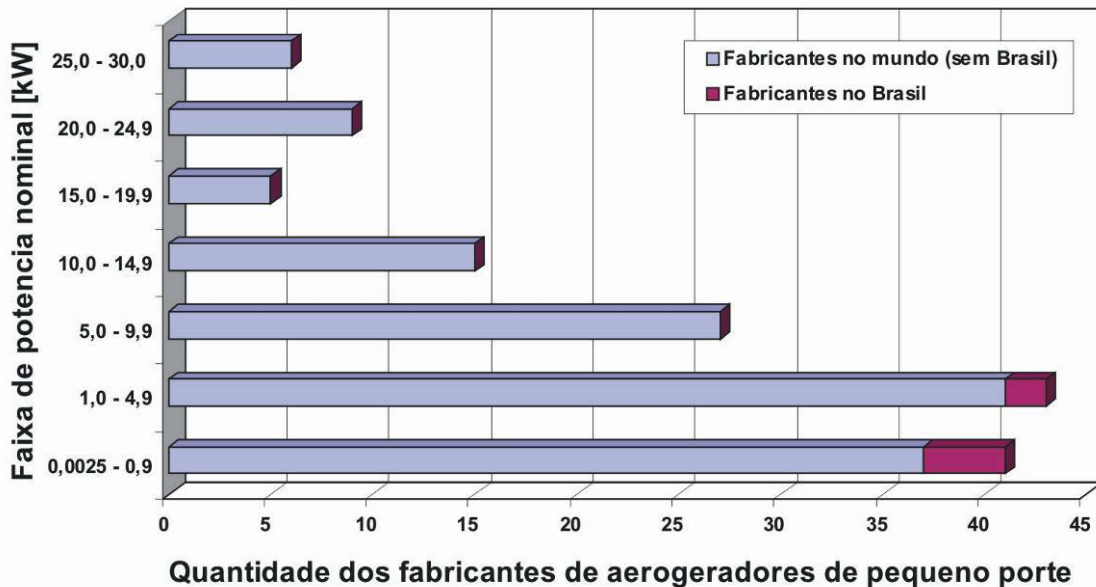


Figura 6: Vista geral do mercado dos fabricantes e das faixas de potência de aerogeradores de pequeno porte
Dados de TOCHTROP, 2005

Os 78 fabricantes, identificados no mundo, produzem mais de 190 modelos diferentes nas diversas faixas de potência (cf. Anexo H). Uma diversidade particular de fabricantes e tipos de sistema pode ser registrada nos países Alemanha, EUA e Espanha que também são líderes no mercado internacional de aerogeradores de grande porte (WIND TURBINE MARKET, 2006).

Tabela 5: Países produtores de aerogeradores de pequeno porte e a sua oferta de máquinas
Dados de TOCHTROP, 2005

País	Número de fabricantes	Número de tipos	Faixas de potência						
			0,025 - 0,9 [kW]	1,0 - 4,9 [kW]	5,0 - 9,9 [kW]	10,0 - 14,9 [kW]	15,0 - 19,9 [kW]	20,0 - 24,9 [kW]	25,0 - 30,0 [kW]
Austrália	3	7	X	X	X	X		X	
Brasil	4	6	X	X					
China	3	8	X	X					
Dinamarca	1	1		X					
Alemanha	16	45	X	X	X	X			X
Finlândia	1	2	X						

França	4	12		X	X	X	X	X	X
Grécia	1	2		X					
Grã-Bretanha	4	7	X	X	X		X	X	
Índia	2	9	X	X	X				
Irã	1	1		X					
Irlanda	1	2	X	X					
Itália	2	2						X	
Canadá	2	2	X	X	X	X			
Nova Zelândia	2	5		X	X	X			X
Nicarágua	1	1	X						
Países Baixos	2	8	X	X	X	X			
Áustria	1	1					X		
Peru	1	2	X						
Romênia	1	5	X	X					
Rússia	1	1			X				
Suécia	2	1	X						
Suíça	1	1			X				
Espanha	3	18	X	X	X		X		
África do Sul	2	6	X	X			X		X
Trinidad	1	1	X						
República Checa	3	9	X	X	X	X		X	
Ucrânia	1	2		X	X				
EUA	10	25	X	X	X	X	X	X	
Zimbábue	1	1	X						
Total	78	193							

2.3.2 Tendências e preços

Pequenos aerogeradores se afirmaram apesar do seu baixo rendimento de potência na aplicação como carregador de baterias, para o abastecimento autárquico com energia elétrica, como suporte do aquecimento, no bombeamento de água ou também pela operação à rede. Também a instalação simples sem a utilização de tecnologia pesada (p.ex. guindauto, caminhões de fundo baixo) é uma vantagem decisiva dos aerogeradores de pequeno porte. Enquanto construíam-se 10 a 20 anos atrás máquinas com estrutura mecânica tecnicamente baixa e tecnologia de regulação simples, elas se desenvolvem atualmente na direção de produtos de alta tecnologia, também por pressão das tendências de desenvolvimentos dos aerogeradores de grande porte. Estas máquinas se adaptam sempre mais às turbinas de Megawatt em relação à segurança operacional e a tecnologia de controle. Mas sob o ponto de vista econômico receberão somente a complexidade de tecnologia de regulação que realmente é necessária. Ainda poucos anos atrás, aerogeradores de pequeno porte eram construídos por técnicos amadores em trabalho manual partindo do rotor, passando pela orientação até a torre.

Hoje existem empresas que produzem estes conversores de vento em produção em série e em diversos espectros de potência.

Quase 90 por cento dos aerogeradores vendidos, são fornecidos por um punhado de fabricantes em série e os 10 por cento restantes predominantemente por empresas pequenas que produzem em fabrico individual (HACKER, 2004).

É verdade que, devido à crescente produção em série de aerogeradores de pequeno porte, os custos específicos das máquinas (atualmente aprox. 5.400,00 R\$/kW na faixa de potência de 5-30 kW, cf. Figura 7) vão baixar a longo prazo em todo mundo, porém, atualmente estes ainda são duas a três vezes mais altos que os de modernas máquinas grandes na faixa de Megawatt.

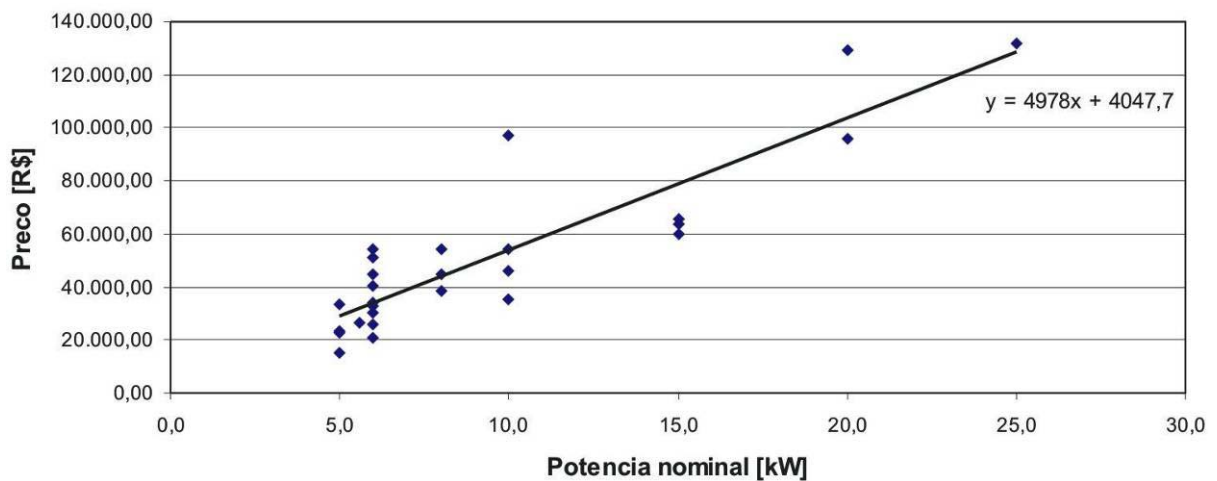


Figura 7: Custos de aerogeradores de pequeno porte em função de sua potência nominal (sem considerar os custos com transporte, montagem e se for o caso com importação)¹⁰ baseado em TOCHTROP, 2005

2.4 Mercado nacional, projetos de pesquisa e estado da tecnologia

Os quatro fabricantes nacionais de aerogeradores de pequeno porte (cf. 2.3.1), são representados a seguir (Tabela 6).

¹⁰ Foram analisados os custos de 28 modelos de aerogeradores pequenos de 21 fabricantes nacionais e internacionais.

Tabela 6: Fabricantes brasileiros de aerogeradores de pequeno porte
Páginas de Internet dos respectivos fabricantes



Fabricante	Enersud Indústrias e Solucoes Energéticas	AlterCoop	Cataventos do Nordeste	Aerogeradores Sul
Estado	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	Ceará	Rio Grande do Sul
Potência [kW]	0,24 / 0,4 / 1,0	0,5	0,54	1,5 / 2,0

Até agora não são produzidos aerogeradores de pequeno porte no mercado nacional que em relação à sua potência nominal ($P \geq 5$ kW), bem como à sua tecnologia amadurecida de regulação e de segurança operacional possam ser interessantes para o uso em modernos sistemas híbridos (capítulo 3.1.2.2 – 3.1.2.5) ou na geração paralela à rede (capítulo 3.1.2.6). Todas as máquinas ofertadas são configuradas para a carga de sistemas de baterias em combinação com micro-aplicações autárquicas (capítulo 3.1.1.1).

Uma série de projetos de pesquisa nacionais (cf. Tabela 7) ocupa-se, no entanto, há alguns anos com o desenvolvimento de novas concepções, componentes e tecnologia de máquinas.

Tabela 7: Projetos nacionais de pesquisa e de desenvolvimento dos últimos cinco anos na área da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte
Dados de CT BRASIL, 2005 e outros

Tema/objetivo do projeto	Instituição (UF)	Empresas participantes	Período do projeto	Instituição de apoio	Resultado do projeto
Desenvolvimento de componentes para aerogeradores de pequeno porte e projeto de uma turbina de 1,5 kW	UFRGS (RS)	PCE Projetos e Consultoria em Engenharia	2002-2004	FINEP Incubadora CIENTEL Engenharia e Consultoria Ltda.	Constituição da empresa <i>Aerogeradores Sul</i> e produção do <i>AEROSUL</i> com uma potência de 1,5 / 2,0 kW
Desenvolvimento de um aerogerador de pequeno porte de 10 kW	UFSC (SC)	MILANO Mecânica e Metalúrgica APPE Assessoria para Projetos Especiais WEG Indústrias S/A	2003- hoje	FINEP	Produção do protótipo
Desenvolvimento de um aerogerador de pequeno porte de 5 kW	UERJ (RJ)	ENERSUD Indústria e Soluções	2003- hoje	FINEP	Em aberto

		Energéticas			
Desenvolvimento de um aerogerador de pequeno porte com eixo vertical	PUC (RS)	IEM Intercâmbio Eletro Mecânica	2003- hoje	FINEP	Em aberto
Desenvolvimento de um aerogerador de pequeno porte com eixo vertical e potência nominal de 50 kW	ITA (SP)	Dynamics Indústria e Comércio	2003- hoje	FINEP	Em aberto
Desenvolvimento de sistemas de regulação para aerogeradores de pequeno porte	FURG (RS)	ProWind Energias Alternativas	2005- hoje	FAPERGS	Em aberto
Desenvolvimento de componentes para aerogeradores de pequeno porte até 30kW serem utilizados em sistemas híbridos ¹¹	UFRGS (RS)	EPI Energias, Projetos e Investimentos	2005- hoje	FAPERGS	Em aberto

A demanda, em geral, crescente por aerogeradores de pequeno porte modernos no Brasil ainda está sendo satisfeita por importações caras do exterior.

2.5 Causas principais de avarias de aerogeradores de pequeno porte

Entre as causas de avaria de aerogeradores (ver Figura 8), lideram falhas de componentes em consequência de fadiga de material, desgaste ou afrouxamento e falhas no sistema de controle. Influências externas, como tempestade, trovoada ou falha da rede, são diretamente responsáveis por cerca de 14 por cento das avarias de sistemas. Uma parte da fadiga de material considerável (porém até hoje não quantificada) é provocada indiretamente devido influências externas, especialmente meteorológicas.

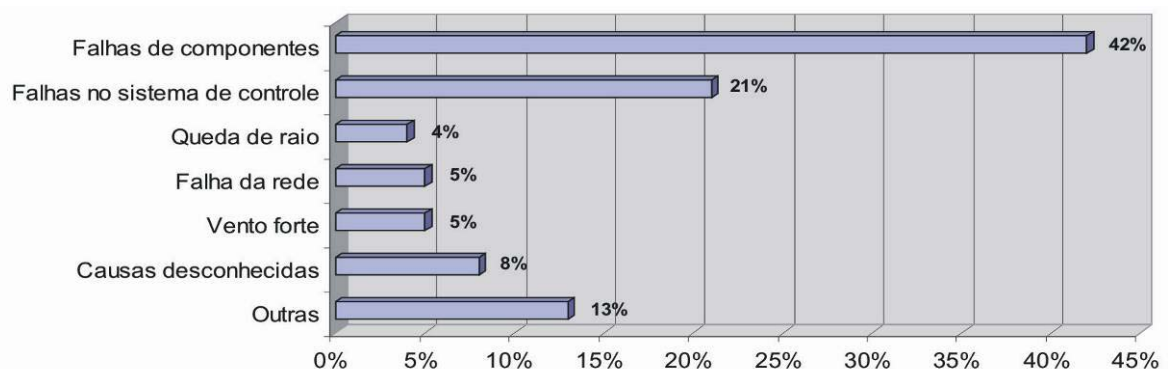


Figura 8: Causas principais de avarias de aerogeradores¹²

Fonte: Dados de HAASE, 2002

¹¹ Com referência a este projeto, (cf. 5.2) surgiu a presente tese.

¹² Os dados baseiam numa pesquisa sobre o comportamento operacional de 1.335 aerogeradores com vida de 2 a 11 anos.

A tabela a seguir apresenta uma síntese dos problemas materiais mais frequentes de componentes individuais da máquina e de suas conseqüências para o aerogerador de pequeno porte.

Geralmente, precede à falha de componentes mecânicos um estado no qual a avaria iminente é detectável por métodos de medição apropriados. Atenção particular merece, neste contexto, a análise de vibração e o monitoramento à distância do sistema (ver capítulo 4.6).

Tabela 8: Falhas de material típicas em componentes de aerogeradores de pequeno porte e as suas conseqüências para o estado operacional baseado em HAASE, 2002

Diagnóstico	Conseqüências possíveis
Rotor	
Massa centrífuga das pás de rotor	Alta carga de vibração sobre o cubo do rotor, rolamento do rotor e a torre Torção da torre Redução da extração de energia
Assimetria aerodinâmica do rotor	Alta carga de vibração sobre cubo, rolamento e a torre Torção da torre Extração de energia reduzida
Falha no rolamento do rotor	Aceleração transversal e axial de todo o sistema Torção da torre Redução do rendimento de energia Incômodo por poluição sonora
Ruptura da pá de rotor	Aceleração forte e repentina de toda a máquina Torção da torre Avaria do sistema
Caixa de multiplicação	
Desgaste de dentes	Redução da funcionabilidade da caixa de multiplicação Incômodo por poluição sonora
Ruptura de dentes	Avaria da caixa de multiplicação
Danos no rolamento	Redução do grau de eficiência Redução da funcionabilidade Avaria da caixa de multiplicação
Gerador	
Danos no rolamento	Avaria do gerador
Freio	
Desgaste	Rotor não pode ser mais freado Altas cargas sobre o rotor, rolamento e a torre no caso de vento forte
Afrouxamento	Avaria do sistema de frenagem Perigo que o sistema se embala em tempestade
Torre	
Fadiga, afrouxamento	Aceleração transversal e axial da caixa de máquinas
Ruptura	Avaria do sistema Perigo de danos para pessoas

Catavento para a orientação	
Fadiga, afrouxamento	Afluxo de ar inclinado Redução de desempenho Alta carga de vibração de todos os componentes da máquina
Ruptura	O plano das pás de rotor gira automaticamente contra a direção do vento Avaria do sistema Perigo de danos para pessoas
Ligações parafusadas e de flanges	
Afrouxamento	Vibração de componentes de sistema Avaria de componentes de sistema
Ruptura	Falha de funcionamento ou destruição de componentes Avaria de todo o sistema Perigo potencial de danos para pessoas

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PARTICULARIDADES METEOROLÓGICAS, DA TÉCNICA DE SISTEMA E SÓCIO-ECONÔMICAS E AS EXIGÊNCIAS RESULTANTES PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE EM USO NO BRASIL

3.1 Pré-requisitos relevantes para o uso de aerogeradores de pequeno porte no Brasil

3.1.1 Condições climáticas

Dois dos problemas de material que surgem com mais frequência em aerogeradores de pequeno porte no contexto dos pré-requisitos climáticos locais são desgaste e corrosão. No primeiro caso, ocorre o desgaste do material por influências mecânicas na superfície (p.ex. por areia no fluxo do ar) enquanto, no caso da corrosão, o dano das propriedades do material resulta de reações químicas entre o material e o seu ambiente (p.ex. devido à alta umidade do ar e irradiação solar).

Ambos reduzem a vida útil e a segurança operacional de aerogeradores de pequeno porte prejudicando principalmente o uso econômico desta tecnologia. Para a configuração da máquina, o conhecimento das condições climáticas da potencial área de uso é, por isso, indispensável para poder selecionar, em função das influências meteorológicas a serem esperadas, os materiais adequados e desenvolver soluções construtivas correspondentes.

As situações locais de vento são, ao lado da configuração construtiva e do uso de materiais, de grande importância para a avaliação energética da locação, pois o rendimento de energia da máquina depende destas.

Nos capítulos subseqüentes, são expostos os fatores de influência meteorológicos decisivos para o uso de aerogeradores de pequeno porte no Brasil.

3.1.1.1 Temperatura

O Brasil estende-se sobre três zonas climáticas, o norte tropical, o centro subtropical e o sul com mudança sensível de estações. Correspondentemente às zonas climáticas, três zonas de temperaturas também podem ser definidas (ver Figura 9).

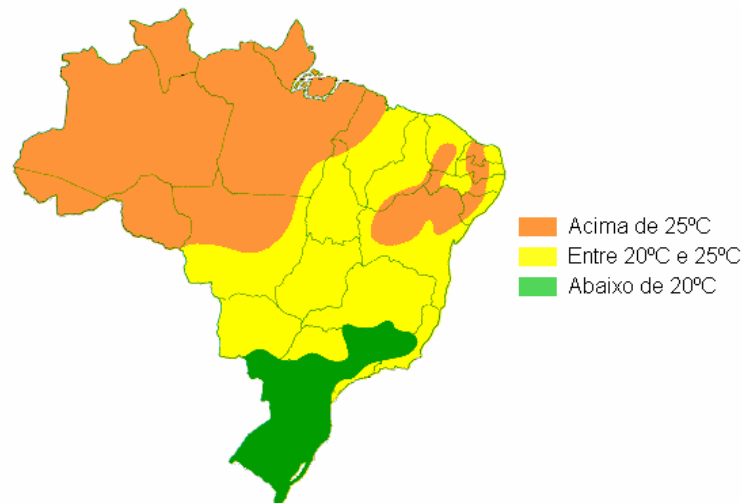


Figura 9: Médias Anuais de Temperatura
ATLAS ESCOLAR MELHORAMENTOS, 2000

As temperaturas têm influência sobre a densidade do ar e assim, conseqüentemente, sobre a energia cinética contida no vento. O rendimento de um aerogerador cresce sob condições inalteradas de vento com densidade do ar crescente e, portanto, temperaturas decrescentes. O mesmo modelo de um aerogerador de pequeno porte fornecerá, por conseqüência, rendimentos de energia sensivelmente mais altos no sul do Brasil que no norte.

Para a configuração de máquinas e de sua faixa de temperatura operacional, antes de tudo, as temperaturas máximas são de grande importância. Os seguintes valores máximos foram registrados em várias localidades nos últimos vinte anos.

Tabela 9: Temperaturas mais altas medidas no Brasil
Dados WEATHERBASE, 2006

Estação meteorológica	Porto Alegre	Manaus	Fortaleza	Belem	Rio de Janeiro
Temperatura máxima [°C]	41	37	38	41	43

3.1.1.2 Umidade do ar

Uma alta umidade do ar local favorece a corrosão de materiais, oxidando a água contida no ar no material, com temperaturas decrescentes do ambiente ao chegar a baixo ponto de condensação. Especialmente sensíveis para a umidade do ar, são todos os componentes do sistema de metal e os circuitos de conexão integrados (transistores, condensadores, resistências e indutividades) (BINGEL, 1993).

A umidade absoluta do ar e consequentemente a capacidade do ar de absorver água aumenta com a temperatura. Ao mesmo tempo, a umidade do ar depende da propriedade e da existência de água. Ambos os critérios, isto é temperaturas altas (cf. 3.1.1.1) e, ao mesmo tempo, a existência de muita água e assim de uma grande base para a criação de vapor d'água através da evaporação, são dados no Brasil.

Valores especialmente altos e uniformes podem ser observados como consequência na região da Amazônia com umidade relativa do ar permanentemente acima de 80% (Figura 10).

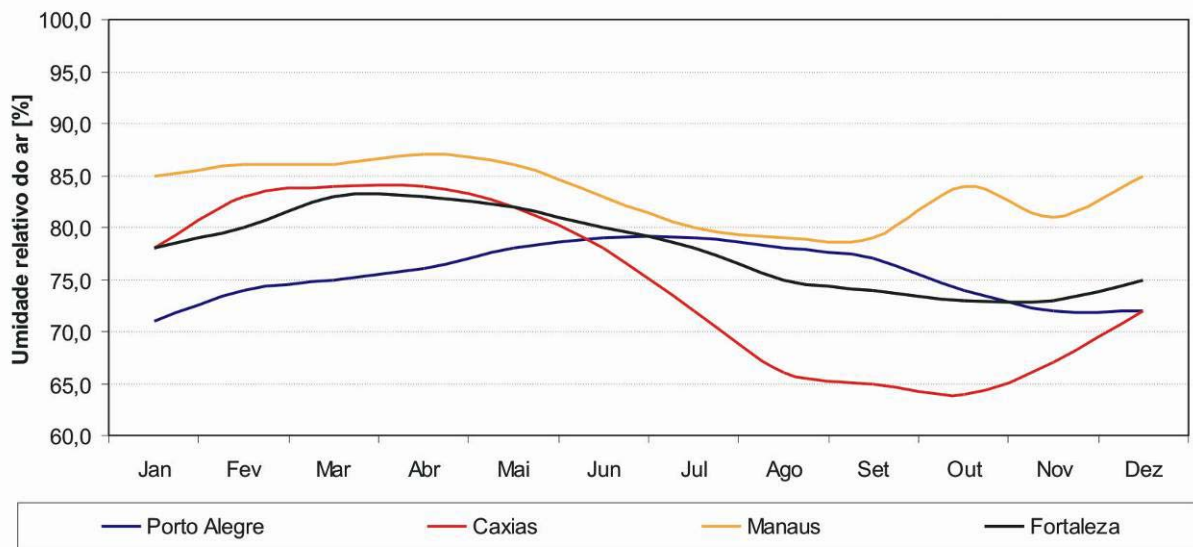


Figura 10: Trajetória média anual da umidade relativa do ar de locais selecionados no Brasil, representando diferentes regiões (período de medição: 1984-2005)
Dados WEATHERBASE, 2006

3.1.1.3 Vento

As velocidades máximas do vento a serem esperadas na locação do aerogerador são, primordialmente, de importância para o dimensionamento e a seleção de material dos seus componentes, especialmente das pás de rotor, da torre (bem como, se for o caso, de sua ancoragem), da fundação, do sistema de frenagem e do controle de número de rotações e da potência.

Em março de 2004, um furacão atingiu pela primeira vez o sul do Brasil. O furacão *Catarina* provocou com velocidades do vento maiores que 180 km/h (50 m/s) grande destruição em edifícios nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (RIBEIRO, 2004) e representa o máximo de velocidades do vento jamais registradas no Brasil.

Para a configuração da potência nominal de um gerador e, conseqüentemente, da potência do gerador o qual, devido às suas dimensões e ao seu peso, possui influência sobre toda a construção do sistema, bem como sobre a seleção do material, são necessários os conhecimentos das velocidades locais do vento, merecendo atenção especial a trajetória anual da velocidade média do vento, bem como a distribuição das velocidades de acordo com as classes. Somente depois de alcançar a velocidade nominal do vento, aerogeradores trabalham com a potência nominal que, p.ex., é alcançado no Sul do Brasil durante 30-40% do tempo operacional e no Nordeste durante 35-45% (ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, 2000). Nisto, oscilações sazonais do potencial eólico podem ser consideráveis. A potência do gerador deve ser assim escolhida de forma ótima de acordo com o caso de aplicação e com as situações brasileiras de vento. Utilizando o aerogerador de pequeno porte em conjunto com outras fontes de energia (sistemas híbridos, cf. 3.1.2.2 – 3.1.2.5) surge no desenvolvimento do projeto a tarefa complexa de encontrar uma configuração global que possa fornecer durante o ano inteiro um nível energético contínuo.

Como já ficou evidente no extrato do Atlas de vento do Brasil no Figura 1 (p. 6) podem ser registradas altas velocidades do vento acima da média especialmente no Nordeste (Estados: Ceará, Rio Grande do Norte), bem como no Sul do Brasil. Medições próprias da *eab* confirmaram estes valores (Figura 12 e Figura 11). Em relação à trajetória anual, a mesma tendência é provada para todo o Brasil. Nos meses de agosto a fevereiro, as melhores situações de vento podem ser registradas. Além disso, pode ser observada uma amplitude de oscilação bem mais alta dos valores no decorrer do ano que nas regiões de maior altitude.

Devido ao grande número de fatores específicos da locação dos quais depende a velocidade local do vento (p.ex. localização geográfica, topografia, rugosidade do terreno, obstáculos da corrente) (FADIGAS, 2002), não se pode fazer uma afirmação universal em relação a valores concretos. Por isso sempre deve ser realizada uma medição do vento na locação potencial de um aerogerador de pequeno porte caso não se possa recorrer a dados meteorológicos locais.

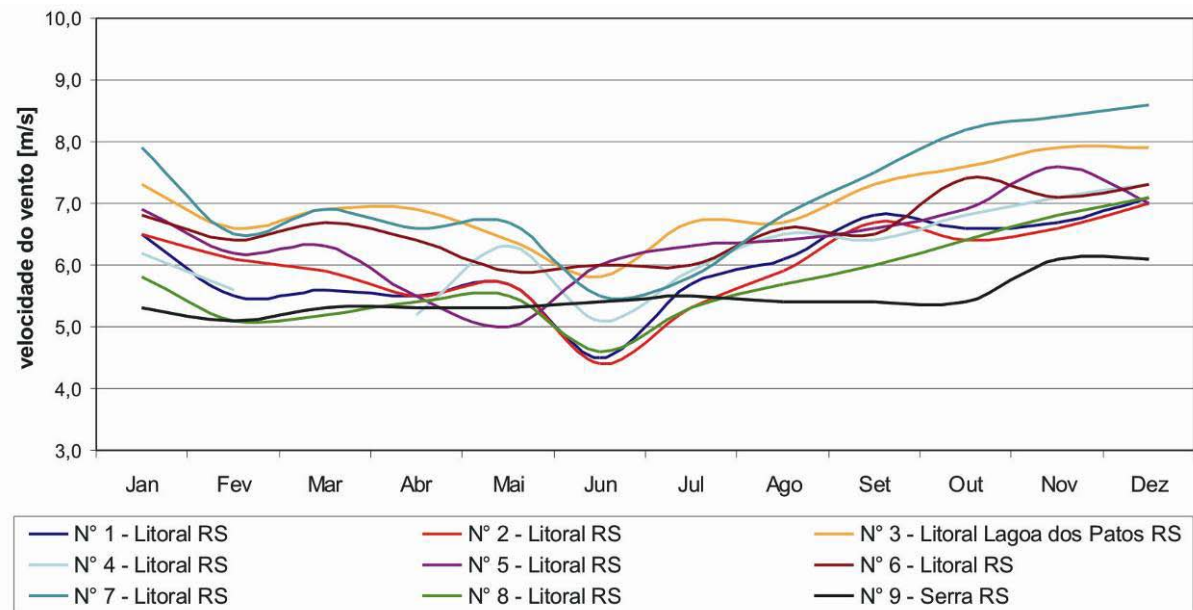


Figura 11: Velocidades médias do vento medidas na altura de 30 m em locais geograficamente diferentes no Rio Grande do Sul (período de medição: 2002-2005)¹³

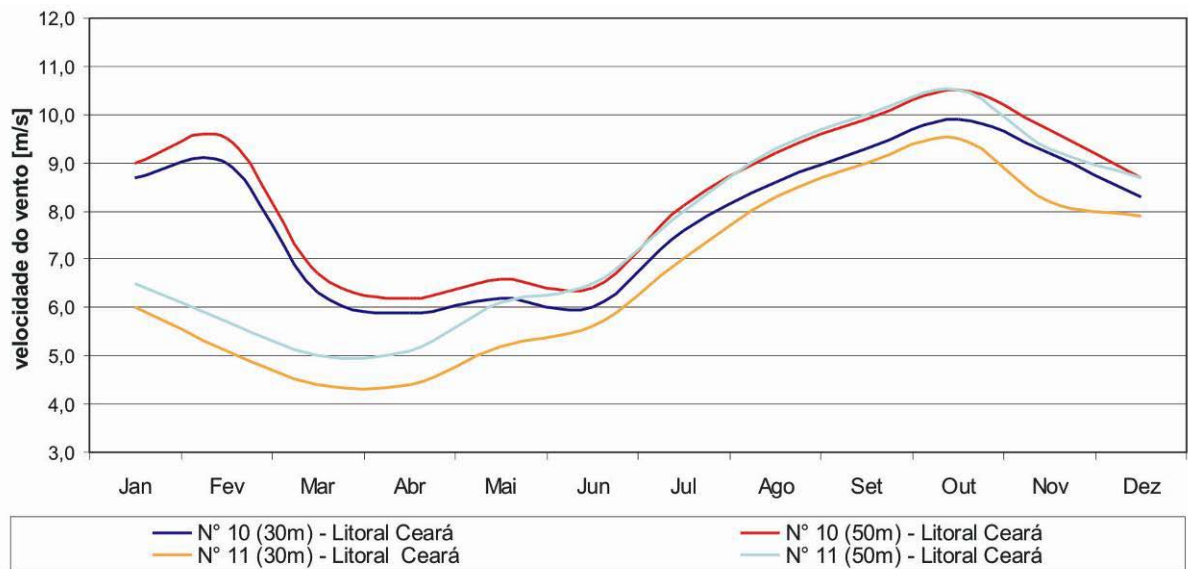


Figura 12: Representação comparativa das velocidades do vento medidas de duas estações de medição na costa do Estado do Ceará (período de medição 2002-2004)¹⁴

¹³ As medições foram realizadas pelo próprio autor, no âmbito do desenvolvimento de projetos de parques eólicos grandes, encomendadas pela *eab technology group*.

¹⁴ As medições foram realizadas por funcionários da *Ventos Ltda.*, filial da *eab technology group*, com sede em Fortaleza.

3.1.1.4 Areia no fluxo do ar

Areia no fluxo do ar, isto é, areia levantada e transportada pelo vento, leva, por um lado, a uma fricção mecânica aumentada e conseqüentemente a um desgaste prematuro das pás de rotor com conseqüências negativas para o perfil aerodinâmico destas. Em razão disso prejudica também o rendimento energético e o comportamento de vibração de todo o sistema. Por outro lado, pode, ao penetrar na caixa de máquinas, através de seu depósito e bloqueando componentes mecânicos, provocar danos consideráveis na máquina.

A seguinte figura compara a distribuição média anual de dias com areia no fluxo do ar de três cidades brasileiras que, por sua localização no litoral, representam localidades com mais areia no fluxo do ar a ser esperada.

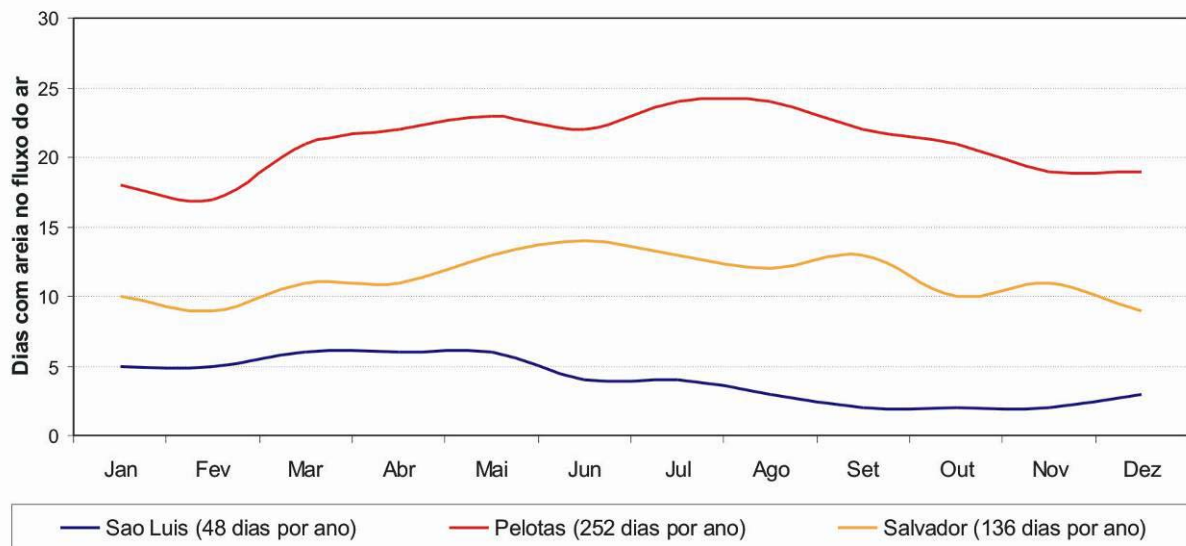


Figura 13: Número médio de dias com areia no fluxo do ar em diferentes cidades litorais brasileiras (período de medição: 1985-2005)
Dados WEATHERBASE, 2006

O número total de dias com areia no fluxo do ar varia consideravelmente com um aumento de cinco vezes entre São Luís e Pelotas e cresce geograficamente do norte para o sul. A amplitude sazonal nas localizações é, no entanto, baixa.

3.1.1.5 Irradiação solar

A parte ultra-violeta da radiação solar leva, a longo prazo, a esforços graves de componentes plásticos (corrosão de plásticos). Isto porque a radiação UV pode desencadear com grande eficiência reações de oxidação que, no final, levam a uma duração de funcionamento menor (BAM, 2004).

Sob a influência da irradiação solar, plásticos podem inchar, ficar porosos, mudar de cor, sofrer indifusões, criar bolhas, depolimerizar, dissolver-se e sofrer um tipo de corrosão de fissura sob tensão com as respectivas correspondentes para o componente (KORROS, 2006).

Por outro lado, a irradiação solar não tem conseqüências negativas para metais.

A parte de UV da radiação global é de aprox. 8% (LEICHTER, 2004). A seguinte figura fornece uma vista geral da irradiação solar global sazonal no Brasil.

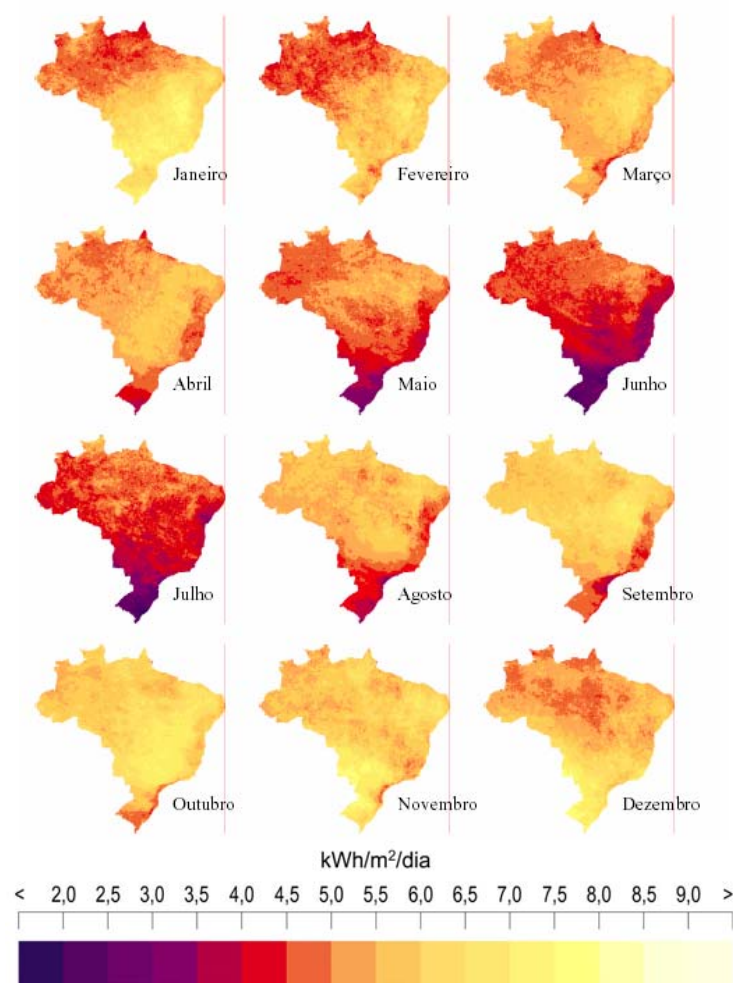


Figura 14: Mapas de irradiação solar global média mensal para o território brasileiro a partir de dados climatológicos e imagens de satélite GOES-8 para o ano de 2000
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005

A irradiação solar, e, conseqüentemente, a intensidade da radiação solar ultra-violeta deve ser avaliada como muita alta em todo o Brasil. Os seus maiores valores nos meses de verão são duas a três vezes maior que p.ex. no sul da Europa (EUROPEAN SOLAR RADIATION ATLAS, 2000).

3.1.1.6 Teor do sal no ar

Na instalação de aerogeradores de pequeno porte na zona litoral, todos os componentes externos são expostos ao ar salubre do mar que favorece a corrosão de componentes. A alta umidade do ar no Brasil ainda amplia este efeito, pois, assim, de forma absoluta, mais sal agressivo é transportado para os componentes externos dos sistemas.

3.1.2 Pré-requisitos técnicos do sistema e tipos de operação

Nos seguintes itens, será exposto o estado da tecnologia nacional e internacional referente às possibilidades da operação e da inserção de aerogeradores de pequeno porte para as gerações de energia elétrica autárquica e paralela à rede. O equipamento técnico e a configuração do aerogerador dependem do tipo de operação previsto.

