PROJETO DE AEROGERADOR PARA RESIDÊNCIAS SEM ACESSO À REDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Luís Fernando de Barros Prado
lfbprado@gmail.com

Resumo. *Este trabalho visa disponibilizar o acesso à energia elétrica de residências desprovidas deste recurso através da instalação de um aerogerador de pequeno porte. O estudo busca reunir informações, avaliar custos, definir especificações e desenvolver o projeto básico de um equipamento eficiente e de baixo custo. Também será desenvolvido um plano de implementação da solução desenvolvida, abrangendo todas as ações necessárias para facilitar e concretizar a execução do projeto.*

Palavras chave. *aerogerador de pequeno porte, energia eólica, rotor aerodinâmico, rede elétrica isolada.*

1. Introdução

O modo de vida atual está baseado na utilização de energia elétrica. A geração de energia no mundo está resumida, em sua grande maioria, pelas fontes de energias tradicionais como petróleo, carvão mineral e gás natural. Tais fontes são poluentes e não-renováveis. Devido a energias limpas e renováveis como biomassa, energia eólica, energia solar e energia maremotriz e sanções como o Protocolo de Quioto, que cobra de países um nível menor de emissões de poluentes na atmosfera, as energias alternativas são um novo modelo de produção de energias econômicas e saudáveis para o meio ambiente.

Todos os meios de produção de energia dependem da disponibilidade de recursos naturais, que podem ser rios, ventos ou combustíveis fosseis. Devido a essa diversidade de meios de produção, as matrizes energéticas dos países tendem a ser cada vez mais diversificadas, aproveitando de maneira eficaz as potencialidades de cada região.

A busca por soluções ecologicamente corretas para a produção de energia e a universalização do acesso à energia elétrica, aumenta, cada vez mais, o número de centrais de geração de energia de pequeno porte. Esse é o contexto no qual o projeto desenvolvido nesse trabalho está inserido.

2. Objetivos

Esse projeto tem como objetivo principal viabilizar o acesso à energia elétrica de residências desprovidas deste recurso em determinadas regiões do país. As grandes distâncias das redes de transmissão elétrica, a falta de recursos naturais para geração de energia primaria (como presença de bacias hidrográficas e combustíveis fósseis) ou a baixa renda das famílias são os principais fatores responsáveis por impedir que algumas residências e instalações rurais utilizem energia elétrica.

Dentre as possíveis soluções, o projeto será baseado no desenvolvimento de um aerogerador, pois, com os avanços tecnológicos obtidos até o momento, a energia eólica possui uma melhor relação custo/benefício do que a energia solar, devido ao alto valor das células fotovoltaicas. Porém, um estudo de viabilidade da solução escolhida será realizado para comprovar sua eficiência frente às outras soluções possíveis para o problema proposto.

Com os parâmetros iniciais do projeto definidos, como potência elétrica nominal e tipo de aerogerador, o projeto básico com o desenvolvimento de todos os sistemas do dispositivo será realizado. O aerogerador será dividido nos seguintes subsistemas: rotor (aerodinâmica e estrutura mecânica), nacele (caixa de transmissão, mecanismos de controle e proteção), gerador elétrico, transmissão e armazenamento elétrico e torre de sustentação.

Por fim, o projeto visa propor um plano de execução da solução desenvolvida, especificando regiões com potencial para a instalação, possibilidades de financiamento, elaboração de guias de utilização para as famílias que receberem o sistema e todos os outros detalhes para tornar possível a implementação do projeto.

3. Consumo elétrico da residência

Os dois critérios fundamentais que o equipamento deve atender são: capacidade de atender uma residência com aparelhos elétricos básicos para uma boa qualidade de vida e apresentar um custo reduzido em comparação com os produtos presentes no mercado.

Os benefícios trazidos pela energia elétrica, para residências de baixa renda ou em zonas rurais isoladas, que foram julgados como de primeira necessidade foram à iluminação, a higiene e a conservação de alimentos. Assim, foram estudadas as características dos seguintes equipamentos: lâmpadas incandescentes e fluorescentes, um chuveiro elétrico, uma bomba d'água e uma geladeira pequena. Ainda serão incluídos no estudo equipamentos de entretenimento como TV e rádio.

A Tabela 1 mostra os valores de consumo de potência média de cada aparelho, uma estimativa do tempo de utilização por dia e os cálculos para determinar a potência elétrica nominal que deve ser fornecida pelo aparelho [PROCEL] e [INMETRO].

Tabela 1. Determinação da potência nominal do projeto.

	Potência elétrica (W)	Estimativa de tempo de utilização por dia (h)	Número	Consumo médio por dia (Wh)
Chuveiro elétrico	3200	1	1	3200
Bomba d'água	410	1,5	1	615
Lâmpada fluorescente	20	5	3	300
Lâmpada incandescente	60	5	3	900
Geladeira 250l	-	-	1	850
TV 20''	90	8	1	720
Rádio	10	8	1	80

O chuveiro elétrico apresenta um alto consumo de energia, e devido ao grande número de soluções corretas ecologicamente para o aquecimento da água do chuveiro aproveitando o calor proveniente de determinadas regiões da residência, como o telhado ou fogões à lenha, a sua utilização não será incluída na determinação da potência nominal de projeto.

Todos os outros demais aparelhos serão considerados: bomba elétrica, lâmpadas fluorescentes, geladeira, TV e rádio. Assim, o consumo médio total estipulado por dia é de 2.565 Wh. Posteriormente, no projeto básico, serão calculadas as potências elétrica e mecânica necessárias para suprir essa demanda de energia.

4. Escolha da solução

Os diversos tipos de aerogeradores são agrupados em dois grandes grupos: os aerogeradores de eixo vertical e os aerogeradores de eixo horizontal.

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais conhecidos e os mais utilizados por ter uma eficiência aerodinâmica maior que a dos aerogeradores de eixo vertical. São constituídos por turbinas de duas, três ou multipás.

