

HELENE MALLMANN

IMPACTO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS AGROMETEOROLÓGICOS NA
PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UMA CENTRAL GERADORA EÓLICA

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Orientadora: Prof. Dr. Adriane Prisco Petry

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

IMPACTO DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS AGROMETEOROLÓGICOS NA
PRODUÇÃO DE ENERGIA DE UMA CENTRAL GERADORA EÓLICA

HELENE MALLMANN

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FRANCIS HENRIQUE RAMOS FRANÇA
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. SERGIO VIÇOSA MÖLLER
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. SÉRGIO LUIZ FREY
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2009

de modo especial a tudo de positivo que o ser humano traz ao mundo

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à mãe natureza me deixar fazer parte de seu universo repleto de vida e movimento.

aos meus pais *Pedro Raul e Maria Inês*, e à minha irmã *Lauren* que me deram o exemplo de perseverança para a concretização de sonhos.

à minha orientadora, *Prof. Adriane Petry*, que acreditou na minha proposta de trabalho e me acendeu luzes durante a minha caminhada para sua realização.

ao professor *Homero Bergamaschi*, do departamento de agrometeorologia da UFRGS que foi de grande auxílio para o correto estudo micrometeorológico de diferentes culturas agrícolas e florestais.

ao grupo eab New Energy, em especial à sua filial sediada em Porto Alegre epi Energia, pela oportunidade a mim dada de entrar em contato com o universo da energia eólica e pelo apoio e auxílio constante.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:
- eab New Energy Group GmbH, e sua filial: epi Energia, Projetos e Investimentos Ltda.

“Com novo espírito ao mestre seu mandava
Que as velas desse ao vento que assoprava.

"Dai velas (disse), dai ao largo vento,
Que o Céu nos favorece, e Deus o manda;
Que um mensageiro vi do claro Assento,
Que só em favor de nossos passos anda."
Alevanta-se nisto o movimento
Dos marinheiros, de hũa e de outra banda;
Levam, gritando, as âncoras acima,
Mostrando a ruda força que se estima.”

”Os Lusíadas”, Luís de Camões- Canto II- parte II

MALLMANN, H. **Impacto da variação de parâmetros agrometeorológicos na produção de energia de uma central geradora eólica.** 2009. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise do impacto da variação de parâmetros agrometeorológicos na produção de energia de uma fazenda eólica de uma determinada região do país.

Os diferentes parâmetros que caracterizam o terreno são levantados e caracterizam com grande fidelidade as condições funcionais para projetos desta natureza que esta área apresenta. A análise da variação dos parâmetros ao longo do tempo também é avaliada. Os dados de velocidade de vento têm como origem medições de vento realizadas durante o período de doze meses próximo à área estudada.

Através da metodologia WindPRO– ATLAS foi analisado o impacto da variação dos diferentes parâmetros que caracterizam a vegetação do terreno. Diferentes metodologias como ALWIN – *Measure* (discretizada), *Weibull e Rayleigh* e WindPRO – metodologia *Weibull e Measure* foram empregadas para efeitos de comparação com os resultados obtidos através da metodologia escolhida.

Os resultados obtidos através da metodologia WindPRO– ATLAS acusam uma relevância da variação dos parâmetros na previsão da produção de energia e, dessa forma, atentam para a necessidade da correta caracterização do terreno estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, parâmetros agrometeorológicos, rugosidade, altura de deslocamento, WindPRO, ALWIN

MALLMANN, H. **Impact of agrometeorological parameters variations in wind energy production of a wind farm.** 2009. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

This report presents an analysis of the impact of agrometeorological parameters variations in wind energy production of a wind farm located in a specific area.

The different parameters that characterize the studied area represent with fidelity the functional characteristics of projects of this nature that this area presents. Analysis of variation of parameters over time is also evaluated. The wind data source was obtained by wind measurements near the studied area during the period of twelve months.

Through the methodology WindPRO– ATLAS, the impact of agrometeorological parameters variation - as roughness and low displacement height - which characterize the vegetation of the studied land, was analyzed. Different methodologies such as ALWIN-Measure, Weibull and Rayleigh as WindPRO- Measure and Weibull were used for a comparison with the results obtained by the chosen methodology.

The results obtained through the methodology WindPRO- ATLAS show that agrometeorological parameters variations in the prediction of energy production are relevant and identify the need for accurate characterization of the studied area.

KEYWORDS: Wind energy, agrometeorological parameters, roughness, low displacement height, WindPRO, ALWIN

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 ENERGIA DOS VENTOS.....	1
2.2 PARÂMETROS DETERMINANTES DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	2
2.2.1 Comprimento de Rugosidade	2
2.2.2 Deslocamento do plano zero.....	3
2.2.3 Efeitos dos obstáculos	3
2.2.4 Esteira da turbina	4
2.3 POTÊNCIA EÓLICA	4
2.3.1 Coeficiente de potência	4
2.4 CÁLCULO ENERGÉTICO.....	5
2.4.1 Eficiência do parque	5
2.4.2 Fator de capacidade do parque	5
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	6
4. METODOLOGIA.....	6
4.1 DADOS DE VENTO	6
4.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS.....	7
4.2.1 Incertezas de cálculo.....	7
4.2.2 Parâmetros agrometeorológicos	8
4.2.3 Inserção de parâmetros	8
4.2.3.1 Rosa de rugosidades.....	8
4.2.3.2 Rosa de morros e obstáculos.....	9
4.2.4 Interferência da altura de deslocamento	9
4.3 COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS.....	10
4.3.1 Avaliação da metodologia ATLAS	10

