



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GPT YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO-CONVENCIONAIS GPT

**AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE ADAPTADOS A REGIMES DE VENTOS TURBULENTOS E
CONECTÁVEIS EM REDES ELÉTRICAS FRACAS**

Bruno Marciano Lopes (*)¹ Alexandre H. Lisboa¹ André M. Carvalho¹ Carlos A. M. do Nascimento¹

Marcos Vinícius Bortolus² Ramón Molina Valle² Ricardo Luiz U. de Freitas Pinto²

Rogério Pinto Ribeiro² Selênio Rocha Silva² João Antônio de Vasconcelos²

¹COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS ²UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

RESUMO

Este informe técnico apresenta as motivações para o desenvolvimento de tecnologia nacional em aerogeradores de pequeno porte, bem como apresenta os resultados parciais do desenvolvimento de um protótipo de 10 kW. Através de uma abordagem resumida, são descritos os principais passos do projeto, salientando-se as razões e implicações das decisões tomadas. Sem esgotar o assunto, são delineados os passos realizados e futuros para atingir o objetivo de transformar o protótipo em produto comercial e viabilizar seu uso como alternativa de geração para localidades remotas desprovidas de rede elétrica ou conectadas a sistemas elétricos fracos.

PALAVRAS-CHAVE

Energia Eólica, Turbina Eólica, Alternativas Energéticas, Geração Distribuída

1.0 - INTRODUÇÃO

O acesso às fontes modernas de energia é um dos principais indicadores de desenvolvimento de um povo. O acertado processo de universalização do uso de energia elétrica constitui um desafio às concessionárias do setor, que precisam prover as mais competitivas soluções para o provimento de energia a consumidores remotos. Em regiões como o Norte de Minas Gerais, onde a densidade populacional e o consumo específico de energia são baixos, esta questão se agrava, uma vez que o provimento via rede convencional assume custos elevados. Na CEMIG, um portfólio de opções de geração local, tradicionais e alternativas, é confrontado a opções de conexão ou expansão da rede. Um exemplo de sucesso é o programa existente na empresa de universalização do acesso à energia a escolas e residências rurais por meio de sistemas fotovoltaicos.

Aerogeradores de pequeno porte são alternativas comerciais para provimento de energia renovável em localidades remotas. Além daqueles que podem operar em sistemas isolados ou híbridos, alguns geradores de pequeno porte podem atuar em redes fracas, fornecendo potência ativa bem como regulação de tensão, minimizando distúrbios aos consumidores e agregando robustez que a faça suportar desequilíbrios, variações de tensão, tensões induzidas, entre outros distúrbios característicos de redes rurais.

A maioria dos pequenos aerogeradores disponíveis no mercado nacional, importados na quase totalidade, não são providos de elementos que os permitam atender plenamente aos quesitos de melhoria da qualidade da energia, além de não terem sido desenvolvidos para os regimes de ventos típicos do interior do território brasileiro, caracterizados por alta turbulência aerodinâmica, devida à topografia complexa, sendo responsáveis pela redução do desempenho e da vida útil dos aerogeradores.

Adicionado à questão de adaptabilidade das turbinas ao regime turbulento dos ventos, a necessidade do conhecimento sistemático das características dos últimos impõe a criação de uma metodologia de estimação de velocidades de ventos a baixas alturas (típicas para turbinas de pequeno porte), onde o relevo e a rugosidade superficial têm significativa relevância.

Nesse contexto, está sendo conduzido, por meio de parceria entre a Cemig e a UFMG, o projeto “Desenvolvimento de Centrais Eólicas Adaptadas às Condições de Vento do Estado de Minas Gerais” (1), que tem como principais objetivos: a caracterização do regime de ventos em terrenos complexos para fins de desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte; o desenvolvimento de uma turbina eólica de 10 kW de baixo custo e alta eficiência, adaptada aos regimes de vento em terrenos complexos; e o desenvolvimento de um sistema de geração, adequado para acionamento direto por turbina eólica de baixa potência, para conexão com redes elétricas de distribuição.

Propõe-se no presente apresentar os resultados parciais do projeto, trazendo as metodologias desenvolvidas, os principais avanços e resultados alcançados, bem como os desafios a serem suplantados.

2.0 - METODOLOGIA DO PROJETO DA TURBINA EÓLICA

Turbinas eólicas são equipamentos mecânicos complexos que exigem ampla gama de conhecimentos em seu projeto global, que é realizado em um processo iterativo em que estimativas preliminares são continuamente confirmadas ou modificadas em função de etapas subseqüentes. A Figura 1 apresenta a estrutura básica da metodologia aplicada.