Existem ainda duas categorias de eólicas de eixo horizontal: Frontais ("upwind"), quando o vento sopra pela parte frontal, suas pás são rígidas e o rotor é orientado segundo a direção do vento através de um dispositivo motor, e Retaguarda ("downwind"), quando o vento sopra pela retaguarda das pás.

Com as possíveis configurações que influenciam no desempenho do aerogerador expostas, as alternativas devem ser organizadas e avaliadas.

Considerando que os aerogeradores de multipás são menos adequados à geração de energia elétrica do que os demais, essa possibilidade será descartada na escolha da seleção.

O controle de direcionamento do rotor para aerogeradores pequenos por não apresentar grandes esforços na estrutura, pode ser efetuado sem problemas através de um leme de direção, que alinha o rotor com a direção do vento através da força de arrasto. Pela simplicidade e eficiência dessa solução, o controle motorizado de direcionamento do rotor não será avaliado, pois esse apresenta um maior grau de complexidade devido ao sistema de controle com sensores de velocidade e direção do vento.

Portanto, com as alternativas restantes, cinco configurações diferentes foram definidas.

Tabela 2. Soluções propostas.

	Soluções				
	A	**B**	**C**	**D**	**E**
Orientação do rotor	vertical	horizontal	horizontal	horizontal	horizontal
Posição do rotor	-	upwind	upwind	downwind	downwind
Número de pás	2	2	3	2	3
Mecanismo de direcionamento do rotor	ausente	leme	leme	leme	leme

Os critérios para a escolha da solução que será desenvolvida nesse projeto foram definidos com ênfase nas características de operação, rendimento e custo. Assim, foram definidos quatro critérios: custo, eficiência, facilidade de instalação e manutenção. Sendo que os pesos dos dois primeiros critérios foram definidos iguais e significativamente maiores do que os demais, pois caracterizam o foco do projeto. Assim, o método da matriz de decisão foi aplicado para avaliar as soluções.

Tabela 3. Matriz de decisão

		Solução				
Critério	**Peso**	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
Custo	**30%**	9	7	6	8	7
Eficiência	**30%**	6	10	9	8	7
Facilidade de instalação	**20%**	7	10	9	10	9
Manutenção	**20%**	8	9	8	9	8
	Total	**7,5**	**8,9**	**7,9**	**8,6**	**7,6**

As soluções B e D apresentaram resultados próximos e superiores às demais, isto se deve ao fato de apresentarem melhor custo e eficiência devido à utilização de um rotor de apenas duas pás. Entretanto, a maior eficiência do rotor upwind (solução B) obteve um peso maior no resultado final do que o maior custo ligado à existência do leme direcionador do rotor. Assim a solução que será desenvolvida nesse trabalho será um aerogerador de eixo horizontal, upwind, com duas pás e leme.

5. Projeto Básico

5.1. Projeto Aerodinâmico do Rotor

O aerogerador a ser desenvolvido será de eixo horizontal, upwind, com duas pás e leme direcionador. O objetivo dessa etapa do projeto é determinar a geometria do rotor visando à máxima eficiência aerodinâmica e obtenção das curvas de desempenho mecânico do equipamento, como curvas de potencia e esforços mecânicos em função da velocidade de vento e rotação.

A metodologia utilizada é baseada em teorias de escoamentos aerodinâmicos (teoria do elemento de pá) e em processos de otimização iterativos.

5.1.1. Dados nominais de projeto

O valor do consumo de energia elétrica total diária foi definido no escopo como 2565 Wh. Considerando um fator de capacidade de 30% (região com bom regime de ventos) a potência elétrica que deve ser fornecida pelo aerogerador será de 316,2 W.

Primeiramente, serão adotados os valores do rendimento do gerador elétrico como 90%, valor conservador para aerogeradores, e a massa específica do ar constante e igual a 1,225 kg/m3. Assim, temos que a potência nominal mecânica deve ser de 351 kW.

De acordo com o Atlas Eólico Brasileiro [Amarante, Brower, Zack, Sá, 2001], a maioria das regiões do país possui uma média de ventos acima de 7 m/s a 50 m de altura, porém, como os aerogeradores serão instalados em uma altura inferior, será adotada, inicialmente, uma velocidade média nominal de 6 m/s.

5.1.2. Calculo do raio do rotor

O próximo passo é determinar a TSR ou Tip-Speed Ratio (λ), que é a razão entre a velocidade linear na ponta da pá do rotor e a velocidade do vento livre incidente nas pás. Ou seja, quanto maior o TSR maior a rotação do rotor. Aerogeradores de pequeno porte trabalham com essa relação baixa, entre 7 e 8 [CRESESB], portanto maiores velocidades de rotação.

Sendo assim, serão avaliados quatro valores de TSR, 7, 7.5, 8 e 8.5, e posteriormente, avaliando os resultados obtidos, será selecionado o mais adequado ao caso.

Através da analise de aerogeradores existentes no mercado, podemos estimar também a rotação nominal do rotor. Para uma potencia de 350W foi estimada uma rotação nominal de 650 rpm.

Portanto, com a rotação e o TSR definidos, o raio pode ser facilmente determinado. Para os TSR 7, 7,5, 8 e 8,5 foram definidos os diâmetros, em metros, 2,1 , 2,25, 2,4 e 2,6, respectivamente.

5.1.3. Distribuição dos perfis aerodinâmicos das pás

As pás serão divididas em 10 elementos de mesmo comprimento de acordo com a teoria do elemento de pá. Cada elemento terá o seu perfil aerodinâmico, ângulo de torção e corda independentes.

Os perfis aerodinâmicos utilizados no projeto serão os perfis da família MH projetados para aerogeradores. Eles foram desenvolvidos por Martin Hepperle [Martin Hepperle] e estão disponíveis na internet, assim como seus coeficientes de desempenho para diferentes situações de escoamento. A família MH é composta pelos perfis MH102, MH104, MH106, MH108 e MH110. Cada perfil foi desenvolvido para atuar em uma posição da pá, quanto menor a sua numeração, mais próximo da base o perfil deve estar.