3.1.2.1 Aerogeradores de pequeno porte como simples carregadores de baterias

O uso de aerogeradores de pequeno porte para a carga de baterias destinado a utilizações autárquicas pequenas (p.ex. operação de geladeiras, sistemas de iluminação, televisores e rádios em regiões afastadas, bem como estações meteorológicas, estações de rádio, bóias radiofônicas, veleiros, etc.) é hoje o mais freqüente tanto no Brasil quanto no resto do mundo. Tais turbinas possuem geralmente uma potência nominal entre 0,2 e 3,0 kW tendo diâmetros de rotor de até 3m. As exigências à tecnologia de regulação e à máquina são relativamente pequenas.

Para armazenar a energia elétrica fornecida pelo gerador, esta corrente alternada é transformada em corrente contínua e um acumulador (bateria) é carregado com a respectiva amperagem. Esta tarefa é assumida por um regulador de carga. Este providencia que,

dependendo do tipo e do tamanho da bateria e considerando o estado atual de carga, corre a corrente de carga apropriada. Além desta função de carga, incluindo a proteção contra sobrecarga, alguns reguladores de carga ainda assumem o trabalho de proteção contra descarga total. Esta função prolonga a vida útil do carregador porque a maioria de tipos de acumuladores não suporta repetidamente descarga demasiadamente grande. Quando a carga cai abaixo de certo valor os consumidores são separados do abastecimento com energia elétrica. Parcialmente, também há a possibilidade da subdivisão dos consumidores, conforme a sua importância. Esta ligação de prioridade desliga consumidores "mais importantes" somente num momento posterior (BOKU, 2006).

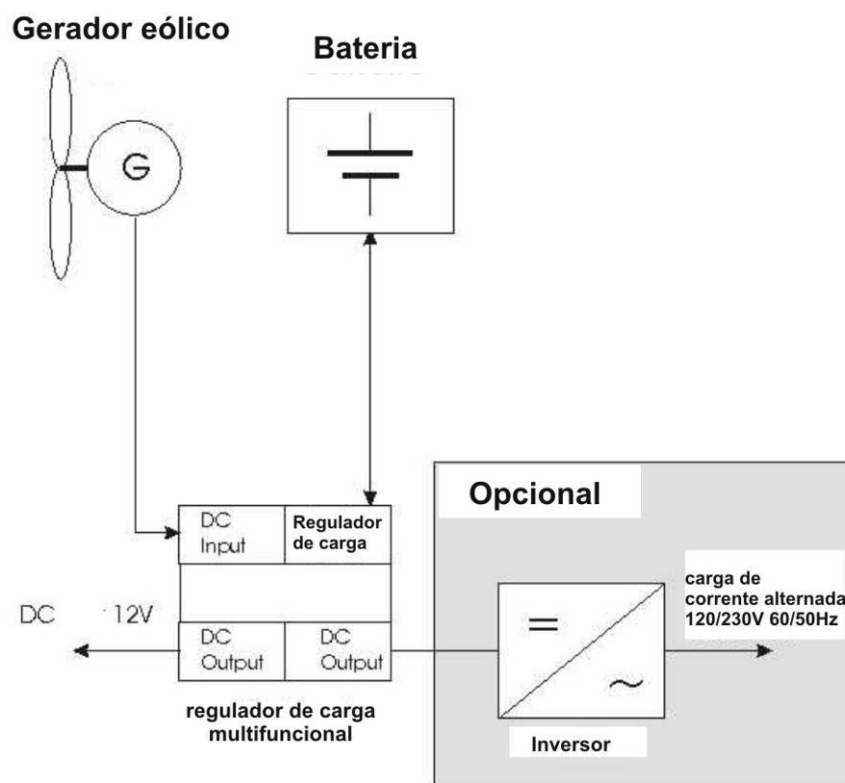


Figura 15: Diagrama em bloco de um sistema simples de carga de bateria com aerogerador de pequeno porte

Ao dimensionar o gerador eólico, o carregador de carga e a bateria, deve ser observado (como também nos sistemas apresentados em seguida) que estes precisam estar sintonizados entre si. Além disso, toda a configuração destes componentes deve ser escolhida de acordo com a demanda por energia (também distribuída de acordo com a estação) e com a oferta de vento a ser esperada. Adicionalmente, deve ser considerada especialmente a potência do gerador na velocidade do vento a ser esperada predominantemente e, além disso, os períodos de falta de ventaria devem ser atravessados. Este atravessamento (menor) da carência de

oferta de vento pode ser realizado através de reservas de armazenamento suficiente (inclusive considerando o grau de eficiência do processo de carga e da auto-descarga que ocorre).

3.1.2.2 Rede ilhada com aerogerador e gerador a óleo diesel sem bateria

Em sistemas ilhados deste tipo, só trabalha um dos geradores de energia elétrica de vez, p.ex. um aerogerador com gerador síncrono, formando assim uma rede (Figura 16) sem acumulador intermediário adicional. O aerogerador é regulado por uma frequência constante da rede e um número de rotações constantes. O valor atual do número de rotações é retirado da rede própria através da frequência da rede. Ultrapassando o valor calculado na rede, devido a altas velocidades do vento ou rajadas de vento, o controle do ângulo de fase liga uma carga de frenagem elétrica, os assim chamados „Dumploads“ (p.ex. resistências de filamento). Assim o número de rotações e/ou a frequência da rede são mantidos constantes (LIETZMANN, 2000).

Os desvios da frequência do número de rotações e/ou e da rede são extraordinariamente baixos sob condições operacionais. Caso um consumidor elétrico seja ligado neste sistema, o valor da demanda de consumo é retirado da potência de frenagem. A potência, porém, não pode ultrapassar a atual potência de regulação. Se isso for o caso, a frequência calculada não pode ser mantida e o aerogerador é obrigado a parar.

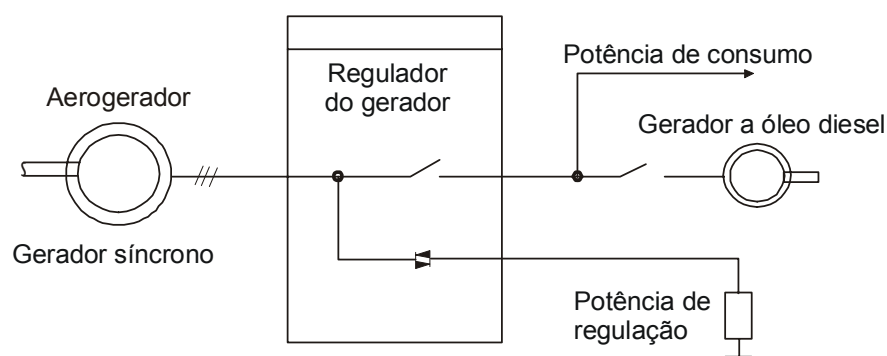


Figura 16: Diagrama em bloco de um aerogerador de pequeno porte com gerador síncrono na operação em rede ilhada
LIETZMANN, 2000

Uma desvantagem deste sistema é que só pode ser retirada tanta potência elétrica quanta o aerogerador produz no respectivo momento. O consumidor então é exortado a saber exatamente qual potência está sendo produzida atualmente para que ele possa influenciar de

acordo com a demanda a disponibilidade de seus aparelhos elétricos. A regulação utilizada libera somente a potência desejada para os consumidores se um fornecimento de energia sem problemas pode ser assegurado pelo aerogerador. Ocorrendo calmaria, o aerogerador é parado no caso de um determinado número de rotações (FRÖHLER, 2005; LIETZMANN, 2000).

Outra desvantagem é o grande desgaste do gerador a óleo diesel porque este ou é ligado e desligado com frequência ou trabalha com potência baixa, o que tem como consequência um grau de eficiência baixo do gerador (LUKAS, 2001).

3.1.2.3 Rede ilhada com operação paralela de aerogerador de pequeno porte e gerador a óleo diesel

Neste tipo do sistema autônomo existe maior segurança de abastecimento para o consumidor. Através da frequência da rede, decide-se quando, em sistemas vento-diesel, os geradores a óleo diesel (um ou mais) são ligados para manter a potência na rede (Figura 17). Em função do estado do sistema, a frequência da rede regula-se no seu valor calculado de 60 (50) Hz \pm 2 %.

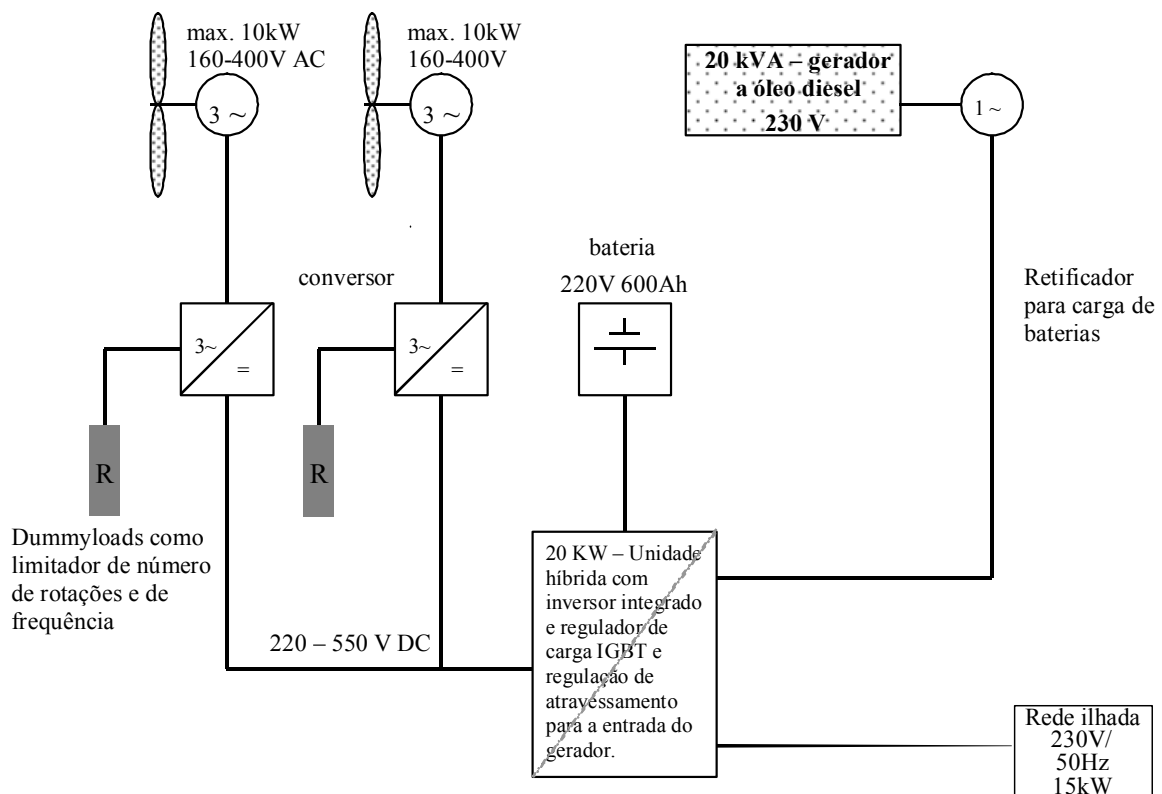


Figura 17: Diagrama em bloco de uma solução de rede ilhada com energia eólica e óleo diesel, com operação paralela de aerogerador e gerador a óleo diesel
AUTER, 2005

Caso a frequência encontre-se acima do valor calculado, somente o aerogerador trabalha no sistema. Quando a frequência se reduz, a energia ainda a ser retirada do vento também cai. Neste caso o ou os gerador(es) a óleo diesel devem ser ligados para manter a rede estável. Cada um dos geradores de energia elétrica (aerogerador, gerador a óleo diesel) possui uma curva de frequência própria. A limitação de potência do aerogerador utilizado é realizada através do princípio stall (ângulo fixo da pá do rotor, ruptura do fluxo de ar nas pontas da pá – ver também Tabela 3). Então o sistema é operado como descrito no capítulo 3.1.2.2. porque possui uma prioridade maior neste caso. Havendo uma sobrecarga ou a redução da frequência do aerogerador devido a uma demanda por potência não coberta por um espaço de tempo curto, o ou os gerador(es) a óleo diesel é/são ligados. O valor calculado da curva de frequência do/s gerador/es fica um pouco abaixo do valor do aerogerador.

Quando a oferta de vento volta a crescer e, por consequência, a potência fornecida pelo aerogerador, o ou os gerador/es devem absorver retornos a partir de determinado valor calculado (dependendo da curva de frequência própria e do controle). Ao alcançar o valor limite, eles desligam-se da rede (FRÖHLER, 2005).

Uma outra possibilidade é que, tendo altas cargas básicas, os geradores a óleo diesel operam constantemente enquanto o aerogerador serve, no caso de oferta de vento suficiente, somente para reduzir o consumo de combustível dos aerogeradores a óleo diesel (LIETZMANN, 2000).

3.1.2.4 Aerogeradores de pequeno porte em redes ilhadas combinando energia fotovoltaica e eólica

Usando combinações de sistemas fotovoltaicos e aerogeradores, é decisivo determinar qual das respectivas fontes de energia como o sol e também o vento estejam à disposição para poder assegurar um abastecimento básico estável na rede autárquica. O dimensionamento dos componentes individuais e a configuração do sistema global e, conseqüentemente, os custos do sistema global são determinados pelos dados meteorológicos da locação (velocidade média anual do vento, horas e intensidade de irradiação solar).

Em regiões que dispõem tanto de boas situações de vento quanto de alta irradiação solar, oferece-se o uso destes sistemas. Para atravessar oscilações meteorológicas, acumuladores podem ser utilizados como sistema de armazenagem. A Figura 18 mostra uma

das diversas combinações como aerogeradores de pequeno porte podem ser integrados em tal solução de rede ilhada (LIETZMANN, 2000).

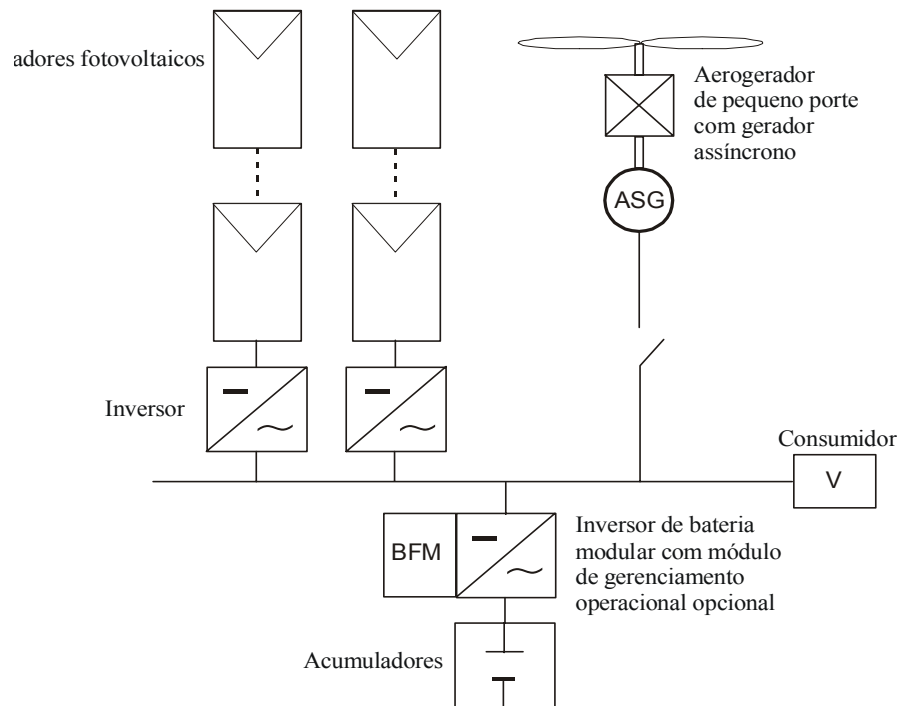


Figura 18: Esquema de um sistema de rede ilhada fotovoltaico-eólico
FRÖHLER, 2005

3.1.2.5 Modernas soluções técnicas para eletrificação descentralizada com aerogeradores de pequeno porte

A demanda crescente internacional, incentivada por diversos programas governamentais para a eletrificação de áreas rurais (cf. capítulo vi) estimulou os desenvolvimentos técnicos nesta área. Soluções e propostas modernas para a eletrificação descentralizada de aerogeradores de pequeno porte podem ser classificadas na situação atual de acordo com a sua voltagem (DC ou AC):

- **Rede local de AC com componentes acoplados de DC:**

Esta tecnologia surgiu da exigência de poder ligar consumidores de AC (faixa média de potência) com geradores de DC e, além disso, carregar a bateria no lado DC através de um motor à combustão. Estas configurações de sistema servem para o abastecimento de consumidores afastados com demanda por energia de até 10 KW (p.ex. casas rurais, comunidades, pequenas empresas ou

fazendas). A faixa de potência total encontra-se entre 1 a 10 kW, a voltagem de DC abrange 12 a 48 V (GABLER, 1999).

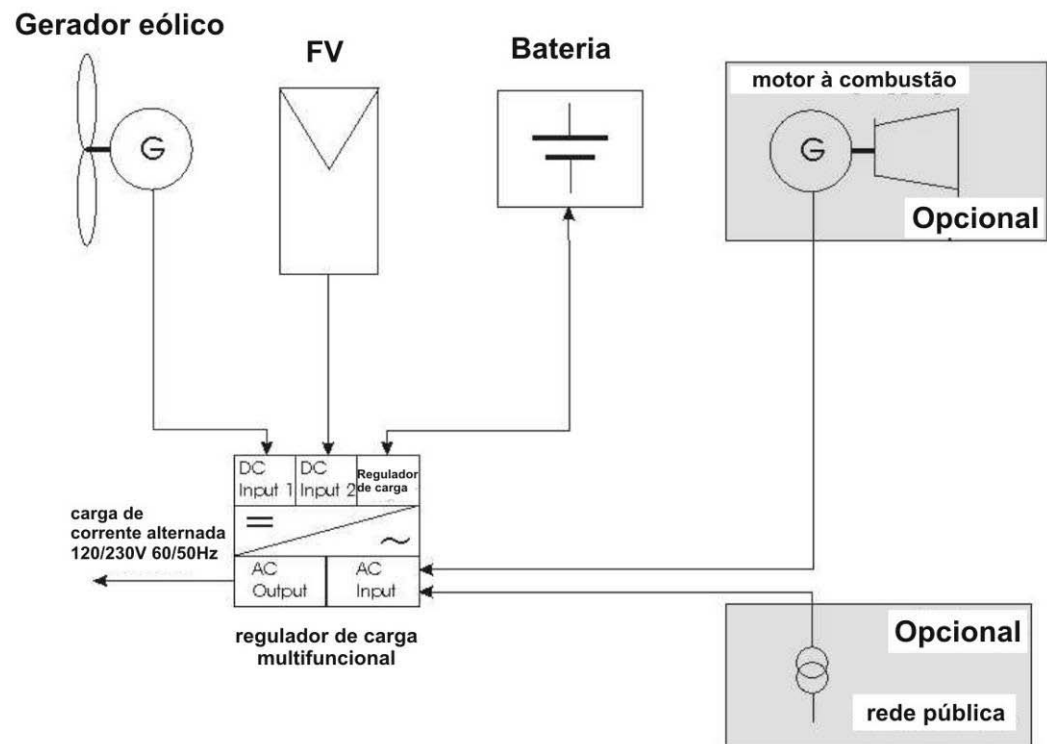


Figura 19: Pequeno sistema ilhado com potência AC e componentes DC acoplados

- **Sistemas AC acoplados de forma modular**

Sistemas flexíveis com componentes modulares podem ser montados através do acoplamento de todos os consumidores e produtores no lado AC. Conforme as aplicações e as fontes de energia disponíveis, diferentes fontes de energia renováveis e convencionais podem ser integradas. Quando o regulador e os motores à combustão estão previstos para isto, a conexão à rede pública é possível. Além disso, o sistema pode ser ampliado de forma simples através de componentes adicionais ou de geradores de energia adaptando-o à demanda crescente por energia. Estas estruturas podem ser utilizadas para o abastecimento de todos os consumidores elétricos. (GABLER, 1999).

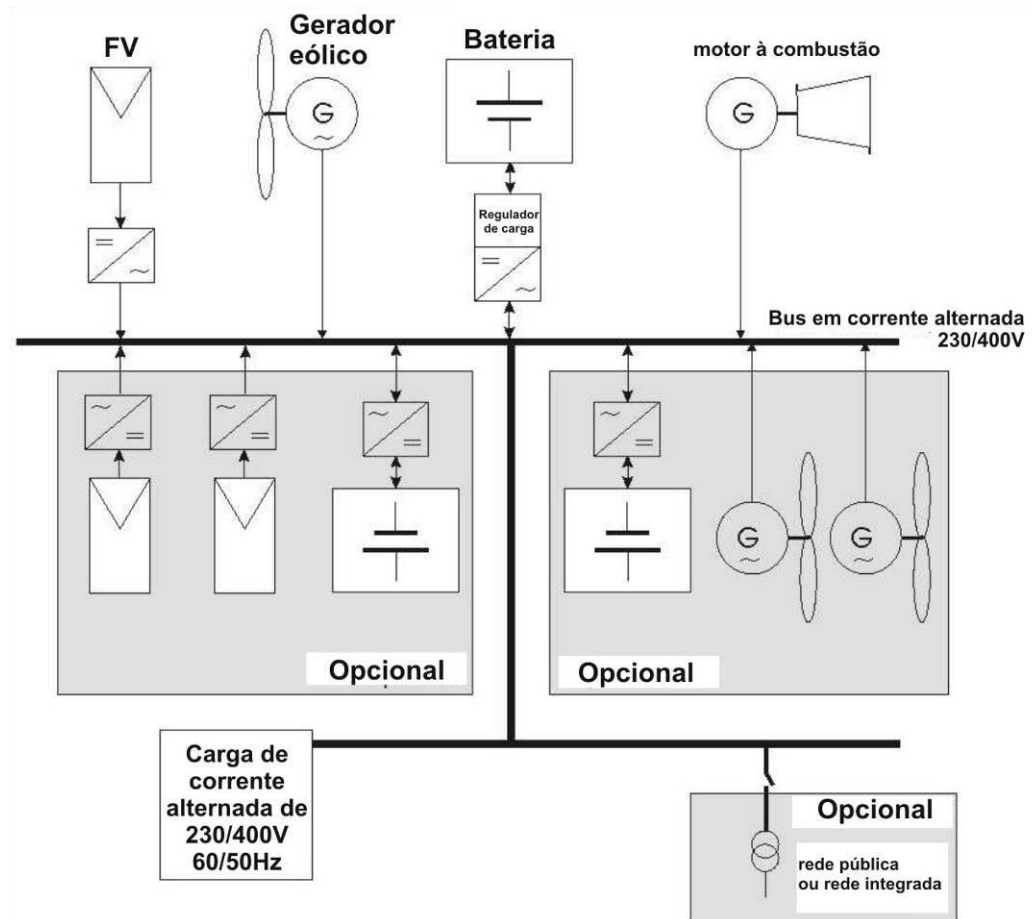


Figura 20: Sistema híbrido, estruturado de forma modular, ampliável, com componentes AC acoplados para as opções de operação ilhada ou paralela à rede sob as diferentes condições de rede elétrica

Ambos os sistemas mencionados que podem assegurar o fornecimento de cargas de AC, usam um inversor para disponibilizar a rede elétrica de corrente alternada.

3.1.2.6 Aerogeradores de pequeno porte na operação na rede

Operando aerogeradores de pequeno porte na rede de distribuição fixa (ver Figura 21) das distribuidoras de energia elétrica regionais, a potência ofertada pela turbina é passada diretamente à rede.

Deste modo, um alto grau de aproveitamento de energia pode ser alcançado. Para proteger o gerador e a conexão à rede de sobrecarga elétrica bem como a construção total de sobrecarga mecânica, basta limitar a potência (e, por consequência, o número de rotações da pá de rotor) a um valor máximo. Isto pode ser realizado de forma simples com técnica de construção e de regulação através de diversos dispositivos reguladores (p.ex. posição de

helicóptero do rotor, mudança do ângulo da pá, etc. – confere capítulo 1.2, Tabela 3)(LÜTZ, 2005).

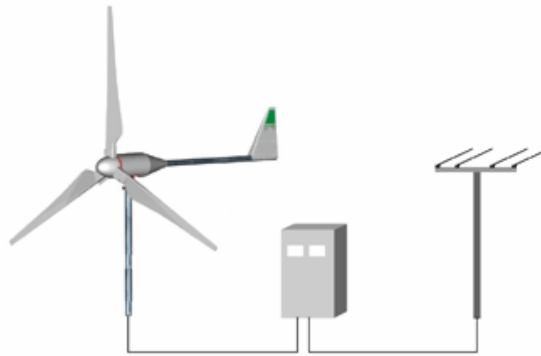


Figura 21: Representação esquemática de um aerogerador de pequeno porte na operação paralela à rede

A regulação e o gerenciamento da operação de tais sistemas que operam paralelamente à rede limita-se a processos de ligar e de desligar, o que tem, como consequência, baixas exigências à tecnologia de regulação do aerogerador de pequeno porte (CASELITZ, 1993).

3.1.3 Particularidades sócio-econômicas

Para uma produção e comercialização bem sucedida de um pequeno aerogerador no Brasil, a máquina não deve somente corresponder ao estado mais novo da tecnologia, bem como a todos os pré-requisitos meteorológicos, mas também tem que ser adaptada às condições sócio-econômicas do local onde será utilizada.

Sistemas descentralizados de fornecimento de energia servem no Brasil principalmente para a eletrificação de regiões afastadas, de cunho agrícola, nas quais a maior parte da população (especialmente os usuários potenciais de sistemas híbridos) é caracterizada por renda média (em parte extremamente) baixa e nível educacional baixo. Paralelamente a taxa de criminalidade é muito alta.

A infra-estrutura destas regiões é normalmente subdesenvolvida o que fica evidente, por exemplo, na carência de estradas bem construídas e de redes de telefone.

3.2 Exigências específicas aos aerogeradores de pequeno porte para o Brasil

A maioria dos aerogeradores de pequeno porte disponíveis no mundo com potência nominal de até 30 KW é produzida na Europa (especialmente na Alemanha), bem como na América do Norte (EUA) (cf. capítulo 2.3), onde, apesar do amplo espectro de aplicação, os principais mercados de venda ainda se encontram hoje.

Por isso, os fabricantes concentraram a tecnologia de suas máquinas predominantemente na satisfação das exigências e dos fatores de localização (condições climáticas, tipos de aplicação, tecnologia do sistema, infra-estrutura, etc.) destes mercados. Quando se utilizam aerogeradores de pequeno porte europeus ou americanos no Brasil, o resultado é uma série de problemas de adaptação que, caso sejam ignorados, levam a um desempenho e uma segurança operacional altamente reduzidos do sistema, podendo causar até a parada de operação. Além disso, importações desta tecnologia não parecem sensatas sob o ponto de vista financeiro, devido a custos de produções muitas vezes mais altos, aos custos de transporte, bem como ao imposto de importação incidente.

Sistemas híbridos atuais possuem uma taxa de parada de mais que 65% devido à falha de componentes e materiais, à má ou insuficiente manutenção, e à assessoria inadequada de empresas de planejamento. Uma enquête do ano de 2002 entre operadores e projetistas estadunidenses de tais sistemas mostrou adicionalmente que um dos problemas principais é a falta de aerogeradores de pequeno porte confiáveis e de baixo custo na faixa de potência apropriada para sistemas híbridos (NELSON, 2002).

Até hoje, esta situação pouco mudou.

As exigências especiais a aerogeradores de pequeno porte e as tendências resultantes destas para o uso em sistemas híbridos no Brasil (e na América do Sul em geral) são apresentadas a seguir.

3.2.1 Exigências à tecnologia de materiais

Devido às cargas de tração, pressão e flexão, podem ocorrer a deformação e a posterior limitação ou avaria de funcionamento de componentes do aerogerador de pequeno porte. Fricção leva ao desgaste e freqüentes mudanças de carga podem condicionar fissuras no material.

Em princípio, as cargas sobre um aerogerador podem ser classificadas, como segue (Tabela 10).

Tabela 10: Classificação das cargas sobre um aerogerador de pequeno porte
KLOCKE, 2002

Térmica	
Temperatura alta	Perda de resistência
Temperatura baixa	Aspereza
Mudança de temperatura	Fissuras
Química	
Radiação UV, umidade do ar, chuva ácida	Corrosão Oxidação Decomposição
Mecânica	
Tração, pressão, flexão	Deformação
Fricção	Desgaste
Mudanças de cargas	Fissuras

As exigências específicas de cada componente de aerogeradores de pequeno porte ao material são resumidas na Tabela 11.

Tabela 11: Exigências aos materiais a serem utilizados especificamente nos componentes na construção de aerogeradores de pequeno porte e as possibilidades correspondentes na seleção de materiais

Componente principal	Exigências à tecnologia de materiais	Seleção de material
Pás de rotor	resistente contra corrosão resistente contra UV alta resistência contra abrasão propriedades de baixa fadiga baixa rigidez flexional alta elasticidade baixo peso	- plástico reforçado por fibra de vidro (fibra de vidro) - plástico reforçado por fibra de carbono - plástico reforçado por fibra de aramida - resina epóxi - resina de poliéster - poliamida - madeira - vela de tecido
Caixa de multiplicação / rolamento do rotor	alta resistência contra abrasão baixa fricção baixo ruído	- aço para melhoramento - aço fundido
Gerador	alta classe de isolamento pouco desgaste baixo ruído	- aços resistentes contra calor e pressão - materiais fundidos
Caixa de máquinas	resistente contra corrosão resistente contra UV alta resistência contra abrasão alta resistência alta rigidez dissipação de calor	- alumínio - plástico reforçado por fibra de vidro (fibra de vidro) - plástico reforçado por fibra de carbono - resina epóxi

	baixo peso	- resina de poliéster - poliamida
Orientação ¹⁵	resistente contra corrosão resistente contra UV baixo peso	- alumínio - plástico reforçado por fibra de vidro (fibra de vidro) - plástico reforçado por fibra de carbono - resina epóxi - resina de poliéster - poliamida
Mastro / dispositivo de instalação	resistente contra corrosão alta rigidez flexional alta resistência baixo peso	- concreto - aço galvanizado a fogo
Conexões parafusadas & de flange	resistente contra corrosão alta rigidez flexional alta resistência	- aço inox - aço galvanizado a fogo - aço galvanizado

O material para as pás de rotor deve apresentar boas propriedades de fadiga, uma alta resistência contra abrasão (cf. 3.1.1.4 e extraordinária resistência contra corrosão (cf. 3.1.1.2 e 3.1.1.6) e radiação UV (cf. 3.1.1.5). Um problema especial para aerogeradores de pequeno porte consiste no fato que a construção e o material das máquinas devem resistir à pressão do vento também em situações de vento extremas (cf. 3.1.1.3). A velocidade do vento de configuração deveria ficar para o Brasil pelo menos 20% acima das velocidades máximas de vento medidas até agora, isto é de 60 m/s. Para o caso da previsão de situações de vento ainda mais extremas, devem ser previstos o desligamento da máquina ou a possibilidade de deitar a máquina (mais sobre assunto no capítulo 3.2.2).

Caixa de multiplicação e rolamento do rotor devem ser dimensionados suficientemente em relação à sua resistência contra abrasão para garantir uma longa vida útil também em locais com altas velocidades médias de vento (como no nordeste do Brasil e, em geral, na zona litoral). Especialmente para regiões de ventos fracos (principalmente no interior), a seleção de vedações e de rolamentos especiais com pouca fricção é de importância para favorecer o arranque da máquina já com baixas velocidades do vento.

Na caixa de máquinas de um aerogerador de pequeno porte são postos geralmente os componentes: rolamento do rotor, caixa de multiplicação, gerador, freio(s) e rolamento vertical. Para isso, é necessária uma caixa compacta e otimizada em relação a rigidez, resistência, dissipação de calor, peso e técnica de produção, incluindo um revestimento resistente à água marinha para a proteção confiável contra corrosão. As mesmas exigências são feitas para a orientação, caso seja executada como um catavento (cf. 3.2.2).

¹⁵ Caso necessário (cf. para este assunto 2.2)

O mastro de um aerogerador de pequeno porte está exposto, por um lado, às cargas combinadas (e devido à massa relativamente grande da máquina no topo do mastro altamente dinâmicas) de vento e operação do sistema e, ao mesmo tempo, às influências meteorológicas (umidade do ar, temperatura, ar salubre, areia no fluxo do ar, etc.). Afinal, o comportamento de vibração do mastro tem influência decisiva sobre a carga mecânica.

A tarefa é escolher um material para o mastro que apresente alta rigidez flexional e resistência e que é, ao mesmo tempo, resistente contra corrosão. Além disso, por causa da possibilidade necessária de transporte simples dos aerogeradores de pequeno porte em regiões afastadas, o peso do mastro é bastante importante.

Todas as conexões parafusadas e de flange devem ser selecionadas em relação à escolha de material visando também resistência contra corrosão, bem como alta resistência contra tração e rigidez flexional.

3.2.2 Necessidades construtivas

A configuração construtiva do aerogerador também deve ser adaptada às condições locais.

Tabela 12 resume as necessidades e as propostas de soluções construtivas.

Tabela 12: Exigências a configuração construtiva dos componentes de aerogeradores de pequeno porte no uso no Brasil

Componente principal	Exigências construtivas	Propostas construtivas
Pás de rotor	perfil aerodinâmico otimizado em relação à potência operação com altos números de Reynold altos valores de razão de planeio boas propriedades stall (ou pitch) resistente contra furacão diâmetros de rotor diferentes	- configuração do perfil específica para o sistema através de cálculos de corrente de ar - otimização experimental do ângulo da pá - torção das pás de rotor em direção ao cubo
Caixa de multiplicação / rolamento do rotor	superdimensionamento para longa vida útil caixa de multiplicação otimizada em relação a ruídos longa vida útil da engrenagem da caixa de multiplicação	- espaço suficiente para óleo na caixa de máquinas - vedações e rolamentos de pouca fricção - engrenagem inclinada
Gerador	alto grau de eficiência execução para 50 e 60 Hz modelos mono- e trifásicos boa dissipação do calor diferentes classes de potência resistente contra as influências atmosféricas	- máquina assíncrona - alta classe de isolamento - blindagem completa
Sistema de frenagem	alto grau de eficiência funcionamento autárquico	- freio de disco com reajuste automático

	sistema ativo para a regulação da potência em combinação com sistemas híbridos possibilidade de frenagem emergencial em todos os estados operacionais	- freio de gerador - freio aerodinâmico - pelo menos dois sistemas de frenagem independentes
Caixa de máquinas	desenrolamento automático do cabo de potência considerando diversos tamanhos de geradores boa dissipação do calor alta resistência e rigidez tecnologia de produção simples resistente contra as influências atmosféricas	- anéis coletores para a transmissão de potência - Fundição do componente em uma peça
Orientação	baixa orientação faltosa resistente contra ventos fortes o mais simples e econômico possível	- Sistema a jusante do vento ¹⁶ - catavento
Mastro / dispositivo de instalação	Cargas dinâmicas menores possíveis estrutura simples possibilidades simples de montagem e desmontagem resistente contra furacão diferentes alturas do cubo	- baixa rigidez flexional das pás de rotor - ancoragem do mastro - base em forma de cruz sem fundação - dispositivo de instalação inclusive guincho
Conexões parafusadas e de flange	Menor quantidade possível Longa vida útil e segurança operacional	- componentes fundidos - componentes grandes - superdimensionamento de 3 a 4 vezes

A maioria dos aerogeradores de pequeno porte existentes possui uma velocidade do vento de arranque de 3 a 5 m/s alcançando a potência nominal com velocidade do vento de 12 a 13 m/s. Assim, são configurados para a maior extração de energia. O objetivo de sistemas descentralizados de fornecimento de energia para a eletrificação de localidades afastadas, no entanto, não é a maior produção de energia anual possível, mas a produção de energia mais uniforme possível. Isto porque alta produção de energia momentânea sempre significa crescente complexidade de regulação, tendo que ser guardada em sistemas de armazenagem (baterias). Mas, afinal, o objetivo é uma oferta contínua de energia e, conseqüentemente, a segurança de abastecimento.

A caixa de multiplicação e o espaço da caixa devem ser dimensionados de tal modo que diferentes rodas dentadas para as relações de transmissão necessárias para diferentes frequências de rede (operação com 50/60Hz) possam ser montadas, de forma a considerar já durante o projeto eventuais exportações das máquinas em regiões com outras variações de rede. Na parte inferior da caixa de máquinas, deve ser previsto espaço para a quantidade de óleo necessária. A seleção posterior do óleo garante longa vida útil da engrenagem da caixa

¹⁶ Sistemas a jusante do vento são aerogeradores nos quais o plano das pás de rotor encontra-se na direção do vento depois do azimuth, isto é, o sistema possui direcionamento contrário das pás de rotor, vindo então o fluxo de ar por trás. Devido a este posicionamento, o sistema orienta-se automaticamente na direção do vento devido às forças aerodinâmicas do rotor. Esta construção é especialmente vantajosa em relação à economia de custos porque podem ser dispensados um catavento ou uma orientação ativa!

de multiplicação e do mancal de rolamento. Mudanças de óleo deveriam ser necessárias apenas raramente (no máximo a cada 5 anos) no âmbito de vistorias de rotina. Por motivo da otimização de ruídos, a engrenagem deve ser prevista como engrenagem inclinada.

Dependendo de cada caso de aplicação, também deveriam estar disponíveis diferentes execuções do gerador. Em função da situação, o sistema poderia estar disponível com gerador mono- ou trifásico para a rede em 50Hz ou 60Hz e em diferentes faixas de potência. Diferentes potências de gerador requerem naturalmente também alternativas de diâmetro de rotor.

Todos os componentes do gerador também deveriam ser blindados adicionalmente na caixa de máquinas como proteção contra situações climáticas extremas (cf. 3.1.1). A refrigeração de caixa de multiplicação e do gerador devem ser configurados para uma operação com temperaturas ambientais de até 45°C (cf. 3.1.1.1).

Para o uso de aerogeradores de pequeno porte em redes ilhadas é necessário, pelo menos, um freio que tenha um bom funcionamento. Caso não se necessite mais energia elétrica porque p.ex. não há mais carga e a bateria já está carregada, o aerogerador deve poder ser freado em qualquer situação.

Na faixa de potência <5 kW, o gerador é predominantemente posto em curto-circuito ("curto-circuito do gerador") para frear a máquina. No entanto, este não é um processo apropriado para frear regularmente o sistema, p.ex. em combinação com o gerenciamento "dumpload" das baterias. Na faixa de potência maior que 5kW que é interessante para o uso em redes ilhadas, as máquinas necessitam de pelo menos um outro sistema de frenagem. Isto pode ser realizado através da mudança (ativa ou passiva) do ângulo das pás de rotor ("pitch") ou através do uso de um freio de disco na transmissão.