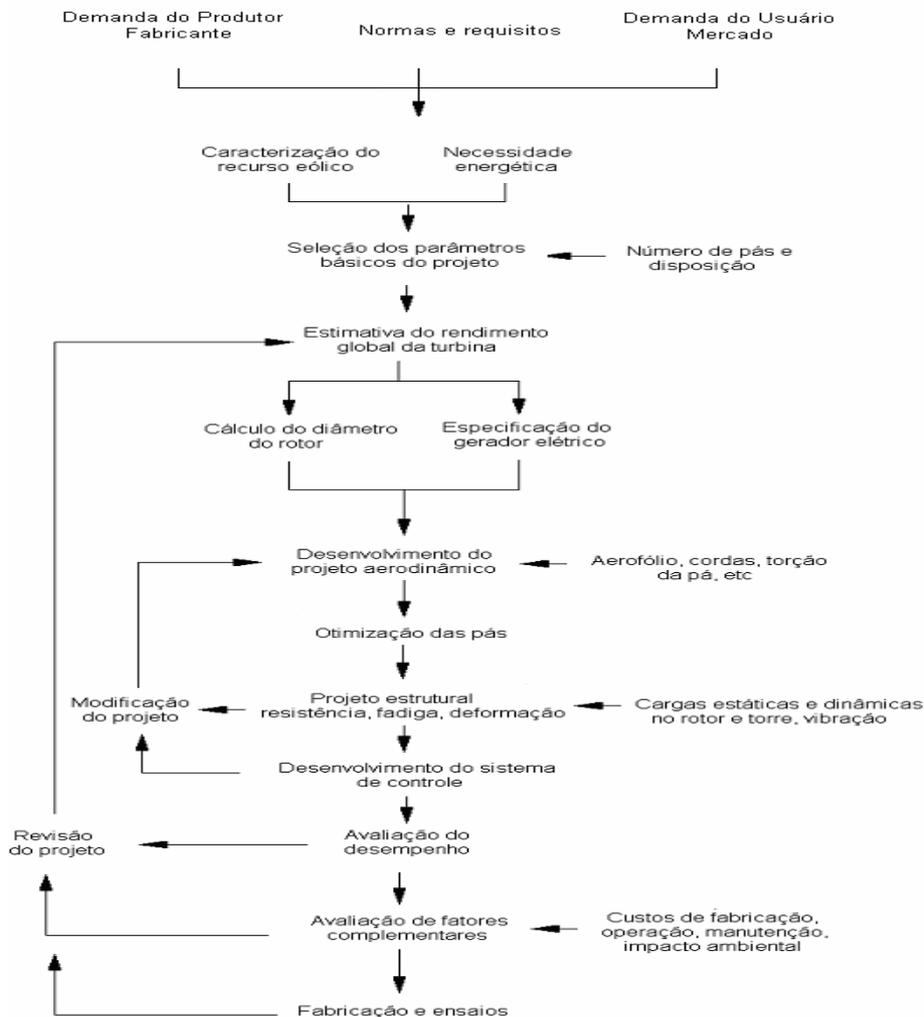


FIGURA 1 – Fluxograma da metodologia de projeto.

2.1 Especificação preliminar e filosofia de projeto

Em uma fase preliminar, define-se o desempenho almejado e o regime de ventos “alvo”, bem como se levanta o arcabouço normativo, de modo que o produto final seja passível de certificação. A International Electrotechnical Commission – IEC possui um conjunto de normas (em processo de adoção pela ABNT) referentes ao projeto, fabricação e utilização de equipamentos de geração eólico-elétrica agrupados sob a referência geral IEC 61400. Em suas diversas partes, esta norma trata de requisitos gerais de projetos de aerogeradores, turbinas de pequeno porte, técnicas de mensuração de ruído acústico, teste de desempenho de turbinas, qualidade da energia, proteção contra descargas atmosféricas, dentre outros. De fundamental importância são os critérios da IEC 61400 relativos a regime de ventos críticos e carregamentos aerodinâmicos, operacionais, gravitacionais e inerciais.