5.1.4. Cálculo do ângulo de torção das pás

O desempenho do perfil aerodinâmico depende do ângulo de ataque (α) formado entre a corda do perfil e a velocidade relativa do vento, Fig. 1. O ângulo de ataque ótimo (j) é aquele que apresenta um menor valor, em módulo, da razão entre Cd e Cl.

O ângulo de torção (β) de cada seção da pá, deve ser tal que para as condições nominais de operação (rotação e velocidade do vento) o ângulo de ataque (α) seja igual ao ângulo de ataque ótimo (j).

Portanto, os valores de β podem ser calculados com as seguintes equações [I. Paraschivoiu, 2002]:

$$\phi = \frac{2}{3}.arctg\left(V_V \Big/ \omega.r\right) \tag{5}$$

$$\beta = \phi - j \tag{6}$$

5.1.5. Cálculo da corda

Os valores de corda também variam continuamente com o raio da pá, assim, para cada seção da pá é definido um valor médio da corda de acordo com a seguinte expressão:

$$c = \frac{8.\pi.r}{N_P.C_{lp}}.(1-\cos(\phi)) \tag{7}$$

Onde C_{lp} é o Cl de projeto dos perfis que é definido pelo proprietário dos perfis. Para o caso dos perfis MH, todos possuem $C_{lp} = 1{,}3$.

5.1.6. Calculo do desempenho

Com a geometria dos rotores definidas, o desempenho dos rotores pode ser calculada através da teoria do elemento de pá. Nesse trabalho, esses cálculos serão realizados com o auxílio do programa PROP93 [McCarty, 1993]. Para uma maior fidelidade dos resultados, devem ser utilizados valores de Cl e Cd dos perfis para uma vasta gama de ângulos de ataque. Porém, o fabricante dos perfis MH, disponibiliza na internet apenas os valores mais importantes para aerogeradores. Devido a fenômenos aerodinâmicos como o stall (decréscimo da força de sustentação devido ao descolamento da camada limite da superfície), a incerteza nos valores de Cl e Cd para ângulo de ataque elevados é grande, porém, uma interpolação e extrapolação conservativas desses valores se fazem necessária para o estudo.

Com esse objetivo, foi utilizado outro programa disponível na internet, o FoilCheck [NWTC], e foi possível estimar valores de Cl e Cd Para ângulo de ataque de -60° a 60° tomando como base os valores originais e os parâmetros de projeto dos perfis, como o Cl de projeto, Cd mínimo e AR (razão de aspecto).

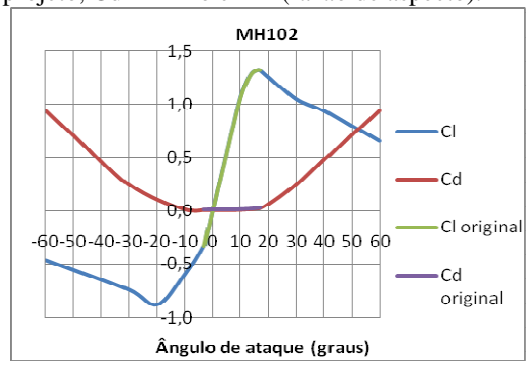

Figura 1. Gráficos de Cl e Cd (originais e extrapolados) do perfil aerodinâmico MH102.

Definidos os todos os parâmetros dos rotores, os resultados, obtidos utilizando a teoria do elemento de pá através do programa PROP93, estão representados no gráfico a seguir:

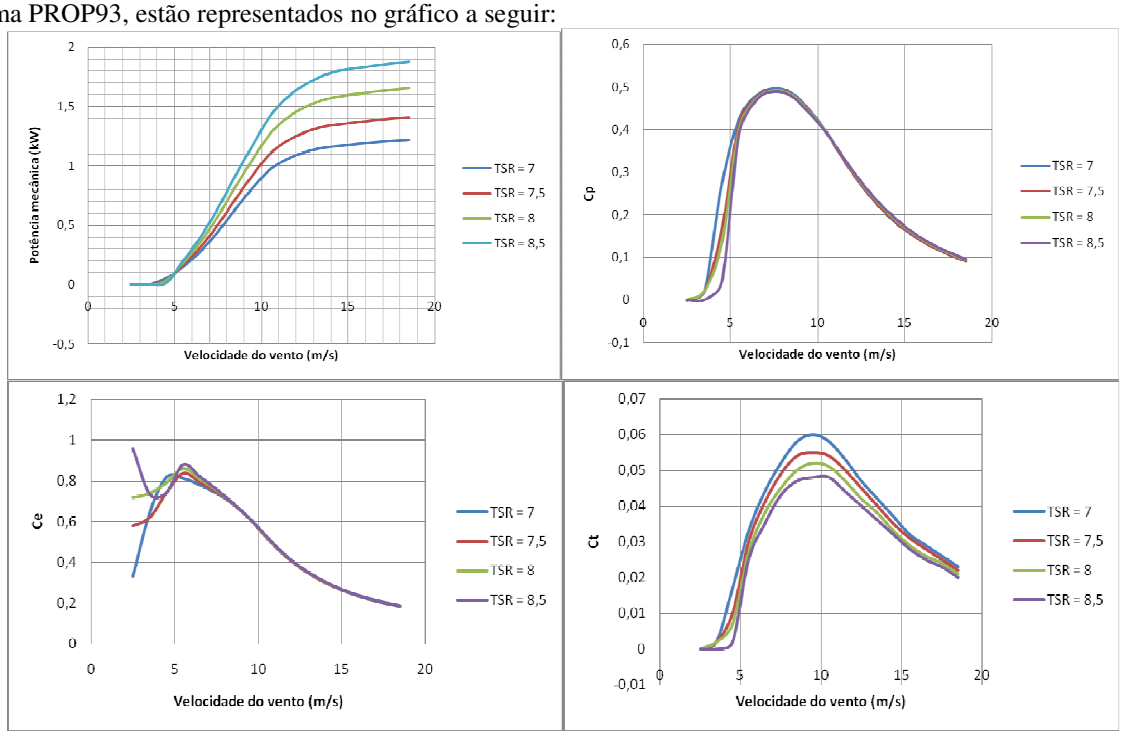

Figura 2. Curvas de Potência, Cp, Ce e Ct em função da velocidade do vento dos rotores.