A configuração da maioria dos aerogeradores de pequeno porte existentes para a operação paralela à rede leva, no entanto, ao fato de que os freios de disco ora utilizados são configurados para cerca de 2 a 4 freadas por mês. Na operação em rede ilhada ocorrem, porém, freadas significativamente mais frequentes, por um lado, como já foi mencionado, para proteger o sistema de bateria e, por outro lado, na separação breve da rede para a comutação à rede de diesel caso este gerador for parte do sistema ilhado. Para processos de frenagem tão frequentes, os freios de disco existentes, no entanto, estão inadequados, pois estariam por demais expostos a desgaste.

A orientação deve ser econômica e suficientemente ampla.

A capacidade de transporte e o dispositivo de montagem, se possível incluído no sistema de mastro, são itens decisivos para o uso em regiões afastadas sem infra-estrutura moderna. Os componentes de mastro devem poder ser movimentados sem grandes exigências (em relação à carga útil e às dimensões) ao meio de transporte até qualquer lugar por mais afastado que for. Na locação de instalação, o mastro (inclusive gôndola) deveria ser montável rapidamente sem guindaste, isto é, os componentes são instalados na horizontal no chão e, em seguida, o aerogerador completo é erguido, por exemplo, com um guincho. Em contrapartida, o sistema poderia ser facilmente, sem custos altos, deitado ao chão para fins de manutenção e reparo bem como p.ex. em caso de aviso de furacão.

Para poder fornecer rendimentos da máquina ajustados às situações de vento e às demandas dos consumidores, várias alturas de mastro devem ser previstas.

3.2.3 Exigências quanto à regulação e comando

Na regulação e no gerenciamento da operação de um aerogerador, devem ser observados dados internos (propriedades de grupos de componentes e a interação destes) bem como especificações externas (demandas dos consumidores, determinações para a operação paralela à rede).

Pelo gerenciamento de operação, são tomadas decisões através de combinações lógicas, monitorando se planos de procedimento são seguidos e valores limites observados. A regulação deve observar os valores ajustados ao sistema e dados pelo gerenciamento de operação. Correspondentemente deve ser assegurado que as decisões do gerenciamento de operação não sejam passadas diretamente aos controles (cf. Tabela 3) do sistema. Caso seja possível sintonizar com as velocidades de reação, especificações do gerenciamento de operação deveriam acontecer através de unidades de regulação, levando-se assim em conta, em casos de intervenção, os componentes e toda a dinâmica do sistema. Exceções só deveriam ser admitidas sob aspectos de segurança (p.ex. desligamento rápido em caso de avaria).

Além das propriedades comuns para sistemas de transformação de energia, deve ser requerido adicionalmente para o uso de aerogeradores de pequeno porte no Brasil:

- Início automático da operação e parada autônoma em função das situações do vento e do sistema;
- Monitoramento da segurança dos componentes do sistema através de uma unidade de gerenciamento de operação (de forma ideal com consulta à distância e avisos de avaria junto ao operador);
- Proteção separada e independente da regulação para a limitação rápida da absorção de potência do aerogerador no caso de oferta de energia eólica grande demais.

Em relação às exigências, devem ser distinguidas, por princípio, a operação ilhada (cf. 3.1.2.2 – 3.1.2.5) e operação em rede (cf. 3.1.2.6). Na operação ilhada, os dados meramente específicos do sistema devem ser considerados. Além disso, devem influir as demandas dos consumidores, as quais, no entanto, só podem ser definidas com exatidão para cada caso isolado. Por princípio, as respectivas determinações eletrotécnicas devem ser observadas, especialmente as que dizem respeito à a proteção contra sobretensão.

Para a operação na rede, além disso, devem ser cumpridas as condições locais dadas para a operação paralela de unidades de geração de energia elétrica na rede.

A regulação de um aerogerador representa o elo entre o gerenciamento de operação e a turbina eólica propriamente dita e de seus componentes. Ela deve ser configurada especialmente para as propriedades dinâmicas e possibilidades de carga dos componentes do sistema para poder realizar as tarefas de ajuste que lhe competem.

Os diversos tipos de estrutura (cf. 2.2) e possibilidades de aplicação (cf. 2.1) de aerogeradores de pequeno porte requerem concepções de regulação diferentes para a operação ilhada e operação na rede. Isto é necessário para poder definir as exigências aos componentes do sistema e as possibilidades de operação para o uso planejado de um aerogerador. Além disso, numerosos critérios podem ser consultados, como: o grau de eficiência total do sistema, custos, efeitos para a rede e confiabilidade operacional (HEIER, 1998).

3.2.4 Reivindicações à tecnologia de produção, aos custos de produção e viabilidade econômica

Todos os componentes do aerogerador de pequeno porte devem ter a possibilidade de produção nacional. Se isto não for possível em relação ao primeiro projeto do sistema, devem

ser aceitas reduções na execução técnica para se poder alcançar no final um baixo preço específico de máquina. Para se projetar um produto competitivo também em relação ao preço e, conseqüentemente, garantir as vendas e o sucesso do fabricante e comercializador potencial, os custos específicos do sistema devem ser abaixo de 5.000,00 R\$/kW de potência nominal (cf. 2.3.2).

No processo de produção dos componentes do sistema, bem como na montagem final, deve ser previsto o maior grau possível de automatização, pois somente assim exatidão e qualidade serão possíveis dentro de um preço econômico.

3.2.5 Comprovante de potência do aerogerador de pequeno porte

Como critério importante para configuração de um aerogerador, recorre-se tipicamente à curva de potência apurada. Esta permite identificar a potência a ser esperada do sistema com determinada velocidade do vento. Normalmente diferencia-se a curva de potência simulada (pelo fabricante) e a curva de potência medida num teste em campo (comum no caso de aerogeradores de grande porte).

Testes realizados no aerogerador de pequeno porte instalado no sistema híbrido de prova, em Großschirma, mostraram que existem desvios consideráveis entre as curvas de potência indicadas (simuladas) pelo fabricante e a potência que realmente pode ser obtida (mais no 5.1.3).

Para alcançar uma segurança de planejamento do desenvolvimento do projeto de sistemas descentralizados de fornecimento de energia e para estimular a confiança do consumidor, deve existir uma curva de potência medida do aerogerador de pequeno porte.

4. CONCEPÇÃO DE CONFIGURAÇÃO DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE AJUSTADO ÀS CONDIÇÕES DE LOCAÇÃO NO SISTEMA MODULAR

4.1 Pás e rotor

Em relação à seleção de materiais, devido à resistência exigida contra as cargas mecânicas, térmicas e químicas (exposto em extenso no 3.2) durante a operação do sistema, somente interessam materiais compostos reforçados por fibra (especialmente plásticos reforçados por fibras de vidro, reforçados por fibra de carbono ou reforçados por fibra de aramida¹⁷) para as pás de rotor. Estes materiais obtêm em todos os seus coeficientes resultados decisivos melhores que p.ex. plástico puro, madeira ou metal. Na Tabela 13 estão listadas as principais propriedades de materiais compostos reforçados por fibra.

Tabela 13: Propriedades gerais de materiais compostos reforçados por fibra para pás de rotor
R&G, 2003

Vantagens	Desvantagens
alta resistência contra tração baixo peso do material alta resistência contra corrosão alta resistência contra vibrações bom comportamento de impacto capacidade dinâmica de carga permanente formas de construção econômicas (boa capacidade de formar e poucos resíduos de material)	custos de material relativamente altos custos de produção mais altos

Para a seleção final do material para pás de rotor, em seguida, as propriedades específicas dos três materiais compostos reforçados por fibras mais importantes serão comparadas.

Tabela 14: Propriedades específicas de materiais compostos reforçados por fibras para rotores de aerogeradores
R&G, 2003

	Plástico reforçado por fibra de vidro	Plástico reforçado por fibra de carbono	Plástico reforçado por fibra de aramida
Resistência contra tração [GPa]	1,8 - 3,0	2,4 - 7,0	2,5 - 3,5
Coefficiente de elasticidade [GPa]	72 - 83	230 - 700	60 - 130
Limite linear de elasticidade [%]	2 - 3	0,5 - 2,3	2,0 - 4,0
Absorção de umidade com	não mensurável	não mensurável	4,3 - 7,0

¹⁷ Aramida é uma fibra sintética.

umidade do ar relativa de 60% e temperatura de 20°C [%]			
Carga de radiação pela exposição ao clima exterior	pouca	pouca	deterioração fotoquímica rápida
Custos	econômico	muito caro	relativamente econômico

O plástico reforçado por fibra de aramida não é apropriado como material para pás de rotor devido a sua má resistência contra radiação UV e à alta absorção de umidade. . Por causa dos altos custos do material, plásticos reforçados por fibra de carbono, apesar dos coeficientes extraordinários do material não são interessantes. A melhor relação entre custos e funcionabilidade é alcançada com plásticos reforçados por fibra de vidro (chamados de fibra de vidro).

Plásticos reforçados por fibra possuem outra vantagem decisiva em relação a outros materiais – as suas propriedades podem ser influenciadas em função da direção e pela técnica de produção (através do direcionamento das fibras na formação do componente¹⁸). O uso de um material de baixa rigidez flexional na direção de impacto (cf. 3.2.1), pode possibilitar uma deformação por flexão elástica da pá de rotor até dois terços do seu comprimento estendido (SIEGFRIEDSEN, 2004). Devido à deformação por flexão elástica, por um lado, a área projetada perpassada pelo vento é reduzida consideravelmente. Por outro lado, o coeficiente de resistência é reduzido na direção da parte exterior devido à curvatura implicada com deformação por flexão. Finalmente, o aerogerador de pequeno porte pode resistir assim também a situações extremas de vento.

Para que o aerogerador esteja habilitado para ventos fracos, ele deve começar a trabalhar com uma velocidade de vento de cerca de 2 a 3 m/s, alcançando a sua potência nominal aos 8 a 9 m/s. Para este fim, é necessária a elevação do grau de eficiência aerodinâmica das pás de rotor, como já tem sido amplamente desenvolvido para as máquinas grandes.

Sob o fundamento da longa experiência com aerogeradores de grande porte, as pás de rotores para a maioria dos aerogeradores de pequeno porte existentes e a sua configuração e dimensionamento do perfil aerodinâmico, foram copiadas dos modelos grandes, construindo-as em escala menor. Trata-se superficialmente de uma metodologia que reduz custos, porém, o comportamento de desempenho e as propriedades estruturais do rotor não foram calculados e simulados especificamente para o sistema. Para o desenvolvimento de um aerogerador de

¹⁸ As fibras deveriam, se possível, ser posicionadas de forma simétricas e sempre na direção das cargas de impacto.

pequeno porte moderno de alto desempenho, deveria ser configurado um perfil de pá de rotor próprio, específico para o sistema e o uso, mediante cálculos de corrente. Isto eleva o custo do desenvolvimento, aumentando, porém, ao mesmo tempo vida útil, rendimento de potência, confiabilidade e segurança operacional de toda a máquina.

Além do mais, o ângulo da pá otimizado para a potência deve ser encontrado mediante simulações de corrente e a verificação experimental complementar com protótipos (como foi realizado na estação de ensaio na Alemanha – cf. 5.1.3). Observa-se que devido aos baixos custos e longos ciclos de manutenção, deve ser escolhida preferencialmente uma regulação (aerodinâmica) de potência e do número de rotações stall ou passiva pitch (cf. Tabela 3, p.18).

Neste contexto, a concepção da transmissão, inclusive caixa de multiplicação e gerador, deve ser otimizada em relação a perdas de fricção, para alcançar um melhor comportamento de início de produção da máquina.

4.2 Concepção do gerador

Na utilização moderna da energia eólica, dois tipos básicos de construção de geradores são empregados:

- Geradores síncronos
- Geradores assíncronos

O gerador assíncrono oferece as vantagens de uma estrutura de regulação relativamente fácil, bem como a possibilidade da ligação direta à rede sem eletrônica interligada. No entanto, é relativamente inflexível a respeito de seu ajuste à rede e não permite uma regulação contínua do número de rotações do rotor.

Uma variação do gerador assíncrono é o gerador assíncrono duplamente alimentado. Neste caso, a energia elétrica do gerador é regulada através de um inversor. Este princípio permite o controle do número de rotações numa faixa ampla, sendo, por isso, utilizado crescentemente nos aerogeradores de grande porte a partir dos meados dos anos 90. Para a utilização em aerogeradores de pequeno porte, ele é, no entanto, tecnicamente complexo demais e, conseqüentemente, caro demais.

Uma variabilidade do número de rotações comparável como do gerador assíncrono duplamente alimentado é oferecida pelo gerador síncrono. Este tipo de gerador é utilizado hoje em dia na maioria dos aerogeradores de pequeno porte. Na operação na rede, a energia

elétrica é alimentada através de um inversor, podendo o número de rotações do rotor ser quase de qualquer maneira ajustado de acordo com as necessidades. Na operação ilhada, uma rede elétrica própria pode ser instalada e estabilizada através do gerador síncrono.

No final, a estrutura de regulação simples, a alta segurança operacional e a resistência e, ligados a esta, os baixos custos da máquina e de manutenção do gerador assíncrono são aspectos determinantes na seleção do gerador para um aerogerador de pequeno porte brasileiro.

Com o objetivo de poder oferecer faixas de potências específicas para a aplicação, o sistema global deve ser desenhado de forma modular, isto é, dependendo da demanda do consumidor e/ou do potencial eólico ou da energia elétrica suplementar gerada pelo aerogerador em sistemas híbridos. Deve-se também poder recorrer a capacidades de geração diferentes. Ao mesmo tempo, uma grande oferta de tipos de geradores e de outros componentes de sistema modulados correspondentemente (como diâmetro do rotor, robustez do mastro, dimensionamento da caixa de multiplicação) significa uma complexidade de desenvolvimento maior e, conseqüentemente, de maior intensidade pecuniária. O mesmo vale posteriormente para a produção da máquina e também para o preço de mercado do sistema.

Ambos fatores podem ser combinados de forma conveniente selecionando duas classes de potência diferentes na faixa da maioria das aplicações que, no caso de demanda por potência maior de aerogeradores de pequeno porte, serão levados à potência combinando máquinas individuais. Como linha de produto ideal, foram identificadas as classes de potência de 6 e 10 kW, pois cobrem a área principal de aplicação de aerogeradores de pequeno porte e porque, através da combinação destas classes, pode ser coberto um grande número de potências totais do sistema até 30 kW (Tabela 15).

Tabela 15: Possibilidades de combinação das classes de gerador selecionadas para aumentar a potência do sistema de aerogeradores

Potência do sistema		6	10	12	16	18	20	22	24	26	28	30
Potência nominal de cada unidade	6 kW	1		2	1	3		2	4	1	3	
	10 kW		1		1		2	1		2	1	3

Além das diferentes classes de potência, o sistema deve poder ser equipado com uma versão monofásica ou trifásica, bem como variantes de 50 e de 60 Hz.

Para obter o maior grau de eficiência possível, duas escalas de número de rotações devem ser previstas a serem comutadas de acordo com a oferta de vento através do comando e do gerenciamento de operação (cf. 4.3).

4.3 Unidade de gerenciamento de operação e regulação do sistema

O comando e a regulação de um aerogerador de pequeno porte e a sua conexão à rede elétrica (rede pública ou rede ilhada) são realizados por um sistema de micro-processador.

A unidade de gerenciamento de operação tem a tarefa de detectar corretamente todos os estados operacionais do sistema, desencadeando reações correspondentes, caso sejam necessárias.. Ela deve disponibilizar as seguintes funções:

- Monitorar a rede e conexão;
- Ligar e desligar o freio (cf. 4.5);
- Analisar o campo giratório do gerador (cf. 4.2);
- Intercalar na rede com arranque suave (cf. 3.1.2);
- Compensar potência reativa¹⁹;
- Comutar as escalas do gerador (cf. 4.2);
- Monitorar a função de frenagem (cf. 4.5 e 4.6);
- Monitorar a cadeia de segurança (sensor de vibrações, interruptor de temperatura);
- Indicar os estados operacional e do freio (cf. 4.5 e 4.6);
- Desligamento emergencial direto;
- Monitoramento e controle à distância (cf. 4.6);
- Medir, registrar e monitorar o número de rotações do gerador, a direção giratória do rotor e do gerador, o campo giratório da rede, voltagem, corrente e frequência na rede.

Atenção especial merece, por motivos várias vezes referidos, a operação segura do sistema. Por isso, a cadeia de segurança que consiste em sensores que monitoram a operação, deve ser ligada diretamente ao freio. A cadeia de segurança deve consistir pelo menos de um sensor de força centrífuga, um sensor de vibrações e um interruptor de temperatura. Caso um

¹⁹ Potência reativa é a potência elétrica necessária para criar campos magnéticos. Potência elétrica (potência aparente) é composta de potência ativa que produz energia e potência reativa, gerada por consumidores indutivos. A potência reativa reduz assim a capacidade da rede, causando perdas desnecessárias.

dos sensores for acionado (p.ex. por número de rotações da pá de rotor alta demais, vibrações extremas da torre ou temperatura aumentada do óleo da caixa de multiplicação) é acionada uma parada emergencial e a máquina é detida através dos sistemas de frenagem. Posteriormente, o sistema analisará automaticamente de forma iterativa os pré-requisitos para novo arranque.

Quando os sensores são acionados, deveria ocorrer, ao mesmo tempo, mediante transmissão de dados à distância, um aviso à central de operação ou ao operador, permitindo, assim, a imediata reação caso seja necessária. Em contrapartida, deveria ser possível controlar o sistema de forma remota. P.ex., caso for registrado o desgaste das sapatas do freio através do monitoramento de dados à distância (Condition Monitoring), tem que existir a possibilidade de desligar o sistema de uma central de controle.

Para que o aerogerador possa transformar a energia cinética contida no vento com o maior grau de eficiência em energia elétrica, ele deve ser orientado sempre de forma otimizada para a direção do vento (com a exceção dos tipos de construção especiais dos rotores de Savonius e de Darrius (cf. Figura 5, p.17), que são independentes da direção do vento).

Existem várias possibilidades técnicas (cf. Tabela 16) para manter o plano do rotor de um gerador continuamente num ângulo de 90° em relação ao fluxo do ar. No caso mais simples (a) o sistema orienta-se pelo próprio vento. Isto acontece na maioria das vezes (e em mais que 75% de todos os aerogeradores de pequeno porte) através de um catavento no lado do topo da torre que fica oposto ao cubo do rotor.

Tabela 16: Possibilidades da orientação da direção do vento de aerogeradores de pequeno porte
LÜTZ, 2005



(a) Catavento de um aerogerador de pequeno porte <i>Moratec</i>	(b) Rotor de sotavento da empresa <i>Aerodyn</i>	(c) Orientação de um aerogerador de pequeno porte do fabricante <i>Greentech</i>	(d) Orientação ativa de uma máquina de <i>WindElectric</i>
--	---	---	---

Por outro lado, existe o assim chamado rotor de sotavento (b) no qual as pás são orientadas em direção à gôndola e o plano do rotor se encontra referente à direção do vento atrás do azimute. Estas máquinas não necessitam dispositivo especial para a orientação porque se orientam automaticamente no vento.

Um caso especial (c) representa o fabricante alemão de aerogeradores de pequeno porte *Greentech*. Através de um adaptador no topo do mastro, a gôndola inteira da máquina é posicionada atrás do azimute em relação à direção do vento. Assim, é assegurada uma orientação automática no vento, similar à de um rotor de sotavento.

Do mesmo modo, a orientação ativa pode ser utilizada mediante acionamento de azimute no rolamento da caixa de máquinas, como é comum nos aerogeradores de grande porte (d).

Todas as alternativas operam com exatidão satisfatória (orientação errada do rotor $<5^\circ$).

A execução do aerogerador como rotor de sotavento possui a vantagem determinante. Devido à falta de um cata-vento (ou de um adaptador para mover a gôndola), material e, por consequência, custos podem ser economizados, reduzindo assim o preço específico do sistema. A orientação ativa para aerogeradores de pequeno porte é tecnicamente complexa demais, exigindo intensa manutenção e, assim também, caro demais (na aquisição e na manutenção).

4.4 Sistema de mastro e dispositivo de montagem

No caso dos mastros para aerogeradores de pequeno porte, diferenciam-se basicamente mastros de concretos, mastros tubulares de aço (na maioria das vezes, ancorados) e mastros em treliça. Os últimos podem ser fabricados com aço galvanizado, resistindo (como um mastro de concreto) sem problema às condições climáticas no Brasil.

Devido ao seu dimensionamento e ao peso próprio, mastros de concreto não são nem fáceis de transportar nem de (des-)montar, o que os torna inapropriados como alternativa de mastro para regiões afastadas sem boa infra-estrutura.

No caso de mastros em treliça (e também de mastros de concreto), é desvantajosa a necessidade de uma fundação que imobiliza a máquina. Ótimo seria um sistema de suporte

que dispensa fundações. Pode-se pensar, porém, numa base fixada com âncoras de terra em combinação com ancoragem da torre em treliça em três ou quatro lados a ser fixada também através de âncoras de terra.

Quantidades de material menores são necessárias para a construção de mastros em treliça em relação a mastros tubulares, possuindo os primeiros assim uma vantagem de peso e de custos. Abstraindo de uma ancoragem do mastro, também são por si construtivamente mais estáveis.²⁰

No caso de torres em treliça como também de torres tubulares, dispositivos de montagem podem ser integrados de forma simples que permitem instalar o aerogerador também sem guindaste. O guincho necessário para a montagem pode ser incorporado ou um guincho externo existente é utilizado (p.ex. guincho de carro).

Afinal, o mastro em treliça parece ser a forma construção mais conveniente.

Além do tipo de construção da torre do sistema, a sua altura é de importância determinante porque a velocidade do vento e, conseqüentemente, o rendimento aumentam com a altura do cubo crescente. O perfil de altura do vento depende, no entanto, muito da situação local como da rugosidade do terreno, da topografia e de obstáculos existentes na área de influência do aerogerador, de tal modo que nenhuma afirmação universal referente à melhor altura do cubo pode ser feita (cf. sobre este assunto também 5.1.3).

Por princípio, diversas alturas de construção devem ser previstas. Em todo caso, estas deveriam ultrapassar em vários metros obstáculos comuns das áreas alvo como casas, estábulos, pequenos celeiros e árvores para garantir um bom afluxo do ar (sem turbulências) para o motor (cf. Figura 22).

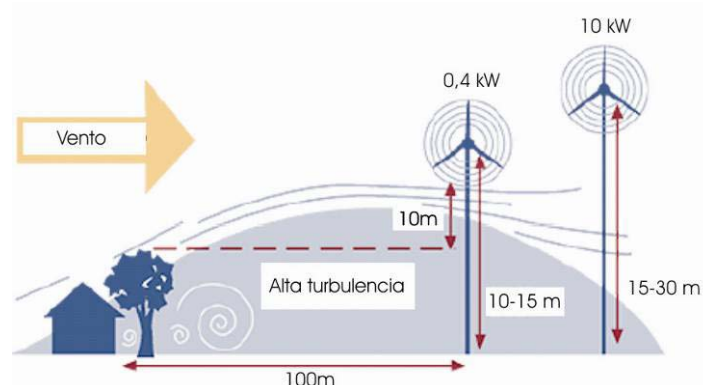


Figura 22: Influência de obstáculos anteriores na direção principal do vento sobre aerogeradores de pequeno porte
AWEA, 2004

²⁰ Por isso aerogeradores de grande porte livres com torre em treliça podem ser construídos mais altos que máquinas com meras torres tubulares de aço.

Ao mesmo tempo, o aproveitamento (energético e econômico) de mastros mais altos deve ser ponderado com maior complexidade de construção e maior uso de material (e, conseqüentemente, custos crescentes do sistema. Por isso, interessam alturas do cubo entre 10 e 20 m. Uma graduação com intervalos de 3 m parece conveniente porque um sortimento de mastro grande demais aumenta também os custos. Pelas causas referidas, a decisão é tomada a favor de alturas de cubo de 12, 15 e 18m.

4.5 Sistema de frenagem

Para o uso de aerogeradores de pequeno porte na operação ilhada, o sistema de frenagem deve ser geralmente otimizado (cf. 3.2.2), isto significa o uso de sapatas de desgaste menor em combinação com um dispositivo de reajuste automático. De forma ideal, a indicação contínua do desgaste do freio deve ser integrada ao monitoramento do estado (cf. 4.3 e 4.6) .

Exatamente aqui entra também o projeto conjunto de pesquisa da empresa *EPI* e da *UFRGS* para o desenvolvimento de componentes de alta performance para aerogeradores de pequeno porte. Maiores informações sobre este assunto estão disponibilizadas no capítulo 5.2.

4.6 Monitoramento do estado através da transmissão de dados à longa distância

No caso de aerogeradores na faixa de Megawatts, supervisiona-se o estado operacional através de um sistema de supervisão contínuo (Condition Monitoring). Um grande número de valores medidos, como a produção atual de potência, o número de rotações, acelerações de vibrações no mancal principal do rotor, engrenagem e gerador e temperatura do óleo de engrenagem, é supervisionado em tempo real numa caixa de diagnóstico no aerogerador. Havendo distúrbios ou a suspeita de erro, uma central de manutenção na qual é concentrada a supervisão do estado de muitas máquinas, é informada através da transmissão de dados à longa distância. Assim, medidas imediatas para a eliminação do erro podem ser tomadas diminuindo, desta forma, taxas de parada, custos operacionais e, finalmente, aumentando a eficiência (IMA, 2004).

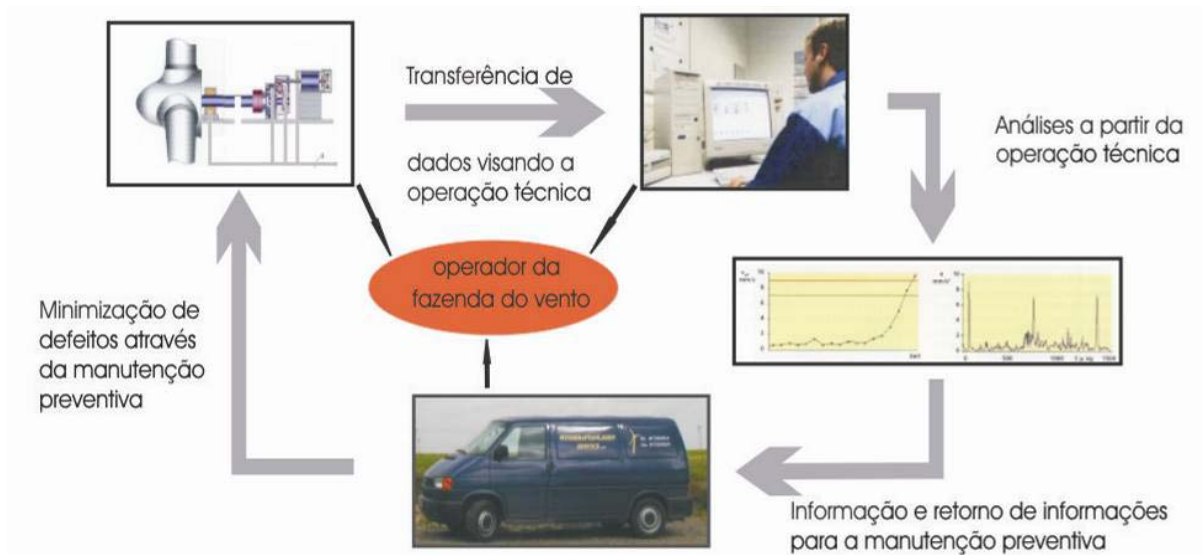


Figura 23: Sistema de “Condition Monitoring” para elevar a segurança operacional e de abastecimento, reduzindo ao mesmo tempo os custos operacionais através de uma manutenção orientada pelo estado

Para o uso de aerogeradores de pequeno porte em regiões afastadas no Brasil, tais sistemas (como ultimamente já oferecidos por alguns fabricantes europeus) também são necessários. Assim, todas as máquinas podiam ser supervisionadas a partir de uma central, reagindo imediatamente em caso de paradas, aumentando, desta maneira, consideravelmente a segurança de operação e conseqüentemente de abastecimento. Além disso, os custos operacionais serão reduzidos tanto através da manutenção orientada pelo estado como os custos adicionais pelo sistema se amortizarão no final.

A análise das possibilidades de realização e o desenvolvimento de soluções de sistema para monitoramento de dados e controle à distância de aerogeradores de pequeno porte, também fazem parte do projeto de pesquisa de *EPI / UFRGS* (cf. 5.2).

4.7 Caixa para gôndola e unidade de gerenciamento da operação

A gôndola e a unidade de gerenciamento de operação precisam ser blindadas mediante caixas contra situações climáticas extremas (cf. 3.1.1). Por isso, a refrigeração da máquina deve ser realizada sem contato direto entre o ar externo e o espaço interno (com gerador e caixa de multiplicação).

Como a caixa não está exposta às cargas mecânicas oriundas da operação do sistema, a escolha do material recai sobre alumínio. Este material destaca-se por sua resistência contra

corrosão, peso baixo, rigidez média e boa condutibilidade de calor (e, conseqüentemente, boa dissipação de calor) (WIAM, 2006).

O desenho da caixa deve ser projetado o mais compacto e aerodinâmico possível, porque no caso do rotor de sotavento ela é colocada (na direção do vento) antes das pás de rotor, atrapalhando, caso contrário, o sistema por turbulências causadas pela mesma.

4.8 Operabilidade e segurança operacional

Para o uso de aerogeradores de pequeno porte no âmbito de estações híbridas de regiões afastadas no Brasil, a operação segura do sistema deve ser possível sem acompanhamento técnico no local. Disto, podem ser deduzidas exigências de uma operabilidade simples sem conhecimentos especializados, de uma longa vida útil com longos intervalos de manutenção, bem como uma alta segurança operacional e para pessoas.

Um papel decisivo cabe, neste contexto, à unidade de gerenciamento de operação. Assim, além da coleta e do registro contínuo de todos os estados operacionais do sistema e da transmissão das informações mais importantes sobre o sistema a um monitoramento à distância, deve ser garantido o mais alto grau de independência operacional no local, abrangendo o acionamento automático e remoto de reações como, por exemplo, o acionamento, a ventilação e o reajuste do freio e a intercalação suave na rede.

Para o caso de falha do monitoramento de dados à distância e do controle remoto do sistema, deve ser previsto adicionalmente um interruptor emergencial para parar a máquina.

À eletrificação de áreas rurais, está ligado em geral o objetivo de melhores fatores da locação para apoiar de forma sustentável o desenvolvimento econômico regional, combatendo pobreza e o êxodo rural. Para que isso possa ocorrer de forma duradoura, além da boa tecnologia, caberá um papel importante à inclusão precoce dos futuros usuários da energia elétrica. De forma a garantir uma operação segura do sistema a longo prazo, a população deve ser sensibilizada com respeito às propriedades do aerogerador de pequeno porte, isto é, uma estrutura de conhecimento local deve ser criada. Técnicos locais podem garantir o acompanhamento básico do sistema, identificar-se com a nova tecnologia e, no melhor dos casos, repassar impulsos de desenvolvimento (LANDAU, 2005).

Ao mesmo tempo, isto reduz custos de manutenção e de operação através de trabalhadores especializados.

4.9 Diagrama em bloco referente à concepção do projeto de um novo aerogerador de pequeno porte

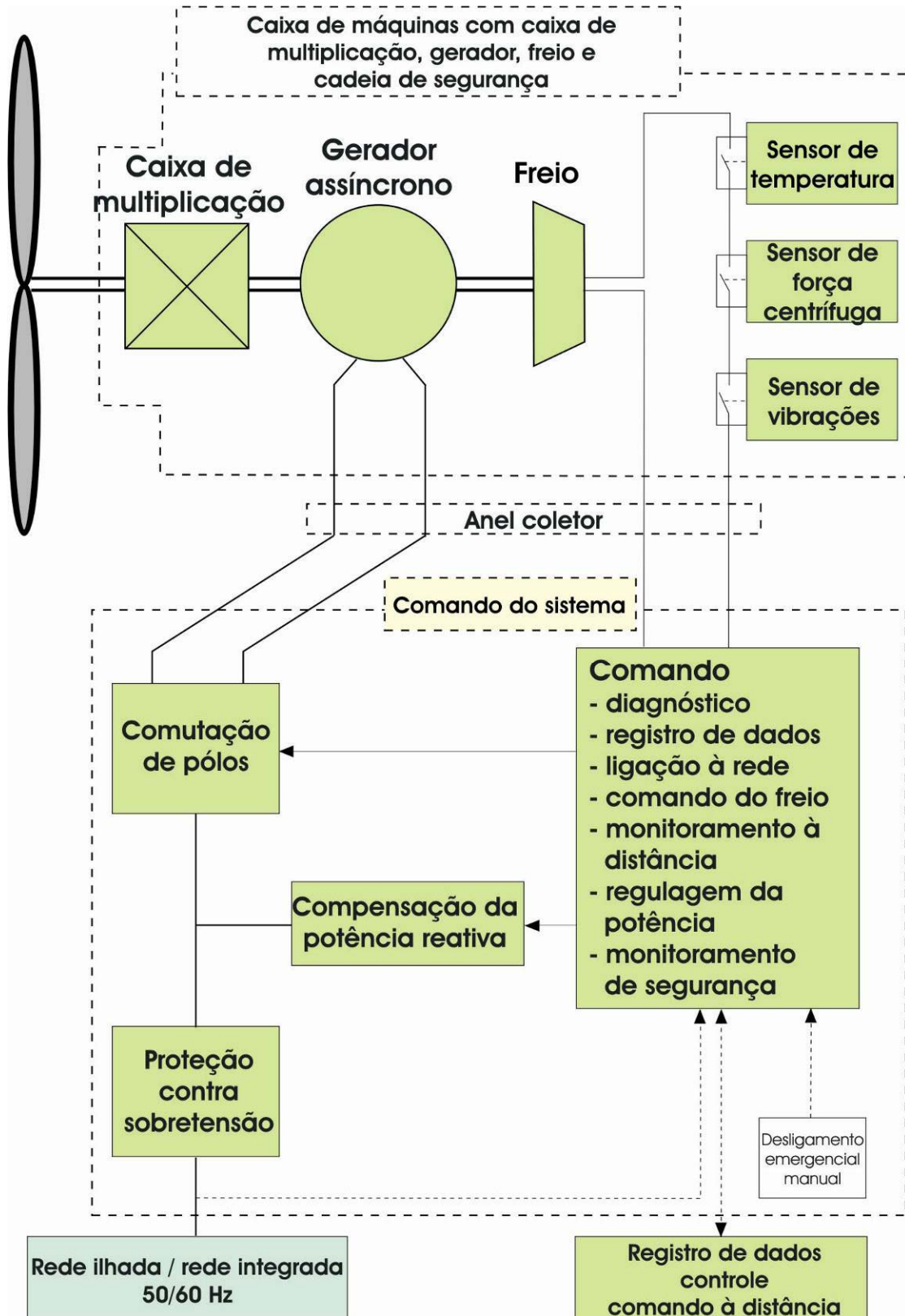


Figura 24: Diagrama em bloco de um novo aerogerador de pequeno porte

5. PESQUISAS PRÓPRIAS REFERENTES À TECNOLOGIA DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

5.1 Estação de ensaio para o fornecimento descentralizado de energia, em Großschirma, Alemanha

No âmbito de um projeto conjunto de pesquisa, apoiado com recursos do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (EFRE), 06/2000-06/2006, e com recursos do Estado Livre da Saxônia, a *EAB - Projektbau GmbH* (Freiberg) desenvolveu e otimizou em cooperação com a *ProCon GmbH* (Chemnitz) uma estação de fornecimento descentralizado de energia modular na base de energia regenerativa que pode garantir um abastecimento de energia elétrica para regiões não-eletrificadas ou pouco eletrificadas. Operação desta estação não se limita apenas à disponibilização de energia elétrica, mas oferece também a possibilidade de incluir um sistema de tratamento d'água com sistemas de bombeamento e purificação.

5.1.1 Condições básicas e objetivo

O objetivo do projeto de pesquisa foi o desenvolvimento de uma estação básica para o fornecimento autárquico de energia elétrica em combinação com um sistema de tratamento d'água para a entrega de energia e água potável em diferentes regiões do mundo.

No desenvolvimento da estação, os seguintes objetivos principais foram enfocados:

- A parte principal da energia deve ser fornecida pelas fontes de energia regenerativas vento e sol;
- A estação deve corresponder à demanda de energia de acordo com as curvas anuais de carga, constituídas diária e sazonalmente, devendo ser consideradas as demandas básica e máxima;
- Para cobrir a carga máxima, devem ser previstos tanto um sistema de armazenagem (sistema de bateria) quanto um gerador a óleo diesel, garantindo, assim, o abastecimento seguro no caso de avaria ou na falta das fontes de energia regenerativas (sol, vento), devendo ser analisado até que ponto o gerador a óleo diesel possa operar também com óleo vegetal extraído a frio;

- A estação deve ser configurada com uma reserva de potência para o equipamento posterior com um sistema de bombeamento d'água e/ou de tratamento;
- O gerador a óleo diesel ou a óleo vegetal deve ser utilizado como gerador de reserva operando somente para o abastecimento emergencial durante períodos sem geração de energia regenerativa;
- A estação deve poder cobrir, utilizando o princípio modular, diferentes áreas de utilização em função da demanda de energia e do caso de aplicação (p.ex. abastecimento de fazendas, casas isolados ou pequenos povoados com energia elétrica, fornecimento de potência para a disponibilização de água potável ou para a irrigação de áreas utilizadas na agricultura, etc.);
- A tecnologia do sistema deve permitir uma operação automática e exigir pouca necessidade de manutenção e elétrica sob diferentes condições climáticas;
- Os componentes individuais devem permitir longa vida útil em combinação com alta disponibilidade da estação;
- A Estação deve apresentar alta estabilidade da rede, no caso de uma rede interna de abastecimento;
- O serviço deve poder ser executado por mão-de-obra regional a ser treinada.

Também se parte do pressuposto no projeto que deve ser assegurado o registro das condições locais para o uso das fontes de energia regenerativa regionalmente disponíveis. Os fundamentos e equipamentos a serem criados devem ser configurados de tal forma que o registro e a avaliação dos potenciais locais de energia podem ser compreendidos como base para a instalação de estações descentralizadas de fornecimento de energia em outros locais e regiões, p.ex. na América do Sul.

5.1.2 Estrutura e funcionamento

Na Figura 25 é representada a estrutura fundamental do sistema conceituado com aerogerador (6 kW), sistema fotovoltaico (1,5 kW), gerador a óleo diesel (5 kW), bateria, bem como consumidores elétricos.