Com relação ao regime de ventos, vale ressaltar que o projeto da turbina é fortemente dependente da distribuição anual de ventos da localidade que se pretende instalar o aerogerador. Em projetos de turbinas de pequeno porte, esta realidade se mantém, mas destaca-se o fato de que não é economicamente interessante personalizar cada equipamento a uma condição específica ou até mesmo conhecer profundamente o regime de ventos dos diversos locais de instalação. Então, faz-se necessário o conhecimento das características de uma região e não propriamente de um sítio. Sacrifica-se parcialmente a eficiência local em benefício da global. No contexto desse projeto, busca-se avaliar o regime de ventos típicos das regiões propícias do Estado de Minas Gerais, caracterizadas por relevo acidentado e velocidades de vento moderadas, e que possuem semelhanças com grande parte do interior brasileiro. A seção 4 apresenta a metodologia empregada para obtenção dessas informações.

Outra característica importante a ser considerada é a turbulência, definida como a razão entre a variância da velocidade do vento e sua velocidade média. Em regiões montanhosas o regime dos ventos tende a ser mais turbulento, especialmente a baixas alturas, onde são instalados geradores de pequeno porte. A quantificação dessa característica permite melhor desempenho e maior longevidade dos sistemas projetados.

Uma vez que se objetiva o desenvolvimento de tecnologia nacional de aerogeradores de pequeno porte, que seja competitiva economicamente e adaptada às condições locais, serão utilizados materiais e componentes de fácil disponibilidade em nosso mercado, sendo também almejado simplicidade construtiva e baixos custos de fabricação, instalação e manutenção.

2.2 Projeto Conceitual e Preliminar

Entende-se por projeto conceitual um conjunto de escolhas dentre alternativas possíveis ainda que nenhum cálculo completo tenha sido feito. Há nesta etapa um balanço entre soluções inovadoras e consagradas, que depende da experiência dos projetistas e do grau de risco a ser assumido. O projeto conceitual baseia-se no conhecimento de características genéricas das alternativas, nas suas evoluções históricas e tendências, e na oportunidade de desenvolver tecnologias de ruptura. No contexto do projeto do sistema eólico fazem parte do projeto conceitual a decisão entre rotores de eixo vertical ou horizontal, do posicionamento das pás a montante ou a jusante do vento, do sistema de alinhamento do rotor com o vento, da operação a velocidade constante ou variável, da existência ou não de caixa de multiplicação, do tipo de gerador elétrico, da existência e topologia de conversores estáticos, dentre outros.

Foi selecionada para este trabalho a configuração básica com emprego de eixo horizontal, adotada por todos os fabricantes de sistemas de grande porte e pela maioria dos fabricantes de sistemas de pequeno e médio porte. Análises comparativas entre turbinas de eixo vertical e horizontal podem ser obtidas em (2) e (3). Quanto à posição do rotor em relação à torre, há uma clara tendência de opção pela configuração upwind (rotor a montante do vento), caracterizado por menor ruído, fadiga das pás e pulsação de potência. No que diz respeito ao número de pás, diversas características técnicas convergem para o uso de três elementos em sistemas de geração eólico-elétrica. Maiores detalhes podem ser obtidos em (4), (5) e (6).

Com relação ao controle de passo, este permite que a turbina trabalhe em regime de rendimento ótimo para cada faixa de velocidade, além de permitir o controle ativo de potência, facilitar a partida da máquina, reduzir o peso do rotor, dispensar o uso de fortes freios de parada de emergência, entre outros (7). No entanto, constitui-se normalmente de um sistema de regulagem ativo que onera o projeto. Para a faixa de potência nominal de 10 a 20 kW, alguns fabricantes têm optado por turbinas de variação passiva do passo através da deformação das pás sob carregamentos aerodinâmicos e inerciais, solução que está sendo buscada nesse projeto.

Uma atenção especial deve ser dada à seleção dos materiais a serem utilizados na fabricação dos componentes estruturais dos rotores eólicos, que devem, além de atender critérios de resistência, rigidez e resistência à fadiga, contemplar compromissos de custo, facilidade de fabricação e manutenção, confiabilidade e segurança operacional. A maioria das turbinas eólicas utiliza, em sua construção, plástico reforçado com fibra de vidro, plástico reforçado com fibra de carbono, aço ou madeira (8). Além de atender aos quesitos citados, o uso da

madeira se justifica pela ampla experiência da equipe do projeto na construção de perfis aerodinâmicos utilizando esse material.

No presente momento, a equipe de pesquisa concluiu todos os passos do projeto da turbina, cuja construção se inicia. O equacionamento e os modelos empregados possuem nível de complexidade que foge ao escopo desse informe e, portanto foram omitidos. As especificações básicas são apresentadas na seção 5.