4.3.2	Comparação de metodologias para os prognósticos de produção de energia.....	10
4.3.3	Características das diferentes metodologias	10
4.4	ESCOLHA DO MODELO DA TURBINA	11
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	11
5.1	DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE TURBINAS	11
5.2	ESCOLHA DO MODELO DA TURBINA	11
5.3	COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO	12
5.3.1	Comparativo da metodologia WindPRO - ATLAS Morro e obstáculos.....	12
5.3.2	Comparação de metodologias para o prognóstico de produção de energia.....	12
5.4	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS AGROMETEOROLÓGICOS....	13
5.5	INTERFERÊNCIA DA ALTURA DE DESLOCAMENTO.....	14
6.	CONCLUSÕES.....	15
	REFERÊNCIAS	16
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	17
	APÊNDICES	18
	ANEXOS	20

1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista que a maioria das fazendas eólicas ocupam terras utilizadas para os mais diversos tipos de culturas agrícolas e florestais, entra em discussão a questão sobre a real influência dos mesmos na caracterização da camada limite atmosférica.

Isso porque as características intrínsecas de uma vegetação como rugosidade, porosidade e altura de deslocamento interferem no escoamento do vento na região acima da altura do dossel, região de interesse para os cálculos de potencial eólico.

Para o projeto de um parque eólico e estudo de sua viabilidade econômica, o desafio é descrever o comportamento dos ventos na região baseando-se em dados de uma única torre anemométrica próxima ao local. Mesmo partindo do princípio de que os dados são confiáveis e descrevem com exatidão o regime dos ventos de um único ponto a diferentes alturas, a representação do regime dos ventos - em pontos afastados da torre - apresenta erros cumulativos. Os perfis de velocidades de vento gerados podem ser encontrados em uma faixa de incertezas de $\pm 5\%$ para terrenos não muito complexos, como no caso do programa de simulação numérica específico para eólica WindPRO. Uma vez que a energia produzida é proporcional à velocidade do vento ao cubo, os resultados de produção de energia podem apresentar erros de $\pm 15\%$.

Com o objetivo de analisar o impacto da variação de parâmetros agrometeorológicos, faz-se uso de uma metodologia sensível à variação dos mesmos dentro de um mesmo terreno analisado. Uma análise comparativa dos resultados obtidos através do emprego de diferentes metodologias para o prognóstico de energia para as condições iniciais do terreno em combinação com as incertezas envolvidas nos cálculos possibilita a avaliação da metodologia escolhida. Posteriormente uma comparação do prognóstico de produção de energia - mantidas as condições originais do terreno - com a produção de energia no mesmo parque com características do seu terreno alteradas possibilita a acusação da real relevância de todos os parâmetros envolvidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA DOS VENTOS

O vento é a principal característica da movimentação das massas de ar existentes na atmosfera e o seu surgimento está diretamente relacionado às variações das pressões do ar, que por sua vez é originada termicamente através da radiação solar e das fases de aquecimento das massas de ar.

Em torno de 1 a 2% da energia solar é convertida em energia dos ventos. Isso significa um potencial estimado em $3.5 \cdot 10^{12}$ kW e um potencial teórico de produção de energia em cerca de $3 \cdot 10^{16}$ kWh/a. As regiões onde esse tipo de conversão de energia inicia-se são nas regiões existentes na linha do Equador, onde a latitude é 0° e ocorre um maior aquecimento nas massas de ar e posteriormente é estendida para as regiões norte e sul do planeta.

A superfície da Terra exerce importante influência sobre o escoamento atmosférico na troposfera, que corresponde à camada atmosférica mais próxima do solo estendendo-se até aproximadamente 12 km acima deste. O escoamento de ar na troposfera é fortemente influenciado pelas tensões cisalhantes e forças de empuxo térmico devido à sua interação com a superfície terrestre, pela aceleração de Coriolis devido à rotação da Terra e também pelos movimentos de grande escala na atmosfera, como os ventos geostroficos e térmicos.

O perfil de velocidade vertical do vento, dada em m/s, pode ser aproximado pela Lei Logarítmica (SEMC, 2004), segundo a relação:

$$v_h = \frac{v^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (1)$$

onde v^* é a velocidade de fricção da superfície, k é a constante de Kármán (aproximadamente igual a 0,4), h é a altura de interesse e z_0 é a rugosidade da superfície.

Através da equação (1) podemos perceber que a velocidade do vento cresce à medida que nos afastamos do nível do solo. Vale lembrar que a equação leva em consideração apenas a influência da rugosidade no perfil de velocidade, negligenciando o efeito da estratificação térmica da atmosfera e, portanto, desvios significativos podem ocorrer em relação ao perfil de velocidade real da atmosfera em alturas elevadas (entre 100 e 150m)

A Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov descreve um perfil mais geral da velocidade vertical levando em consideração os efeitos da rugosidade e da estabilidade térmica (L), expressando-se matematicamente por:

$$v_h = \frac{v^*}{k} \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) - \psi \left(\frac{h}{L} \right) \right] \quad (2)$$

onde ψ é a função empírica da estratificação térmica da atmosfera (BUSINGER, 1973; DYER, 1974).

2.2 PARÂMETROS DETERMINANTES DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

2.2.1 Comprimento de Rugosidade

Só a partir dos mil metros de altura é que as características da superfície do terreno deixam de ter influência significativa sobre o vento. Na região que abrange a camada limite atmosférica, a velocidade do vento é afetada pela fricção com a superfície terrestre.