Pode-se observar as curvas de Cp em função da velocidade do vento são muito semelhantes para os quatro rotores, isto deve a mesma distribuição dos perfis aerodinâmicos ao longo das pás. Assim, a diferença entre as potências mecânicas é ocasionada, quase que somente, devido à diferença entre os raios dos rotores.

A escolha da melhor configuração de rotor será baseada na curva de potencia, visando identificar a que mais se aproxima dos valores nominais desejados. É importante ressaltar que devem ser avaliadas as potencia geradas em altas e baixas velocidades, pois a potência fornecida em baixas velocidades de vento é menor quanto maior é o TSR, ao contrário do comportamento em altas velocidades.

Pelas curvas de potência mecânica em função da velocidade de vento, verifica-se a potencia nominal de 350 kW é atingida pelo rotor 2 (TSR igual a 7,5) em 6,5 m/s de velocidade de vento. Por fim, conclui-se que o rotor 3 possui a geometria que apresentou melhor desempenho para a metodologia apresentada.

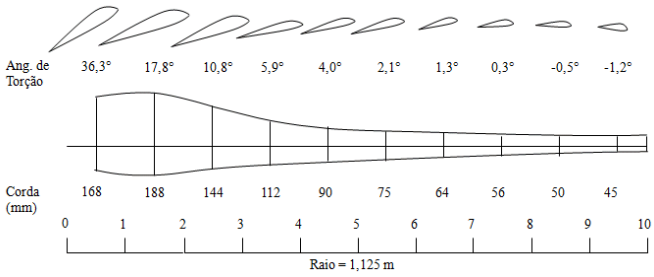

Figura 3. Geometria das pás da solução escolhida.

5.2. Seleção do Gerador

A seleção do gerador foi feita com base em alternadores de carro devido à potência ser baixa, a sua grande variedade disponível no mercado e aos seus custos compatíveis com este projeto. Assim, foi selecionado o alternador Bosch K1 - 14V-35A [BOSCH, 2008].

Outra vantagem do alternador selecionado é a presença do conjunto retificador acoplado. Também conhecido como placa de diodos, o conjunto retificador tem a função de transformar corrente e tensão alternadas em contínuas.

Do catálogo do fabricante [BOSCH, 2008] é possível definir a rotação necessária para obter a potencia nominal de projeto (351 W), que para o caso corresponde a 1800 rpm. Assim, como a rotação de projeto do aerogerador é igual a 650 rpm, faz-se necessária a utilização de uma transmissão multiplicadora de velocidade.

5.3. Projeto da transmissão

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

5.3.1. Projeto das polias e correia

Para a seleção do perfil da correia é necessário calcular a potência projetada transmitida, que é o resultado da multiplicação da potência mecânica pelo fator de serviço. Para uma transmissão multiplicadora de velocidade de baixa potencia e com operação contínua de 18 a 24 horas por dia, Fs é igual a 1,2. Assim através da rotação da polia motora ,650 rpm e da potência projetada, 350 W, é possível selecionar o perfil de correias Super HC 3V como o mais apropriado, de acordo com o gráfico 1 de [Gates, 2004].

Para esse perfil, o diâmetro mínimo de segurança é igual a 6 cm (2,4”). Portanto o diâmetro da polia movida (ligada ao gerador) será igual ao mínimo, 6 cm. Das rotações nominais de projeto, tem-se a relação de transmissão igual a 2,77, e assim o diâmetro da polia motora (ligado ao rotor aerodinâmico) deve ser igual a 16,6 cm.

O comprimento da correia é obtido através de [Gates, 2004] com base nos diâmetros das polias. O comprimento selecionado foi de 710 mm.

Em seguida é possível determinar o valor do fator de correção de acordo com [Gates, 2004]. Assim foi selecionado o valor de 0,27. Por fim a distancia entre centros pode ser calculada, obtendo o valor de 173 mm.

5.3.2. Projeto do eixo

A ilustração a seguir mostra um esquema do eixo e os esforços aos quais ele será solicitado:

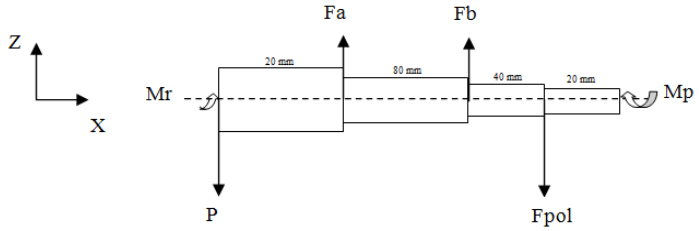

Figura 4. Esquema dos esforços no eixo.

As dimensões foram definidas levando em conta os espaços necessários para a montagem dos rolamentos e polias.

Devido à simetria do rotor aerodinâmico, apenas o momento responsável pela sua rotação e o seu empuxo, na direção axial, são transmitidos ao eixo.

Primeiramente precisamos encontrar a força que a polia exerce no eixo. Sabendo os diâmetros das polias motoras e movida e a distância entre centros podemos encontrar o ângulo de abraçamento α [Provenza, 1990]:

$$\alpha = 180^{\circ} - \frac{60 * (D_2 - D_1)}{I} \tag{8}$$

Com isso, podemos aplicar a Lei de Euler:

$$\frac{F_2}{F_1} \leq e^{\frac{\mu \cdot \alpha}{\operatorname{sen}(\beta/2)}} \tag{9}$$

A potência transmitida é dada pela diferença de forças entre o lado tracionado e o lado frouxo. A equação na polia movida fica:

$$P \cdot \eta_c = D_2 \cdot (F_2 - F_1) \cdot n_2 \tag{10}$$

Utilizando $\mu = 0{,}4$ (couro em aço fundido) e $\beta = 42^{\circ}$ (ângulo da correia V) obtêm-se os seguintes valores para as forças na polia: 26,74 N e 38,98N.