3.0 - DETERMINAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO ELÉTRICA

Entende-se como sistema de geração elétrica, no contexto desse artigo, o conjunto do gerador elétrico e dos conversores estáticos que promovem a adequação da energia elétrica gerada nos terminais desse gerador com a energia demandada. A Figura 2 (9) apresenta exemplos de arquiteturas clássicas de sistemas eólicos conectados à rede, aplicação foco do projeto. A determinação do sistema adequado é função de uma série de fatores, onde se destacam as características de amortecimento, a capacidade de provimento de energia reativa, a resposta dinâmica frente a curtos-circuitos, a robustez de sua construção, as dificuldades de sincronismo com a rede, o aproveitamento energético e os custos de aquisição e operação.

Existem sistemas de conversão de energia eólica que operam a velocidade constante (ex. Figuras 2 – a, d) e sistemas que operam a velocidade variável (ex. Figuras 2 – b, c, e). Os primeiros estão em franco desuso, devido ao restrito aproveitamento energético, dentre outros inconvenientes. Ainda muito utilizada, a arquitetura da Figura 2 – f, permite uma excursão limitada a cerca de $\pm 30\%$ em torno da velocidade nominal, restringindo sua capacidade de otimização energética. A menor potência aparente dos conversores estáticos (30% a 40% da potência nominal da máquina) torna o custo desse tipo de máquina competitivo. Tal vantagem diminui ou se inverte com a redução dos níveis de potência do aerogerador, devido à redução dos custos dos elementos semicondutores, sendo esta também uma tendência para máquinas de grande porte.

Do ponto de vista construtivo, os sistemas de geração elétrica se diferenciam quanto à presença de caixa de multiplicação, presença de conversores estáticos no circuito de potência e/ou de campo, tipo e características construtivas dos geradores. Naturalmente, a escolha desses elementos é interdependente e deve atender aos quesitos já citados.

As turbinas eólicas operam em baixas rotações, da ordem de 0,25 a 2,5 rotações por segundo. Três estratégias (não necessariamente mutuamente excludentes) podem ser utilizadas de modo a compatibilizá-las com a frequência da rede: utilização de caixa de multiplicação, utilização de gerador de grande número de pólos ou conversão em baixa frequência. Historicamente, optou-se pela primeira alternativa, que embora possua eficiência relativamente menor e maior demanda de manutenção, configurava um baixo custo global para o equipamento, além de permitir que os fabricantes de aerogeradores integrassem geradores comerciais aos seus produtos sem participar do desenvolvimento dos mesmos. Nesse projeto, optou-se pela utilização da combinação do gerador de maior número de pólos com conversão em baixa frequência, acompanhando a tendência de desenvolvimento atual. Ilustrando esta tendência, a CEMIG possui, juntamente com a empresa argentina Impsa, um parque gerador de quase 100 MW formado por aerogeradores de 1,5 MW de tecnologia alemã Vensys, que fazem uso dessa estratégia. Como benefícios podem ser citados a simplificação do projeto da nacelle e a redução de paradas e custos de manutenção.

Realizada a opção por geradores de acionamento direto, foi analisada a questão sobre a escolha entre geradores síncronos a excitação elétrica ou a ímãs permanentes. Apesar de serem mais caros, os segundos eliminam as perdas da bobina de excitação e são menores, além de eliminarem anéis e escovas de contato e circuitos auxiliares, passíveis de falhas e manutenção. Ademais, o controle da excitação do gerador não se constitui uma vantagem relevante quando se utiliza conversores estáticos no circuito de potência. Para esse projeto optou-se pela adoção do ímã permanente para excitação do gerador elétrico.

Uma característica marcante das máquinas a ímãs permanentes é a grande flexibilidade dos projetos, uma vez que estes podem possuir diversos formatos e tamanhos e alocados em diferentes posições e orientações. A Figura 3 – a apresenta a mais marcante diferenciação entre os diversos projetos: a orientação do fluxo do entreferro, podendo ser este radial ou axial. A maioria dos projetos existentes usa a primeira configuração. Esta, no entanto, possui menor densidade de potência (potência por volume e por massa) que as de fluxo axial, que ainda possuem como vantagem a possibilidade de modularidade, de ajuste de entreferro, e de maior número de pólos (melhor para baixas velocidades de rotação). Em (10), são comparadas diversas topologias de máquinas de fluxo axial e radial por meio de várias figuras de mérito: relação conjugado/peso e conjugado/volume, peso dos ímãs permanentes, do material ferromagnético e do cobre, comprimento e raio externo, volume e eficiência. Não existe genericamente uma melhor configuração, sendo esta dependente, dentre outros, de aspectos construtivos, preço dos materiais e requisitos de desempenho. Para este projeto, uma topologia se destacou: máquina de fluxo axial com duplo rotor externo (Figura 3 - b). Atualmente tal máquina está sendo projetada em um processo interativo com as características das turbinas e do conversor estático. Formulações analíticas permitem o traçado