O comprimento de rugosidade é um número positivo e um parâmetro que representa a altura, em metros (m), abaixo da qual a velocidade do vento é nula.

A tabela a seguir indica os valores de classe e comprimento de rugosidade para diferentes características do terreno (EMD).

Tabela 2.1 – Classificação de classe e comprimento de rugosidade de acordo com as características do terreno

Classe	z_0 (m)	Característica do terreno
0,0	0,0002	Mares e lagos
0,5	0,0024	Terrenos com vegetação totalmente rasteira
1,0	0,03	Terreno com vegetação rasteira
1,5	0,055	Terreno com vegetação rasteira e alguns arbustos espaçados ca. 1250m
2,0	0,1	Terreno com vegetação rasteira, alguns arbustos distantes ca. 500m e pequenas construções
2,5	0,2	Terreno com pequenos vilarejos, crescimento de vegetação ou arbustos com distancia de cerca de 250m
3,0	0,4	Pequena cidade, campos com muitas e/ou árvores altas, floresta ; terreno bastante desnivelado
3,5	0,8	Grande cidade, terreno extremamente desnivelado
4,0	1,6	Capitais; terrenos extremamente montanhosos

2.2.2 Deslocamento do plano zero

No caso de existir vegetação ou construções, há a necessidade de se fazer uma correção da altura em que o vento é nulo (ROBALO, 2008). Portanto, define-se para perfis de velocidade local do vento sobre superfícies rugosas, um deslocamento do plano zero (d) que está associado ao comprimento de rugosidade, z_0 . Conceitualmente, d é uma altura acima da superfície, dada em metros (m), na qual a velocidade do vento é nula.

Para casos típicos de existência de vegetação, o perfil de velocidades do vento tem um comportamento conforme a figura abaixo:

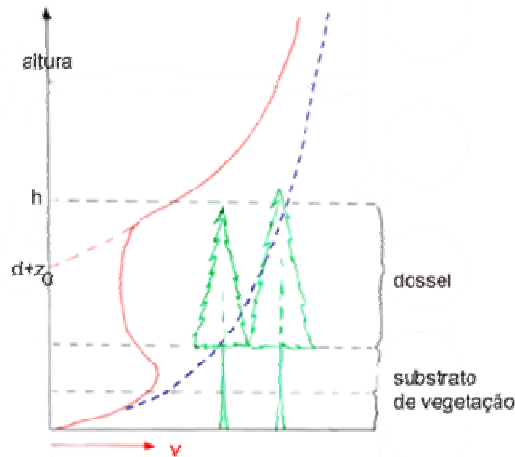


Figura 2.1 – Perfil de velocidade do vento na região de dossel (Fonte: GARDINER 2004)

Desta forma, o perfil de velocidade de vento em (m/s) acima da vegetação pode ser determinado como sendo:

$$v_h = \frac{v^*}{k} \ln \left(\frac{h-d}{z_0} \right) \quad (3)$$

Uma floresta bastante densa apresenta vantagens como um menor valor de rugosidade. Porém, apresentará uma maior altura de deslocamento para o perfil logarítmico de velocidade de vento. Uma floresta bastante esparsa apresenta alta rugosidade, porém a relação entre a altura de deslocamento e altura da vegetação é menor.

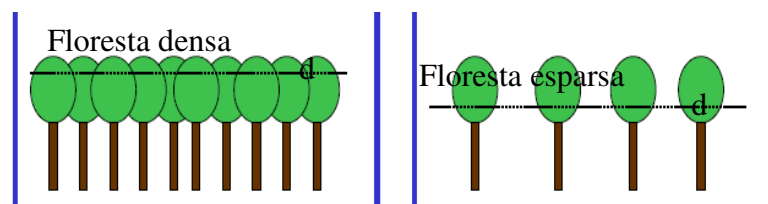


Figura 2.2 - Rugosidade e altura de deslocamento em relação à porosidade do dossel (Fonte: DELLWIK, JENSEN E LANDBERG, 2004).

2.2.3 Efeitos dos obstáculos

Os obstáculos ao vento tais como edifícios, árvores e formações rochosas, podem diminuir a velocidade do vento de forma significativa e intensificar a turbulência ao redor deles. Uma região de alta intensidade de turbulência e baixa velocidade desenvolve-se após o obstáculo, e pode propagar-se até três vezes a dimensão do objeto, sendo necessário evitar a

disposição de turbinas na esteira de grandes obstáculos, em particular na esteira formada na direção do vento dominante.

A figura 2.1 mostra uma simplificação da porcentagem de redução da velocidade do vento em função da relação altura nacele/altura do obstáculo (eixo y) e distância do obstáculo/altura do obstáculo (eixo x).

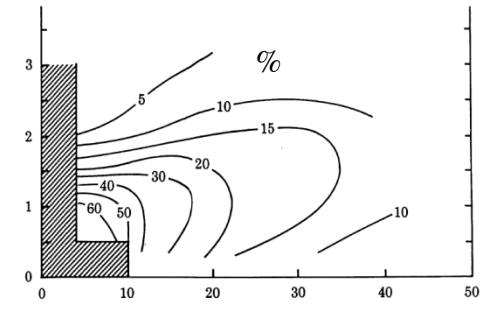


Figura 2.3 Redução da velocidade do vento através da presença de um obstáculo (Fonte: EMD)

2.2.4 Esteira da turbina

Outro aspecto a considerar é o chamado efeito de esteira da turbina. Uma vez que uma turbina eólica produz energia mecânica a partir da energia do vento incidente, o vento de saída, após passagem pelo rotor, tem um conteúdo energético muito inferior ao vento de entrada. Na região forma-se uma esteira de vento turbulento e com velocidade reduzida relativamente ao vento incidente.