A força resultante Fp admite que as forças F1 e F2 são paralelas e na direção do eixo z, o que caracteriza uma situação conservadora, pois as componentes verticais (direção y) das forças tenderiam a se cancelar. O peso do rotor aerodinâmico foi aproximado utilizando a densidade de 1900 kg/m³ chegando ao valor conservativo de 150 N.

E os diagramas e força cortante e momento fletor:

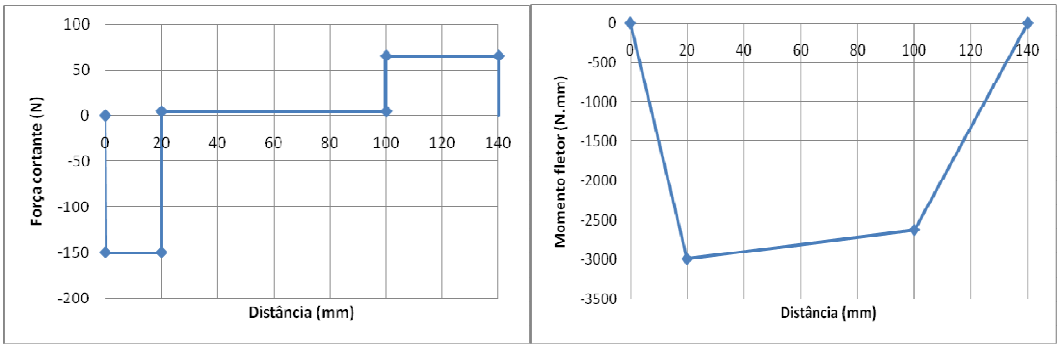

Figura 5. Gráfico da força cortante e do momento fletor ao logo do eixo.

O dimensionamento pelo critério de resistência à fadiga consiste na resolução da seguinte equação:

$$d = \left\{ \frac{16 \cdot FS}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{S_f} \cdot k_{f_M} \cdot M_a + \frac{\sqrt{3} \cdot}{S_{ut}} k_{f_T} \cdot T_m \right] \right\}^{1/3} \tag{12}$$

$$S_f = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_r (0{,}504 \cdot S_{ut}) \tag{13}$$

Supondo-se inicialmente D/d = 1,2 e r/d = 0,15, tem-se dos gráficos encontrados em [Shigley, Mischke, Budynas, 2006], kfm = 1,45 e kft = 1,25. Para eixos de aço ABNT 1060, encontra-se também Sut = 380 MPa.

Assim, os fatores podem ficam determinados por: ka = 0,72 (para superfície usinada), kb = 0,81 (fator de tamanho estimado para um diâmetro de 50 mm), kc = 0,58 (fator de carregamento em torção), kd = 1 (fator de temperatura ambiente) e kr = 0,897 (fator de confiabilidade de 90%).

Sabe-se que os pontos que devem ser analisados são aqueles em que há rebaixos, pois são os pontos onde há concentração de tensões. Analisando o gráfico de momento fletor, chega-se a conclusão que o ponto crítico é o ponto distante 20 mm do rotor aerodinâmico. Para este ponto temos momento fletor igual a 164656 N.mm.

O torque no eixo pode ser calculado utilizando a curva de Ct em função da velocidade do vento, Fig. 4, obtendo o torque máximo de 17600 N.mm. Calculando o valor de Sf, 71,2 MPa, o diâmetro mínimo calculado é igual a 14,4 mm. Portanto, o diâmetro será aproximado para 15 mm para se adequar aos rolamentos disponíveis no mercado.

5.3.3. Seleção dos rolamentos

Para selecionar os rolamentos devemos encontrar as cargas estática (C0) e dinâmica (CD) às quais os rolamentos estão expostos. A carga estática é dada pela própria força radial atuante no mancal. Como os mancais de um mesmo eixo estão sujeitos a duas cargas diferentes, considerar-se-á a maior carga. Já a carga dinâmica é calculada pela seguinte fórmula:

$$C_D = C_0 \cdot \left(\frac{L_D \cdot n_D \cdot 60}{f.L_R \cdot n_R \cdot 60} \right)^{1/a} \tag{14}$$

Onde as constantes são dadas por: a = 3 (para mancais de esfera), Lr.nr.60 = 1000000 revoluções, L = 131400 horas (vida estipulada de 15 anos) e f = 0,62 (fator de confiabilidade de 95%) [SKF].

Para o rolamento 2 (próximo a polia) deve ser levada em conta a força axial no eixo, gerado pelo empuxo no rotor aerodinâmico. Do gráfico de Ce em função da velocidade do vento, Fig. 4, verifica-se que a maior força axial que o rolamento deve ser suportar é de 160 N.

Foram selecionados os rolamentos SKF-61804 e SKF-7202, compatíveis com os esforços calculados, porém foram escolhidos tipos diferentes: um rolamento simples de esfera e um rolamento de esfera de contato angular, sendo o último o responsável por suportar o esforço axial proveniente do eixo.

No contato entre a nacele do aerogerador e a torre de sustentação deve ser posicionado um rolamento axial para permitir a rotação do aerogerador em torno do eixo da torre a sustentar o peso da estrutura e ainda um outro rolamento de guia para estabilizar a rotação do aerogerador com dois pontos de contato. O esforço sobre esse rolamento axial será apenas o peso do aerogerador que foi definido anteriormente como 200 N. Assim, foi selecionado o rolamento axial de esfera e escora simples da SKF modelo 51102. Para o rolamento guia, foi selecionado um rolamento de esferas simples com o mesmo diâmetro do rolamento axial (SKF-61802), pois esta rolamento não sofrerá ação de nenhum esforço considerável.