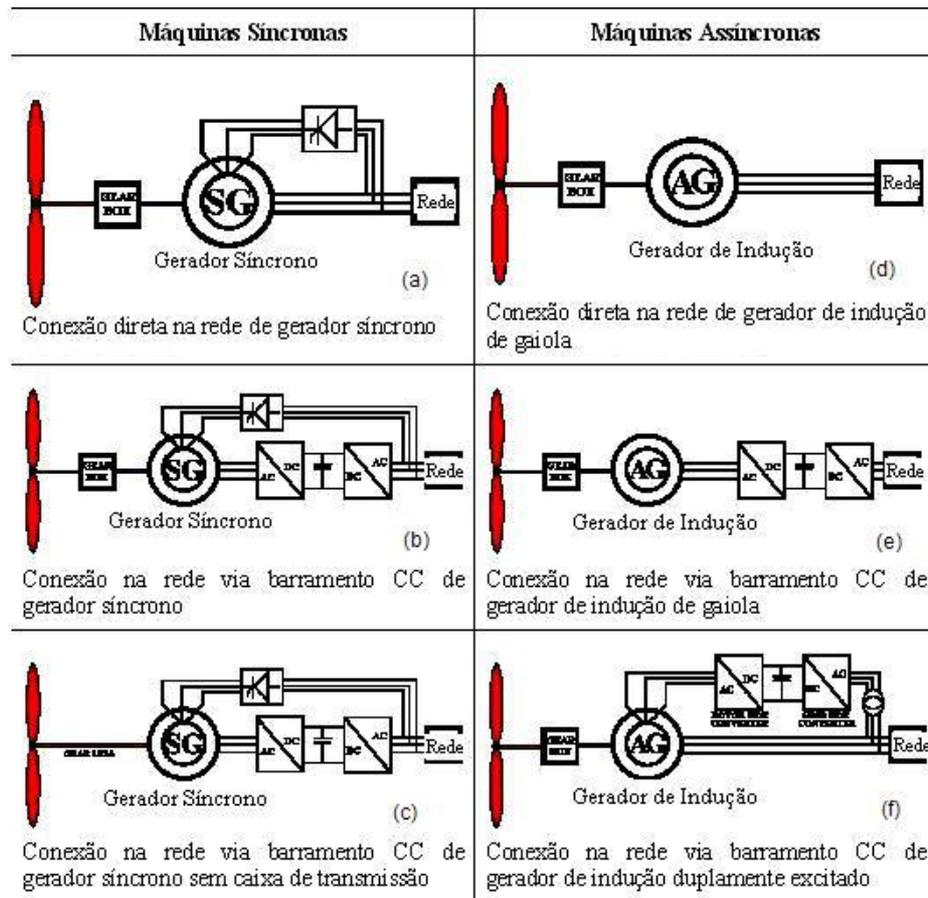


FIGURA 2 – Arquiteturas clássicas de sistemas eólicos conectados à rede

básico do equipamento, que é então modelado e otimizado via software de simulação eletromagnética ANSYS Workbench 11.0, baseado em técnicas de elementos finitos. O detalhamento desse desenvolvimento foge ao escopo desse informe.

Com relação ao material do ímã permanente, optou-se por aqueles de terras raras, especificamente o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) sinterizado, devido à sua alta densidade de fluxo remanente e força coercitiva, alto nível de energia e curva de desmagnetização linear. Tais ímãs possuem grande potencial de aprimoramento tecnológico, além de custos decrescentes o que torna esta alternativa a mais promissora em todos os desenvolvimentos de máquinas elétricas a ímãs permanentes.

Para a interface com a rede, optou-se pelo uso de um conversor estático composto por retificador e inversor trifásico chaveado a IGBTs (do inglês Insulated Gate Bipolar Transistor). Através de mecanismos de controle apropriados, esta topologia permite melhor interação do gerador com redes “fracas” (com baixa potência de curto-circuito), uma vez que permite entrega máxima de energia à rede, além de poder realizar compensações de potência reativa e minimizar distúrbios tais como flutuações de tensão, harmônicos e desequilíbrios de fase, melhorando a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores.