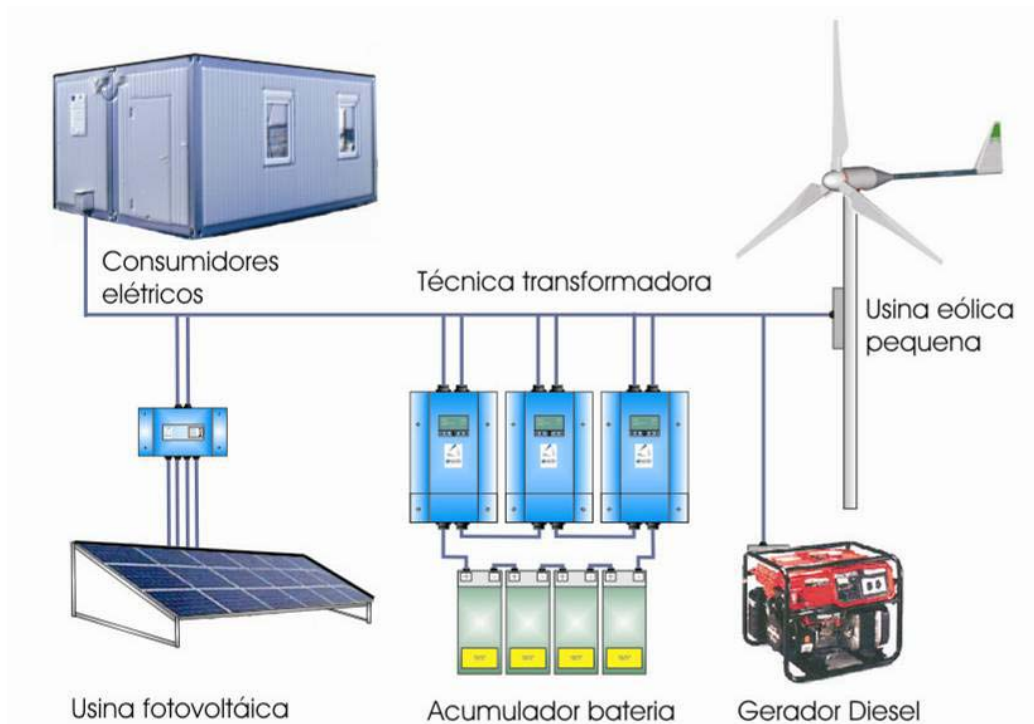


Figura 25: Esquema do sistema da estação de ensaio “Auter”, em Großschirma, Alemanha

Para a formação de uma rede ilhada trifásica, são utilizados três inversores do tipo „Sunny Island“ da empresa *SMA*. Estes inversores criam no lado de corrente alternada uma tensão constante de 230 V (faixa operacional possível de 196 V – 253 V), bem como uma frequência de 50 Hz (faixa operacional possível de 48 Hz – 62 Hz), utilizando a bateria como armazém tampão. No lado da corrente contínua, o inversor providencia um tratamento cuidadoso da bateria, bem como: a observação dos limites de tensão em função de temperatura e corrente, a realização de cargas completas regulares e a adaptação do processo de carga ao tipo de bateria e às condições de uso.

Como componente do sistema mais importante neste contexto, foi montado o aerogerador de pequeno porte *Inventus* com uma potência nominal de 6 kW. A máquina foi instalada primeiramente numa altura do cubo de 7m (Figura 26, esquerda).

Os primeiros testes e resultados de medição do aerogerador mostraram claramente que se deve cobçar urgentemente uma elevação da altura de cubo para melhorar as situações locais do afluxo do ar na altura do cubo e, por conseqüência, a extração de energia. Por fim, a altura do cubo foi elevada a 13 m (Figura 26, direita). Mais material fotográfico detalhado de aerogerador de pequeno porte e do sistema híbrido foi reunido no anexo B.



Figura 26: Sistema híbrido de ensaio completamente instalado com aerogerador de pequeno porte (altura do cubo de 7 m à esquerda e de 13 m à direita) e mastro de medição para o registro de velocidade do vento, direção do vento, temperatura e pressão do ar

5.1.3 Avaliação das experiências operacionais com um aerogerador de pequeno porte

Durante os três anos da fase de teste, foram perseguidos principalmente os seguintes objetivos em relação ao aerogerador de pequeno porte:

- Medição da curva de potência;
- Otimização do rotor;
- Avaliação de um aerogerador de pequeno porte como unidade de geração de energia elétrica num sistema híbrido para o fornecimento descentralizado com energia elétrica;
- Segurança operacional e de abastecimento de uma estação híbrida na base exclusiva de energias regenerativas (vento, sol, biomassa).

A curva de potência (ver anexo C1) apurada através do registro contínuo de potência elétrica, medindo ao mesmo tempo as velocidades locais do vento com anemômetros calibrados na proximidade imediata da locação do aerogerador (mostrado na Figura 26) deixa evidente que a potência nominal de 6kW indicada pelo fabricante (cf. Tabela F1, anexo F) da turbina eólica não pode ser alcançada sob as condições de uso. A potência máxima da máquina fica até abaixo de 5 kW na média de 10 minutos.

Também por esta causa, foram realizados extensos testes de otimização no rotor. Para estes, o ângulo das pás de rotor foi alterado minimamente. O objetivo desta medida era obter um aumento da extração de energia em relação ao aproveitamento da energia eólica. Para este fim, três posições do ângulo da pá foram comparadas:

- Estado original do fabricante;
- 1ª alteração: Redução do ângulo da pá por 1,5°;
- 2ª alteração: Aumento do ângulo da pá por 1,5°.

O coeficiente de potência c'_p indica a proporção entre o potencial energético do vento existente e a energia elétrica gerada pelo aerogerador. Para chegar à representação da evolução do coeficiente de potência em função da velocidade do vento, devem ser registradas a velocidade do vento e a energia elétrica do mesmo. Ambos os valores são medidos no local e gravados para a interpretação posterior. Em seguida, as velocidades do vento são divididas em classes e as médias das velocidades e das potências das respectivas classes são calculadas. Os resultados do cálculo são apresentados nos anexos C2/C3. Como a curva de potência do fabricante encontra-se acima das curvas da primeira e segunda alteração, pode concluir-se que a posição do ângulo da pá do fabricante garante a maior produção de energia, representando a posição mais favorável das três alternativas testadas. Ao mesmo tempo, isto significa que a potência nominal do aerogerador de pequeno porte fica de fato (mesmo com a melhor posição do ângulo das pás) cerca de 20% abaixo da potência informada pelo fabricante.

A geração de energia elétrica do sistema híbrido é determinada decisivamente pela produção de energia dos geradores regenerativos de energia, aerogerador e sistema fotovoltaico. No anexo C4, é resumida a produção média diária dos geradores de energia instalados no período de teste. A média no período de teste é de 18,69 kWh/d. É claramente perceptível que a distribuição anual da geração de energia das fontes eólica e solar complementam-se muito bem sob as condições meteorológicas locais.

A vantagem de um sistema fotovoltaico é, antes de tudo, a geração contínua de energia elétrica, enquanto o aerogerador apresenta uma produção diária maior de energia porém com muito mais flutuação (anexo C5).

Picos de carga que não podem ser cobertos por estes geradores de energia devem ser cobertos pela bateria (anexo C6/C7). Caso a capacidade da bateria também for consumida, normalmente, um gerador de combustão é previsto para o fornecimento de energia. Para os

fins de teste e de ensaio um gerador à gasolina foi integrado no sistema referido. No entanto, este foi substituído pela rede pública disponível nas experiências de longa duração. Isto significa que, ao alcançar um limite definido de ligação, o gerador não foi ligado, mas, em vez disso, o sistema foi comutado para a rede pública, de forma a simular uma fonte de energia externa.

A participação da energia regenerativa depende de várias condições operacionais do sistema:

- Trajetória diária do consumo de energia, bem como da geração de energia regenerativa;
- Trajetória sazonal da demanda por energia, bem como da geração de energia.

Pode verificar-se que a participação das energias regenerativas depende de muitos fatores dinâmicos. Um fornecimento descentralizado de energia na base meramente regenerativa somente é possível e razoável, se estiver disponível um sistema back up na base de óleo vegetal, biogás ou de outras fontes de energia regenerativa. Um abastecimento confiável na base exclusiva de energia solar e eólica, é somente razoável em sistemas com demanda por energia constantemente baixa.

5.1.4 Interpretação e conclusão da fase de teste de três anos²¹

Os resultados da fase de teste, com enfoque no aerogerador de pequeno porte e da operação deste no sistema híbrido, podem ser resumidos, divididos de acordo com enfoques de pesquisa, como segue:

Determinação da curva de potência do aerogerador

- Para elevar a segurança de planejamento e para a colocação bem sucedida no mercado de aerogeradores de pequeno porte, estes necessitam além da curva de potência simulada, uma medida (anexo C1).

Otimização do rotor

- Não se alcançou a otimização do ângulo das pás de rotor do aerogerador de pequeno porte utilizado (anexos C2/C3).

²¹ Somente a interpretação dos resultados foi feito pelo autor!

Avaliação do aerogerador como unidade descentralizada de geração de energia em sistemas híbridos

- A geração de energia por aerogeradores está sujeita a flutuações muito altas, diárias e sazonais (Anexo C5).

Análise da segurança de abastecimento de estações híbridas que utilizam exclusivamente fontes de energia regenerativa

- A flutuação da produção de energia regenerativa pode ser limitada fortemente através da combinação de energia eólica e fotovoltaica (Anexo C5);
- O sistema fotovoltaico é bem apropriado para uma produção contínua de energia (Anexo C4);
- O aerogerador apresenta sazonalmente uma alta produção de energia (Anexo C4),
- O aerogerador, além disso, gera regularmente altas quantidades de energia (excelente para a carga completa da bateria);
- A combinação de fotovoltaica e energia eólica completa-se muito bem no caso de curvas de carga com os picos durante o dia, se o sistema fotovoltaico for adequadamente configurado (anexo C6);
- A combinação de fotovoltaica e energia eólica completa-se muito bem no caso de curvas de carga com os picos durante a noite, se aerogerador for adequadamente configurado (Anexo C7);
- Para poder utilizar a total energia gerada, é necessária uma bateria que possa armazenar a geração de energia descontínua.

5.2 Projeto de pesquisa para o desenvolvimento ulterior da tecnologia de aerogeradores de pequeno porte, na UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Financiado com recursos de fomento à tecnologia da FAPERGS (Edital 07/2004) e da *EPI – Energia, Projetos e Investimentos Ltda.*, no âmbito de um projeto de pesquisa, e coordenado pelo *Centro de Tecnologia (Campus do Vale)* da *UFRGS*, são analisadas possibilidades para a otimização e o desenvolvimento ulterior de componentes para aerogeradores de pequeno porte desde março de 2005.

Na primeira fase do projeto (até o fim de 2005) foram analisados os problemas principais de aerogeradores de pequeno porte para o uso em modernos sistemas híbridos, parcialmente sob o fundamento das experiências da estação de ensaio em Großschirma (cf. 5.1). Neste local, foi elaborado um estudo de mercado internacional referente a fabricantes, mercados de venda e modelos de aerogeradores de pequeno porte, bem como foram comprovadas as chances econômicas desta tecnologia no mercado nacional.

Ainda não foi tomada a decisão da FAPERGS sobre o apoio financeiro na segunda fase do projeto na qual entre outros é planejado a montagem de uma estação de ensaio para o teste de componentes para aerogeradores de pequeno porte (cf. Anexo F).

5.2.1 Pré-requisitos e objetivos

O projeto de pesquisa dedica-se especialmente ao melhoramento do sistema de frenagens e às possibilidades técnicas do monitoramento de dados à distância e do controle remoto de aerogeradores de pequeno porte.

Durante a operação da estação híbrida em Großschirma (cf. 5.1) ocorreram freqüentes problemas com o sistema de frenagem do aerogerador de pequeno porte *Inventus*. Para a limitação do número de rotações e da potência, no caso de velocidades elevadas do vento, as pás de rotor são pressionadas automaticamente para fora do vento através da regulação passiva pitch. Além disso, o sistema é equipado com um freio de disco (cf. Anexo B). Ele é configurado como freio emergencial sendo utilizado na operação ilhada também como freio regular. Freio regular significa que é utilizado para processos de frenagens normais que se repetem com freqüência. Isto é o caso quando, num sistema independente, a energia gerada não pode ser absorvida de modo que o sistema precisa ser desligado e freado. Freios emergenciais intervêm somente no caso de perturbações casuais do processo operacional normal através do acionamento do interruptor vibratório. Além disso, o freio é utilizado para trabalhos de manutenção.

Já dez meses após o início de operação, o freio falhou pela primeira vez e, depois de 13 meses, as sapatas tiveram que ser substituídas (cf. Figura 27).

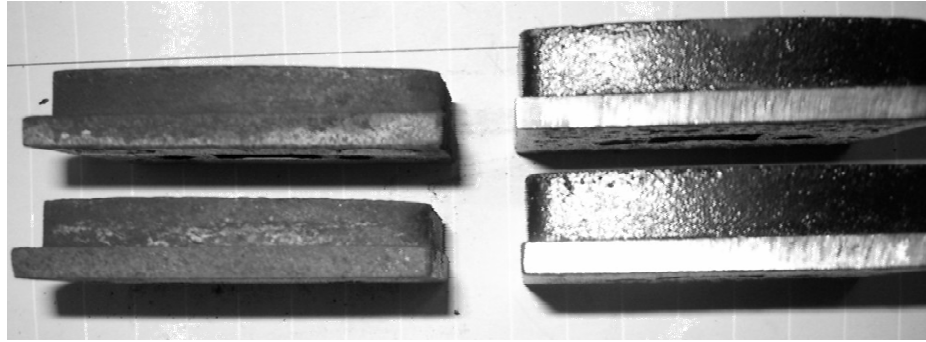


Figura 27: Desgaste das sapatas do freio de disco depois de 13 meses de operação

Todas as experiências operacionais negativas com o sistema de frenagem no decorrer dos primeiros um ano e meio após o início de operação do aerogerador de pequeno porte são representadas na Figura 28.

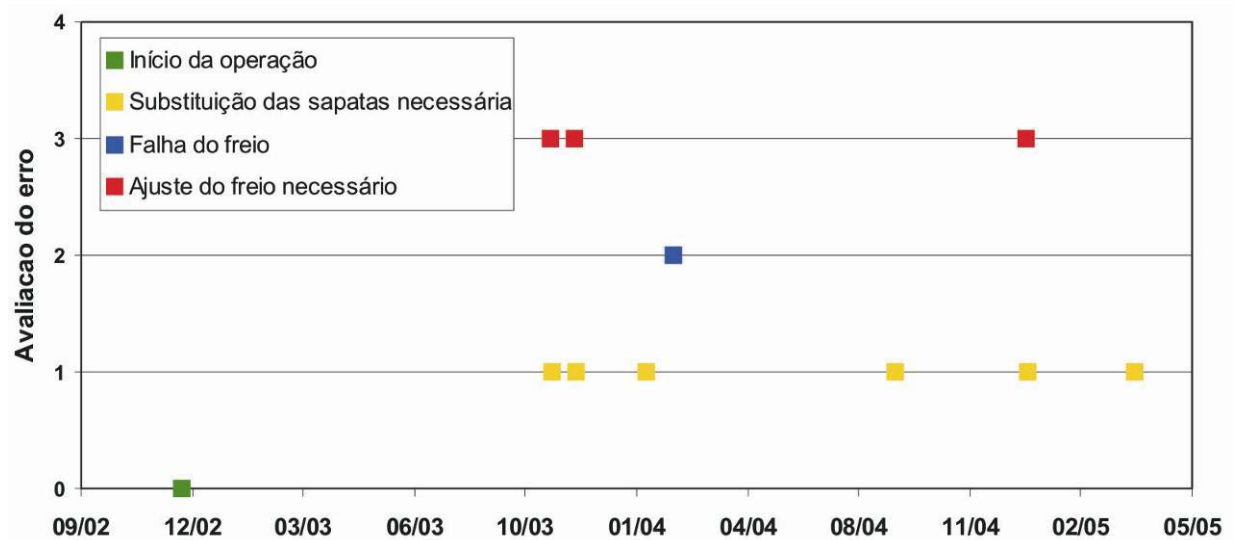
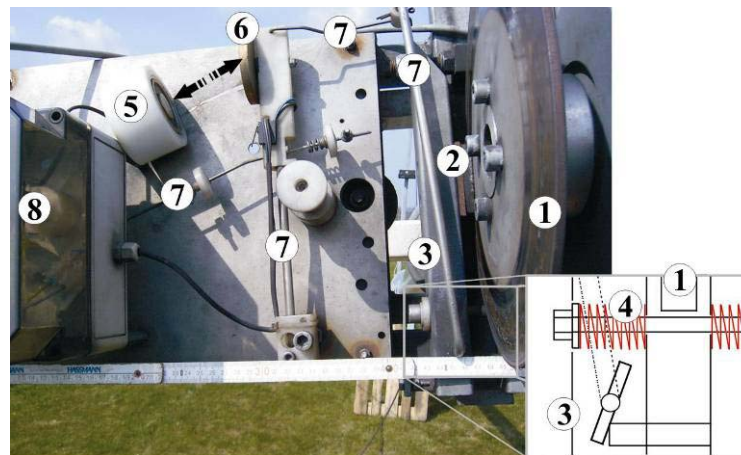


Figura 28: Erros do sistema de frenagem do aerogerador e peso dos erros para a operação do sistema

Como o sistema de frenagem deste aerogerador de pequeno porte foi construído como freio de emergência e está sendo usado como freio regular na operação ilhada, ocorrem processos de frenagem com mais frequência. Por este motivo, o desgaste das sapatas do freio é alto e o sistema de frenagem tem que ser reajustado regularmente. Este intervalo de reajuste pode variar em função do material das sapatas, da localização do aerogerador e das propriedades operacionais do sistema autárquico. Além disso, as cintas do freio são desgastadas de forma inclinada pela construção atual do sistema de frenagem, não levando a melhor distribuição de força sobre o disco do freio, aumentando o desgaste. Um dispositivo automático de reajuste seria complexo demais para este sistema de frenagem e requereria um motor adicional o qual

por sua vez precisaria de energia auxiliar e de um dispositivo de monitoramento das cintas do freio. O problema principal desta construção de freio (cf. Figura 29) consiste no fato que as sapatas só podem se movimentar até cerca de 3 mm em direção ao disco do freio. Disto resulta um desgaste por sapata (pastilha) de cerca de 2 mm até o próximo reajuste necessário porque uma passagem de ar de cerca de 1mm tem que ser assegurada quando o freio está aberto. Uma simples medição do desgaste seria dificilmente possível também por esta causa, já que um contato de todos os 2 mm precisaria ser introduzido nas sapatas, o que é difícil de ser realizado por causa do desgaste irregular.



- | | |
|---------------------|---------------------------------|
| ① Disco de freio | ⑥ Cilindro ferro-magnético |
| ② Pastilha de freio | |
| ③ Escora | ⑦ Sistema mecânico de alavancas |
| ④ Mola de pressão | ⑧ Motor para destravar o freio |
| ⑤ Bobina magnética | |

Figura 29: Sistema de frenagem do aerogerador de pequeno porte *Inventus* ²²

Na configuração de outros sistemas similares de frenagem, precisa ser observado que a mola utilizada que pressiona as sapatas contra o disco mobiliza força suficiente para parar o

²² A mola de tração montada entre as escoras está armada quando o freio está aberto e pode ser regulada com um parafuso de ajuste. Assim, a pressão das cintas de freio sobre o disco pode ser aumentada reduzindo o tempo da marcha em inércia do rotor no processo de frenagem. A INVENTUS não possui um dispositivo regulador automático do freio. Ela precisa ser regulada manualmente com a ajuda dos parafusos fixados nos fins das duas escoras. Destravar e rearmar um freio acionado acontece por um motor elétrico e um sistema mecânico de alavancas ajustado a este.

Uma pequena alavanca é montada no motor que move o sistema de alavancas incluindo o cilindro ferro-magnético na direção ao motor de destrava. Quando o cilindro magnético se aproxima suficientemente da bobina de eletroímã percorrida com energia elétrica, ela o atrai e o segura através do efeito magnético. Ao mesmo tempo, as escoras foram afastadas através da alavanca comprida ligada ao cilindro, liberando o disco do freio. O acionamento do freio é realizado desligando a bobina de eletroímã. A mola armada mobiliza então a força de frenagem para parar a máquina.

O interruptor vibratório que se encontra na cabeça da torre, protege o sistema de destruição por rajadas violentas de vento. Quando não há demanda de energia elétrica em sistemas ilhados autárquicos, o aerogerador deve ser parado para não sobrecarregar a bateria e preservar o gerador de “queimar”.

rotor durante a operação. Durante a freada o rotor ainda pode fazer 5-10 rotações até que pare (WIND POWER MONTHLY, 1996).

Se, no entanto, o freio for superdimensionado e/ou a mola desenvolver forças grandes demais, o aerogerador é exposto a enormes cargas que podem levar as asas a dobrar ou até a quebrar e, caso o freio esteja montado atrás da transmissão, à destruição da engrenagem. Se o freio for configurado fraco demais, a máquina pára somente após muitas rotações levando a um desgaste proporcional das cintas do freio. No caso extremo, o disco do freio pode estar em brasa de modo que as sapatas não oponham resistência de fricção suficiente ao disco. Conseqüentemente, deve-se observar qual é o momento de frenagem do respectivo freio. Durante o processo de frenagem, dois momentos precisam ser superados. Por um lado, é a energia de rotação – contida no rotor que está girando, bem como na engrenagem e no rotor do gerador elétrico – ou o momento de inércia. Por outro lado, durante o tempo de frenagem, as pás de rotor ainda transformam energia eólica em potência do eixo do rotor a qual não pode ser negligenciada pois durante a freada o rotor perpassa uma faixa de número de rotações, na qual as forças aerodinâmicas desenvolvem-se inteiramente, transformando o máximo de potência do vento.

O sistema de frenagem fraco impossibilita a operação autárquica com pouca manutenção do aerogerador de pequeno porte e, por conseqüência, do sistema total.

Ao mesmo tempo, não há possibilidade de monitoramento à distância e/ou de controle remoto (cf. 4.6), devendo ser previstos intervalos curtos de serviço ao utilizar a máquina para poder garantir alta segurança operacional. Isto contradiz as exigências à maior independência e confiabilidade, tendo custos de manutenção o mais baixo possível para uma unidade descentralizada de fornecimento de energia para regiões afastadas.

O projeto de pesquisa teve por causa disso, antes de tudo, os seguintes objetivos:

- Desenvolvimento de um novo sistema de frenagem para aerogeradores de pequeno porte na operação em sistemas híbridos;
- Desenvolvimento de sapatas com desgaste menor configuradas especialmente para o uso em aerogeradores de pequeno porte;
- Verificação das possibilidades de monitoramento à distância e de controle remoto de aerogeradores de pequeno porte em todo o Brasil.

5.2.2 Avaliação das conclusões atuais

A possibilidade melhor e mais econômica para frear um aerogerador de pequeno porte é (como utilizado também no *Inventus*) um freio de disco. É simples na sua estrutura, de baixo preço e pode ser configurado através de respectivas forças de mola (força elástica). Isto significa que o freio é ventilado de forma eletro-mecânica, sendo ativado no caso da perda de energia de abastecimento, tornando, assim, desnecessário o uso de energia auxiliar para parar o sistema. Na construção do sistema de frenagem, os seguintes aspectos devem ser observados:

- desgaste paralelo e inteiro das cintas de freio;
- um consumo de energia justificável para abrir o freio e mantê-lo aberto;
- componentes baratos, existentes no mercado;
- funcionamento simples e o mais isento de avarias possível;
- desgaste mínimo das cintas através da melhor composição dos materiais;
- indicador de desgaste simples e funcional;
- facilidade para substituir as cintas de freio.

Como o uso de um freio de disco representa a solução mais favorável, os cinco resultados elaborados baseiam-se neste princípio. A dificuldade fica na exigência primária da configuração „fail-save“ do freio. São oferecidas três soluções hidráulicas e uma mecânica (Anexo D).

Para uma avaliação mais exata dos sistemas de frenagem, esta deve ser feita com respeito aos objetivos antes formulados. A melhor solução apurada no processo de seleção pode ser seguida com a construção e a configuração exata dos diversos componentes. Na análise de valor, os aspectos técnicos e econômicos devem ser considerados. A ponderação é expressa com os números 0 – 3. Na Tabela 17, os critérios de avaliação e os fatores de ponderação pertinentes são listados, incluindo cálculos. A matriz de valores resultou de considerações abrangentes e avaliações técnicas dos diversos sistemas.

Tabela 17: Análise avaliativa dos princípios de construção de freios de disco para aerogeradores de pequeno porte

		2	2	3	2	2	3	2	3	2	2	1
G =		2	2	3	2	2	3	2	3	2	2	1
Critérios de avaliação												
	Custos de fabricação de componentes específicos											
	Custos de componentes existentes no mercado											
	Dispêndio de energia para manter freio aberto											
	Dispêndio de energia para abrir o freio											
	Princípio de funcionamento											
	Carga sob a transmissão por causa de intervalos de força de frenagem											
	Fator de risco para a segurança operacional											
	Sujeito a distúrbios											
	Dispêndio da montagem do sistema de frenagem											
	Dispêndio da montagem das cintas de freio											
	Manutenção e reparação											
	Danos ao meio ambiente											
	Reciclagem											
W =		2	1	3	2	2	3	2	1	2	2	1
a)		2	1	3	2	2	3	2	1	2	2	1
b)		2	1	2	3	2	3	2	1	3	2	1
c)		1	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1
d)		1	2	1	2	1	2	2	2	1	3	2
e)		2	3	1	1	2	1	2	2	2	1	1
W*G^T =		52	53	49	52	46						

Valores das variáveis	Frenagem	Ponderação = G
Alto (mal) = 3	a) primeiro sistema de frenagem mecânico	Matriz transposta = G^T
Médio (médio) = 2	b) segundo sistema de frenagem mecânico	Matriz de valores = W
Baixo (bom, simples) = 1	c) primeiro sistema de frenagem hidráulico	
sem significado = 0	d) segundo sistema de frenagem hidráulico	
	e) sistema de frenagem hidráulico com reajustamento	

Como melhor princípio de ação, evidenciou-se na análise avaliativa o “sistema hidráulico com reajustamento”. Destacou-se pela força de frenagem constante, pouca necessidade de energia para soltar e segurar o freio e pela troca simples das cintas do freio. Desvantajosos são os custos de aquisição dos diferentes componentes e o princípio de ação dificilmente inteligível à primeira vista.

Resumindo, a melhor solução para o sistema de frenagem é o freio de disco selecionado junto com um gerenciamento Dumpload. Por causa disso, as cintas de freio só são exigidas em processos de parada e o desgaste é reduzido a um mínimo. O gerenciamento Dumpload que deve ser classificado como freio de resistência providencia, em caso de superoferta de energia elétrica gerada, a “eliminação” desta por barras aquecedoras ou lâmpadas incandescentes. Neste caso, a transmissão é mantida com número de rotações constante pelo momento resistente gerado pelo gerador. Isto corresponde também na operação normal do sistema ao princípio de ação do gerador não representando nenhum prejuízo ou distúrbios do aerogerador como conseqüência. No entanto, dados do vento da locação de instalação e os hábitos dos usuários referentes ao consumo de energia devem ser levantados para a configuração de uma regulação Dumpload. Com estes dados, um acumulador pode ser configurado para que os Dumploads desperdicem menos energia possível.

Para o registro do desgaste dos freios também vale utilizar uma tecnologia de sensores. Instalações de medição complexas demais somente causam erros desnecessários. O monitoramento do desgaste máximo da cinta é necessário para o freio. Conseqüentemente, um sinal deve ser transmitido à captação ou à transmissão de dados, se existente, logo que a menor espessura admissível da cinta da sapata for alcançada. Uma indicação do desgaste pode ser realizada através de um diodo emissor de luz (LED) colocado na base da torre ou no controle do gerador. Este diodo tem que iluminar assim que a cinta do freio alcançar o limite de desgaste. Deve ser considerado também em que intervalo um controle do sistema tem que ser realizado para que o intervalo de tempo entre o registro da indicação de desgaste disparada e a troca da cinta de freio possa ser superada e o sistema continue operando. Conseqüentemente, o sinal ou a corrente de energia do diodo devem ser liberados antes que o limite de desgaste máximo admissível seja alcançado. A voltagem necessária para o diodo deve ser fornecida pelo transformador que se encontra no controle do gerador. Os contatos postos nas sapatas servem tão somente para fechar o circuito simples. Se as cintas forem gastas de forma irregular pela construção do freio, seria conveniente pôr sensores nos dois lados do disco de freio. No anexo E, quatro indicadores de desgaste são explicados e seu

funcionamento é descrito. Os princípios referidos emitem, no entanto, somente sinais e/ou liberam corrente de energia elétrica para o diodo emissor de luz. Uma inserção no registro de dados ou na transmissão de dados pode ser feita através de mais uma entrada do data-logger, processado no data-logger e transmitido ao ponto de apoio do gerenciamento da operação.

Os princípios apresentados (cf. Anexo D) de um indicador de desgaste podem ser utilizados para qualquer um dos sistemas de frenagem supra apresentados.

Os quatro indicadores de desgaste, apresentados e descritos no anexo D, preenchem todos os critérios requeridos. Em todos os princípios mostrados, não se realizam medições do estado da cinta, porém, indica-se quando é necessário renovar a cinta de freio. Este indicador pode ser variado em função do intervalo de manutenção e do tempo para providenciar as cintas através de pequenas alterações, por exemplo, da profundidade de entrada do fio de desgaste. Isto tem que ser escolhido em função da locação. Sendo prevista uma transmissão de dados à distância para um ou mais aerogeradores, é aconselhável incluir o dispositivo de desgaste na transmissão. Ultrapassando-se o limite máximo de desgaste das cintas de freio, pode-se gerar um desgaste indesejado do disco de freio. Deste modo, seria necessário renovar adicionalmente o disco, o que é relativamente caro. Além disso, não é mais garantido frear a transmissão para eventuais trabalhos de manutenção.

Para as sapatas de aerogeradores de pequeno porte, são utilizados atualmente produtos comuns da indústria automobilística, consistindo nos materiais apresentados na Figura 30.

O material e a receita para as cintas do freio são determinados por diversos critérios exigidos (KLUG, 1997):

- desgaste pequeno;
- variação menor possível do valor de fricção (diferenças de temperatura, altas velocidades deslizantes e altas pressões da superfície da cinta);
- cinta não deveria nem crescer nem encolher;
- resistência à corrosão;
- dureza alta;
- resistência alta à flexão e resistência alta à cisalhamento;
- não combustível ou inflamável;
- boa capacidade de condução de calor;
- não tender a ruídos de frenagem.

- não onerar o meio-ambiente por abrasão ou com cheiro (sem amianto)
- disco de freio ou tambor de freio devem ser conservados através da cinta
- peso baixo
- preço de compra baixo

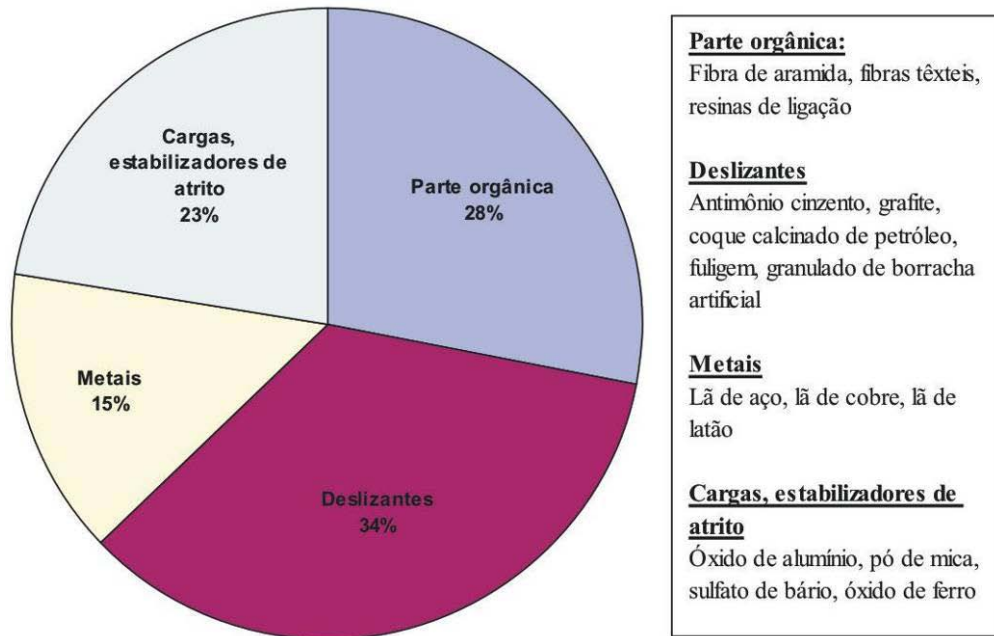


Figura 30: Mistura dos materiais das sapatas dos freios de disco de aerogeradores de pequeno porte uma cinta de freio padrão
KLUG, 1997

Os fabricantes de cinta de freio não podem reunir todas estas propriedades numa cinta de freio. Por isso, são oferecidas sapatas com requisitos específicos no mercado. Para as exigências referentes ao uso em aerogeradores de pequeno porte, no âmbito de alterações de misturas comuns, novas cintas de freio devem ser desenvolvidas e verificadas (cf. Anexo F).

6. PERSPECTIVAS

6.1 Demanda por necessidade de aerogeradores de pequeno porte e de estações híbridas no Brasil

A demanda pela tecnologia de aerogeradores de pequeno porte e por sistemas híbridos completos no Brasil é estimada muito alta.

Uma análise de mercado representativa, realizada no início de 2005 por COMTEXTO²³ sobre a necessidade de e demanda por aerogeradores de pequeno porte com potência nominal de até 20 kW junto a pequenos fornecedores regionais de energia (cooperativas) e empresas de produção agrícola nos três Estados Rio Grande do Sul, Mato Grosso do Sul e Bahia mostrou que cerca de 37% (de 30) cooperativas perguntadas e 49% (de 120) empresas agrícolas têm interesse em adquirir aerogeradores de pequeno porte ou sistemas híbridos. Ao mesmo tempo, dois fatores básicos para a decisão de compra foram mencionados com maioria predominante. No topo, ficam a segurança operacional e a confiabilidade da tecnologia. Somente sistemas testados de forma abrangente e de longa duração, bem como já empregados no mercado com sucesso vão ao encontro dos interesses dos compradores. Ao mesmo tempo, dá-se menos valor a custos baixos do sistema, porém, um tanto mais à confiabilidade e à experiência do oferecedor (COMTEXTO, 2005).

6.2 Perspectivas e prognósticos do desenvolvimento do mercado internacional

Os mercados e as perspectivas para a produção e a utilização de sistemas descentralizados de fornecimento de energia foram analisados pela WADE²⁴ no âmbito do estudo *World Survey of Decentralized Energy 2005*. Como as principais áreas para vendas, a médio e longo prazo, foram indicados regiões e países os quais, como o Brasil, são definidos devido ao seu desenvolvimento econômico como países recém-industrializados (Tabela 18) possuindo, no entanto, ao mesmo tempo alta demanda por eletrificação descentralizada rural (WADE, 2005).

²³ ComTexto – Informação de Marketing (Porto Alegre), Instituto de Pesquisa de Mercado

²⁴ WADE - World Alliance for Decentralized Energy (Edinburgh), Aliança Mundial pela Energia Descentralizada

Tabela 18: Mercados de crescimento, a médio e longo prazo, para o fornecimento descentralizado de energia na base do uso de recursos regenerativos
Dados WADE, 2005

País recém-industrializado / Região	Avaliação do mercado
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> - demanda muito alta por fornecimento descentralizado de energia (cf. 5.1); - alto potencial de energia regenerativa (eólica / solar); - preços de energia crescentes; - incentivo público para esta tecnologia; - maior potencial de crescimento para a produção e a utilização de sistemas descentralizados de produção de energia no mundo todo.
Rússia	<ul style="list-style-type: none"> - demanda alta; - potencial medíocre de fontes de energia regenerativa; - nenhum incentivo público; - apesar disso, boas chances de crescimento.
Índia	<ul style="list-style-type: none"> - demanda muito alta nas regiões rurais; - alto potencial de fontes de energia regenerativa; - consumo de energia elétrica crescendo rapidamente; - incentivo público através de nova legislação de energia; - potencial de crescimento muito alto.
Oriente Médio	<ul style="list-style-type: none"> - demanda alta por eletrificação rural; - situação de vento e potencial de irradiação solar acima da média; - mercado do futuro atrativo para sistemas descentralizados de energia na base do uso de fontes de energia regenerativa.
China	<ul style="list-style-type: none"> - demanda muito alta; - bom potencial de fontes de energia regenerativa; - programas de incentivo do Banco Mundial para o uso reforçado de energias regenerativas em sistemas descentralizados de fornecimento de energia; - preços de energia elétrica muito baixos (tendo preços altos de carvão) favorecem ao mesmo tempo artificialmente a ampliação da rede; - de forma paradoxal, o mercado chinês apresenta na área do fornecimento descentralizado de energia na visão de hoje perspectivas moderadas para o futuro.

Neste estudo, o Brasil é identificado como mercado-chave para o desenvolvimento futuro nas áreas de produção e de aplicação de sistemas de energia regenerativa para o fornecimento descentralizado de energia. Um dos obstáculos principais para o mercado ainda é a disponibilidade de componentes de sistema nacionais para cujo desenvolvimento o presente trabalho pretende dar uma contribuição.

A potência anual instalada é hoje de cerca de 70 MW no mundo inteiro. Até 2010 espera-se um aumento de novas construções de cinco vezes a 350 MW anuais (SONNE, WIND & WÄRME, 2006). As vendas mundiais de aerogeradores de pequeno porte são prognosticadas com um total de 150.000 unidades entre 2006 e 2010 (AWEA, 2005).

6.3 Oportunidades empresariais através da produção nacional de um moderno aerogerador de pequeno porte

A produção e a comercialização de um aerogerador de pequeno porte desenhado no capítulo 4 no sistema modular com classes de potência de 6 e 10 kW engloba potencial interessante e promissor para (novas) micro-empresas e empresas de tamanho médio. O plano financeiro e de negócio²⁵ desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa FAPERGS 07/2004 - N° 0407051 (cf. 5.2), que documenta, analisa e projeta exatamente esta idéia de negócio, chega como resultado a um balanço muito positivo.

O cenário empresarial²⁶ parte da produção e da comercialização dos produtos listados na tabela que segue:

Tabela 19: Linha de produtos de uma empresa fictícia no ramo de negócio de aerogeradores de pequeno porte e mercado de vendas nacional
TOCHTROP, 2005

Produto	Descrição comercial	Preço por unidade (R\$)
Turbina 6 kW	Aerogerador de pequeno porte inovador com potência nominal de 6kW para o uso em sistemas híbridos ou como máquina instalada isoladamente.	29.990,00
Turbina 10 kW	Aerogerador de pequeno porte inovador modular com potência nominal de 10kW para o uso em sistemas híbridos ou como máquina instalada isoladamente.	44.990,00
Freio	Freio a disco com controle automático de desgaste e dispositivo regulador para aerogeradores de pequeno porte.	3.630,00
Sapatos	Sapatos com desgaste extremamente baixo para freios de disco.	129,00
Controle	Sistema de monitoramento de dados à distância para aerogeradores de pequeno porte.	2.990,00

Os custos totais com desenvolvimento, implantação e investimentos em capital fixo para montar uma linha de produção dos produtos novos somam cerca de R\$ 980.000,00 (cf. anexo G). Para a montagem e o início da produção, é prevista a utilização de um empréstimo no valor de R\$ 400.000,00 (cf. anexo G). Os custos fixos na fase operacional foram prognosticados em cerca de R\$ 16.000,00 mensais no primeiro ano crescendo depois nos

²⁵ Considerando a venda de aerogeradores de pequeno porte completamente montados, bem como a comercialização de componentes individuais (especialmente do sistema de frenagem e do sistema de monitoramento de dados à distância) – cf. Anexo G.