2.3 POTÊNCIA EÓLICA

Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. As turbinas modernas são projetadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s.

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante. A potência disponível no vento P_{dis} (W) é proporcional ao cubo da velocidade do vento:

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), A é a seção plana transversal do rotor da turbina (m^2) e v é a velocidade do vento a altura da nacele (m/s).

A informação sobre o recurso eólico de um local independentemente das características das turbinas, pode ser apresentada em termos da densidade de potência disponível no vento (W/m^2), isto é, potência por unidade de área varrida pelas pás da turbina.

2.3.1 Coeficiente de potência

A equação (4) indica a potência disponível no vento na ausência de turbina. Esta potência não pode ser integralmente convertida em potência mecânica no veio da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula. A aplicação de conceitos da mecânica de fluidos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão eólica - mecânica: o seu valor é 59,3%, e é conhecido por Limite de Betz. O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado por:

$$C_p(u) = \frac{P_m}{P_{dis}} \quad (5)$$

onde P_m é a potência mecânica disponível no veio da turbina.

2.4 CÁLCULO ENERGÉTICO

Uma vez obtida uma representação do perfil de ventos, o valor esperado para a energia elétrica produtível anualmente (kWh/a) através da densidade de probabilidade $f(v)$ (sendo as mais utilizadas as distribuições de Weibull e Rayleigh detalhadas no ANEXO B) é, no caso geral (CASTRO, 2008):

$$E = \Delta t \int_{v_0}^{v_{máx}} f(v) P_e(v) v dv \quad (6)$$

onde Δt é o tempo de operação do parque, $P_e(v)$ é a característica elétrica do sistema de conversão de energia eólica (kW), v_0 é a velocidade de *cut-in* e $v_{máx}$ é a velocidade de *cut-out*.

Habitualmente estão disponíveis distribuições discretas, pelo que a equação (6) se transforma em:

$$E = \Delta t \sum_{v_0}^{v_{máx}} f_r(v) P_e(v) \quad (7)$$

onde $f_r(v)$ é a frequência relativa de ocorrência da velocidade média do vento para cada faixa de velocidade determinada.

2.4.1 Eficiência do parque

Como já citado anteriormente, as turbinas reduzem a velocidade do vento após a sua passagem pelas mesmas. Desta maneira conclui-se que a presença de cada turbina afetará a produção de energia das outras turbinas localizadas em sua região de esteira. A eficiência do parque é definida como a relação entre a energia total gerada no parque (com a influência das turbinas entre si) e o somatório da energia gerada por cada turbina isoladamente posicionadas no parque estudado (sem sofrer efeito esteira).

Surge, desta maneira, a necessidade de se manter uma boa distância entre os aerogeradores, principalmente na direção de maior frequência de direção de vento. Recomenda-se uma distância entre as torres de, no mínimo 5 vezes o diâmetro do rotor na direção principal de vento e 3,5 vezes na direção perpendicular (uma vez que a direção principal não é 100% dominante).

2.4.2 Fator de capacidade do parque

Uma vez calculado a energia convertida, podemos estimar a relação entre o mesmo e o máximo de energia possível de ser retirada dos aerogeradores (caso o parque tenha 100% de eficiência e opere ininterruptamente em sua potência de pico).

$$FC = \frac{E}{8760 P_{máx}} \quad (8)$$

onde $P_{máx}$ é a potência nominal.

O fator de capacidade é um dos parâmetros que permite determinar o modelo mais adequado de aerogerador de acordo com as características locais de vento. Quanto maior o seu

valor, melhor o aproveitamento de energia diante da capacidade disponibilizada por cada um e melhor custo-benefício para o investimento através da aquisição dos mesmos para a construção de um projeto.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Sabe-se que a vegetação característica de uma fazenda eólica interfere gera interferência na camada limite atmosférica. Implementado um diferente tipo de cultura nestas terras, se faz necessária a análise do impacto da sua presença na produção de energia pelas turbinas instaladas no local.

Será analisado o impacto da variação de parâmetros agrometeorológicos na produção de energia de um projeto eólico localizado na região da Lagoa dos Patos no estado do Rio Grande do Sul - conforme pode ser visto na Figura A.1 do APÊNDICE A - através da caracterização de cinco possíveis diferentes cenários de culturas:

- **Ausência de culturas** nas terras arrendadas
Característica da vegetação original: rasteira
- Presença da **cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)** no domínio das terras arrendadas.
 - ciclo: 12 meses
 - altura de corte: 2,6 m
- Presença de **cultura de soja (*Glycine max*)** não irrigada no domínio das terras arrendadas.
 - ciclo: curto de 9 quinzenas
 - altura de corte: 0,7
- Presença de **cultura de Pinus (*Pinus eliottis*)** no domínio das terras arrendadas.
 - ciclo: curto de 6 anos - para preparo de pasta de celulose
 - altura de corte: 12 m
- **Ausência de culturas** nas terras arrendadas com presença da **cultura de Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) em terras adjacentes.**
 - ciclo: 6 anos
 - altura de corte: 25 m

4. METODOLOGIA

4.1 DADOS DE VENTO

Através da Figura A.2 do APÊNDICE A, podem ser visualizados os dados de média de velocidade de vento mensais a uma altura de 50 m que têm como origem medições de vento realizadas a cada dez minutos e durante o período de doze meses – com anemômetros do fabricante Ammonit nas alturas de 30 e 50 metros – a aproximadamente cinco quilômetros da área estudada. (Figura A.1 do APÊNDICE A). O local tem características de comprimentos de rugosidade baixos por se tratar de uma região cercada de lagoa nas direções, no sentido horário, de leste a oeste-sudoeste e regiões de vegetação rasteira e arenosa nas direções, também no sentido horário, de oeste a leste-nordeste.