4.0 - CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VENTOS

Existem algumas diferenças de paradigmas entre a geração eólica de grande e pequeno porte. Os primeiros visam geração em escala para atendimento convencional ao sistema elétrico e, portanto, devem ser competitivos (mesmo que com alguma forma de incentivo ou subsídio) com outras formas de geração em escala. Regra geral, empreendimentos só são viabilizados em sítios cuja velocidade média de ventos seja elevada, acima de 7 m/s. De modo a garantir a sanidade financeira do investimento, é necessário conhecer profundamente o regime de ventos do sítio, realizado através de medições no local por pelo menos 1 ano e ainda cruzar informações com dados plurianuais de estações anemométricas próximas. As regiões propícias são preliminarmente conhecidas através de atlas de potencial eólico que, no caso do brasileiro, traz velocidades de ventos a 50 metros de altura e resolução espacial de 1 km (11).



FIGURA 3 – Orientações de fluxo (a) e máquina de fluxo axial com duplo rotor (b)

No caso do sistema de pequeno porte, pretende-se atender a demandas específicas, normalmente cargas afastadas da rede convencional ou reforços à rede em ponta de linha em sistemas rurais. O gerador eólico entra como potencial solução, assim como sistemas fotovoltaicos ou de geração a diesel, todos de alto custo, mas em alguns casos atrativos frente a reforços ou implantação de linhas. Neste contexto, viabiliza-se instalações em locais com velocidades de ventos não tão favoráveis, da ordem de 5 a 7 m/s. Por outro lado, não se pode desperdiçar tempo e recursos financeiros elevados com medições do regime de ventos em locais específicos, o que inviabilizaria a solução. As baixas alturas de instalação de geradores de pequeno porte possuem como característica um regime mais turbulento de ventos e uma variação espacial mais acentuada que em alturas elevadas, de modo que o uso direto da informação de atlas existentes não é possível.

Idealmente, para o uso de aerogeradores de pequeno porte como solução ótima, faz-se necessário o conhecimento prévio das regiões onde há regime de ventos favorável a esta solução. Isso seria conseguido através de um atlas para baixas altitudes, com resolução espacial refinada. Levantada a demanda de uma geração local, medições locais de curta duração associadas a técnicas de extrapolação temporal e espacial trariam informações sobre o melhor ponto de instalação. Esta abordagem, embora não esteja explícita no escopo do projeto, constitui um próximo passo a ser dado pela equipe, que no momento busca a solução para uma questão afim: qual o(s) regime(s) de ventos característico(s) de uma localidade propícia e típica do interior do país? Naturalmente a resposta a esta questão atende tanto à demanda para projeto das turbinas quanto sinaliza a metodologia para definição dos locais de instalação.

Está em curso a modelagem de uma região denominada Acuruí que atende à demanda relatada, e envolve territórios dos municípios de Itabirito, Ouro Preto, Rio Acima e Nova Lima, na região central do Estado de Minas Gerais. Esta região foi equipada com instrumentos de modo que os dados medidos podem ser utilizados para alimentação e/ou validação do modelo. A Figura 4 – a apresenta a representação do relevo da região, juntamente com os pontos de medição de velocidade do vento (1 a 6, L, M, H). Os pontos L, M e H são estratégicos para análise tendo, respectivamente, baixa, média e alta altura. A Figura 4 – b apresenta o perfil de rugosidade, extraído através das tonalidades de cores de fotos de satélite. Tais informações, juntamente com dados de velocidade obtida por medição em pontos específicos ou nos contornos, obtidas por atlas, permitem a obtenção do perfil da velocidade dos ventos tanto ao longo do terreno (Figuras 4 – c, d), quanto em função da altura (Figura 4 - e). Destaca-se a intensa variação espacial da velocidade do vento, bem como a complexidade do perfil de velocidades em função da altura, o que denota a importância do procedimento de simulação.

No presente, o modelo está sendo refinado, com a inclusão de alguns fenômenos físicos secundários. Caracterizado o regime de ventos dessa região, incluindo valores médios e turbulência, os parâmetros são disponibilizados para refinamento do projeto da turbina. Os detalhes sobre o modelo desenvolvido fogem ao escopo desse trabalho.