²⁶ Configurado para o desenvolvimento do equipamento, para a implementação de uma produção no âmbito da constituição de uma nova empresa e os primeiros cinco anos de operação com o desenvolvimento do mercado exposto nos capítulos 5.1 e 5.2.

quatro anos subseqüentes a aproximadamente R\$ 39.000,00 de acordo com o desenvolvimento do negócio e o número de funcionários (cf. anexo G).

Os custos variáveis que representam, por dependerem de um grande número de dados incertos (como número de vendas e custos de produção) o maior fator de incerteza, foram calculados com R\$ 218.000,00 no primeiro ano operacional. Se todos os números de vendas e custos prognosticados puderem ser mantidos, os custos variáveis aumentarão a aproximadamente R\$ 1.980.000,00 até o quinto ano operacional.

Finalmente, foram prognosticados uma TIR (taxa interna de retorno) de 17 por cento, bem como um prazo de payback menor que 2 anos. No primeiro ano operacional, ainda deve se calcular um resultado negativo mas já, no segundo ano, o ponto de nivelamento será ultrapassado.

O resultado líquido (no primeiro ano operacional aprox. R\$ -3.800,00) já alcança o valor de aprox. R\$ 150.000,00 no segundo ano (TOCHTROP, 2005).

A análise de custos e o plano financeiro para o modelo de negócio ora apresentado podem ser vistos no anexo G.

7. DISCUSSÃO

A demanda por abastecimento descentralizado com energia elétrica baseada no uso de fontes de energia regenerativas, antes de tudo, para a eletrificação rural de regiões afastadas da rede onde os custos da ampliação da rede das distribuidoras regionais de energia elétrica podem ultrapassar várias vezes os custos da instalação de um abastecimento descentralizado da população e de empresas, é muito alta no mundo e especialmente no Brasil. Ao mesmo tempo, a instalação de tais sistemas autárquicos é fomentada através de programas públicos de incentivo já que com a elevação do grau de eletrificação sempre cresce também o nível social geral em relação à educação, produção, saúde e bem-estar.

No caso da eletrificação descentralizada, uma oferta constante de energia pode ser proposta ao consumidor em assim chamados sistemas híbridos, especialmente através da combinação do uso de aerogeradores e de sistemas fotovoltaicos, caracterizados por potenciais de geração de energia em parte fortemente oscilantes em função da estação e da hora do dia, complementados por pequenos geradores a óleo diesel e baterias. Na base das situações locais de vento e de irradiação, as unidades geradoras de energia elétrica podem ser dimensionadas de tal forma que elas se complementam de melhor forma possível em relação ao potencial de geração. O sistema de bateria configurado de acordo com isto pode compensar a curto e a médio prazo as demais oscilações referentes à demanda por energia elétrica e a supercapacidades. Geradores a óleo diesel servem como unidade geradora de emergência.

De costume, o aerogerador é o elemento de maior potência de tais estações híbridas.

Exigências específicas aos aerogeradores de pequeno porte em relação à tecnologia do sistema, à construção, ao uso de materiais, aos custos, à confiabilidade, à segurança operacional e à facilidade de operar não podem ser preenchidas pela tecnologia de máquinas existentes, significando isto que atualmente nenhuma máquina apropriada para o uso em sistemas híbridos no Brasil está disponível.

Considerando todos os critérios de exigências relevantes, resulta a concepção de um sistema para um novo aerogerador de pequeno porte, apresentada a seguir.

Tabela 20: Concepção de sistema para um novo aerogerador de pequeno porte, habilitado para sistemas híbridos, adaptada às exigências locais brasileiras

Componente principal / unidade operacional	Configuração construtiva	Utilização principal do material
Pás de rotor	<ul style="list-style-type: none"> - orientação das fibras para baixa rigidez flexional na direção de impacto para deformação por flexão elástica das pás na direção do vento - configuração do perfil específica para o sistema através de cálculos de corrente de ar - otimização experimental do ângulo da pá - torção das pás de rotor em direção ao cubo - diâmetro do rotor variável para diferentes potências do gerador 	fibra de vidro
Caixa de multiplicação / rolamento do rotor	<ul style="list-style-type: none"> - espaço suficiente para óleo na caixa de máquinas - vedações e rolamentos de baixa fricção - engrenagem inclinada - relação de transmissão variável (50 / 60 Hz) 	aço fundido
Gerador	<ul style="list-style-type: none"> - máquina assíncrona - magneto permanente - alta classe de isolamento - blindagem completa - classes de potência nominal de 6 e 10 kW - comutação de pólos possível - faixa operacional até 45°C de temperatura externa - versões mono- e trifásicas - 2 escalas de número de rotações 	aços resistentes do calor e pressão / materiais fundidos
Sistema de frenagem	<ul style="list-style-type: none"> - freio de disco com reajuste automático e monitoramento à distância - freio do gerador (curto-circuito do gerador) - freio aerodinâmico (Stall) - pelo menos dois sistemas de frenagem independentes - freio de emergência direto manual 	componentes mecânicos do freio de disco de aço galvanizado a fogo / cintas de freio de novas composições especificamente adaptadas ao uso em aerogeradores de pequeno porte
Caixa de máquinas	<ul style="list-style-type: none"> - anéis coletores para a transmissão de potência - fundição do componente em uma peça - blindagem e revestimento resistente à água do mar - desenho aerodinâmico 	caixa de alumínio
Orientação	<ul style="list-style-type: none"> - sistema a jusante do vento 	
Mastro	<ul style="list-style-type: none"> - mastro em treliça ancorado - sem fundação, somente base de fundação / base em forma de cruz - dispositivo de montagem integrado com guincho - alturas de cubo variáveis de 12 / 15 / 18m 	aço galvanizado a fogo
Conexões parafusadas & de flange	<ul style="list-style-type: none"> - componentes fundidos - componentes grandes - superdimensionamento de 3 a 4 vezes 	aço galvanizado a fogo / aço galvanizado
Sistema de segurança e de controle	<ul style="list-style-type: none"> - sensor de vibrações, interruptor de temperatura, sensor de força centrífuga - ligar e desligar automaticamente - monitoramento contínuo do sistema (à distância) - sistemas de regulação e de segurança independentes 	

Além disso, o sistema global requer uma configuração para uma velocidade de vento de sobrevivência até 60 m/s, e uma vida útil de vinte anos (imitando as modernas máquinas Megawatts), bem como (como objetivo do desenvolvimento) custos específicos menores que 5.000,00 R\$/kW. Isto pode ser alcançado pelo sistema modular elaborado em combinação com produção de componentes e montagem final nacionais, com o maior grau de automatização possível e com a utilização de uma construção de baixo custo que economiza materiais, como exposto.

Como comprovante da potência do aerogerador de pequeno porte, deve ser prevista, além da simulação computadorizada da curva de potência, também a medição da característica de potência em função da situação do vento, por meio de protótipos em teste de campo.

As perspectivas sob o ponto de vista da economia nacional e da administração da produção e da utilização de aerogeradores de pequeno porte são enormes no mundo, mas especialmente no Brasil. Prognostica-se um aumento da potência nova anual de hoje cerca de 70 MW, em cinco vezes – no prazo de quatro anos.

Para que o Brasil tire proveito deste desenvolvimento de mercado, desenvolvimentos, novos e ulteriores, documentados, bem como a produção nacional destes são indispensáveis.

8. CONCLUSÕES

As pesquisas e as análises realizadas, por um lado, referentes ao estado de tecnologia, às taxas de avaria, às causas de erros e aos custos específicos de aerogeradores de pequeno porte existentes, por outro lado, referentes às diversas possibilidades de aplicação, às demandas do mercado (inter-)nacional e às perspectivas econômicas desta tecnologia provaram abrangentemente a demanda urgentemente necessária por pesquisa e desenvolvimento nesta área.

Foram tornados evidentes de forma detalhada todas as condições meteorológicas locais, todos os parâmetros técnicos do sistema, bem como as particularidades sócio-econômicas relevantes para a configuração construtiva e de materiais de um moderno aerogerador de pequeno porte, mas também foram realizadas a comparação e a avaliação dos sistemas existentes no mundo.

A concepção de um projeto, resultante destes, de um aerogerador de pequeno porte que corresponde às necessidades e exigências específicas do Brasil, deve ser concretizada na realidade agora e a sua funcionalidade e a segurança operacional devem ser testadas e provadas. Para tal fim, devem ser desenvolvidos, primeiramente, componentes individuais de acordo com o presente projeto, como planejado (cf. 5.2) no âmbito de projetos de pesquisa e de desenvolvimento, para, em seguida, poder-se analisar protótipos completos sobre condições próximas à aplicação em diversas locações.

ANEXOS

ANEXO A	O Programa Luz Para Todos	89
ANEXO B	Fotos da estação de ensaio, especialmente do aerogerador de pequeno porte <i>Inventus</i> , para o fornecimento descentralizado de energia em Großschirma, Alemanha	93
ANEXO C1	Curso da potência registrada do aerogerador de pequeno porte <i>Inventus</i> (6 kW) em função da velocidade do vento	95
ANEXO C2	Curso do coeficiente de potência do aerogerador de pequeno porte sobre a velocidade do vento em função do ângulo das pás de rotor	96
ANEXO C3	Curso da potência do aerogerador sobre a velocidade do vento em função do ângulo das pás de rotor	97
ANEXO C4	Comparação da produção diária média (em kWh) de aerogerador de pequeno porte e sistema fotovoltaico da estação híbrida autárquica	98
ANEXO C5	Desvio percentual da geração média de energia elétrica de aerogerador de pequeno porte e módulos solares da média	99
ANEXO C6	Curva de potência de aerogerador de pequeno porte, sistema fotovoltaico e consumidores, bem como curva do estado de carga da bateria (medição durante o dia)	100
ANEXO C7	Curva de potência de aerogerador de pequeno porte e de consumidores, bem como curva do estado de carga da bateria (somente medição noturna)	101
ANEXO D	Possibilidades construtivas do freio de disco para aerogeradores de pequeno porte	102
ANEXO E	Possibilidades de construção de indicador do desgaste da cinta de freio para as sapatas de freios de disco de aerogeradores de pequeno porte	109
ANEXO F	Concepção de uma estação de ensaio para o desenvolvimento ulterior de aerogeradores de pequeno porte	114
ANEXO G	Análise de custos e plano financeiro da produção nacional de aerogeradores de pequeno porte para o mercado brasileiro	127
ANEXO H	Vista geral do mercado de aerogeradores de pequeno porte	139

ANEXO A - O Programa Luz Para Todos

Este programa foi instituído em 11 de novembro de 2003 visando propiciar, até 2008, o atendimento em energia elétrica a população do meio rural brasileiro que ainda não tem acesso a esse serviço público.

O Governo Federal, por meio do Ministério de Minas e Energia, elaborou-o com o intuito de assegurar que o esforço para eletrificação do campo resulte em incremento da produção agrícola, proporcionando o crescimento da demanda por energia elétrica, o aumento da renda e a inclusão social da população beneficiada.

Para alcançar seus objetivos, o Programa prioriza o atendimento com tecnologia de rede de baixo custo e, de forma complementar, com sistemas de geração descentralizada com rede isolada e sistemas individuais. Nesse cenário, destinará recursos a projetos que visem ao atendimento de futuros consumidores situados em áreas rurais e privilegiará o caráter social do investimento. Para tanto, contará com a seguinte estrutura operacional:

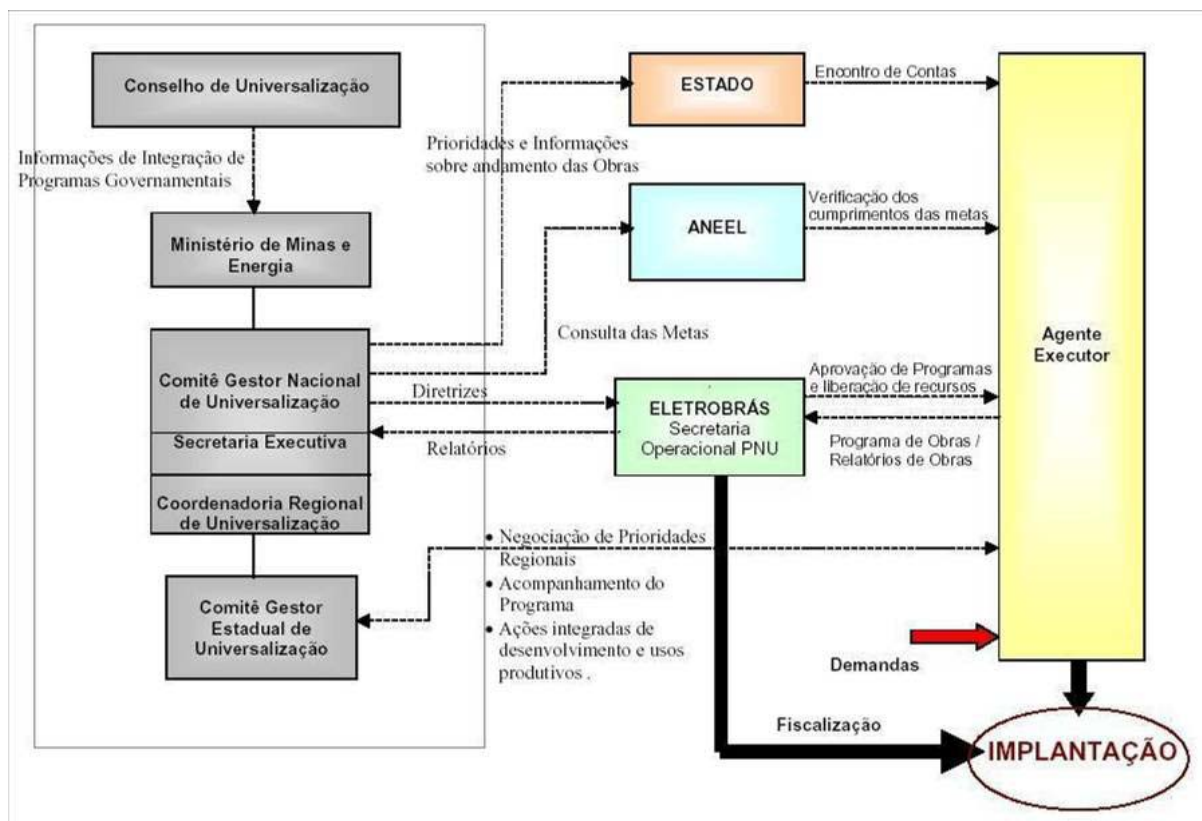


Figura A1: Estrutura Operacional do Programa Luz para Todos.

Fonte: MME, 2003

Contemplará, ainda, ações para capacitar, entre outros, os agentes executores e os técnicos de desenvolvimento, para estimular o uso eficiente e produtivo de energia elétrica. Por meio de processos de capacitação, podem ser identificadas, podem ser identificadas

oportunidades e/ou apresentados projetos para as áreas rurais que contemplem a implementação tanto de programas de informação aos consumidores com de projetos de uso eficiente e produtivo de energia elétrica.

Por fim, a meta do programa é garantir o acesso e o uso de energia elétrica em todo o meio rural brasileiro até 2008. Para tanto, serão efetivados 2 milhões de novos atendimentos, distribuídos conforme a Tabela A1:

Tabela A1: Atendimentos/ano.

Ano	Atendimentos	Total
2004	150.000	150.000
2005	620.000	770.000
2006	630.000	1.400.000
2007	300.000	1.700.000
2008	300.000	2.000.000

Panorama nacional da exclusão elétrica

Segundo os dados da Pesquisa Nacional por Amostragem Domiciliar (PNAD), realizada pelo Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE), referentes ao ano de 2001, aproximadamente 96% da população brasileira tem acesso à energia elétrica em seus domicílios. No entanto, dada a heterogeneidade do País em termos sócio-econômicos e de desenvolvimento regional, o mapa da exclusão elétrica nos mostra que em algumas regiões a eletrificação domiciliar encontra-se significativamente abaixo da média nacional.

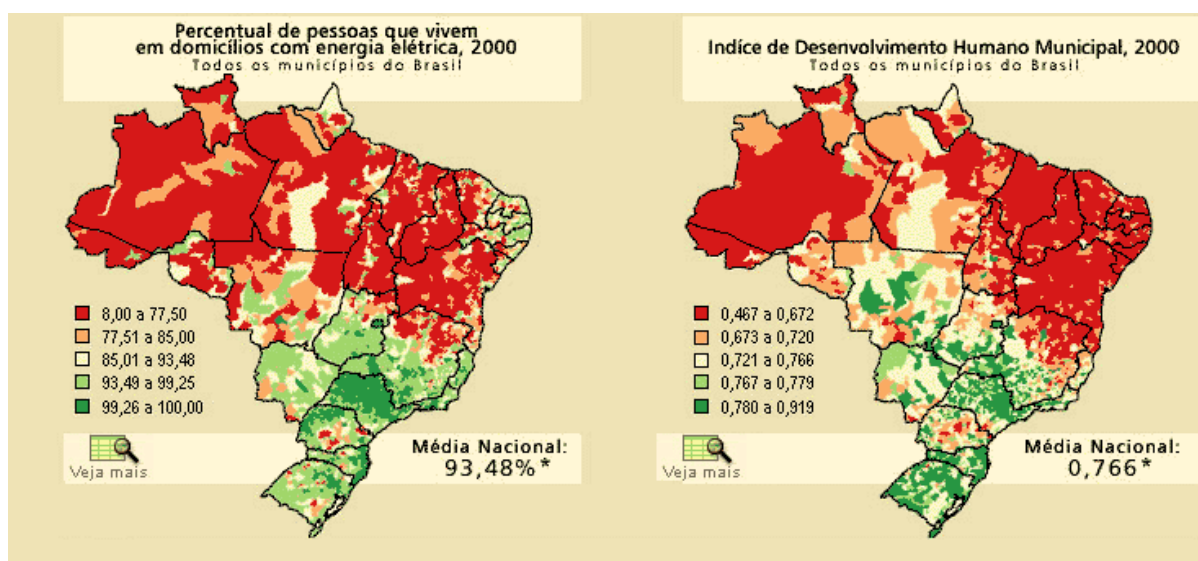


Figura A2: Mapa da Exclusão Elétrica X IDH.

Fonte: UNDP, 2003

Existem atualmente cerca de 2 milhões de domicílios rurais não atendidos, correspondendo a 80% do total nacional da exclusão elétrica, ou seja, 10 milhões de pessoas vivem no meio rural sem acesso a esse serviço público. Como observação geral destaca-se que os estados da Região Norte, acrescidos de Piauí e Maranhão, apresentam os menores índices percentuais de eletrificação rural, enquanto a Bahia possui o maior número absoluto de excluídos.

A Figura A3 mostra o panorama da exclusão elétrica no País em termos absolutos e as Figuras A4 e A5 a posição dos estados e regiões do País, respectivamente, quanto ao seu nível de não atendimento rural.

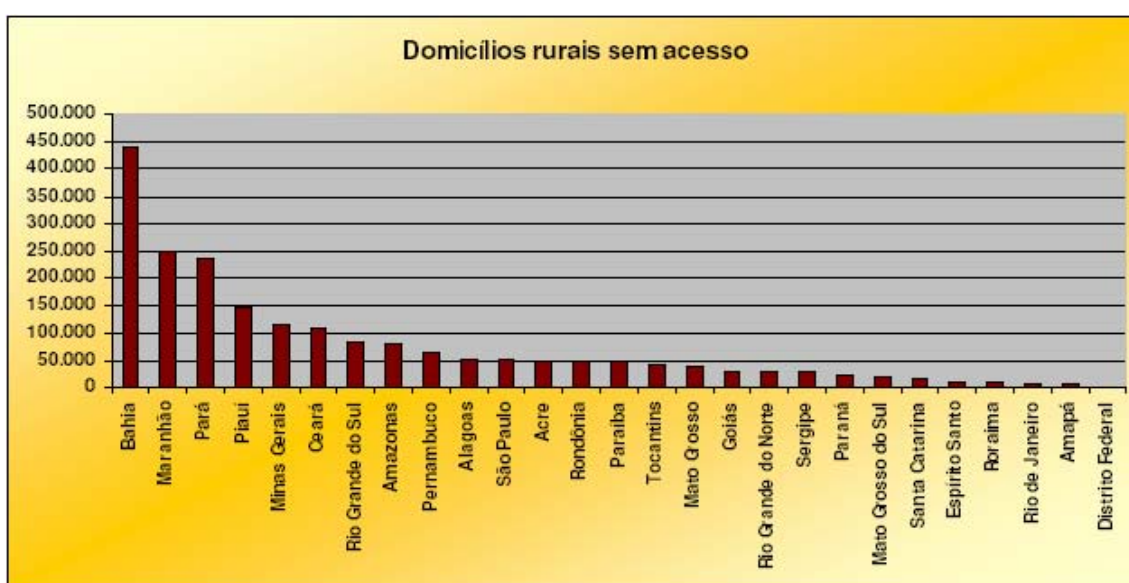


Figura A3: Números absolutos da exclusão elétrica por Estado da Federação.
Fonte: MME, 2003

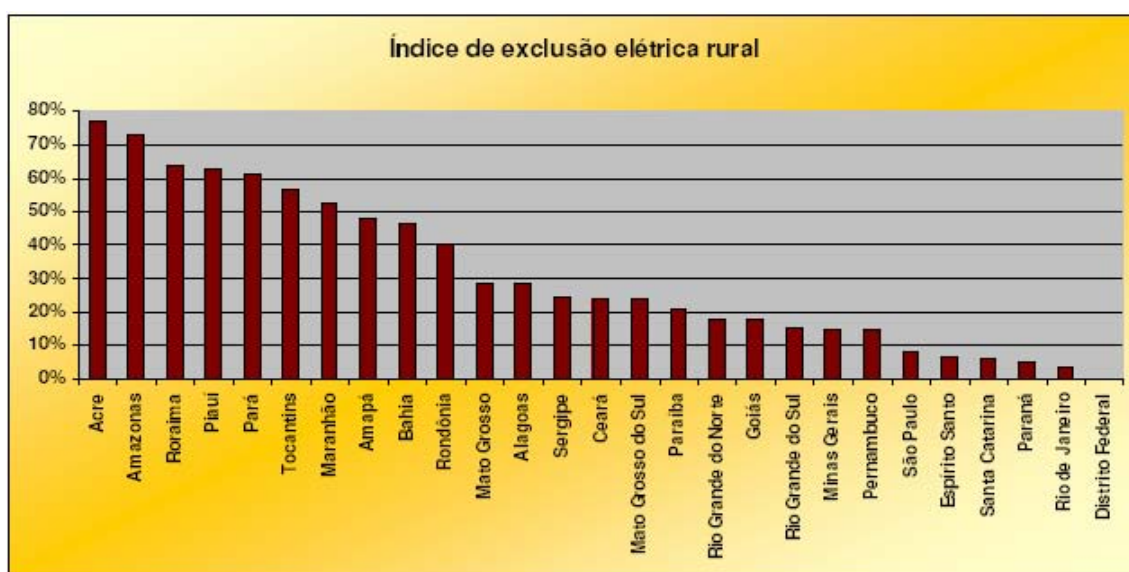


Figura A4: Índices percentuais de não atendimento, por Estado da Federação.
Fonte: MME, 2003

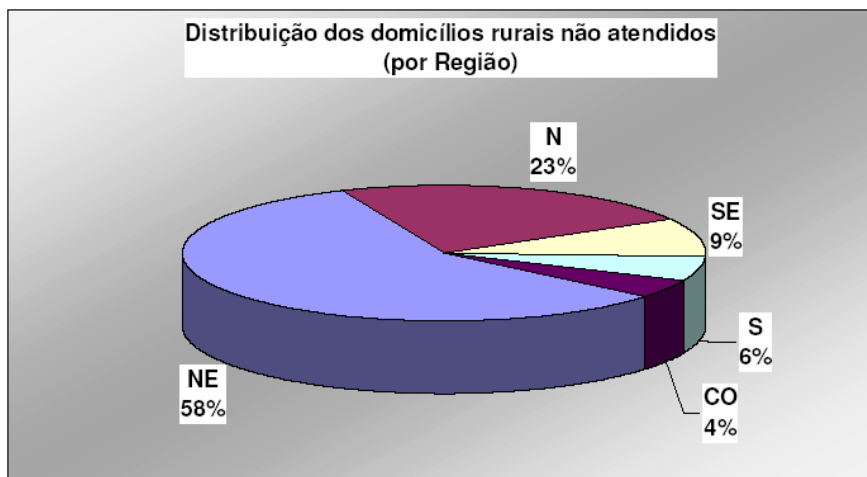


Figura A5: Índices percentuais da exclusão elétrica, por Região.
Fonte: MME, 2003

Além disso, nota-se também que a exclusão elétrica é maior nas áreas com menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e nas famílias de baixa renda. Cerca de 90% das famílias sem acesso à energia elétrica têm renda inferior a três salários mínimos e 84% das famílias sem luz vivem em municípios com IDH abaixo da média nacional.

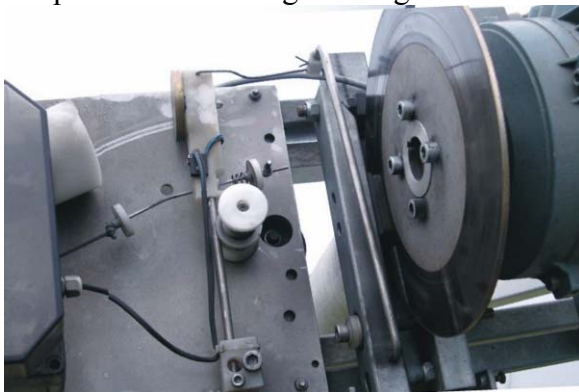
ANEXO B – Fotos da estação de ensaio, especialmente do aerogerador de pequeno porte *Inventus*, para o fornecimento descentralizado de energia em Großschirma, Alemanha



Montagem do mastro ancorado do aerogerador de pequeno porte com o guincho do dispositivo de montagem integrado na torre



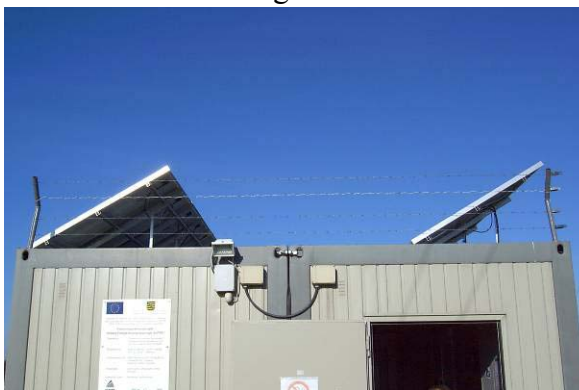
Aerogerador de pequeno porte do tipo *Inventus*, com potência nominal de 6 kW montado



Freio de disco inclusive motor de freio do aerogerador



Vista detalhada do dispositivo de controle do ângulo (pitch) das pás do rotor da *Inventus*



Sistema fotovoltaico com 1,2 kW_{peak} no teto do contêiner da estação



Gerador a óleo diesel com potência nominal de 5 kW, na área externa do contêiner



Depósito de água bruta do sistema de tratamento d'água



Depósito de água potável do sistema de tratamento



Unidade de controle e de comando do sistema híbrido no contêiner da estação

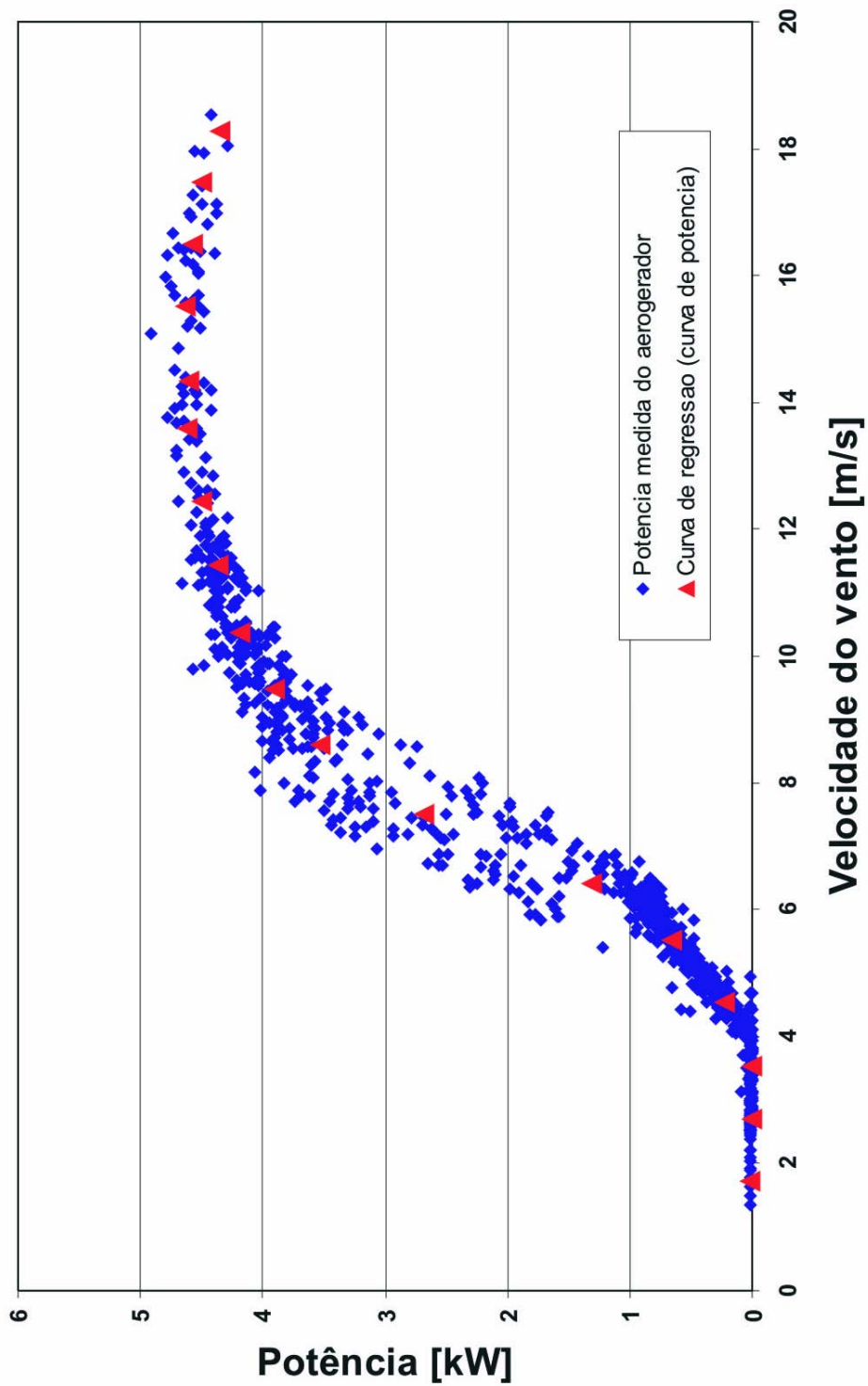


Acumuladores do sistema de baterias para compensar oscilações na oferta de energia

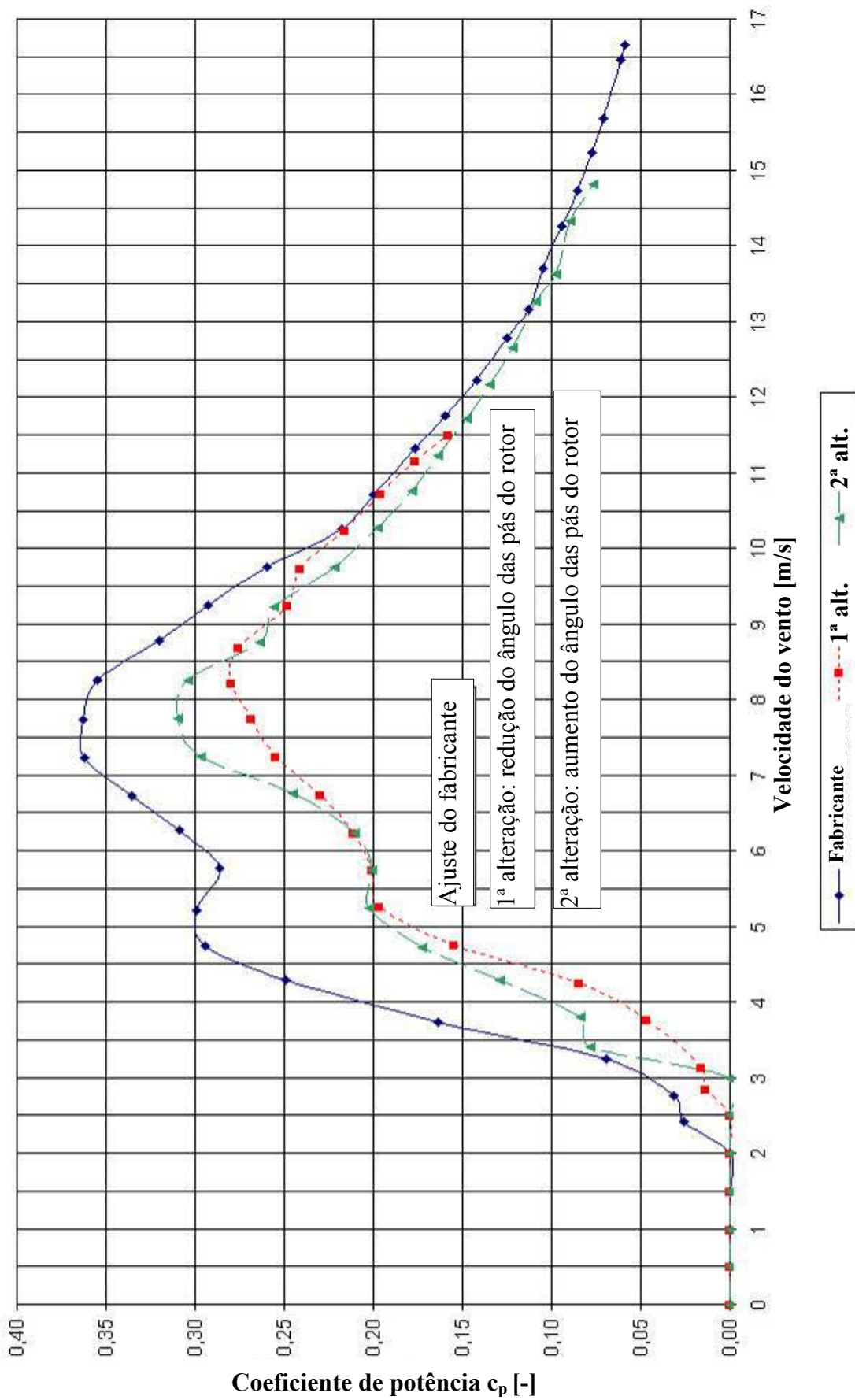


Vista aérea da completa estação híbrida experimental e da torre de medição para o registro das situações locais do vento, da temperatura, bem como da pressão do ar

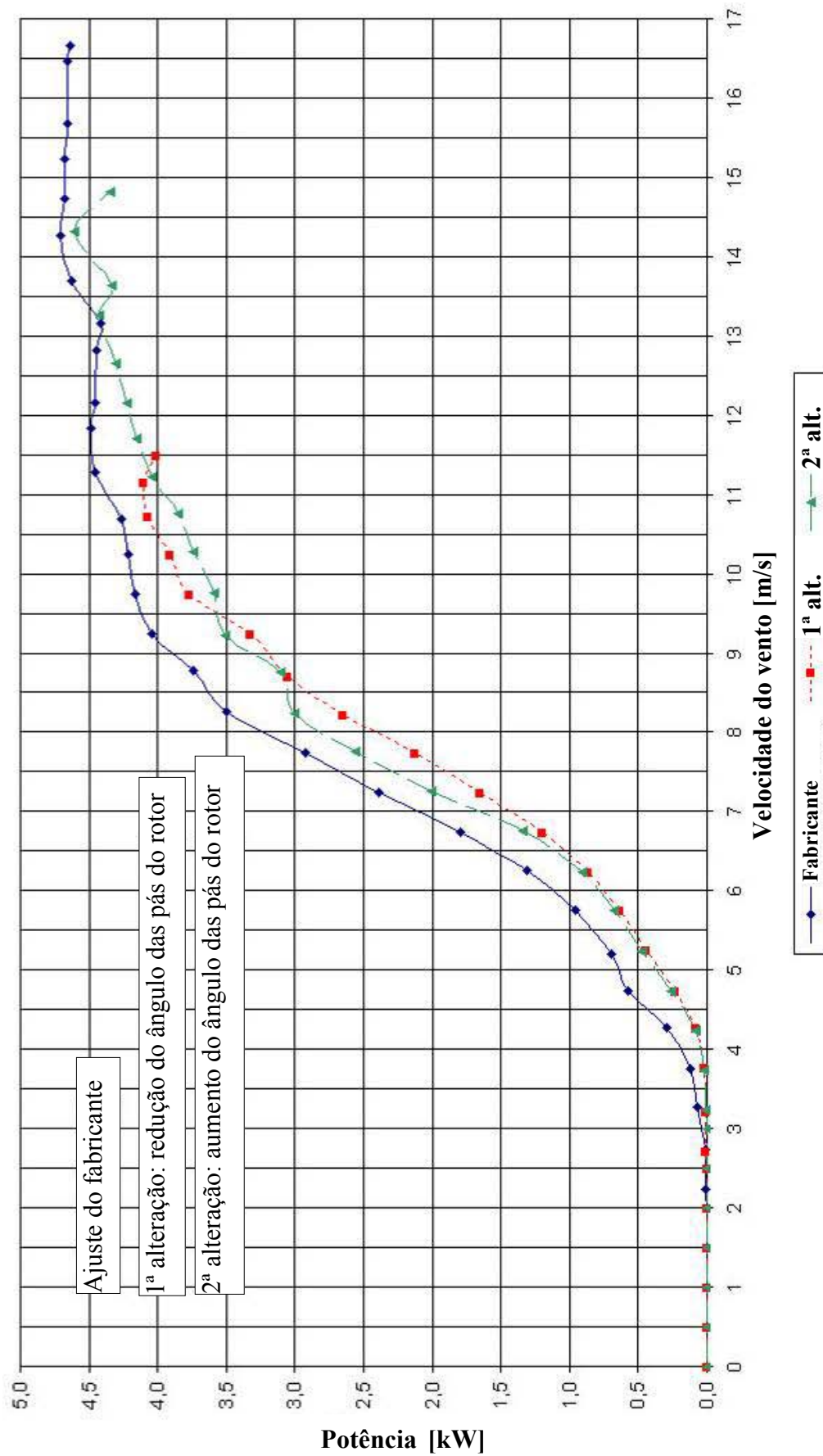
ANEXO C1 - Curso da potência registrada do aerogerador de pequeno porte *Inventus* (6 kW) em função da velocidade do vento