Para a construção dos dados estatísticos de vento, utilizou-se a ferramenta STATGEN – Interface WAsP, presente no programa WindPRO. Uma vez construído os dos estatísticos, os mesmos podem ser inseridos em outro local com características de vegetação que diferem das características de vegetação da torre anemométrica. Posteriormente são construídos novos perfis de velocidades de vento para os locais onde estão posicionados os aerogeradores do projeto.

4.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS

Para a análise de variações de parâmetros como rugosidade e altura de vegetação, utilizou-se o programa de simulação numérica WindPRO com metodologia de cálculo ATLAS – Morros e obstáculos

A metodologia WindPRO- Interface ATLAS faz uso das mesmas equações de análise numérica que a metodologia mais conhecida WindPRO- Interface WAsP. Ambas as metodologias utilizam as equações de Euler baseado na lei de conservação de massa em escoamentos não viscosos e com ausência de turbulência. Posteriormente há a construção do perfil logarítmico de velocidade baseado Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (GIEBEL, 2002). O que difere as duas é a limitação da primeira em relação à inserção de parâmetros de orografia; sendo possível somente utilizá-la em terrenos planos e com número reduzido de obstáculos, como no caso do terreno estudado. (SOLvent, 2008)

A Figura 4.1 Apresenta uma esquematização das metodologias de cálculo, desde a construção dos dados estatísticos de vento até a construção do novo perfil de velocidades de vento para cada turbina do projeto.

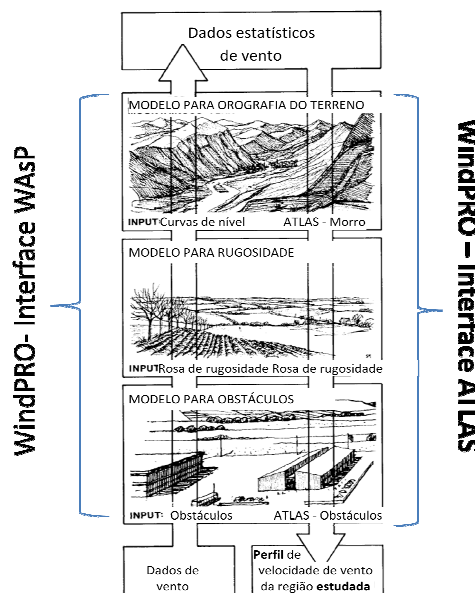


Figura 4.1 Esquematização da metodologia de cálculo desde a construção de dados estatísticos até a construção dos perfis de velocidade de vento (Fonte: EMD)

4.2.1 Incertezas de cálculo

Quando seguidas as orientações do fabricante do programa, as seguintes incertezas são indicadas pelo mesmo:

- Construção de dados estatísticos de vento (5%)
- Construção da rosa de parâmetros (5%)
- Metodologia de cálculo (5%, para terrenos não complexos)

4.2.2 Parâmetros agrometeorológicos

A metodologia escolhida, que permite a obtenção dos parâmetros de rugosidade e altura de deslocamento, baseia-se no parâmetro chamado índice de área foliar (m^2/m^2), usado para descrever a densidade da vegetação (CHOUDHURY E MONTEITH, 1988):

$$d = 1,1h \ln(1 + X^{1/4}) \quad (9)$$

$$z_o = z_{0s} + 0,3h(X)^{1/2} \text{ para } 0 \leq X \leq 0,2 \quad (10)$$

$$z_o = 0,3h \left(1 - \frac{d}{h}\right) \text{ para } 0,2 < X \leq 1,5 \quad (11)$$

onde X é a multiplicação dos parâmetros de coeficiente de arrasto ($C_{d,Cho}$) e o índice de área foliar (IAF):

$$X = C_{d,Cho} IAF \quad (12)$$

em vegetações podemos assumir o parâmetro $C_{d,Cho}$ como constante, igual a 0,2.

Este modelo leva em consideração a presença de substratos na vegetação. Yang e Friedl aproximaram o valor de $z_{0s} \approx 0,1 h_{subs}$, onde h_{subs} é a altura do substrato. Quando há existência do mesmo, o valor de z_{0s} pode ser considerado como aproximadamente 0,01 m.

A porosidade (ϕ) do dossel segue uma relação exponencial inversa da seguinte forma (RICH, 1995):

$$\phi = e^{-kLAI} \quad (13)$$

Os diferentes parâmetros que caracterizam as diferentes culturas, como altura da vegetação e índice de área foliar, são levantados e/ou calculados a partir de trabalhos específicos publicados (APÊNDICE B) e, desta forma, caracterizam com grande fidelidade as condições funcionais para projetos desta natureza que esta área apresenta. A análise da variação dos parâmetros ao longo do ciclo de crescimento também é avaliada em combinação com os dados de vento característicos de cada período.