6. Leme direcionador

O leme direcionador é o responsável por rotacionar o aerogerador e deixá-lo sempre contra o vento. Para simplificar os cálculos do tamanho do braço do leme foi feita uma simplificação da estrutura do equipamento. Além disso, só serão consideradas as forças atuando na lateral da turbina, ou seja, o instante que o vento incide perpendicular a projeção lateral do aerogerador.

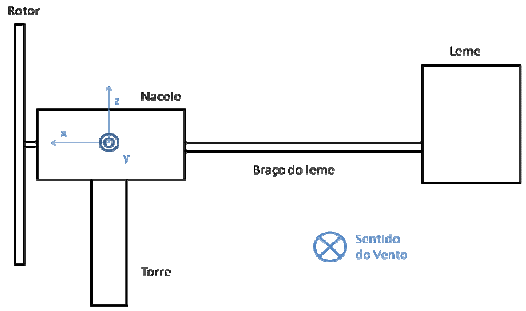

Figura 6. Estrutura simplificada do aerogerador.

De acordo com o teorema do momento angular (TMA), temos [França, 2001]:

$$\frac{d\vec{Kg}}{dt} = M_{ext} \tag{15}$$

Onde:

$$\frac{d\vec{Kg}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\vec{Kg}_{rotor} + \vec{Kg}_{nacele} + \vec{Kg}_{leme}\right) \tag{16}$$

$$M_{ext} = M_{rotor} + M_{nacele} + M_{leme} \tag{17}$$

As forças externas na estrutura são as forças de arrasto devido ao escoamento do ar que geram os momentos responsáveis por direcionara o aerogerador na direção do vento. Será admitido que a nacele esteja simetricamente posicionada no eixo de rotação e assim seu momento resultante devido à força de arrasto é nulo. A força de arrasto para o caso é definida por:

$$D = \frac{1}{2} C_d . \rho . A . V^2 \tag{18}$$

Os valores de Cd variam de acordo com o número de Reynolds do escoamento:

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \tag{19}$$

Utilizando o valor da viscosidade cinemática como $15{,}5x10^{-6}\ m^2/s$, a velocidade do vento de 6 m/s. Temos que os valores de Reynolds são, aproximadamente, 15400 para o leme e 1900 para o rotor, oi que corresponde aos coeficientes de arrasto de 1 e 0,1 respectivamente [Munson, 2005].

Assim, admitindo o leme como uma placa de 0,04 m² as forças de arrasto encontradas foram 0,93 N e 0,11 N para o leme e rotor, respectivamente.

Os momentos de inércia foram considerados para as geometrias simplificadas e valores de massas específicas aproximadas, chegando aos seguintes resultados:

$$I_{rotor,z} = 0{,}44\ kg.m^2 \tag{20}$$

$$I_{nacele,z} = 0{,}47\ kg.m^2 \tag{21}$$

$$I_{leme,z} = 0{,}008 + 0{,}34.b^2\ kg.m^2 \tag{22}$$

Considerando o valor de 10°/s² como uma aceleração angular a ser atingida para o caso avaliado, aerogerador posicionado perpendicularmente à direção do vento, foi possível obter o comprimento do braço do leme igual a 0,49 m.

7. Torre de Sustentação

Devido à simplicidade e funcionalidade da estrutura tubular suportada por cabos, foi definido esse tipo de estrutura para compor o projeto de sustentação do aerogerador. A torre será composta por um tubo metálico de aço carbono apoiada por três cabos posicionados simetricamente a dois terços da altura total. Os cabos servem como reforço estrutural, mas sua função principal é de inibidor de vibrações em toda a estrutura. A base da torre será composta por uma chapa de aço com quatro furos onde quatro chumbadores de expansão a fixarão ao solo. Toda a estrutura deve ser galvanizada para proteção contra corrosão devido à exposição ao tempo.

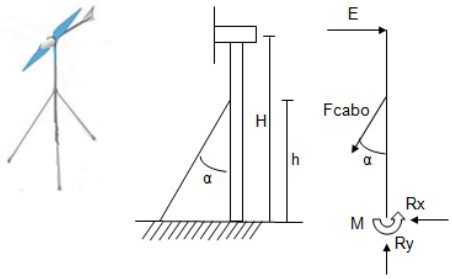

Figura 7. Esquema de instalação e diagramas de forças da torre de sustentação.

O equilíbrio de forças e momento fornece as seguintes equações:

$$E - Rx - Fcabo.sen(\alpha) = 0 \quad (23)$$

$$Ry - Fcabo.cos(\alpha) = 0 \quad (24)$$

$$E.H - M - Fcabo.sen(\alpha).h = 0 \quad (25)$$

Como existe hiperestatismo no problema calculado, outras equações são necessárias para a determinação dos esforços envolvidos. Calculando o momento do solo até a altura h, temos:

$$M(y) = -M + Rx.y \quad (26)$$

De acordo com as equações da linha elástica da tubulação, temos [Gere, 2001]:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial y^2} = \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{M(y)}{E.I} \quad (27)$$

Por fim, temos as condições de contorno:

$$x(0) = 0 \; ; \theta(0) = 0 \; ; \; x(h) = 0 \quad (28)$$

O empuxo máximo no aerogerador é 160 N. Adotando uma altura total da torre de 10 m e a fixação dos cabos de apoio a dois terços dessa altura formando um ângulo de 30° com o eixo da torre.

Assim, os diagramas de força cortante e momento fletor podem ser calculados.