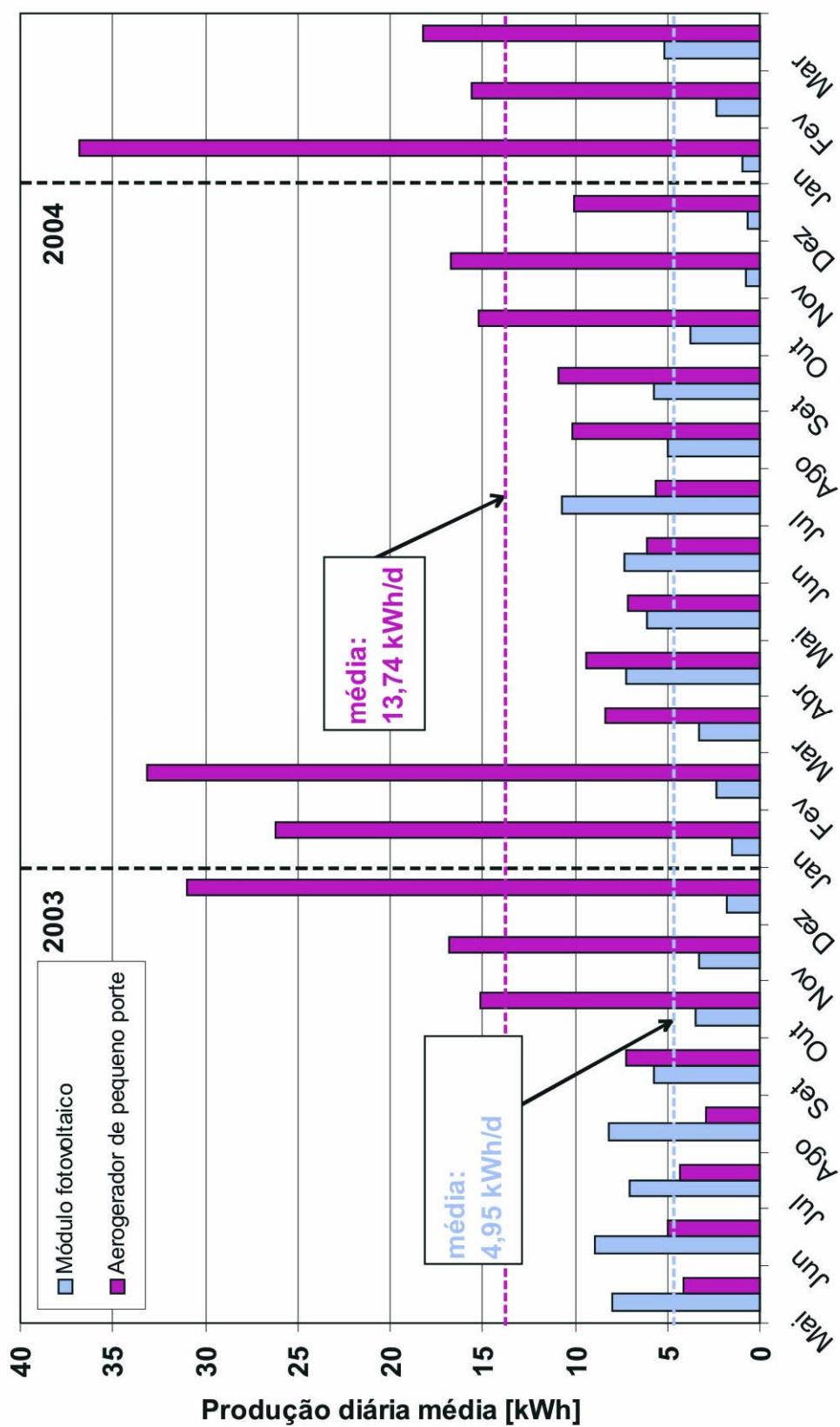
ANEXO C2 - Curso do coeficiente de potência do aerogerador de pequeno porte sobre a velocidade do vento em função do ângulo das pás de rotor



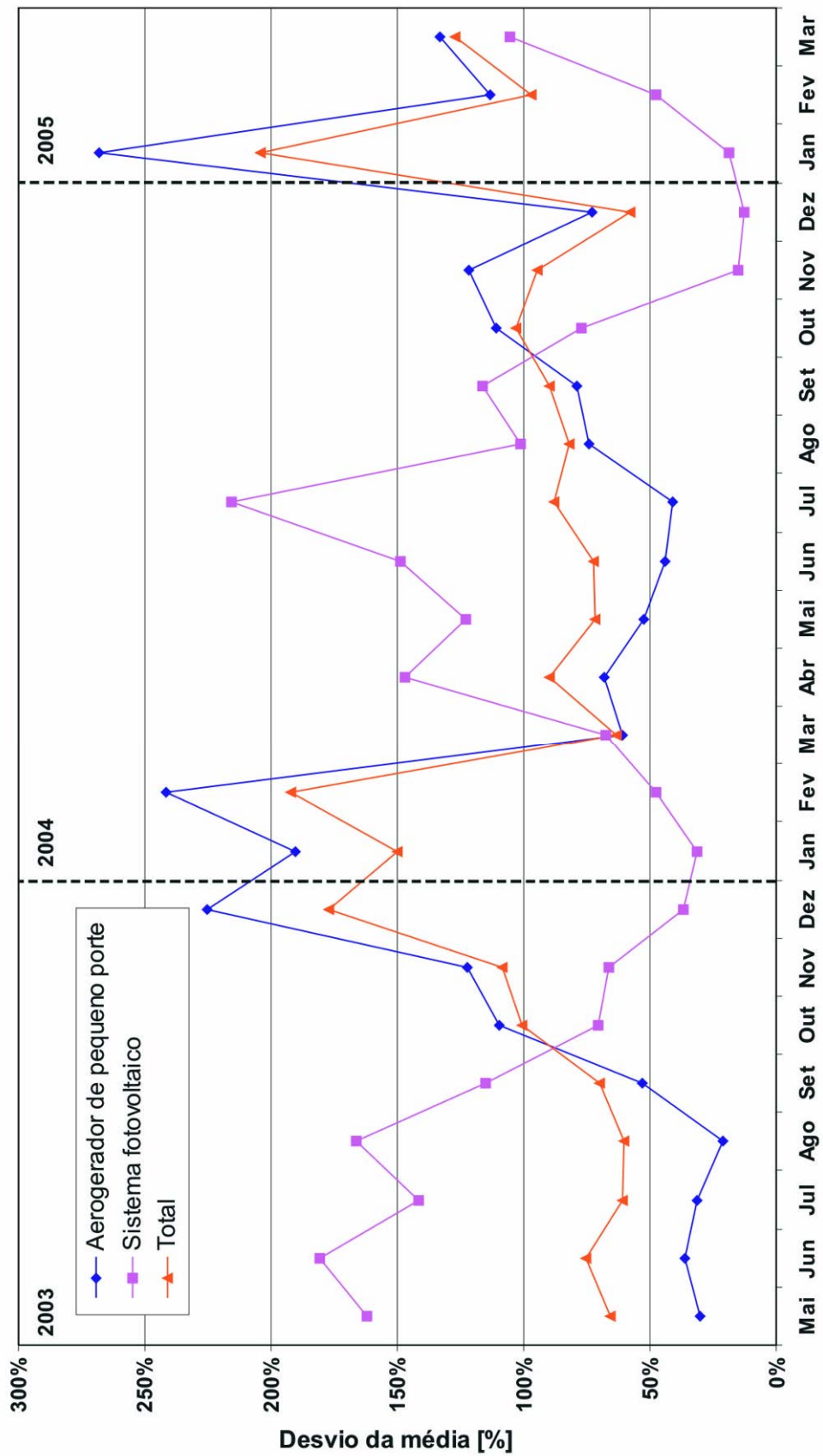
ANEXO C3 - Curso da potência do aerogerador sobre a velocidade do vento em função do ângulo das pás de rotor



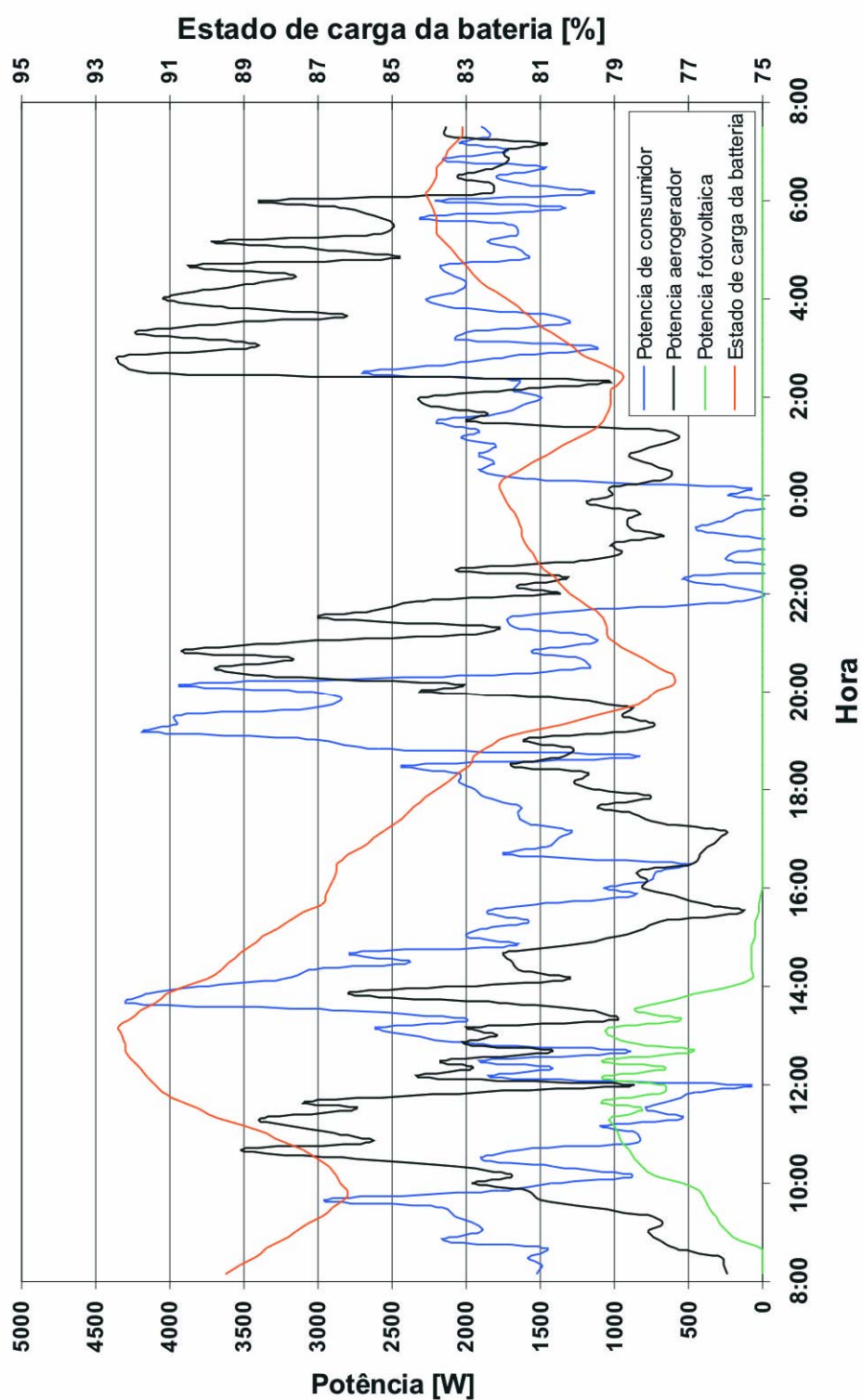
ANEXO C4 - Comparação da produção diária média (em kWh) de aerogerador de pequeno porte e sistema fotovoltaico da estação híbrida autárquica



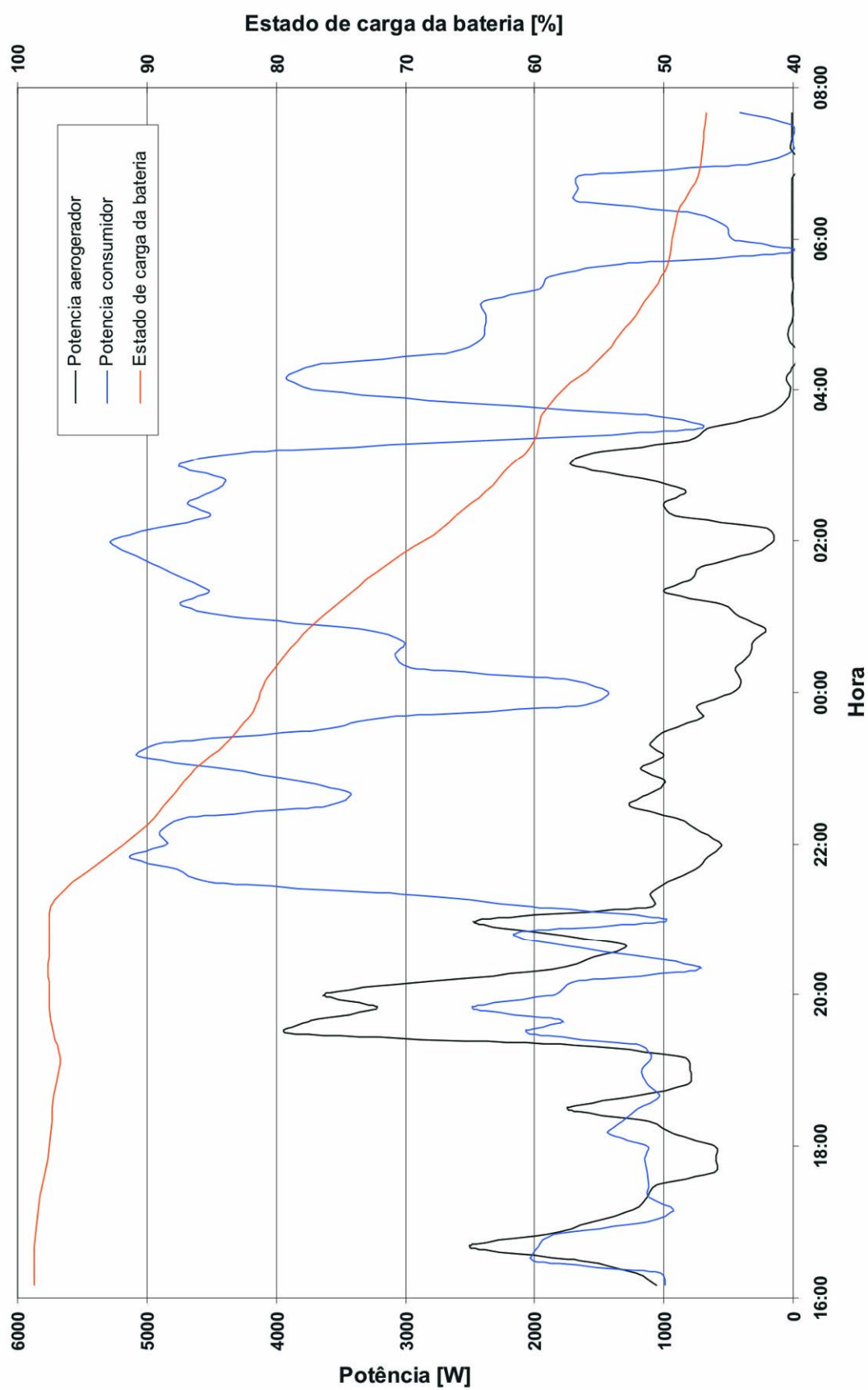
ANEXO C5 - Desvio percentual da geração média de energia elétrica de aerogerador de pequeno porte e módulos solares da média



ANEXO C6 – Curva de potência de aerogerador de pequeno porte, sistema fotovoltaico e consumidores, bem como curva do estado de carga da bateria (medição durante o dia)



ANEXO C7 – Curva de potência de aerogerador de pequeno porte e de consumidores, bem como curva do estado de carga da bateria (somente medição noturna)



ANEXO D – Possibilidades construtivas do freio de disco para aerogeradores de pequeno porte

1. Primeiro sistema de frenagem mecânico

O sistema de frenagem apresentado na Figura D1 trabalha de forma inteiramente mecânica. Nas duas escoras (2) paralelas entre si, as cintas de freio com espessura de 18mm (3) são fixadas mediante uma ligação de parafusos. As escoras que são colocadas a prumo em relação ao disco de freio (4) móveis na chapa de fixação (1), são pressionadas mediante as molas de pressão (9) na direção do disco de freio. A mola de pressão é configurada de tal forma que havendo a espessura completa de 18mm pressiona as sapatas com a força máxima admissível contra o disco e que assegura a força de compressão mínima tendo desgaste máximo. Por meio da porca (11), a força de pressão máxima é ajustada tendo novas cintas de freio. As sapatas são ventiladas através da rotação de duas chapas de aço esmeriladas de forma redonda (6) que são apoiadas no plano do disco de freio de forma rotativa e protegidas contra torcer demais por duas cavilhas de retenção (7). Para reduzir o desgaste das chapas de aço que friccionam, folhinhas de plástico duro (5) foram fixadas nas escoras. O movimento rotatório das chapas de aço é gerador através de uma corda de aço (10) fixada em pequenas alavancas e que passa por uma roldana solta (12). A roldana, por sua vez, fica numa alavanca (16) longa que é apoiada num lado e no outro é segurada por uma bobina magnética (17) na posição aberta do freio. O arranque da impulsão para ventilar as sapatas é realizada com um motor (15) que deve fornecer um momento angular máximo de $M_{M,max}=10Nm$. Pelo momento angular necessário que a alavanca (13) precisa realizar para movimentar a roldana solta 61mm, são necessárias uma transmissão e respectivamente uma roda dentada (14) maior. O motor tem que girar quanto ventila o freio até que a roda dentada (14) tenha girado uma volta. Assim a alavanca grande (17) cai sem ser freada contra o batente (18) e o freio é fechado. Este acionamento do freio é realizado através da desconexão do fornecimento de energia à bobina magnética e a energia armazenada nas duas molas de pressão é liberada para fechar o freio. Em comparação com o freio existente, este princípio destaca-se pelo desgaste completo e reto das cintas de freio. No entanto, o aerogerador é levado a parar em cerca de $t_1=1,5$ s no caso de cintas novas e em $t_2=5$ s no caso de cintas desgastadas.

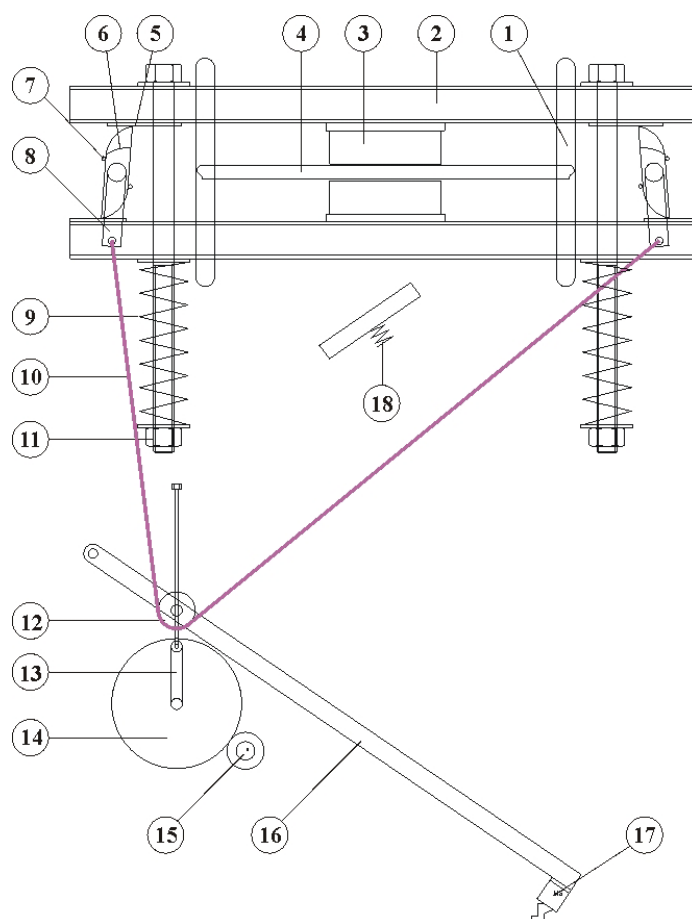


Figura D1: Primeiro sistema de frenagem mecânico

2. Segundo sistema de frenagem mecânico

O segundo sistema de frenagem mecânico apresentado na Figura D2 não gera a força de pressão através de uma mola de pressão, como nos outros sistemas, mas através de uma mola de torção (8). Esta tem que garantir uma força máxima de pressão e uma força mínima, como no primeiro sistema de frenagem. Esta mola de torção é armada entre a alavanca do freio (2) e o suporte (1). O pino (7) é ligado fixamente à alavanca do freio, porém, de forma giratória no suporte. Quando a mola é armada, ela pressiona a alavanca do freio e, conseqüentemente, as cintas de freio (3) contra o disco de freio (4). Por causa da rotação do disco, as sapatas são pressionadas adicionalmente contra este por causa das forças de fricção que se formam. Uma pressão superficial uniforme é garantida pela escora de ligação (10) fixada nas duas alavancas do freio e que passa por baixo do disco. Ela também foi munida de duas articulações rotativas (9) já que torções podem ocorrer abrindo ou fechando o freio.

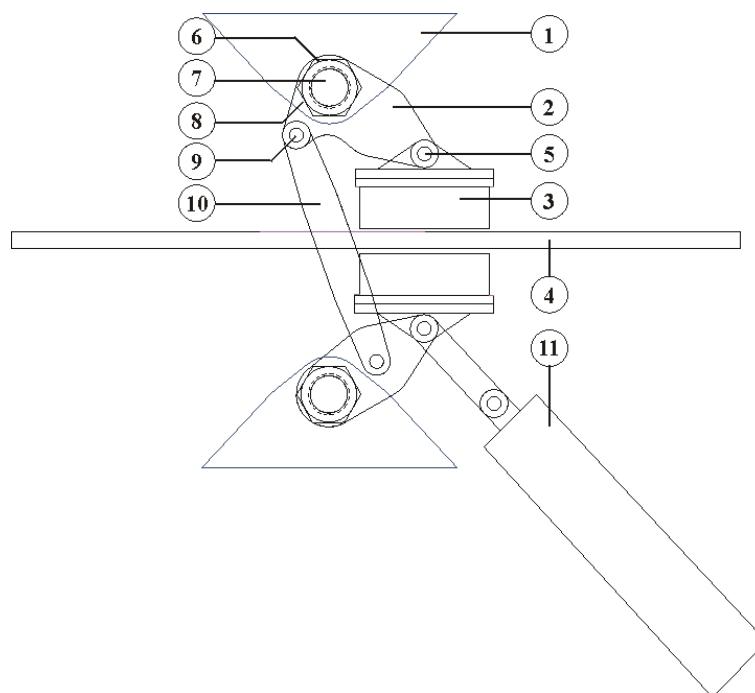


Figura D2: Segundo sistema de frenagem mecânico

A fixação rotatória (5) das sapatas serve para o desgaste uniforme da cinta de freio, ajustando-se assim da melhor forma ao disco de freio. A porca (6) delineada na Figura D2 é utilizada para ajustar a pressão de compressão necessária. Para ventilar o freio, utiliza-se um assim chamado Eldro (11) que tem que superar a força elevatória máxima de $F_{H,Eldro}=3472$ N.

3. Primeiro sistema de frenagem hidráulico

Na Figura D3, a primeira alternativa de um freio hidráulico é apresentada. Neste sistema, as sapatas (6) são pressionadas contra o disco de freio (7) mediante a mola de pressão (3) que se encontra no êmbolo do freio (2). O êmbolo é segurado por um escoramento 1 fixado no aerogerador. Como no freio mecânico, a mola produz força elástica máxima com cintas de freio novas e força mínima no caso de cintas desgastadas. Fechando o freio, a mola pressiona o óleo de freio incompressível com a ajuda do cilindro (4) para fora do espaço do êmbolo (5) e passando pela válvula magnética (16) a qual é aberta para acionar o freio para dentro do êmbolo de pressão. O volume máximo do êmbolo de pressão é composto das duas áreas do êmbolo do freio e do desgaste máximo das cintas. Sendo o freio ventilado, o motor (8) gira a roda dentada de transmissão (9) uma volta completa e a alavanca (10) pressiona o óleo do freio que se encontra no espaço do êmbolo de pressão através da válvula de retenção (17) para dentro do tubo do freio (15) que estão ligados nos fins de baixo do êmbolo do freio. Quando o processo estiver concluído, ocorre uma compensação da pressão entre os dois

espaços de êmbolo (5) e as cintas de freio são mantidas na mesma distância do disco do freio. A direção em forma de barra (12) na qual o prolongamento (11) do cilindro de pressão desliza é necessária para amortecer as forças laterais que se formam pela alavanca e para impedir que o cilindro de pressão inclina. No estado ventilado do freio, a válvula magnética é mantida fechada através da adição de energia elétrica e nenhum óleo do freio pode escapar para o êmbolo de pressão. O sistema é uma vez preenchido com óleo do freio e esvaziado de ar. Em seguida, pode permanecer no sistema de frenagem a não ser que o limite de idade do óleo seja ultrapassado. Este princípio simples garante a parada do sistema no caso de diversas avarias e pode ser realizado de forma econômica comprando adicionalmente componentes do sistema. Outra vantagem do freio hidráulico é o encosto suave das sapatas no disco porque primeiro a perda de pressão do tubo de refluxo precisa ser superada com a ajuda da mola.

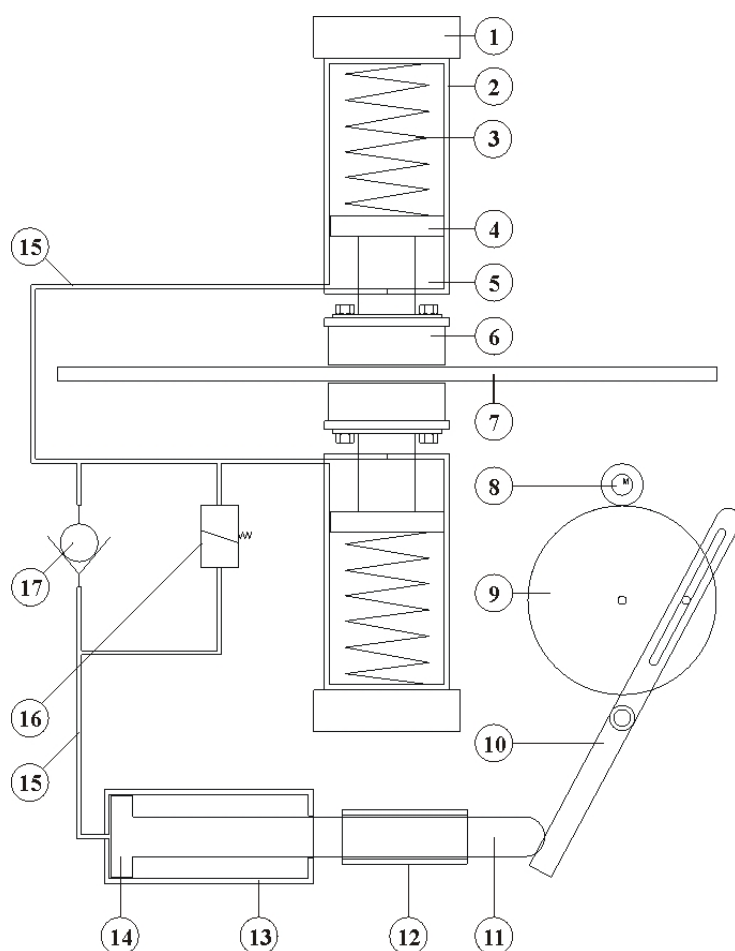


Figura D3: Primeiro sistema de frenagem hidráulico

4. Segundo sistema de frenagem hidráulico

A segunda alternativa hidráulica, apresentada na Figura D4, baseia-se nos mesmos processos que a primeira. Os componentes escoramento (1), êmbolo de pressão (2), mola

de pressão (3), cilindro (4), espaço do êmbolo (5), sapatas (6), disco do freio (7), tubo do freio (15), válvula de retenção (17) e válvula magnética (16) são idênticas ao primeiro sistema hidráulico. A diferença fica na geração da pressão necessária para ventilar as sapatas.

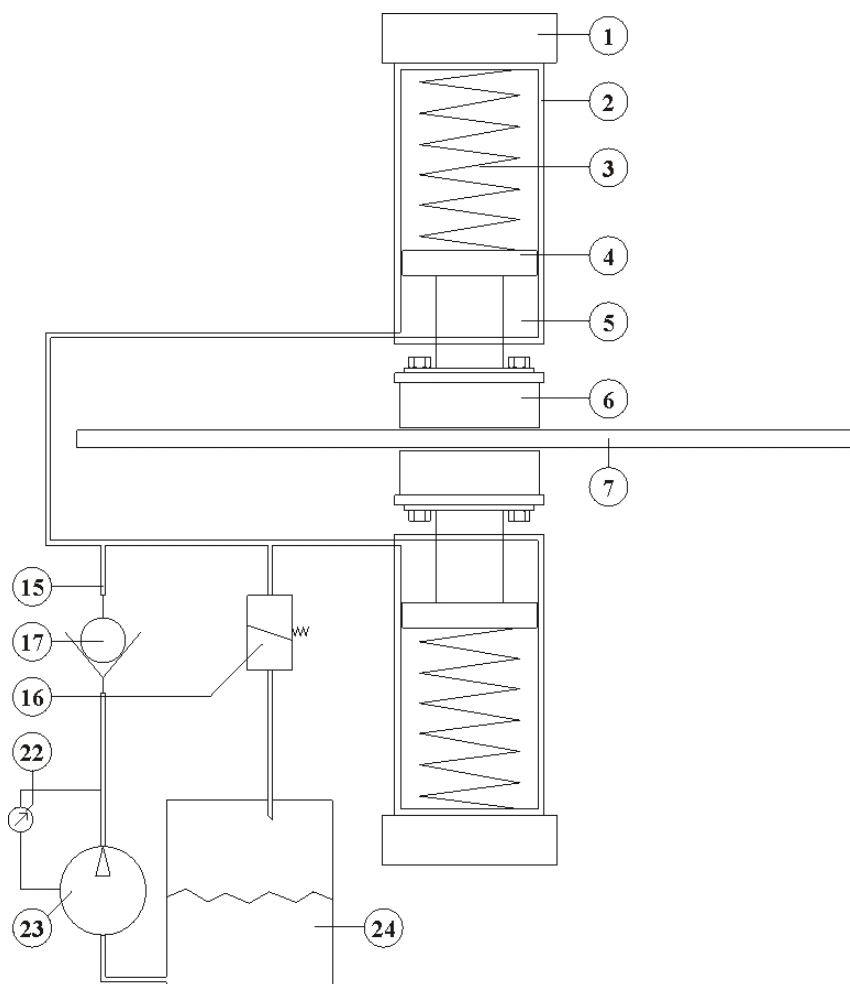


Figura D4: Segundo sistema de frenagem hidráulico

Neste princípio, isto é realizado com a ajuda de uma bomba ou de um compressor (23). Devendo o freio ser aberto, o compressor liga-se e bombeia óleo do freio do reservatório (24) através da válvula retenção para o tubo do freio (15). Quando há a contra-pressão suficiente para ventilar o freio, o compressor é desligado pela unidade de medição e controle (22). Devendo a máquina ser parada, a válvula magnética abre e o óleo do freio flui para o reservatório que se encontra por motivos do arejamento em cima do inteiro sistema de frenagem. Este sistema de frenagem tem, como vantagem, o arejamento automático e a pouca demanda por espaço já que não se usam alavancas volumosas.

5. Terceiro sistema de frenagem hidráulico

O terceiro sistema hidráulico é o único sistema de frenagem “fail-save“ que se auto-regula. Este reajustamento automático requer, porém, mais dispêndio de fabricação dos êmbolos utilizados e uma válvula de retenção adicional (20). Na Figura D5 é representado o sistema de frenagem com reajustamento. O êmbolo do freio (2) é fixado no escoramento (1) como nos outros sistemas hidráulicos. Ao desarmar-se a mola de pressão (3) empurra o cilindro (4) e conseqüentemente a sapata em direção ao disco de freio. O volume de fluido deslocado é conduzido através da válvula magnética ao êmbolo de pressão (13) e o cilindro de pressão (14) inclusive prolongamento (11) são pressionados para fora do êmbolo. A direção em forma de barra serve para absorver as forças laterais geradas pela alavanca. O motor (8) impulsiona neste sistema diretamente a roda dentada maior e a alavanca (10) pressiona o óleo do freio através do movimento do cilindro passando pelo tubo do freio (15) e pela válvula de retenção (17) para dentro dos dois êmbolos de freio. Uma transmissão não é necessária já que a área de pressão do cilindro é menor e conseqüentemente a força a ser gastada para gerar a pressão necessária. Quando as cintas de freio se desgastam um volume maior de líquido das duas câmaras superiores (5) é pressionado para dentro do êmbolo de pressão. Devido à maior quantidade de óleo do freio, o cilindro é empurrado para trás da saída lateral do êmbolo de pressão. Ventilando, no entanto, o freio novamente, o cilindro (14) pressiona o excesso de líquido através da saída lateral e da válvula de retenção (20) para dentro da câmara inferior (18) dos êmbolos do freio. O batente da mola aproxima-se desta maneira do disco do freio. Através do tubo de conexão (21) das câmaras inferiores ocorre a compensação de pressão nos sistemas separados, como também através do tubo de conexão das câmaras superiores. A área transversal operante do cilindro na câmara superior é idêntica à área transversal da inferior sendo igual a trajetória do êmbolo dos cilindros. O volume do cilindro de pressão até o desvio corresponde ao volume necessário para afastar as sapatas respectivamente 2mm do disco. A vantagem do reajustamento fica na passagem uniforme da força de frenagem ao disco. Ela é independente do grau do desgaste.

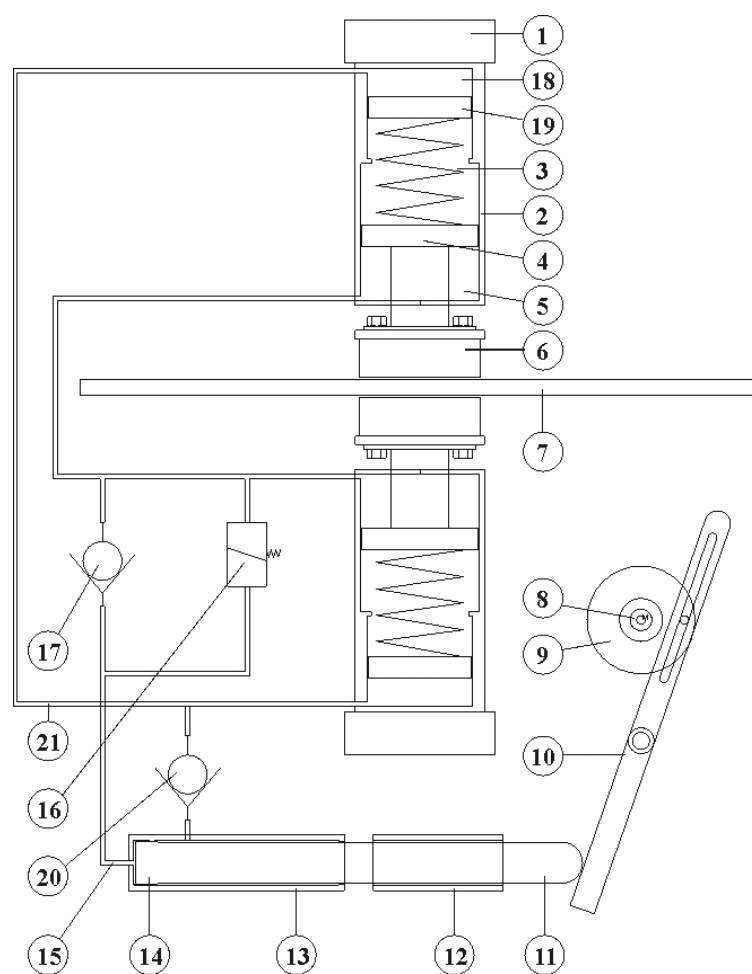


Figura D5: Sistema de frenagem hidráulico com reajustamento

ANEXO E – Possibilidades de construção de indicador do desgaste da cinta de freio para as sapatas de freios de disco de aerogeradores de pequeno porte

Indicador de desgaste 1.

O primeiro indicador de desgaste é representado na Figura E1. É o único que trabalha com relé (21) e conseqüentemente com dois circuitos separados. A voltagem é fornecida por uma fonte de energia elétrica (7). A voltagem pode ser de poucos milivolts já que somente o diodo emissor de luz (6) e o relé (21) precisam ser abastecidos com voltagem. Quando a cinta de freio (4) é desgastada até pouco antes do limite máximo de desgaste, o disco de freio (3) rompe um dos dois laços de fio postos com resina ou parafusados. A entrada máxima do laço na cinta de freio está composta do limite máximo de desgaste (16) e uma certa segurança (2) (1mm suposta) para os intervalos de manutenção. Os condutores (14) (+) e (11) (-) são ambos isolados até inclusive o laço para que não aconteça um curto-circuito entre aerogerador e o circuito. Além disso, há no furo necessário (19) uma camada isoladora (17). Os dois condutores fixados nas cintas de freio mediante conexão de encaixe são conduzidos através do mastro de aço (15) ao controle do gerador até um relé (21). Quando o laço é rompido há uma interrupção do fluxo de energia elétrico no primeiro circuito e o relé liga o segundo circuito e o diodo emissor de luz opera. A partir deste momento, o diodo emite luz tanto faz se o freio está aberto ou fechado. Conseqüentemente, a grande vantagem nesta estrutura é que a máquina não precisa ser parada para saber se a cinta do freio tem alcançado o limite de desgaste. Desvantajoso é o dispêndio maior para introduzir o laço nas cintas. No demais, uma corrente deve ser garantida para manter o relé aberto.