4.2.3 Inserção de parâmetros

4.2.3.1 Rosa de rugosidades

Uma vez conhecido os parâmetros de rugosidade do terreno estudado constrói-se uma rosa de rugosidade que consiste na distribuição de diferentes comprimentos de rugosidade nos 12 setores de direção velocidade de vento Cada setor por sua vez comporta 7 variações de rugosidade à medida em que se afasta do ponto central do projeto.

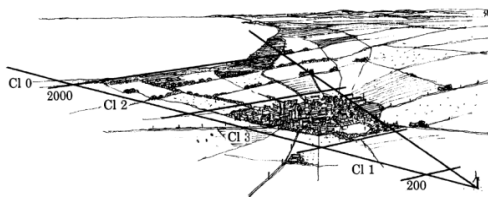


Figura 4.2 - Exemplo de mudanças de rugosidade em um setor da rosa de rugosidades (Fonte: SOLvent, 2008)

4.2.3.2 Rosa de morros e obstáculos

Para cada setor de direção de velocidade de vento, é possível parametrizar, a presença de elevação de terreno e a presença de um obstáculo. Um exemplo de caracterização de um obstáculo é mostrado na figura 4.2

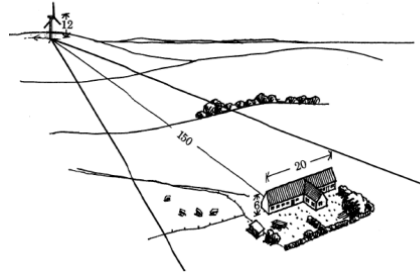


Figura 4.3 - Exemplo de obstáculo posicionado em um setor da rosa de morros e obstáculos (Fonte: SOLvent, 2008)

4.2.4 Interferência da altura de deslocamento

Diferentes metodologias podem ser empregadas para a consideração da altura de deslocamento da vegetação no parque estudado como a consideração de existência de morros de altura d , como no caso da metodologia WindPRO- Interface WAsP ou com a simples subtração da altura da nacela do aerogerador com a altura de deslocamento (HUI, 2006). Outra metodologia possível, e a utilizada no presente trabalho, parte do princípio de que, uma vez determinada a altura de interesse, podemos encontrar o ponto onde as equações (1) e (3) se encontram e, desta forma determinar uma “rugosidade equivalente” (z_o'), em metros, para a curva deslocada no eixo vertical. Desta forma é descrito um perfil de velocidades de vento de altura de deslocamento igual a zero que, apresentará o mesmo valor de velocidade de vento (à altura de interesse) que o perfil deslocado no eixo z (altura em relação ao nível do solo).

$$\left(\frac{h-d}{z_o}\right) = \left(\frac{h}{z_o'}\right) \quad (14)$$

assim:

$$z_o' = \frac{h z_o}{(h-d)} \quad (15)$$

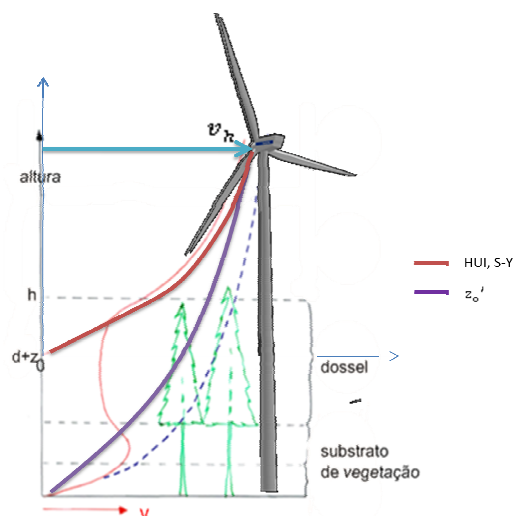


Figura 4.4 – Metodologias para a consideração da altura de deslocamento para a previsão de produção de energia

4.2.5 Esteira da turbina

O modelo empregado para a estimativa da esteira é o modelo cinemático de N.O Jensen (1996), que descreve o comportamento do perfil de velocidades na região de esteira, em m/s, como sendo:

$$v = u \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{R}{R+\alpha x} \right) \right] \quad (16)$$

onde v é o modulo do perfil de velocidades a uma distância x do rotor, u é o modulo do perfil de velocidade antes de atingir às pás, R é o raio do rotor e α é o fator de Hellmann que depende do comprimento de rugosidade:

$$\alpha = \frac{1}{3,851164 - [1,0086199 \ln(z_0)]} \quad (17)$$

4.3 COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS

4.3.1 Avaliação da metodologia ATLAS

Diferentes metodologias para a análise de produção de energia foram empregadas, como integração da densidade de probabilidade *Weibull* e o somatório da distribuição discreta dos dados de velocidade de vento (*Measure*), foram empregadas utilizando-se os programas ALWIN e WindPRO. No programa ALWIN foi utilizado também o método de integração da densidade de probabilidade *Rayleigh*. As metodologias foram comparadas com os resultados obtidos através da metodologia escolhida para análise de variação de parâmetros (WindPRO – ATLAS).

Para verificar a qualidade da metodologia ATLAS, analisou-se a produção de energia para todas as diferentes metodologias, caso uma torre fosse instalada nas mesmas coordenadas onde foi instalada a torre de medição anemométrica.