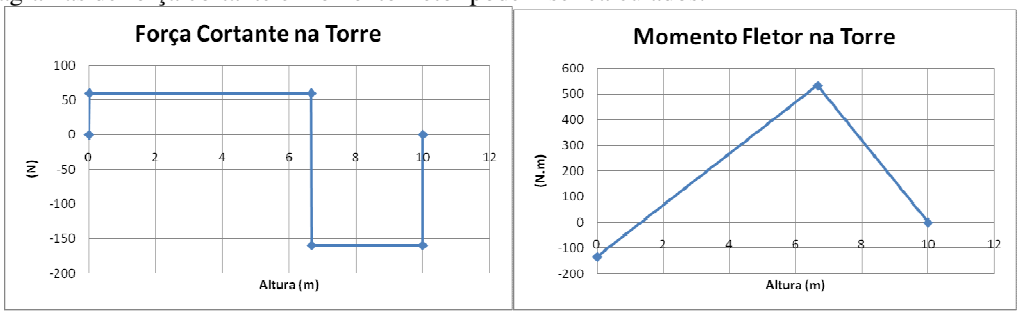

Figura 8. Gráficos da força cortante e momento fletor ao longo da torre de sustentação.

A tensão máxima na seção da tubulação pode ser calculada por:

$$\sigma_{max} = \frac{M.r}{J} \quad (29)$$

Onde,

$$J = \frac{\pi.(R^4 - r^4)}{4} \quad (30)$$

O valor da tensão de escoamento para o material do tubo, ASTM A 36, pode estar entre 170 e 275 MPa [Beer, 1995], portanto para os cálculos será utilizado o valor conservador de 170MPa.

Efetuando os cálculos para os materiais selecionados, temos a máxima tensão a qual o tubo será submetido igual a 14 MPa. O que representa um fator de segurança para a tensão de escoamento do tubo de 12, garantindo assim a confiabilidade da estrutura para o caso.

8. Integração do projeto

Nessa etapa, todos os subsistemas do aerogerador estão definidos, tornando possível sua integração e apresentação do equipamento completo. O aerogerador foi desenvolvido em maquete computacional para ajudar na definição das estruturas a serem fabricadas. A seguir estão apresentadas as imagens obtidas:

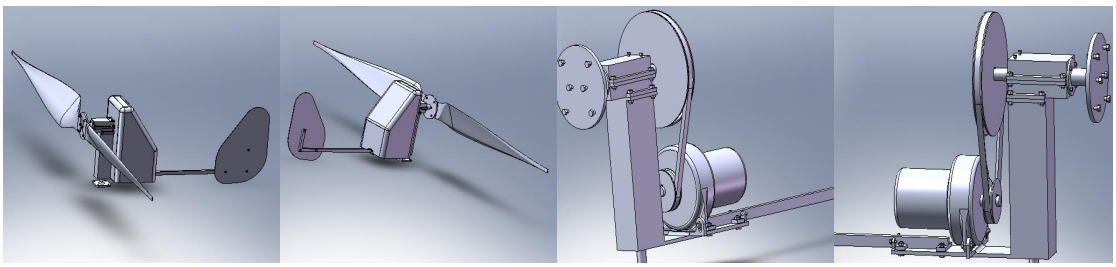

Figura 9. Maquete Computacional do Aerogerador

9. Sistema de Transmissão e Armazenamento de Energia

Os sistemas isolados de pequeno porte, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

O sistema de armazenamento escolhido para complementar o projeto é composto por um banco de baterias, um controlador de carga, um inversor e lâmpadas para consumir o acesso de energia gerada. O fator definitivo para escolha dessa configuração é a facilidade de instalação e a existência de uma extensa variedade desses equipamentos no mercado.

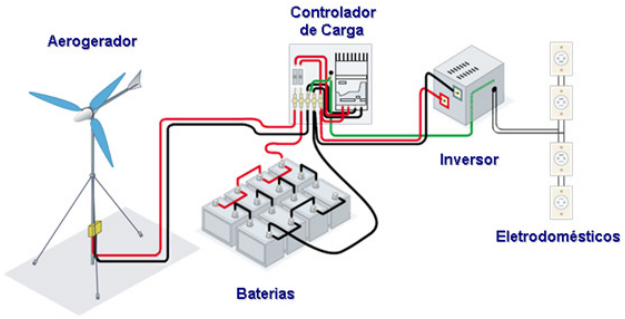

Figura 10. Sistema de armazenamento e distribuição de energia.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O controlador de carga tem como objetivos principais controlar o fornecimento de energia direto do aerogerador ou das baterias e também não deixar que haja danos ao sistema por sobrecargas ou descargas profundas do armazenamento.

Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada é necessário a utilização de um inversor.

Quando existe produção de energia acima do necessário, essa energia deve ser consumida para não danificar os equipamentos ou a produção deve parar. Para o caso dos aerogeradores, interromper o fornecimento desconectando o controlador de carga do gerador pode gerar altas correntes no gerador danificando seus revestimentos de proteção. Assim, a solução mais adequada é o descarte dessa energia excedente através de resistências ou lâmpadas.

Resumidamente, o fornecimento de energia atenderá o seguinte fluxograma:

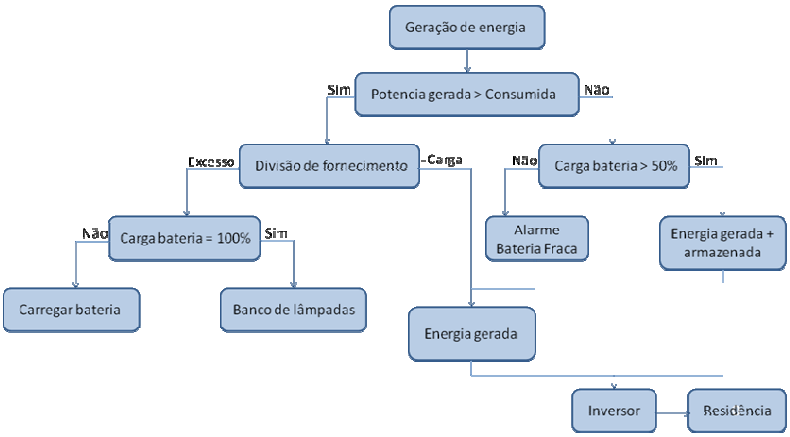

Figura 11. Fluxograma de funcionamento do sistema de distribuição e armazenamento de energia.