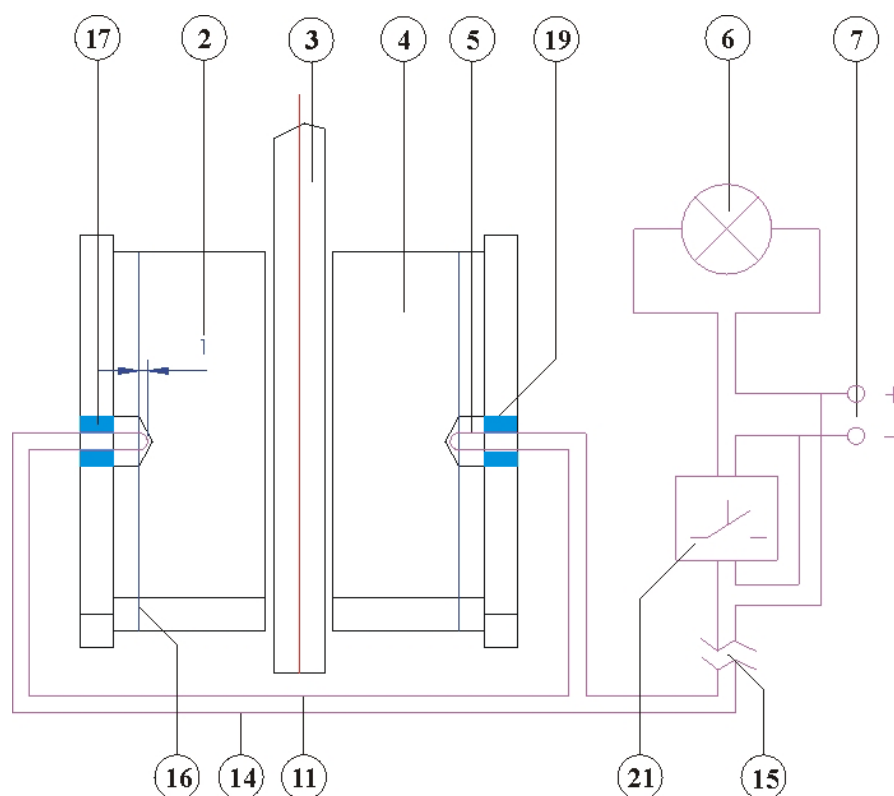


Figura E1: Primeiro Indicador de desgaste

Indicador de desgaste 2.

A segunda possibilidade de indicador de desgaste está apresentada na Figura E2 e funciona de forma parecida quanto o primeiro, porém, sem relé. Este trabalha com um circuito estando a massa (11) (-) junto com a máquina e podendo a corrente ser conduzida por um cabo isolado (14) (+). O cabo (14) é ligado ao fio de desgaste (20) posto com resina ou parafusado na sapata. Este fio é separado da máquina através do isolamento e se destaca no furo (19) além do limite máximo de desgaste (16) pela margem de segurança (2). Quando a cinta (4) é desgastada até o fio (20), este fricciona no disco de freio (3) fechando o circuito. A corrente disponibilizada pela fonte de tensão (7) passa agora pelo mastro de aço (15), pelos condutores e pela máquina através do diodo emissor de luz (6) se o freio estiver fechado e o fio encostado no disco de freio. Assim o aerogerador precisa ser freado para perceber um sinal do desgaste. O dispêndio para a pré-montagem das cintas de freio e do fio de desgaste que sempre se repete é igual ao primeiro Indicador de desgaste e conseqüentemente desvantajoso. Além disso, podem ocorrer distúrbios menores do gerador ou da regulação por causa da conexão da massa à máquina.

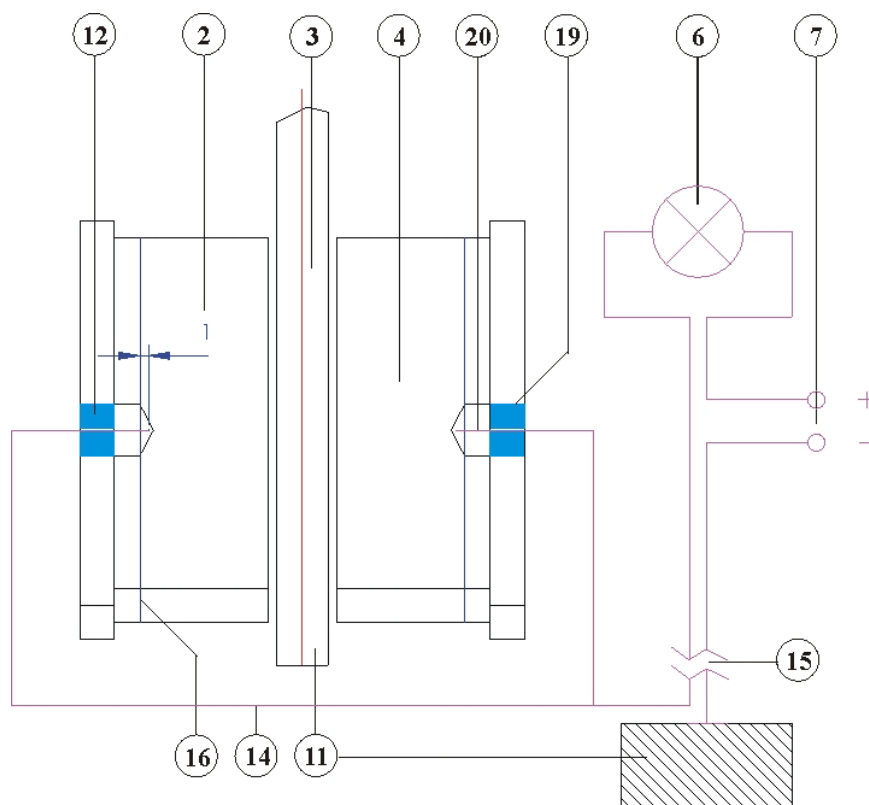


Figura E2: Segundo indicador de desgaste

Indicador de desgaste 3.

O terceiro princípio de ação possível de um Indicador de desgaste está representado na Figura E3. Neste sistema, as alavancas de comutação móveis (18) são pressionadas pelo disco de freio (3) pouco antes do desgaste máximo das cintas do freio (4) contra a chapa de suporte (1). A mola (17) é precisa para manter o comutador aberto (10, 17, 18, 9). A mola de contato (9) e o contato no outro lado (10) estão no estado aberto numa distância de aproximadamente 1,9 mm um do outro 2 (resultante do comprimento da alavanca em relação ao desgaste máximo 16 e da margem de segurança 1mm). Quando a mola de contato toca o contato, o circuito é fechado e a corrente de energia elétrica fornecida pela fonte de tensão (7) passa pelos condutores isolados (14, 11) e do diodo (6) que agora está iluminado.

A grande vantagem deste indicador de desgaste é o dispêndio mínimo na troca das cintas porque o suporte (1) com comutador pode ser reutilizado e colocado de forma simples entre o suporte da sapata. No entanto, deve ser prestada atenção para que o comutador não seja esmerilhado pelo disco quando freia, devendo ser então substituído na troca da cinta. Além disso, o aerogerador precisa se encontrar no estado freado para que o diodo emita luz ou um sinal seja liberado.

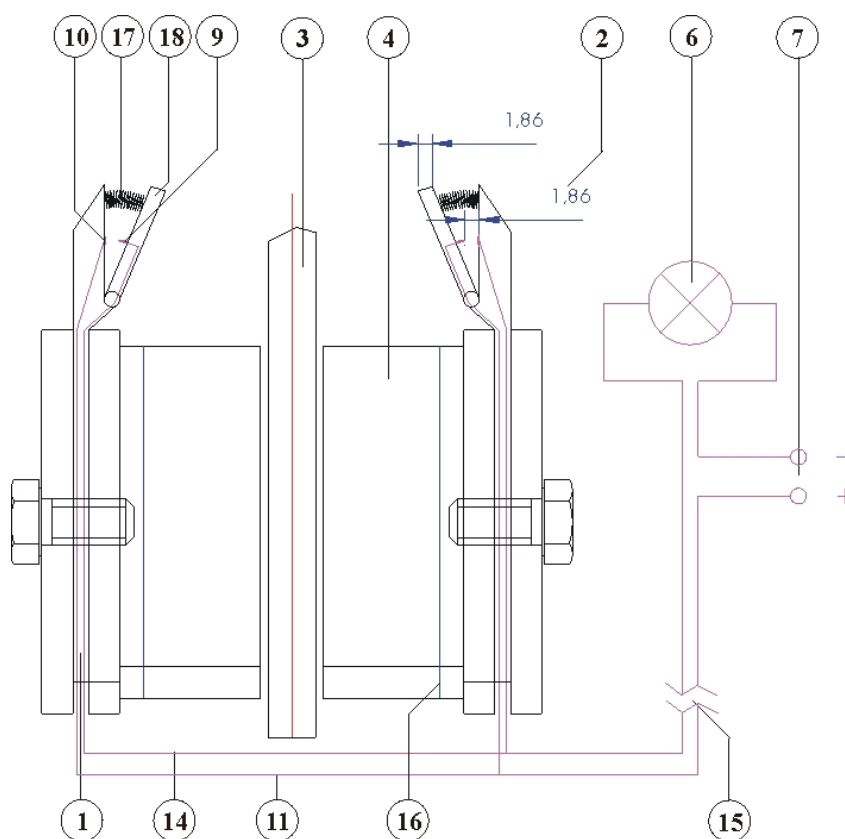


Figura E3: Terceiro indicador de desgaste 1

Indicador de desgaste 4.

A quarta alternativa de um indicador de desgaste é mostrado na Figura E4. Este realiza o contato ou o fluxo de energia mediante pequenas escoras de aço (13) que são colocadas abaixo do disco do freio (3) no suporte das sapatas (1). Quando as cintas (4) desgastam mais que 14mm (2) (resultantes da espessura inicial da cinta menos limite máximo de desgaste (16) menos margem de segurança) as molas de contato (9) juntam-se com o contato (10). O contato (10) está fixado no aerogerador (8) com uma camada isoladora de forma fixa abaixo do disco de freio e conectado com o condutor (14). Os condutores (11) estão conectados de forma móvel às molas de contato. A corrente de energia – criada no contato – é garantida pela fonte de energia elétrica que se encontra no controle do gerador e leva o diodo (6) a emitir luz. Dois microcomutadores, ordenados na direção das escoras de aço podem também ser utilizados para o contato (10), economizando assim os cabos móveis (11). As molas de contato, no entanto, devem ser mantidas porque o microcomutador pode ser esmagado pelas escoras de aço e pela força elástica ativa do freio em caso de desgaste maior ($> 14\text{mm}$). O uso deste sistema requer, no entanto, certo dispêndio na montagem inicial e na fabricação dos suportes e escoras sob medida. Este dispêndio é repago depois de determinado tempo pelo funcionamento confiável e sem manutenção. Para trocar as cintas de freio, não há custos adicionais para p.ex. colocar o fio de desgaste com resina. No entanto, neste princípio de

construção, como nos dois anteriores, os contatos só serão fechados quando a máquina é freada ou parada.

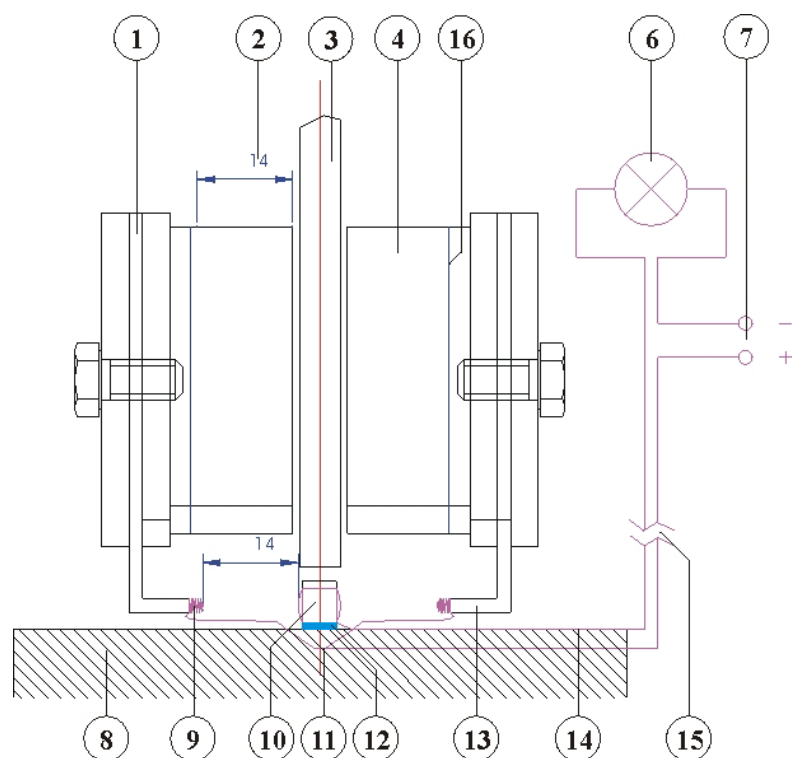


Figura E4: Quarto indicador de desgaste

ANEXO F – Concepção de uma estação de ensaio para o desenvolvimento ulterior de aerogeradores de pequeno porte (segundo EVTEC do projeto FAPERGS 007/2004 – FOLLE, L. F.)

Para se ter dados de funcionamento sobre o gerador eólico antes de se colocá-lo ao vento é preciso montar uma bancada de ensaios estacionária (sem as pás) onde irá se verificar as condições de operação do mesmo como curvas de corrente, tensão, torque, eficiência e potência e características do freio.

A metodologia para avaliar o gerador eólico consiste basicamente em acoplar o gerador a um motor de indução. O motor terá o papel de simular o torque transmitido pelas pás quando as mesmas estão submetidas a uma certa quantidade de vento. As variáveis envolvidas no processo são medidas por sensores e adquiridas por um sistema de aquisição de dados.

Os dados a serem adquiridos com a bancada são:

- Tensão no gerador eólica;
- Corrente no gerador;
- Temperatura do gerador;
- Tensão no motor de indução;
- Corrente no motor de indução;
- Rotação do eixo de acoplamento;
- Temperatura do freio;
- Desgaste do freio;

A tensão e corrente do gerador serão medidas diretamente através de um sistema de aquisição de dados chamado Spider 8, de fabricação alemã. As temperatura serão adquiridas por termopares conectados ao Spider 8. A tensão, corrente e rotação no motor de indução serão adquiridas diretamente por um inversor de frequência e jogadas em um computador através do software específico do inversor. Por fim o desgaste das pastilhas do freio a disco do gerador serão medidas por um sensor de deslocamento (LVDT) que também estará conectado ao Spider 8.

Descrição dos equipamentos

Gerador eólico

O gerador eólico a ser testado será de potencia 6 kW com sistema de frenagem por freio a disco. As características do gerador serão semelhantes à máquina *Inventus 6* fabricada pela Inventus GmbH (F1) da Alemanha descritas na Tabela F1.

Tabela F1: Características do gerador
Fonte: INVENTUS, 2003.

Rotor	
Diâmetro	6 metros
Número de pás	4
Velocidade	80 – 145 rpm
Projeto das pás	Compósito de aço e fibra de vidro
Montagem	
Unidade de engrenagem	Dentes retos de 2 passos, $i=10,1$
Tipo de gerador	Síncrono, auto contido
Potência nominal	8 kW/10 kW
Velocidade	0 – 1500 rpm
Voltagem	400 V, trifásico, 50 Hz
Características de potência	
Potência	6 kW
Início da produção de energia	Ventos de 3 m/s
Produção nominal	Ventos de 10,5 m/s
Velocidade crítica de parada	Ventos > 30m/s através de um sensor de vibração somente se a direção muda muito rápido devido a ventos fortes
Velocidade de sobrevivência	Ventos de 60 m/s
Sistema de controle	
Controle da potência	
Aerodinâmica	Pitch passivo na pá
Elétrico	Mudança de pólo, monitorado eletricamente, carregado com resistores 3 x 2 kW
Controle yaw	Através da pá
Sistema de segurança	
Aerodinâmica	Mudança no ângulo pitch da pá
Mecânico	Freio a disco, mola carregada, operação manual na base da torre
Torre	
Fabricação	Tubo de aço galvanizado calçado em 4 lados
Altura	13 a 19 metros
Peso	
Pás (3 metros)	4 x 12 kg
Carcaça da máquina completa	Aprox. 208 kg
Mastro, 2 partes, 13 metros	Aprox. 220 kg
Mastro, 3 partes, 19 metros	Aprox. 330 kg

Através do catálogo do gerador podemos obter as curvas de desempenho onde serão comparadas com as obtidas através da bancada de ensaios. Ver Figuras F2 e F3.



Figura F1: Foto do gerador eólico Inventus 6.

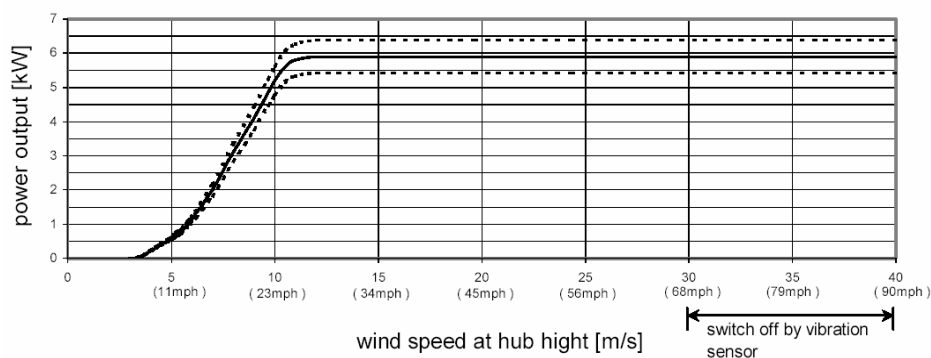


Figura F2: Curva de potência do gerador.
Fonte: INVENTUS, 2003

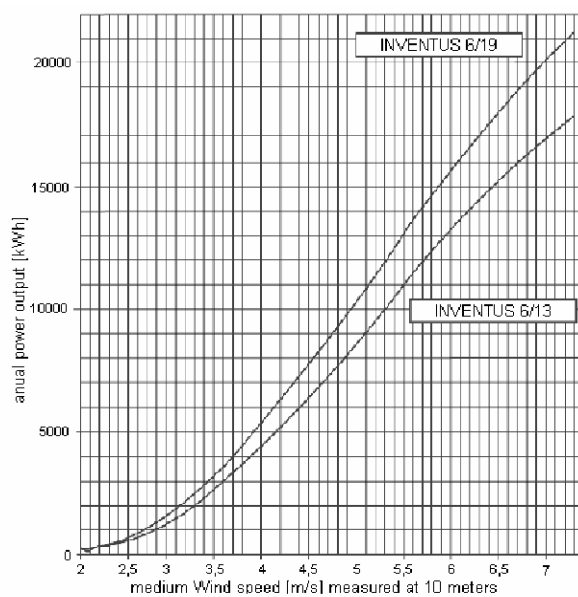


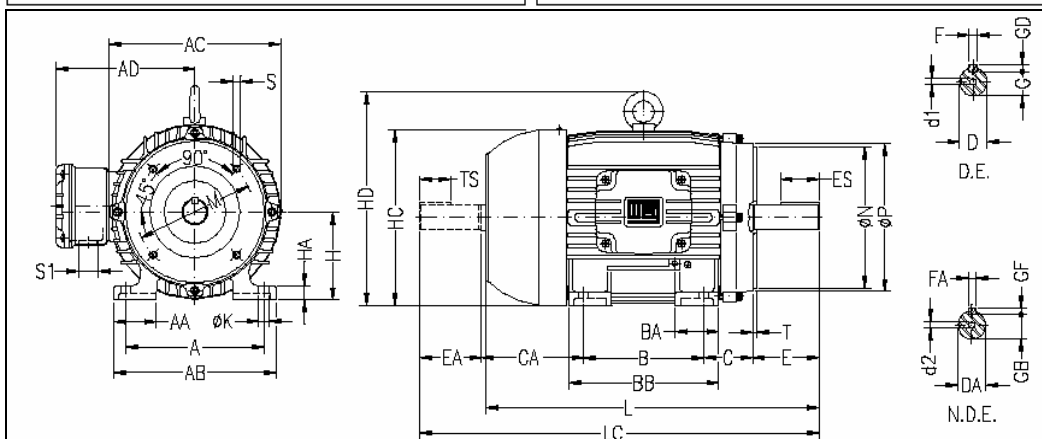
Figura F3: Produção anual de energia em kWh em relação a média de velocidade de vento
Fonte: INVENTUS, 2003.

Motor de indução

O motor de indução a ser acoplado ao gerador terá potência de 11 kW e fará o papel do vento na bancada. O motor terá as mesmas características do motor de indução trifásico linha Well da WEG, pré selecionado (Figura F4). As características do motor estão descritas abaixo.

Carcaça	: 132M/L
Potência	: 15 cv
Frequência	: 60 Hz
Pólos	: 4
Rotação nominal	: 1755
Escorregamento	: 2,50 %
Tensão nominal	: 220/380 V
Corrente nominal	: 37,5/21,7 A
Corrente de partida	: 330/191 A
Ip/In	: 8,8
Corrente a vazio	: 18,0/10,4 A
Conjugado nominal	: 6,10 kgfm
Conjugado de partida	: 260 %
Conjugado máximo	: 340 %
Categoriaaaa	: N
Classe de isolamento	: B
Elevação temp.	: 80 K
Tempo de rotor bloqueado	: 6 s (quente)
Fator de serviço	: 1,15
Regime de serviço	: S1
Temperatura ambiente	: 40
Altitude	: 1000 m
Proteção	: IPW66
Massa aproximada	: 78 kg
Momento de inércia	: 0,06978 kgm ²
Nível de ruído	: 61 dB(A)

	Dianteiro	Traseiro	Carga	Fator potência	Rendimento (%)
Rolamento	6308 C3	6207 C3	100%	0,84	91,7
Intervalo de lubrificação	20000 h	20000 h	75%	0,78	91,0
Quantidade de graxa	11 g	7 g	50%	0,67	90,0



A	AA	AB	AC	AD
216	51	248	270	212
B	BA	BB	C	CA
178/203	55	250	89	150
D	E	ES	F	G
38k6	80	63	10	33
GD	DA	EA	TS	FA
8	28j6	60	45	8
GB	GF	H	HA	HC
24	7	132	20	274
HD	K	L	LC	S1
319	12	515	582	RWG 1
d1	d2	Flange	M	N
A4	A4	C-200	165	130
P	S	T		
200	M10	3.5		



Figura F4: Motor de indução trifásico linha Well da Weg
 Fonte: WEG, 2005.

As curvas características do motor em função da potência e da rotação são mostradas nas Figuras F5 e F6, respectivamente.

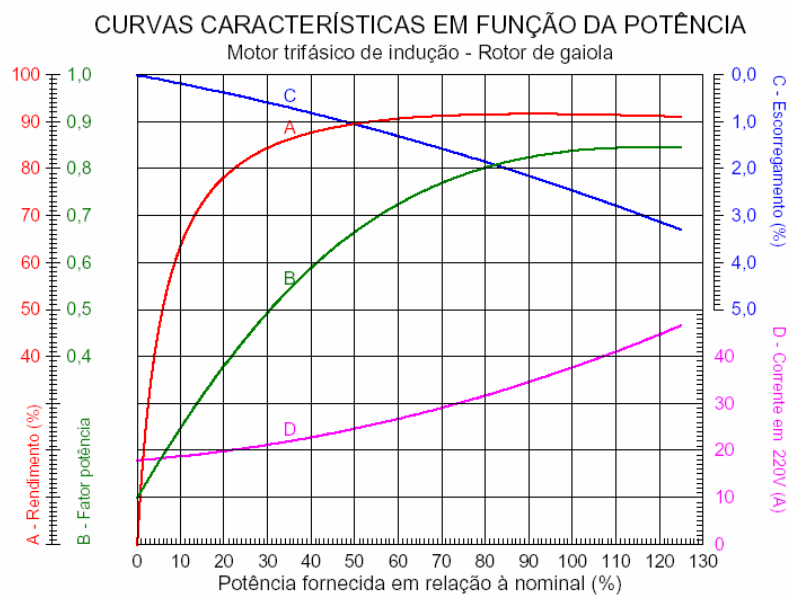


Figura F5: Curva característica do motor em função da potência
Fonte: WEG, 2005.

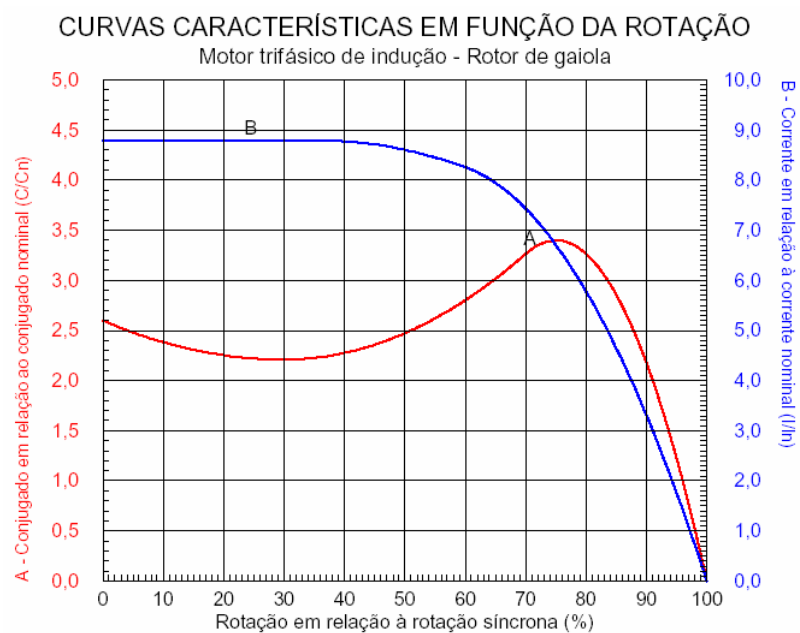


Figura F6: Curva característica do motor em função da rotação
Fonte: WEG, 2005.

Inversor de frequência

O inversor de frequência tem por objetivo controlar a rotação do motor elétrico para que se possa obter a potência do gerador para cada incremento na rotação. O inversor fornecerá também dados sobre tensão, corrente e rotação no motor.

As características do inversor são dadas pela Tabela F2, onde se pegou o modelo CFW09 0045 T 2223 PS A3 Z da WEG.

Tabela F2: Características do inversor de frequência
Fonte: WEG, 2005.

Motor máximo aplicável	11 kW
Corrente nominal de saída em torque constante	45 A
Alimentação de entrada	Trifásica
Tensão de alimentação	Faixa de 220 a 230 V
Idioma do manual	Português
Cartão de expansão de funções	Entrada e saída analógica de 14 bits, entradas e saídas digitais com termistor (PTC)
Entradas digitais	5 entradas 24Vcc bipolar e 4 entradas 220Vca ou 110Vca
Saídas a relé	Três de 250Vca/3 A ou 30Vdc/3 A
Saídas transistorizadas	Três de 24Vcc/50 mA
Entrada para alimentação do circuito de encoder	18 a 30V
Saída para alimentação do encoder	15V

O inversor pode ser adquirido com um kit de interface serial, para conexão com o PC, onde é usado o software SUPERDRIVE de programação e monitoramento do inversor, ou outros equipamentos, via comunicação serial RS – 232 e cabo de interligação para interface remota (ver Figura F7).

O SUPERDRIVE é software de programação via microcomputador que roda em ambiente Windows, para parametrização, comando e monitoração do inversor. Ele permite editar parâmetros “*on-line*”, diretamente no inversor ou editar arquivos de parâmetros “*off-line*”, armazenados no microcomputador. O software também incorpora funções para transferir o conjunto de parâmetros do microcomputador para o inversor e vice versa.



Figura F7: Software SUPERDRIVE, interface serial RS – 232 e cabo de interligação para interface remota
Fonte: WEG, 2005.

Sensor de deslocamento (LVDT)

O sensor de deslocamento conhecido como transdutor indutivo de deslocamentos LVDT (Linear Variable Differential Transformer) é um dos transdutores indutivos mais utilizados em diversos sistemas de medição, dada sua característica de tensão de saída variar

linearmente com o deslocamento do núcleo. Este é conectado à estrutura que se movimenta (ou se desloca).

O sensor selecionado para ser montado na bancada foi escolhido devido a seu alto grau de precisão e linearidade, o que é necessário, visto que esse sensor deverá registrar pequenas variações de deslocamento correspondente ao nível de desgaste da pastilha de freio. Ele deve ter as características descritas na Tabela F3.

Tabela F3: Descrição do sensor de deslocamento a ser usado
Fonte: HBM, 2005.

Tipo de conexão	Meia ponte ou ponte completa
Sensibilidade [mV/V]	+80
Desvio linear em %	± 0.2 to ± 0.1
Grau de proteção	IP67 (IP54)
Deslocamento nominal [mm], 0 ...	50
Limite de temperatura [°C]	-40 ... +80 (+150)
Frequência [kHz]	$4.8 \pm 1\%$

Na Figura F8 é mostrado um exemplo de LVDT, fabricado pela HBM.



Figura F8: LVDT WA T da HBM
Fonte: HBM, 2005.

Termopares

Serão usados dois termopares na bancada, um no bobinado do gerador eólico e outro na pastilha do freio a disco. As características de cada termo par são dadas abaixo.

No bobinado do aerogerador (temperatura até 100°C):

- Com isolamento mineral, com junção isolada e tubo de proteção de cobre (315°C).
- Diâmetro externo da bainha: 1,5mm (1,6 – 920°C)
- Bitola do termopar: 20 AWG = 0,81mm de diâmetro (980°C)
- Tipo: K
- Tempo de resposta do termopar: 0,6s
- Comprimento do sensor: 30 cm
- Cabo de compensação de 4 metros

Na pastilha do freio a disco (temperatura até 1000°C):

- Com isolamento mineral, com junção isolada e tubo de proteção de Nicrobell (1250°C).
- Diâmetro externo da bainha: 6mm (1150°C)
- Bitola do termopar: 20 AWG = 0,81mm de diâmetro (980°C)
- Tipo: K
- Tempo de resposta do termopar: 4,5 s
- Comprimento do sensor: 30 cm
- Cabo de compensação de 4 metros

A fabricação de um termopar com isolamento mineral parte de um termopar convencional montado com um tubo de proteção, sendo todo o conjunto trefilado. Neste processo os termoelementos ficam isolados entre si por um pó compactado de MgO₂ e protegidos por uma bainha metálica (originalmente o tubo de proteção). Após a trefila, o termopar é submetido a um tratamento térmico, visando aliviar as tensões mecânicas produzidas na trefilação. Usualmente os termopares com isolamento mineral são encontrados no mercado com diâmetros externos de 6,0 mm, 4,5 mm, 3,0 mm, 1,5 mm, 1,0 mm e 0,5 mm.

Ambos os termopares a serem usados apresentam isolamento mineral com junção isolada, mostrada na Figura F9.

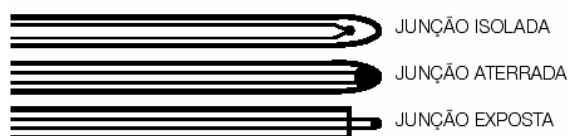


Figura F9: Os termopares com isolamento mineral podem ser montados com a junção de medição isolada, aterrada ou exposta

Fonte: EQUIPE, 2005.

Montagem da bancada

A bancada experimental constitui-se dos seguintes equipamentos: um motor de indução trifásico, um inversor de frequência, um gerador eólico com freio a disco e uma carga que absorva a energia gerada, uma placa de aquisição (Spider 8), um microcomputador, dois termopares, um sensor de deslocamento (LVDT), um multímetro digital e um termômetro para medir temperatura ambiente. As conexões e o esquema de montagem são mostrados na Figura F10.

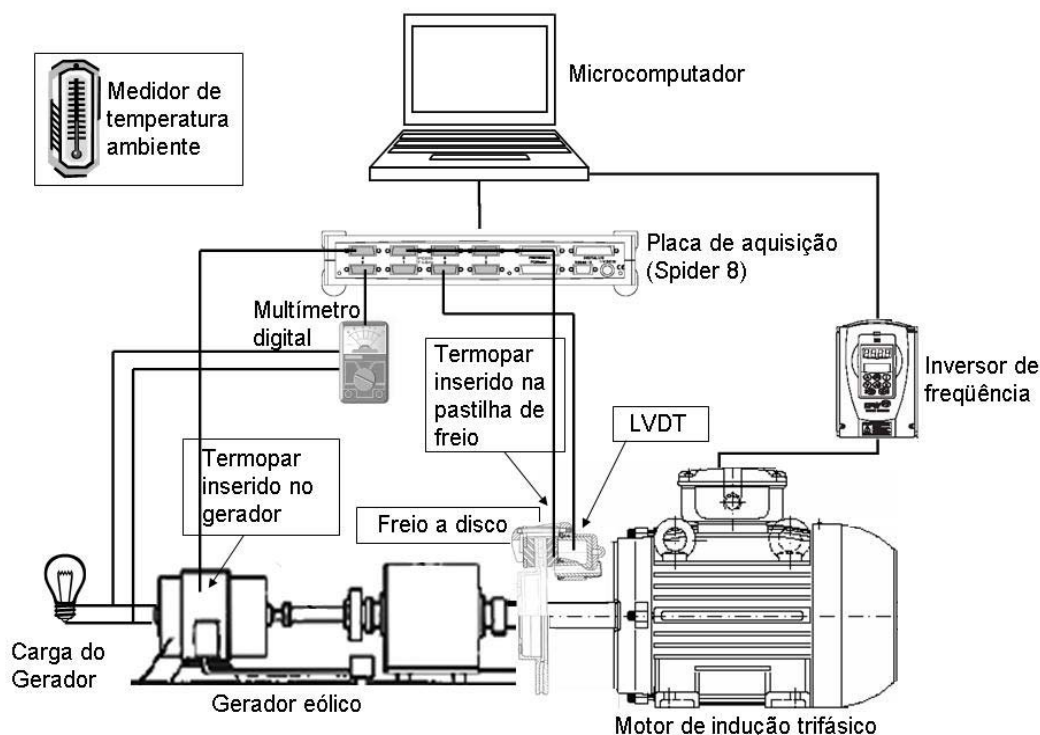


Figura F10: Esquema de ligação dos componentes da bancada experimental.

O microcomputador PC será conectado diretamente ao inversor de frequência, pois o Spider 8 não lê diretamente os dados do inversor, que serão obtidos através de um programa específico instalado no PC. O inversor dará informações da tensão, corrente e rotação no motor. O PC também será conectado ao Spider 8.

O Spider 8, por sua vez, será conectado a um multímetro digital, que dará informações sobre a corrente e a tensão no gerador (o gerador deve ser conectado a uma carga para que se possa fazer essas medidas, por exemplo um banco de resistores). Será conectado, também, a um sensor de deslocamento (LVDT) instalado na pastilha de freio e a dois termopares. O LVDT tem por função medir o deslocamento exercido pela pinça do freio, tendo-se assim, informações sobre o desgaste das pastilhas.

Os termopares serão colocados na pastilha de freio e na bobina do gerador eólico. O primeiro tem por objetivo medir a temperatura a que a pastilha pode chegar em condições críticas operação para saber se essa temperatura não está sobrecarregando e danificando a pastilha.

O segundo terá o papel de medir a temperatura no interior do gerador para se comparar o desempenho deste com relação a um acréscimo de temperatura. Segundo Garcia, Krenzinger e Alé (GÁRCIA, KRENZINGER, ALÉ, 2002), há uma influência da temperatura do gerador sobre a potencia produzida como mostra o gráfico da Figura F11, o que torna necessário a medida dessa.

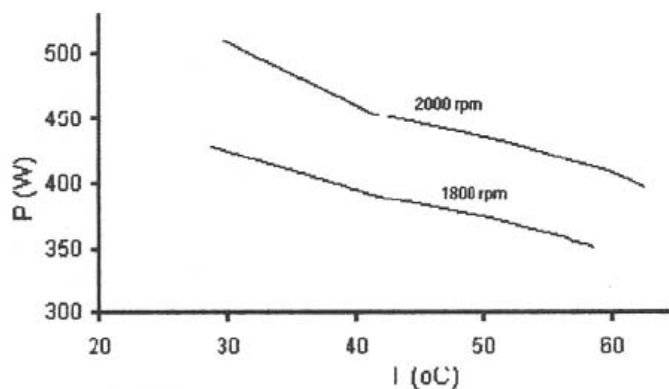


Figura F11: Influência da temperatura do gerador sobre a potência produzida
 Fonte: GÁRCIA, KRENZINGER, ALÉ, 2002

Com as informações sobre tensão e corrente no gerador pode-se obter a curva de potência desse, em relação a rotação do sistema como mostra o exemplo da Figura F12 pode-se, também, fazer uma análise influencia da tensão do sistema sobre a corrente da máquina eólica para cada rotação como mostra o estudo feito por Gárcia, Krenzinger e Alé (2002), no gráfico da Figura F13.

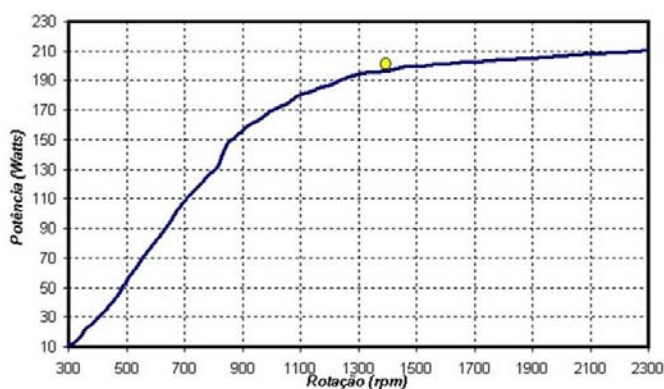


Figura F12: Exemplo de curva de potência obtida no ensaio
 Fonte: NUTEMA, 2005

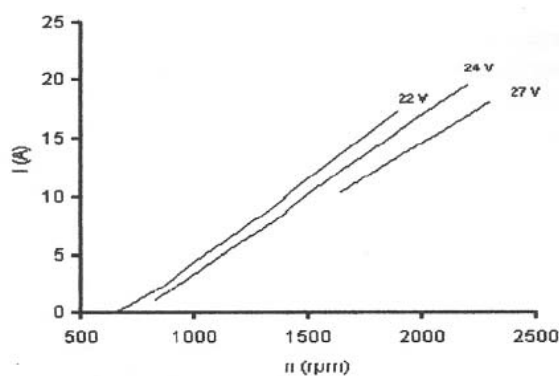


Figura F13: Influência da tensão do sistema sobre a corrente da máquina eólica
 Fonte: NUTEMA, 2005

Por fim tem-se um termômetro externo para a medida da temperatura ambiente. Essa medida é feita para compensar o valor dado pelos termopares, visto que eles só dão informações de diferença de temperatura entre a ambiente e a medida.

A Figura F14 mostra um exemplo de bancada experimental usada para obter os dados mencionados acima. Essa bancada foi usada no laboratório da PUCRS, chamado NUTEMA.

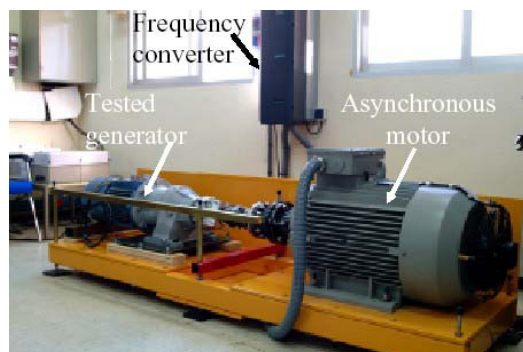


Figura F14: Exemplo de bancada experimental
Fonte: NUTEMA, 2005

Transmissão de dados a distância

Os geradores a serem construídos para aplicação no Brasil terão sensores que precisam ser monitorados, um é o sensor de vibração na torre com o objetivo de se prevenir o colapso do gerador e um outro é o sensor de desgaste dos freios a disco para se saber o momento de troca das pastilhas de freio. Os dados de cada sensor deverão ser coletados diretamente no gerador e enviados a um computador que será apenas uma forma de se saber o que está acontecendo lá..