Uma vez validado o método ATLAS através da análise de produção de energia no local da torre anemométrica, novos dados estatísticos poderão ser construídos levando-se em consideração as características do terreno a ser estudado e não mais as características do local da torre anemométrica.

4.3.2 Comparação de metodologias para os prognósticos de produção de energia

As diferentes metodologias WindPRO– *Weibull* e *Measure* foram comparadas com a metodologia ATLAS para a produção de energia dentro do parque estudado levando em consideração suas características originais de vegetação.

4.3.3 Características das diferentes metodologias

A principal característica que diferencia as metodologias ALWIN e WindPRO é que a ultima setoriza os comprimentos de rugosidade de acordo com os dados de velocidades e direções de vento inseridos e, diferente do método ATLAS, com somente uma variação de comprimento de rugosidade por setor. Já a metodologia ALWIN calcula somente uma rugosidade para os 12 diferentes setores partindo dos mesmos dados. Assim, o resultado de produção de energia para o método WindPRO– *Weibull* e *Measure* dependerá do posicionamento de cada aerogerador na rosa de rugosidade gerada. Há também, na metodologia WindPRO, uma filtragem dos dados de vento discrepantes registrados pelo anemômetro.

4.4 ESCOLHA DO MODELO DA TURBINA

Como já citado anteriormente no capítulo 2, o fator de capacidade é um dos fatores de maior influência sobre a decisão do modelo de aerogerador melhor capacitado para o projeto. Desta forma será analisado o fator de capacidade para diferentes modelos de turbina disponíveis no mercado para projetos *Onshore* (aerogeradores localizados em terra), com rotores posicionados a alturas de 80 m e 100 m.

Tabela 4.1 Modelos de turbina analisados

Fabricante	Modelo	Potência MW	Diâmetro do rotor (m)
ENERCON	E-82-2.000	2,0	82
ENERCON	E-70 E4-2.000	2,0	71
GE WIND ENERGY	GE 2.5/100-2.500	2,5	100
REpower	MM 92 Evolution-2.000	2,0	92,5
Siemens	SWT-2.3-93	2,3	92,6
VESTAS	V90-1.800	1,8	90

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE TURBINAS

Apesar das terras possuírem um grande número de hectares (950 ha) – possibilitando a microlocalização de elevado número de aerogeradores - optou-se por um projeto com um número menor de aerogeradores dentro do valor máximo de 30 MW estipulado atualmente pelo governo para projetos de licitação no Brasil.

5.2 ESCOLHA DO MODELO DA TURBINA

Através do método WindPRO– ATLAS foi analisado o fator de capacidade para diferentes modelos de turbina de turbinas para as condições de vento estudadas. Os resultados para os diferentes modelos podem ser encontrados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Avaliação do fator de capacidade para diferentes modelos de turbina

Fabricante	Modelo	Potência MW	Diâmetro do rotor (m)	D/P	Altura da torre (m)	Energia anual (MWh)	Energia anual (90%) (MWh)	Vm (m/s)	Fc (%)
REpower	MM 92 Evolution-2.000	2,0	92,5	46	100	8.787,30	7.909	8	50,1
VESTAS	V90-1.800	1,8	90	50	100	7.896,80	7.107	8	50
VESTAS	V90-1.800	1,8	90	50	80	7.333,80	6.600	7,7	46,5
REpower	MM 92 Evolution-2.001	2,0	92,5	46	80	8.152,00	7.337	7,7	46,5
ENERCON	E-82-2.000	2,0	82	41	98,3	8.036	7.232	8,0	45,8
GE WIND ENERGY	GE 2.5/100-2.500	2,5	100	40	100	10.004	9.004	8	46
ENERCON	E-82-2.000	2,0	82	41	84,5	7.601	6.841	7,7	43,4
GE WIND ENERGY	GE 2.5/100-2.501	2,5	100	40	85	9.431	8.487	8	43
Siemens	SWT-2.3-93	2,3	92,6	40	90	8.566,20	7.710	7,9	42,5
Siemens	SWT-2.3-93	2,3	92,6	40	80	8.182,10	7.364	7,7	40,6
ENERCON	E-70 E4-2.000	2,0	71	36	98,2	6.726	6.053	8	38,4
ENERCON	E-70 E4-2.000	2,0	71	36	85	6.327	5.694	7,8	36,1

A partir da Tabela 5.1 podemos perceber que as turbinas que apresentam uma maior proporção entre diâmetro do rotor e potência (D/P) são as turbinas que apresentam maior fator de capacidade. Essa relação pode ser utilizada para estudos de parques com vento de classe baixa, quando o parque opera na maior parte com velocidades de vento abaixo da velocidade de pico. Nestas condições, o diâmetro do rotor tem uma influência diretamente proporcional sobre a energia aproveitada quando comparada com a influência durante o funcionamento a velocidades acima da potência nominal.

Desta forma, optou-se por dois modelos que apresentam melhor relação entre diâmetro do rotor e potência nominal:

Tabela 5.2 Modelos de aerogeradores selecionados

Modelo	Variantes de altura do rotor (m)	Numero de turbinas	Potência do parque (MW)
Repower MM 92 Evolution-2.000	80 e 100	15	30
Vestas V90-1.800	80 e 100	15	27

5.3 COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO

5.3.1 Comparativo da metodologia WindPRO - ATLAS Morro e obstáculos

Analisada a produção de energia para diferentes metodologias caso uma torre fosse instalada nas mesmas coordenadas onde foi instalada a torre de medição anemométrica, realizou-se um comparativo com a metodologia WindPRO – ATLAS.