5.0 - ESPECIFICAÇÃO BÁSICA DO PROTÓTIPO

Segue a descrição básica do protótipo, com dados técnicos, ressaltando o caráter preliminar:

- Rotor eólico: eixo horizontal, upwind, com três pás em madeira, passo ajustável e controle passivo de guinada, diâmetro de 7 m, potência nominal de 10 kW, vento nominal de 10 m/s, rotação nominal de 191 rpm, perfil aerodinâmico NACA 23015, sistema de proteção do tipo passivo com desalinhamento automático da direção do vento (auto furl) para velocidade de 18 m/s, velocidade de sobrevivência de 30 m/s, altura de torre entre 12 e 18 m;

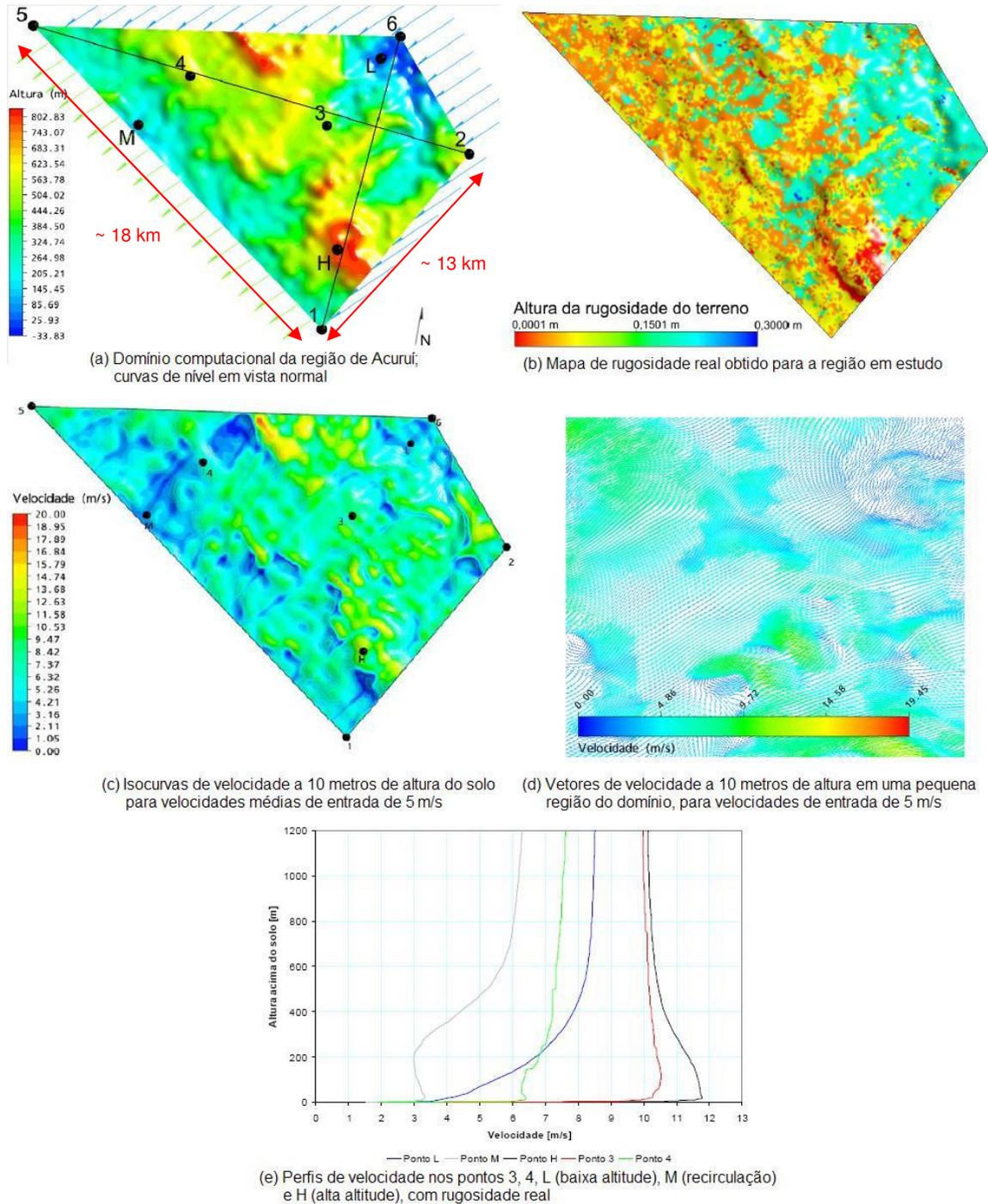


FIGURA 4 – Caracterização do regime de ventos de uma localidade

- Gerador elétrico: trifásico a ímãs permanentes de fluxo axial, com estator interno e duplo rotor externo, com ímãs de terras raras (Nd-Fe-B) grau 45H, distribuição de densidade de fluxo achatada, enrolamento concentrado, estator com 48 bobinas, frequência nominal de 25,5 Hz, 16 pólos e 92% de eficiência.