O meio mais usado para transmitir esses dados é por radiofrequência que será constituído da seguinte forma: deve se ter um CLP (controlador lógico programável) que pegue os dados dos sensores e passe para o transmissor de rádio, esse por sua vez terá a função de transmitir para o receptor, que estará a certa distância do gerador, onde os dados são coletados. O receptor deve estar preferencialmente em uma cidade, onde terá, por sua vez, um sistema que transmita para a capital. Os dados enviados por radiofrequência podem apresentar-se em baixa ou alta frequência. A baixa frequência o emissor transmite a cerca de 900 MHz e a alta ele transmite em torno de 2,4 GHz. Para altas frequências, na legislação vigente, deve-se registrar um pedido de utilização para a ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicações) e pagar-se uma taxa mensal. Com isso, há uma segurança de transmissão de dados em uma frequência não usada por outros na mesma região.

O transmissor e receptor de alta frequência devem ser visados, ou seja, devem estar um de frente para o outro sem interferências (por exemplo, árvores, prédios, morros) para que a transmissão seja correta e segura. Em alta frequência há um limite máximo de 30 km de distância entre o receptor e o transmissor, essa distancia cai para 5 km em baixas frequências.

Conectado ao receptor deve estar um microcomputador PC onde é instalado um programa que converte os dados do receptor para uma planilha em Excel. Esse PC deve conter também um software supervisorio que joga esses dados do Excel em uma página protegida na internet. O PC deve estar permanentemente ligado e conectado com a internet. Dessa forma, os dados podem ser acessados de qualquer computador que tenha acesso à internet.

Existem outras formas de transmissão de dados a distância, como por satélite e antena de telefonia (celular), porém os custos são maiores e há mais dificuldades de implementação. Porém, se considerarmos que cada máquina estiver a uma altura considerável, conter um modem de transmissão de dados via celular e a rede do estado tiver capacidade para transmiti-los por um preço que se equivale a uma chamada de celular, os custos com transmissão estarão bastante abaixo do valor especificado para aplicação de radiofrequência.

Obtenção de dados a distância para o aerogerador

- Sensor de vibração na torre com o objetivo de se prevenir o colapso do gerador;
- Sensor de desgaste dos freios, que serão a disco com um sensor de deslocamento;

Os dados deverão ser coletados diretamente no gerador e enviados a um computador que será apenas um forma de se saber o que está acontecendo lá, esse computador estará localizado na região metropolitana de Porto Alegre. Os dados podem ser enviados diretamente ou por intermédio de algum outro meio, por exemplo, se diretamente, teria um modem na torre do gerador que enviaria por rádio até outra torre de maior capacidade (celular, por exemplo) que enviaria até a receptora da capital, ou, se indiretamente, através de uma conexão com a internet, colhendo os dados e mandando diretamente para uma página protegida que possa ser acessada por um computador da capital. Esses dados não tem muita rigorosidade quanto a proteção, porém só devem ser acessados pelos responsáveis.

Os dados são apenas os obtidos pelos sensores e transmitidos a um computador.

Evolução do ensaio

Inicialmente o ensaio será realizado da seguinte forma: após todas as conexões ligadas, como descrito acima, será dado um comando através do PC para fixar o valor de rotação do motor, com isso obtém-se a corrente, a tensão e a rotação do motor em ampere, volt e rpm, respectivamente. Nesse momento será feita, também, a medida da corrente e tensão do gerador (nas mesmas unidades) que estará ligado a uma carga assim como a temperatura no interior do gerador. Para cada incremento de rotação, será repetida a mesma bateria de medidas e obtendo-se assim, ponto a ponto, as curvas desejadas. Com isso pode-se obter a curva de potência em função da rotação, a curva de corrente versus rpm e a curva de potência versus temperatura do gerador.

As medidas são feitas todas de maneira estacionária (ponto a ponto), pois não há forma de se variar continuamente o ensaio e obter os dados através do mesmo sistema de aquisição (Spider 8), visto que esse não tem a capacidade de controlar o inversor de frequência devido a diferença de comunicação entre os dois. A única forma de se fazer isso seria projetar para a bancada um CLP que controle todo o sistema e adquira as medidas automaticamente, o que encareceria o projeto e, também, não seriam usados os equipamentos disponíveis no laboratório.

Para o freio a disco, será feita uma bateria de testes próprias, que será da seguinte forma: para cada rotação será acionado o freio e medido o tempo de parada do gerador, a temperatura atingida pela pastilha e o deslocamento da pinça para se ter informações sobre o desgaste da mesma. Serão feitos vários ensaios até que a pastilha esteja no limite de desgaste admissível. Nesse momento, poderá se fazer uma prospecção do tempo de vida útil da pastilha se o gerador estivesse em operação normal no vento. Com isso poderá se fazer uma análise da situação do material de atrito frente ao desgaste e, se necessário, trocar esse material por um mais adequado.

A temperatura ambiente será coletada continuamente durante todo o ensaio. Isso permitirá uma correção da temperatura dada pelos termopares e também para se ter um parâmetro de condições atmosféricas definido.

ANEXO G – Análise de custos e plano financeiro da produção nacional de aerogeradores de pequeno porte para o mercado brasileiro

Tabela.G1: Custos do produto e custos variáveis da linha de produto projetada para aerogeradores de pequeno porte dos componentes destes (R\$)

Produto	Unidade	Preço unit	Custo var	Margem
1 Aerogerador de pequeno porte 6kW	1	29.990,00	13.439,54	16.550,46
2 Aerogerador de pequeno porte 10kW	1	44.990,00	19.227,04	25.762,96
3 Disco de freio com controle de desgaste automático e dispositivo regulador para aerogeradores de pequeno porte	1	3.630,00	2.656,23	973,77
4 Sapatas aerogeradores de pequeno porte	1	129,00	84,18	44,82
5 Sistema de monitoramento de dados à distância para aerogeradores de pequeno porte	1	2.990,00	2.267,64	722,36

Tabela G2: Cash-Flow da empresa projetada de produção de aerogeradores de pequeno porte nos primeiros cinco anos de operação (R\$).

	Fase de Implantação	Fase de operação (1)					Total
		Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	
Entradas	1.000.010	656.600	1.195.720	1.989.195	2.967.610	3.938.890	11.748.025
Receita operacional		451.600	1.138.720	1.929.195	2.952.610	3.918.890	10.391.015
Receita não operacional líquida		5.000	7.000	10.000	15.000	20.000	57.000
Investimento de risco - capital próprio	218.080	100.000	50.000	50.000			418.080
Investimento de risco - investidores		100.000					100.000
Fundos não reembolsáveis	381.930						381.930
Empréstimos	400.000						400.000
Saídas	979.510	568.443	1.070.341	1.704.447	2.472.526	3.100.964	9.896.232
Custo variável		218.070	552.236	962.300	1.486.777	1.983.442	5.202.825
Custo fixo (2)		167.896	220.426	321.778	385.853	451.361	1.547.314
IRPJ e contribuições		42.477	167.679	300.369	489.897	666.161	1.666.582
Despesas de implantação	777.960						777.960
Investimento em capital fixo	201.550						201.550
Amortização		100.000	100.000	100.000	100.000	0	400.000
Custos financeiros (juros)		40.000	30.000	20.000	10.000	0	100.000
Fluxo de caixa - total do período	20.500	88.157	125.379	284.748	495.084	837.926	1.851.793
Disponibilidade	20.500	108.657	234.035	518.784	1.013.867	1.851.793	1.851.793

	Fase de Implantação	Fase de operação					Total
		Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	
Necessidade de financiamento	0						0
Empréstimo	400.000						400.000
Amortização		100.000	100.000	100.000	100.000	0	400.000
Juros		40.000	30.000	20.000	10.000	0	100.000

(1) A fase de operação inicia quando iniciarem os custos fixos.

(2) Exceto a depreciação do capital fixo e os custos financeiros.

Tabela G3. Indicadores de viabilidade econômica da produção de aerogeradores de pequeno porte (VPL, TIR e Lucratividade)

Fase de Implantação	Fase de operação					
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	
Fluxo de caixa R\$	-979.510	88.157	125.379	284.748	495.084	837.926

Taxa	VPL R\$
0%	851.783
5%	527.991
10%	276.622
15%	78.842
20%	(78.693)
25%	(205.593)
30%	(308.880)
35%	(393.757)
40%	(464.127)
45%	(522.953)
50%	(572.507)

Taxa interna de retorno (TIR) 17%

Lucratividade	Fase de operação				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Resultado líquido R\$	(37.783)	149.439	308.808	575.714	818.556
Receita operacional R\$	451.600	1.138.720	1.929.195	2.952.610	3.918.890
Lucratividade %	-8%	13%	16%	19%	21%

Tabela G4: Receita (R\$).

Produto	Ano					Total
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	
1 Aerogerador de pequeno porte 6kW						
Unidade	10	25	40	60	80	215
Preço unitário	29.990,00	749.750	1.199.600	1.799.400	2.399.200	6.447.850
Custo variável unitário	134.395	335.989	537.582	806.372	1.075.163	2.889.501
Margem	165.505	413.762	662.018	993.028	1.324.037	3.558.349
Quantidade vendida	2	5	8	12	15	42
Receita	89.980	224.950	359.920	539.880	674.850	1.889.580
Custo variável	38.454	96.135	153.816	230.724	288.406	807.536
Margem	51.526	128.815	206.104	309.156	386.444	1.082.044
2 Aerogerador de pequeno porte 10kW						
Unidade	15	40	90	150	200	495
Preço unitário	54.450	145.200	326.700	544.500	726.000	1.796.850
Custo variável unitário	39843,45	106.249	239.061	398.435	531.246	1.314.834
Margem	14.607	38.951	87.639	146.066	194.754	482.016
3 Disco de freio com controle de desgaste automático e dispositivo regulador para aerogeradores de pequeno porte						
Unidade	10	30	55	70	110	275
Preço unitário	1.290	3.870	7.095	9.030	14.190	35.475
Custo variável unitário	842	2.525	4.630	5.893	9.260	23.149
Margem	448	1.345	2.465	3.137	4.930	12.326
4 Sapatas aerogeradores de pequeno porte						
Unidade	2	5	12	20	35	74
Preço unitário	5.980	14.950	35.880	59.800	104.650	221.260
Custo variável unitário	4.535	11.338	27.212	45.353	79.367	167.805
Margem	1.445	3.612	8.668	14.447	25.283	53.455
5 Sistema de monitoramento de dados à distância para aerogeradores de pequeno porte						
Unidade	2	5	12	20	35	74
Preço unitário	5.980	14.950	35.880	59.800	104.650	221.260
Custo variável unitário	4.535	11.338	27.212	45.353	79.367	167.805
Margem	1.445	3.612	8.668	14.447	25.283	53.455
TOTAL	451.600	1.138.720	1.929.195	2.952.610	3.918.890	10.391.015
Custo variável	218.070	552.236	962.300	1.486.777	1.983.442	5.202.825
Margem de contribuição	233.530	586.484	966.895	1.465.833	1.935.448	5.188.190

Tabela G5: Vista geral dos investimentos necessários em capital fixo para montar a produção de aerogeradores de pequeno porte (R\$).

	Quantid	R\$/unid	Valor	Deprec	Manut	Seguro
Máquinas e equipamentos (exceto de informática)				10,0%	1,5%	1,0%
Banco de trabalho	2	5.800	11.600	1.160	174	116
Ferramentas	1	45.000	45.000	4.500	675	450
Total R\$			56.600	5.660	849	566
Hardware (informática)				20,0%	1,0%	1,0%
Computador	5	3.000	15.000	3.000	150	150
Impressora laser	2	1.500	3.000	600	30	30
Laptop	2	7.000	14.000	2.800	140	140
Modem de banda larga	1	250	250	50	3	3
Impressora jato de tinta	2	300	600	120	6	6
Total R\$			32.850	6.570	329	329
Móveis e utensílios				10,0%	0,2%	0,2%
Lugar de trabalho de escritório	3	1.200	3.600	360	7	7
Armários para oficina	10	350	3.500	350	7	7
Total R\$			7.100	710	14	14
Instalações				10,0%	1,5%	1,0%
Equipamento para escritório	1	20.000	20.000	2.000	300	200
Instalações para oficina	1	60.000	60.000	6.000	900	600
Total R\$			80.000	8.000	1.200	800
Veículos				20,0%	10,0%	1,0%
VW - Gol	1	25.000	25.000	5.000	2.500	250
Total R\$			25.000	5.000	2.500	250
Total do investimento em capital fixo			201.550			
Depreciação mensal			2.162			
Manutenção mensal			408			
Seguro mensal			163			

Tabela G6: Despesas de implantação da local de produção para componentes de aerogeradores (R\$).

	Quantid	R\$/unid	Valor
Software			
Auto Cad	1	14.500	14.500
Windows XP Professional	5	390	1.950
		Total R\$	16.450
Treinamento e capacitação			
Treinamento de funcionários	3	5.000	15.000
		Total R\$	15.000
Desenvolvimento do produto			
Participação própria custos de desenvolvimento	1	218.080	218.080
Participação custos de desenvolvimento FAPERGS	1	381.930	381.930
		Total R\$	600.010
Divulgação			
Folhetos	400	25	10.000
Página da internet	1	1.500	1.500
Congressos, feiras, seminários	5	2.000	10.000
		Total R\$	21.500
Capital de giro antecipado			
Valor global	1	25.000	25.000
		Total R\$	25.000
Diversos			
Valor global	1	100.000	100.000
		Total R\$	100.000
Total das despesas de implantação			777.960

Tabela G7: Estimativa do desenvolvimento dos custos fixos médios mensais da produção de aerogeradores nos primeiros cinco anos de produção (R\$).

Item do custo	Médias mensais				
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Depreciação	2.162	2.162	2.162	1.614	1.614
Manutenção	408	408	408	408	408
Seguro	163	163	163	163	163
Salários com encargos	8.000	12.000	20.000	25.000	30.000
Aluguel	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Mensalidade da Incubadora	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Contador	300	450	500	600	750
Manutenção do site na internet	100	100	150	150	200
Telefone	400	450	500	550	600
Acesso a Internet	80	80	80	80	80
Luz (iluminação padrão)	200	200	200	200	200
Materiais de escritório	400	450	500	550	600
Materiais de limpeza	25	25	25	25	25
Material sanitários	30	30	30	30	30
Água	35	35	35	35	35
Segurança	380	380	380	380	380
Diversos (3% dos itens acima)	470	598	844	984	1.143
Média mensal	16.153	20.531	28.977	33.769	39.228
Custo fixo exceto a depreciação					
Média mensal	13.991	18.369	26.815	32.154	37.613

Tabela G8: Custos variáveis da produção de um aerogerador de pequeno porte de 6kW
(R\$).

1 Produto	Unidade	Lote	Preço unitário			
Aerogerador de pequeno porte 6kW	1	1	29.990,00			
Custo dos materiais e outros itens consumíveis, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo	% IPI	% ICMS
Custos de material	1	1.500,00	1,00	1.192,50	3,50%	17,00%
Custos com produtos pré-fabricados	1	12.500,00	1,00	9.937,50	3,50%	17,00%
Subtotal				11.130,00		
Serviços, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo		
Montagem final	1	300,00	1,00	300,00		
Teste	1	30,00	1,00	30,00		
Serviços prestados por terceiros	1	600,00	1,00	600,00		
Subtotal				930,00		
Custo de comercialização, % sobre o preço do produto						
	Item	%	R\$			
	ICMS	0,00%	0,00			
	IPI	0,00%	0,00			
	ISSQN	3,00%	899,70			
	Comissão	1,00%	299,90			
	Frete	0,35%	104,97			
	Embalagem	0,25%	74,98			
			0,00			
Subtotal				1.379,54		
Custo variável por unidade de produto				13.439,54		
Margem de contribuição por unidade de produto				16.550,46		

Tabela G9: Custos variáveis da produção de um aerogerador de pequeno porte de 10kW (R\$).

2 Produto		Unidade	Lote	Preço unitário		
Aerogerador de pequeno porte 10kW		1	1	44.990,00		
Custo dos materiais e outros itens consumíveis, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo	% IPI	% ICMS
Custos de material	1	3.000,00	1,00	2.385,00	3,50%	17,00%
Custos com produtos pré-fabricados	1	17.500,00	1,00	13.912,50	3,50%	17,00%
Subtotal				16.297,50		
Serviços, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo		
Montagem final	1	500,00	1,00	500,00		
Teste	1	50,00	1,00	50,00		
Serviços prestados por terceiros	1	1.000,00	1,00	1.000,00		
Subtotal				1.550,00		
Custo de comercialização, % sobre o preço do produto						
	Item	%	R\$			
	ICMS	0,00%	0,00			
	IPI	0,00%	0,00			
	ISSQN	3,00%	899,70			
	Comissão	1,00%	299,90			
	Frete	0,35%	104,97			
	Embalagem	0,25%	74,98			
			0,00			
Subtotal				1.379,54		
Custo variável por unidade de produto				19.227,04		
Margem de contribuição por unidade de produto				25.762,96		

Tabela G10: Custos variáveis da produção de sistemas de freio com indicador de desgaste e reajustamento automático para aerogeradores de pequeno porte (R\$).

3 Produto	Unidade	Lote	Preço unitário			
Disco de freio com controle de desgaste automático e dispositivo regulador para aerogeradores de pequeno porte	1	1	3.630,00			
Custo dos materiais e outros itens consumíveis, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo	% IPI	% ICMS
Custos de material	1	180,00	1,00	143,10	3,50%	17,00%
Custos com produtos pré-fabricados	1	1.600,00	1,00	1.272,00	3,50%	17,00%
Subtotal				1.415,10		
Serviços, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo		
Montagem final	1	50,00	1,00	50,00		
Teste	1	30,00	1,00	30,00		
Serviços prestados por terceiros	1	250,00	1,00	250,00		
Subtotal				330,00		
Custo de comercialização, % sobre o preço do produto						
	Item	%	R\$			
	ICMS	17,00%	617,10			
	IPI	3,50%	127,05			
	ISSQN	3,00%	108,90			
	Comissão	1,00%	36,30			
	Frete	0,35%	12,71			
	Embalagem	0,25%	9,08			
			0,00			
Subtotal				911,13		
Custo variável por unidade de produto				2.656,23		
Margem de contribuição por unidade de produto				973,77		

Tabela G11: Custos variáveis da produção de sapatas para freios de disco de aerogeradores de pequeno porte (R\$).

4 Produto		Unidade	Lote	Preço unitário		
Sapatas aerogeradores de pequeno porte		1	1	129,00		
Custo dos materiais e outros itens consumíveis, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo	% IPI	% ICMS
Custos de material	1	40,00	1,00	31,80	3,50%	17,00%
Subtotal				31,80		
Serviços, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo		
Compressão	1	10,00	1,00	10,00		
Sinterização	1	10,00	1,00	10,00		
Subtotal				20,00		
Custo de comercialização, % sobre o preço do produto						
	Item	%	R\$			
	ICMS	17,00%	21,93			
	IPI	3,50%	4,52			
	ISSQN	3,00%	3,87			
	Comissão	1,00%	1,29			
	Frete	0,35%	0,45			
	Embalagem	0,25%	0,32			
			0,00			
Subtotal				32,38		
Custo variável por unidade de produto				84,18		
Margem de contribuição por unidade de produto				44,82		

Tabela G12: Custos variáveis da produção do sistema de monitoramento on-line para aerogeradores de pequeno porte (R\$).

5 Produto	Unidade	Lote	Preço unitário			
Sistema de monitoramento de dados à distância para aerogeradores de pequeno porte	1	1	2.990,00			
Custo dos materiais e outros itens consumíveis, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo	% IPI	% ICMS
Custos de material	1	220,00	1,00	174,90	3,50%	17,00%
Custos com produtos pré-fabricados	1	1.550,00	1,00	1.232,25	3,50%	17,00%
Subtotal				1.407,15		
Serviços, por lote de produção						
Item	Unidade	R\$/Unid.	Quant.	Custo		
Montagem final	1	80,00	1,00	80,00		
Teste	1	30,00	1,00	30,00		
Subtotal				110,00		
Custo de comercialização, % sobre o preço do produto						
	Item	%	R\$			
	ICMS	17,00%	508,30			
	IPI	3,50%	104,65			
	ISSQN	3,00%	89,70			
	Comissão	1,00%	29,90			
	Frete	0,35%	10,47			
	Embalagem	0,25%	7,48			
			0,00			
Subtotal				750,49		
Custo variável por unidade de produto				2.267,64		
Margem de contribuição por unidade de produto				722,36		

ANEXO H – Vista geral do mercado de aerogeradores de pequeno porte

Potência nominal: 0,0025-0,9 kW	
Potência [kW]	Fabricante
0,0025	sunset-solar
0,060	Bornay
0,060	MG Plast
0,070	Solar-Wind-Team
0,090	sunset-solar
0,100	Solar-Wind-Team
0,120	Windside
0,120	Windstreampower
0,150	Eolica Peru
0,150	MG Plast
0,120	Aerocraft
0,200	AES Alternative Energiesysteme GmbH
0,200	Electrical Engineering Co
0,200	Vaigunth Ener Tek(P) Ltd.
0,240	Aerocraft
0,240	Windside
0,250	Bornay
0,250	ACSA Aerogeradores Canarios S:A:
0,250	Eolica Peru
0,250	Landmark alt.E.& Consulting
0,250	Synergy-Power-Corporatin
0,300	MG Plast
0,300	Atlantis
0,300	Fortis-Windenergy
0,300	Electrical Engineering Co
0,300	Kiss High-Output Wind Generators
0,300	Solar-Wind-Team
0,300	Soluciones Energeticas S.A.(SOLENER)
0,300	Synergy-Power-Corporatin
0,300	Wind-Energy-Solutions
0,300	Zhuhai-Hopeful Ltd.
0,350	Superwind
0,400	Enersud Industria e Solucoes E...
0,400	Selsam Innovations
0,400	Soma Power P/L
0,400	Southwest Windpower
0,400	Unitron E.Systems Pvt Ltd
0,400	USA Solar & Wind Inc.
0,400	Windsun Techn.Enterprise Ltd

0,400	Zhuhai-Hopeful Ltd.
0,500	Aerocraft
0,500	AlterCoop WindEnergy
0,500	Energie Ressource Techn.Inc.
0,500	Soluciones Energeticas S.A.(SOLENER)
0,500	Vaigunth Ener Tek(P) Ltd.
0,525	Atlantic-Power-Master
0,600	ACSA Aerogeradores Canarios S:A:
0,600	Atlantis
0,600	Bornay
0,600	Kestrel Wind Turbines (Pyt)Ltd
0,600	Landmark alt.E.& Consulting
0,600	MG Plast
0,600	Proven Engeneering Products Ltd
0,700	Enersud Industria e Solucoes E...
0,700	sunset-solar
0,750	Aerocraft
0,750	Greentec
0,750	Fortis-Windenergy
0,750	Ropatec
0,750	Solar-Wind-Team
0,750	Sviad
0,800	MG Plast
0,800	Blue Energy
0,800	Mike´s Windmill Shop
0,900	Áfrican Windpower
0,900	Southwest Windpower
0,900	Unitron E.Systems Pvt Ltd

Potência nominal: 1,0 - 4,9 kW	
Potência [kW]	Fabricante
1,00	Soma Power P/L
1,00	ACSA Aerogeradores Canarios S.A.
1,00	Aerocraft
1,00	Atlantic-Power-Master
1,00	Bergey Windpower Co
1,00	Enersud Industria e Solucoes Energeticas
1,00	Ingenieurbüro Prof.Dr.Hafner
1,00	Electrical Engineering Co
1,00	MatroW GmbH
1,00	Point Power Systems
1,00	Selsam Innovations

1,00	Solar-Wind-Team
1,00	Southwest Windpower
1,00	Vaigunth Ener Tek (P) Ltd
1,00	WindElectric
1,00	Zhuhai Hopeful Ltd.
1,20	Thermodyne Systems
1,20	Travere Industries S.A.S.
1,30	Unitron Energy Systems Pvt Ltd
1,35	Unitron Energy Systems Pvt Ltd
1,40	Fortis Windenergy
1,50	ACSA AeroGeradores Canarios S.A.
1,50	Bornay
1,50	MG Plast
1,50	Solar-Wind-Team
1,50	Bergey Windpower Co
1,50	Electrical Engineering Co
1,50	Landmark Alternative Energien & Consulting
1,50	Moratec Elektro-Planungs-GmbH
1,50	Renewable Devices Swift Turbines Ltd
1,50	Turbex Rotary Wind Mills
1,50	Windmission
1,80	Windtechnik Geiger GmbH
2,00	Greentec
2,00	ACSA AeroGeradores Canarios S.A.
2,00	AES Alternative Energie Systeme GmbH
2,00	AQUASOLAR Wasserentsalzung & Umwelttechnologie AG
2,00	Energotech S.A.
2,00	Gusto Energy Systems Ltd
2,00	Soluciones Energeticas S.A.(SOLENER)
2,30	Thermodyne Systems
2,50	Arman Engineering Designing
2,50	Proven Engineering Products Ltd
2,50	Wind Energy Solutions
3,00	Bornay
3,00	ACSA AeroGeradores Canarios S.A.
3,00	Energotech S.A.
3,00	Landmark Alternative Energien & Consulting
3,00	Moratec
3,00	Ropatec
3,00	Solwind
3,00	Southwest Windpower
3,00	Synergy Power Corporation
3,00	Travere Industries S.A.S.
3,00	Turbex Rotary Wind Mills

3,00	Westwind
3,30	Unitron Energy Systems Pvt Ltd
3,50	Electrical Engineering Co
3,50	Wind Energy Solutions
4,00	Selsam Innovations

Potência nominal: 5,0 - 9,9 kW	
Potência [kW]	Fabricante
5,00	AQUASOLAR Wasserentsalzung & Umwelttechnologie AG
5,00	Electrosfera
5,00	Flowtrack Pty Ltd
5,00	Turbex Rotary Wind Mills
5,00	Vaigunth Ener Tek (P)Ltd
5,00	Vergnet SA- Department Eolien
5,30	Iskra Wind Turbine Manufacturers
5,50	Westwind
5,60	Fortis Windenergy
6,00	Bornay
6,00	Atlantis
6,00	Eoltec SAS
6,00	INVENTUS GmbH
6,00	INVENTUS GmbH
6,00	Landmark Alternative Energien & Consulting
6,00	Point Power Systems
6,00	Proven Engineering Products Ltd
6,00	Ropatec
6,00	Solwind
6,00	Travere Industries S.A.S.
6,00	WindElectric
6,00	Windtechnik Geiger GmbH
6,40	Aventa
7,50	Bergey Windpower Co
8,00	Greentec
8,00	Windtower
8,00	Moratec Elektro-Planungs-GmbH
9,00	Aeroturbine

Potência nominal: 10 - 14,9 kW	
Potência [kW]	Fabricante
10,00	Windtower

10,00	ACSA Aerogeradores Canarias S.A.
10,00	AIRCON GmbH & Co.KG
10,00	AQUASOLAR Wasserentsalzung & Umwelttechnologie AG
10,00	Bergey Windpower Co
10,00	Fortis Windenergy
10,00	Moratec Elektro-Planungs-GmbH
10,00	Solwind
10,00	Turbex Rotary Wind Mills
10,00	Vergnet SA-Department Eolien
10,00	Westwind
10,00	Wind Turbine Industrie Corporation
12,00	Travere Industries S.A.S.
12,00	TurbodynamX
12,50	Wind Turbine Industrie Corporation

Potência nominal: 15 - 19,9 kW	
Potência [kW]	Fabricante
15,00	Leo Hollmann
15,00	Proven Engineering Products Ltd
15,00	Soluciones Energeticas S.A. (SOLENER)
15,00	Wind Turbine Industries Corporation
17,00	Travere Industries S.A.S.
17,50	Wind Turbine Industries Corporation

Potência nominal: 20 - 24,9 kW	
Potência [kW]	Fabricante
20,00	Firewind S.R.L.
20,00	Stojirny Bohdalice
20,00	MKW Group/ Gazelle Wind Turbines
20,00	PitchWind Systems AB
20,00	Svecom-Energy Srl
20,00	Turbex Rotary Wind Mills
20,00	Vergnet SA- Department Eolien
20,00	Westwind
20,00	Wind Turbine Industries Corporation

Potência nominal: 25 - 30 kW	
Potência [kW]	Fabricante
25,00	Eoltec SAS

25,00	Travere Industries S.A.S.
30,00	Fuhrländer Aktiengesellschaft
30,00	Solwind
30,00	Synergy Power Corporation
30,00	Travere Industries S.A.S.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROGEROADORES SUL LTDA.; <<http://www.aerogeradores.com.br>>; Acesso em 08/01/06.

ALTERCOOP LTDA.; <<http://www.altercoop.com.br>>; Acesso em 08/01/06.

ANCONA, D; Wind Turbines – Materials and Manufacturing Fact Sheets; Princeton 2001

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; Banco de Informações de Geração (BIG); 2006; Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>.

AWEA – American Wind Energy Association; Global Small Wind Industry Market Study; 2005; Disponível em <http://www.awea.org/AWEA_SWT_Market_Study_6-05.pdf>.

AWEA - American Wind Energy Association; Permitting Small Wind Turbines: A Handbook; 2004; Disponível em <<http://www.awea.org/smallwind/documents/PERMITTINGGUIDEREVIEW.pdf>>.

BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung; Die Eignung des Kuststoffes Secudrän R201Z WD601Z R201Z; p. 16; Berlim 2004

BINGEL, H. R.; Korrosion im Innern von integrierten Schaltkreisen; Materials and Corrosion/Werkstoffe und Korrosion; v. 44; p. 142-144; 1992.

BOKU - University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna; Windenergie; 2006; Disponível em <<http://www.homepage.boku.ac.at/h9027481/>>.

CASELITZ, P.; KRÜGER, T.; Drehzahlvariable Windkraftanlagen mit Überlagerungsgetriebe; Windkraftjournal; ed. 13, Berlim 1993

CATAVENTOS DO NORDESTE LTDA.; <<http://www.cataventosdonordeste.com.br>>; Acesso em 08/01/06.

COMTEXTO – Informação de Marketing; Avaliação de Mercado para o Lançamento e a Comercialização de Sistemas de Geração de Energia Eólicos ou Híbridos Destinados à Eletrificação Rural e à Irrigação de Lavouras; Porto Alegre 2005.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Energia Eólica, Principios e Aplicacoes; p. 8; 2002; Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>.

CT BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia; Rede Brasil de Tecnologia; 2005; Disponível em <<http://www.protec.org.br/pdf%20III%20enitec/Mesa%205/Marcelo%20de%20Carvalho.pdf>>.

DÖBERT, H.; Lexikon der Korrosion und Korrosionsarten; 2006; Disponível em <<http://www.korros.de/>>.

ENERSUD INDÚSTRIA E SOLUCOES ENERGÉTICAS LTDA.;
<<http://www.enersud.com.br>>; Acesso em 08/01/06.

EQUIPE; Catálogo de termopares da Equipe Equipamentos de Automação e Controle.
Disponível em <<http://www.equipe-termopar.com.br>>.

ERNEUERBARE ENERGIEN; Windenergie: Wind ins Netz- Netzeinspeisung mit Kleinwindrädern; ed. 07/2004.

FOLLE, L. F., FRÖHLER, F., LÜTZ, O., GOMES, M. S., EVTEC - Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica e Comercial, Projeto de pesquisa: Desenvolvimento de componentes de alta performance para pequenas unidades aerogeradoras em sistema híbrido, Edital FAPERGS 007/2004, Porto Alegre 2005.

FADIGAS, E. A. F. A.; Elaboracao de Diagnostico e Plano de Metas orientadas a Disseminacao de Geradores Eólicos de Pequeno Porte nas Áreas Rurais; EPUSP; Sao Paulo 2002.

FRAUNHOFER INSTITUT; Gutachten zur CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien; Karlsruhe 2005; p. 14.

FRÖHLER, D.; Projeto de Pesquisa „AUTER“; Abschlußbericht zum Verbundprojekt AUTER; p. 4-8; Freiberg 2005.

GABLER, H.,PREISER, K.; Photovoltaik - ein Baustein zur Nachhaltigen Entwicklung netzferner Regionen; 1999; Disponível em <http://www.fv-sonnenenergie.de/publikationen/th9899/th9899_028-031.pdf>.

GARCÍA, F. H.; KRENZINGER, A.; ALÉ, J. A. V.; Bancada Experimental para Estudos de Sistema Híbridos Eólico-Fotovoltaicos; Porto Alegre 2002.

GASCH, R.; Windkraftanlagen - Grundlagen und Entwurf; Stuttgart 1991.

GOLDEMBERG, J.; Secretaria do Meio Ambiente São Paulo; Expanding access to electricity in Brazil; São Paulo 2004.

GREIF, J.; SCHARMER, K.; European Solar Radiation Atlas; Paris 2000

GTZ - Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH; Energiapolitische Rahmenbedingungen für Strommärkte und erneuerbare Energien; Eschborn 2004.

HAASE, T.; Implementierung eines PC-basierten Meßsystems zur Überwachung von Windenergieanlagen; p. 7; Berlim 2002.

HACKER, G.; Wind ins Netz – Netzeinspeisung und Akkuladung mit neuen Kleinwindrädern; St. Georgen 2004

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH; Handbook Composit Materials, e. 01/03; p. 8, p. 263-268; 2003; Disponível em <http://www.download.r-g.de/handbuch/en/komplett_en.pdf>.

HAU, E.; Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit; Heidelberg 1996.

HBM; Catálogo de LVDTs da HBM, Disponível em <<http://www.hbm.com>>.

HEIER, S.; Regelungskonzepte für Windenergieanlagen; Zürich 1988.

IEA – International Energy Agency; World Energy Outlook 2002; capítulo “Energy & Poverty”; Paris 2002 .

IIEC – The International Institute for Energy Conservation; Transitioning to Renewable Energy – An Analytic Framework for Creating a Enabling Environment; Washington 2004; p. 33-42

IMA – Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH; Diagnosesystem zur Zustandsüberwachung von Windkraftanlagen; 2004; Disponível em <<http://www.ima-dresden.de/deutsch/bericht/wka-diagnosesysteme.pdf>> .

INVENTUS; Catálogo técnico do gerador eólico Inventus 6 fabricada pela Inventus GmbH da Alemanha; Disponível em <<http://www.inventus-windenergie.de>>.

KLOCKE, F.; Einführung in den Maschinenbau – Werkstoffauswahl; 2002; Disponível em <http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/70aac0b479a7e054c1256f150047f8d1/vorlesung_7_werkstoffauswahl.pdf>.

KLUG, H.-P.; Nutzfahrzeug-Bremsanlagen, ed. 3; Berlim 1997

LANDAU, M.; Rural electrification – an integrated approach; Kassel 2005.

LEHMANN, K.-P.; KOENEMANN, D.; Die Chancen der Kleinen; Revista Sonne, Wind & Wärme, p. 23, Junho 2005.

LEICHTER, K.; Chopper Licht, die intermittierende Belichtung; Erlangen 2004

LIETZMANN, A.; Entwicklung netzunabhängiger Energie- und Trinkwasserkonzepte auf Basis regenerativer Energie; Freiberg 2000.

LIETZMANN, K.-D.; LÜTZ, O.; SCHAEFFER, L.; EVTEC - Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica e Comercial; Desenvolvimento de componentes de alta performance para pequenas unidades aerogeradoras em sistema híbrido; Edital FAPERGS 007/2004; Porto Alegre 2005.

LUKAS, P.; SCHÖNE, A.; Ein Konzept zur Betriebsführung von Wind-Diesel-Systemen mit Kurzzeitenergiespeichern; Universidade de Bremen; Bremen 2001.

LÜTZ, O.; LIETZMANN, K.-D.; FRÖHLER, D.; Estudo de Mercado com Vistas a Exportação e da Tecnologia utilizada nos Sistemas de Controle e Comando de Aerogeradores de pequeno porte com Pôtencia Nominal de até 30 kW existentes no Mercado Europeu; p. 54-57; Canoas 2005.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S.; Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA; In: Anais VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; Goiana; Brasil; 16-21 abril 2005; p. 3142.

MME – Ministério de Minas e Energia; Atlas do Potencial Eólico Brasileiro; Brasília 2000.

MME – Ministério de Minas e Energia; Luz para Todos, Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica, Manual de Operação; Brasília 2003.

MME – Ministério de Minas e Energia; PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica; Lei N° 10.762; de 11 de novembro de 2003, Brasília 2003.

NELSON, V. C.; Wind Hybrid System Technology Characterization ; West Texas A&M University; p.2,30; Texas 2002.

NOWAK, S.; Renewables for Power Generation – Technologies and Prospects; Suíça 2004.
NUTEMA - Núcleo Tecnológico de Energia e Meio Ambiente; Internet <<http://www.em.pucrs.br/nutema>>.

RIBEIRO, D. C.; O Ciclone Catarina; 2004; Disponível em <<http://www.popa.com.br/imagens/03-04/catarina.htm>>.

SIEGFRIEDSEN, S.; aerosmart5 – Eine neue Generation von Kleinwindenergieanlagen; Rendsburg 2004.

SILVA, M. A. B.; Atlas Escolar Melhoramento; São Paulo, 2000.

SONNE, WIND & WÄRME; Conergy produziert kleine Windkraftanlagen; ed. 01/2006; p. 8; Bielefeld 2006.

TOCHTROP, E. F.; Mercado, Aspectos Financeiros Prospectivos, Avaliação Econômica e Plano de Negócio do projeto FAPERGS 07/2004, N° 0407051; Porto Alegre 2005.

UFPB – Universidade Federal do Pernambuco; Atlas Solarimétrico do Brasil; Pernambuco, 2003.

UNDP – United Nation Development Programme; Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (IDH-M); Brasília 2003.

WADE – World Alliance for Decentralized Energy; National Survey of Decentralized Energy, Brazil 2003/2004; p. 31; Edinburgh 2004.

WADE – World Alliance for Decentralized Energy; World Survey of Decentralized Energy; Edinburgh 2005.

WEATHERBASE - Weather Records and Averages; Disponível em <<http://www.weatherbase.com>>.

WEG; Catálogo técnico do inversor de frequência linha CFW09 da Weg; Disponível em <<http://www.weg.com.br>>.

WEG; Catálogo técnico do motor de indução trifásico linha Well da Weg; Disponível em <<http://www.weg.com.br>>.

WEG; Catálogo técnico dos conversores de corrente contínua da Weg; Disponível em <<http://www.weg.com.br>>.

WIAM-METALLINFO; Werkstoffdatenbank; 2006; Disponível em <<http://www.ima-dresden.de/wiamde/wiam.htm>>.

WIND POWER MONTHLY; Irritation Over Test Station's New Demand; May 1996

WIND TURBINE MARKET; Catálogo técnico do mercado mundial dos aerogeradores; Sunmedia Verlag; Hannover 2006

WINROCK INTERNATIONAL; Trade Guide on Renewable Energy in Brazil; Little Rock 2002