O inversor selecionado para o sistema é o DC/AC Genius Power de 600W com entrada a 12 V em corrente contínua e saída 127 V em corrente alternada. As baterias são comumente associadas gerando o que chamamos de banco de baterias. Essa estrutura resultante apresenta características próprias de tensão e capacidade que variam de acordo com as baterias utilizadas, bem como a maneira com que elas são conectadas.

O banco de baterias será selecionado de maneira que quando alimentando a potência máxima de 350 W, ele consiga ir da condição de completamente carregado até 50% da carga em 24 horas ou mais.

Considerando assim, uma bateria de 12 V com capacidade de 150 Ah, tem-se um total de 1800 Wh. Formando o banco de baterias com 10 unidades iguais a essa se tem que o tempo necessário para descarregar todas completamente carregadas até a metade da carga, com consumo constante de 350 W, é de 25,6 horas.

As baterias selecionadas para formar o banco de baterias são as baterias estacionárias 12TE150 da marca Tudor. Ao observar o gráfico de tensão da bateria em função da sua carga, verifica-se que a condição limitante de operação com 50 % da carga é ideal para a operação sempre com tensão maior ou igual a 12 V. [Tudor]

A função principal do controlador de carga a ser utilizado é proteger os equipamentos do sistema, principalmente o banco de baterias de possíveis sobrecargas ou esvaziamento completo. Suas funções secundárias são controlar o

fornecimento de energia da bateria e o descarte de excesso de energia gerada pelo aerogerador. Foi selecionado o controlador de Carga da Phocos modelo PL20 [Phocos].

O PL 20 oferece extensa capacidade de programação do ciclo de carga assim como ampla informação acerca de dados atuais e históricos da bateria. Existem 4 rotinas de carregamento já programadas em sua memória e com a interface PLI pode-se acessar e programar o controlador, o que possibilita adaptações para cada caso de aplicação.

Ele possui função para desvio do excesso de energia que será encaminhada para as lâmpadas de "descarte" de energia. O controlador opera como regulador série ou paralelo. O "display" indica tensão da bateria, corrente de carga, ampères-hora, corrente e estado de carga.

Quando as baterias já estão completamente carregadas e o aerogerador gera mais energia do que é consumido na casa, o excedente gerado deve ser consumido de alguma maneira. A solução a ser adotada é a utilização de lâmpadas de corrente contínua que consuma essa sobra de energia. Essas lâmpadas serão instaladas no interior das residências para que esse descarte de energia em função da preservação dos equipamentos possa auxiliar de alguma forma as pessoas da residência. Porém, as funções e funcionamento desses itens devem estar bem claros para os residentes, para que não ocorram falhas por utilização indevida.

Esse conjunto de lâmpadas deve ser capaz de consumir 70 % de toda a energia de projeto gerada, 980 W, em caso de nenhum consumo e banco de bateria completamente carregado. Assim, foram selecionadas as lâmpadas compactas fluorescentes da Phocos [Phocos], modelo CL1230C/W-2.1 de 30 W de potência. Para a condição de operação definida, devem ser utilizadas 32 unidades dessa lâmpada.

10. Referências

Amarante O.A.C., Brower M., Zack J. e Sá A.L., "Atlas do Potencial Eólico Brasileiro", Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001.

Beer, F.P.&e Johnston JR., E.R, Resistência dos Materiais, 1995, 3ª Ed., Editora Makron Books.

BOSCH, "Catálogo de Alternadores, Motores de Partida e Principais Componente", 2008/2009.

Callister W. D., "Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução", Resolução 2002, 5ª edição. Editora LTC. Brasil.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, "Energia Eólica – Princípios e Aplicações".

França, L. N. F. & Matsumura, A. Z., Mecânica Geral, 2001, 1ª Ed, Editora Edgard Blucher.

GATES, "Manual de Transmissões – Correias Industriais", 2004.

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 2001. 5 ª ed., Editora IE-Thomson.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
Disponível em <http://www.inmetro.gov.br>. Acesso em 08/12/09.

I. Paraschivoiu, "Wind Turbine Design with emphasis on Darrieus concept", Ecole Polytechnic de Montreal, 2002.

Martin Hepperle, Aerodynamics for Model Aircraft
Disponível em <http://www.mh-aerotools.de>. Acesso em 19/04/10.

McCarty, "PROP93", West Texas AeM University, 1993.

Munson, B., Fundamentos da Mecânica dos Fluidos – Volume Unico, 2005, 4ª Ed, Editora Edgard Blücher

National Wind Technology Center, "FoilCheck".

Phocos AG, Fabricante de equipamentos eletrônicos
Disponível em <http://www.phocos.com/>. Acesso em 08/09/10.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
Disponível em <http://www.procel.gov.br>. Acesso em 12/11/09.

Provenza, F. "Manual PRO-TEC", 71ª Ed. São Paulo: F. Provenza, 1990.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G. "Projeto de Engenharia Mecânica", 2005. Reimpressão 2006. 7ª ed. Artmed Editora. Brasil.

SKF, fabricante de rolamentos.
Disponível em <http://www.skf.com.br>. Acesso em 25/05/10.

Tudor – Catálogo Técnico On Line – Baterias Estacionárias
Disponível em <http://www.tudor.com.br>. Acesso em 08/09/10.

11. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

WIND TURBINE PROJECT FOR RESIDENCES WITHOUT ACCESS TO ELETRICAL NETWORK

Luís Fernando de Barros Prado
lfbprado@gmail.com

Abstract. This paper aims to provide a solution for residences without access to electricity by installing a small wind turbine. The study intends to gather information, define specifications and develop the basic design of an efficient and low cost equipment. Also, will be created an implementation plan for the solution, covering all actions necessary to facilitate and make possible the project execution.

Keywords. *small wind turbine, wind energy, aerodynamic rotor, isolated grid.*