- Sistema de conversão: retificador e inversor trifásico chaveado a IGBTs de 12 kVA, com tensão de saída de 220 V / 60 Hz e tensão de entrada variável em amplitude e frequência, barramento CC a 400V.

6.0 - CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou as linhas gerais do projeto de um protótipo de um gerador eólico de pequeno porte. Destacam-se não só pelo caráter inovador, mas pelo potencial de competitividade:

- Projeto e construção de gerador de fluxo axial, que se caracteriza por maior densidade energética e consequente redução de massa e volume em relação ao gerador convencional (fluxo radial);
- Técnicas de projeto fundamentadas em modelagens analíticas que permitem maior controle de parâmetros e redução de empirismo;
- Foco em sistemas interligados à rede fraca, com possibilidade de injeção de potência ativa e reativa e capacidade de regulação de tensão;
- Conhecimento dos impactos das turbulência sobre o desempenho e longevidade dos aerogeradores, o que permitirá melhorias operacionais e construtivas.

A integração das equipes de pesquisa da UFMG com técnicos da CEMIG tem permitido um bom equilíbrio entre desafios acadêmicos, essenciais para o desenvolvimento de tecnologia de ponta, e empresariais, com foco na viabilização técnico-econômica do produto. Pretende-se, ainda em 2009, ter um protótipo totalmente funcional, construído e instalado. Este balizará o desenvolvimento de novos modelos, ainda no âmbito desse projeto de pesquisa.

O modelo de camada limite atmosférica, cujo desenvolvimento foi iniciado em 2003 (12) e que vem sendo desenvolvido em (13) e no escopo do projeto (1), viabilizará em etapa futura a geração de Atlas Eólico em baixa altura, que por sua vez permitirá, juntamente com informações de demanda de energia e o geo-referenciamento do sistema elétrico, definir os locais de maior viabilidade para implantação de tais sistemas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Lopes, B. M. e Vasconcelos, J.A., "Desenvolvimento de Centrais Eólicas Adaptadas às Condições de Vento do Estado de Minas Gerais", Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, ciclo 2005/2006, P&D-234
- (2) Doerner, H., Wind Energy Utilization: General View, Possibilities and Limitations – Visita ao CETEC, 1987.
- (3) Bergey, M., Turbines Planned for World Bank Project in Brazil – Wind Energy Weekly, Vol. 15, Nº 679, 1996.
- (4) Patel, M. R., "Wind and Solar Power Systems" - ISBN 0849316057, CRC Press, 1999.
- (5) Thresher, R. W., Dodge, D. M., Trends in Evolution of Wind Turbine Generator Configuration and Systems – USA, Wind Energy, 1998.
- (6) Cotrell, J., The Mechanical Design, Analysis and Testing of a Two Blades Wind Turbine Hub – NREL/TP-500-26645, 2002.
- (7) Hand, M. M. Balas, M. J., Systematic Controller Design Methodology for Variable-Speed Wind Turbines – NREL/TP-500-29415, 2002.
- (8) Mayer, R. M., Design of Composite Structures Against Fatigues - Applications to Wind Turbines Blades - ISBN 0852989571, Mechanical Engineering Publications Limited, Inglaterra, 1996.
- (9) Heier, S., Grid Integration of Wind Energy Conversion System - John Wiley & Sons, 1998.
- (10) Chen, Y., Pillay, P.; Khan, A.; PM Wind Generator Topologies - IEEE Transaction on Industry Applications, Volume 41, Issue 6, Nov. – Dec. 2005 Pages: 1619-1626.
- (11) Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB/CEPEL, 2001.
- (12) Do Nascimento, C.A.M., Valle, R. M., "Introdução do estudo da camada limite atmosférica em projeto de linhas aéreas", Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, ciclo 2002/2003, P&D-063
- (13) Do Nascimento, C.A.M., Valle, R. M., "Desenvolvimento e otimização de modelos de camada limite atmosférica para aplicação em projeto de linhas aéreas", Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, ciclo 2005/2006, P&D-223