A tabela a seguir apresenta a diferença de produção de energia em relação ao prognóstico de produção de energia obtido através da metodologia escolhida.

Tabela 5.3 – Comparativos de produção de energia de diferentes metodologias em relação a metodologia escolhida.

Metologia	80 m				100m			
	V90		REpower M92		V90		REpower M92	
	ALWIN	WindPRO	ALWIN	WindPRO	ALWIN	WindPRO	ALWIN	WindPRO
Measure	-5,7%	0,5%	-1,1%	0,5%	-6,2%	0,5%	-2,1%	0,5%
Weibull	-6,5%	2,9%	-2,1%	3,0%	-7,1%	3,9%	-3,0%	4,0%
Rayleigh	-8,8%		-5,1%		-9,6%		-6,5%	

A verificação de as maiores diferenças de produção de energia entre os métodos analisados é plausível uma vez que, à medida em que nos afastamos dos dois pontos de referência da torre anemométrica (50m e 30m), nos afastamos dos pontos comuns de velocidades de vento utilizado pelas diferentes metodologias para a construção do perfil de velocidade de vento.

5.3.2 Comparação de metodologias para o prognóstico de produção de energia

Na tabela a seguir é apresentado a comparação das diferentes metodologias WindPRO- *Measure* e *Weibull* em relação à metodologia WindPRO - ATLAS para a produção de energia no terreno estudado.

Tabela 5.4 Comparativo em percentual de produção de energia para as metodologias WindPRO- *Measure* e *Weibull* em relação à metodologia WindPRO- ATLAS

Metologia	80 m		100m	
	V90	Repower M92	V90	REpower M92
WindPRO -Measure	6,5%	6,5%	3,2%	3,2%
WindPRO -Weibull	8,9%	9,0%	6,5%	6,6%

A Tabela 5.4 apresenta uma superestimação da produção de energia para as metodologias mais simplificadas em relação à metodologia escolhida, que aumenta consideravelmente à medida que a altura de nacela do aerogerador em relação ao nível do solo diminui. O resultado é plausível, uma vez que os cálculos da produção de energia se baseiam

nos dados de rugosidade no local da instalação da torre anemométrica, os quais são consideravelmente inferiores aos do terreno estudado.

5.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS AGROMETEOROLÓGICOS

A figura a seguir mostra a perda em porcentagem de produção de energia com a implementação das diferentes culturas em relação à manutenção das características originais do terreno. São apresentados, também os resultados através das diferentes metodologias de análise (parametrização ao longo do ciclo de crescimento mensal/anual e média da variação dos parâmetros ao longo de todo o ciclo).

Tabela 5.5 – Perda em porcentagem de produção de energia com a implementação de culturas

		Modelo e altura de nacele			
		80 m		100 m	
Cenário	Metodologia	V90	REpower M92	V90	REpower M92
Soja	Parametrização anual	-5,6%	-5,7%	-5,0%	-5,0%
	Parametrização mensal	-5,8%	-6,2%	-4,8%	-5,0%
Cana-de-açúcar	Parametrização anual	-6,4%	-6,5%	-5,3%	-5,3%
	Parametrização mensal	-6,7%	-6,9%	-5,1%	-5,1%
Pinus	Parametrização anual	-12,2%	-12,4%	-7,7%	-7,8%
	Parametrização mensal	-14,1%	-14,1%	-8,9%	-9,0%
Eucalipto	Parametrização anual	-1,6%	-1,6%	-0,9%	-0,9%
	Parametrização mensal	-1,7%	-1,7%	-1,1%	-1,1%

A tabela a seguir apresenta o resultado dos fatores de capacidade do parque estudado para os diferentes cenários estudados através das duas metodologias adotadas.

Tabela 5.6 – Fator de capacidade do parque para os diferentes cenários analisados

		Modelo e altura de nacele			
		80 m		100 m	
Cenário	Metodologia	V90	REpower M92	V90	REpower M92
Vegetação original	Parametrização anual	40,0%	39,9%	43,3%	43,3%
Soja	Parametrização anual	37,7%	37,7%	41,1%	41,1%
	Parametrização mensal	37,7%	37,5%	41,2%	41,1%
Cana-de-açúcar	Parametrização anual	37,4%	37,3%	41,0%	41,0%
	Parametrização mensal	37,3%	37,2%	41,0%	41,1%
Pinus	Parametrização 6 meses	35,1%	35,0%	39,9%	39,9%
	Parametrização anual	34,4%	34,3%	39,4%	39,4%
Eucalipto	Parametrização 6 meses	39,3%	39,3%	42,9%	42,9%
	Parametrização anual	39,3%	39,3%	42,8%	42,8%

Através da análise dos resultados podemos perceber que a metodologia de parametrização da rosa de rugosidades por períodos ao longo do ciclo de crescimento apresenta, na maioria dos casos, resultados de queda maior na produção de energia com exceção da cultura de cana-de-açúcar e soja a uma altura de 100 m. Para a cultura de pinus esta diferença é considerável (até cerca de 2% de perda de produção de energia e 0,7% no fator de capacidade).

Uma sugestão para o uso simplificado da metodologia mais simples seria desenvolver uma média ponderada para a variação dos parâmetros através de uma relação inversa e exata entre produção de energia e rugosidade. Isto para aproximar os resultados da metodologia mais simples aos resultados metodologia mais precisa.

Ao analisar os resultados nota-se, para todos os casos, uma influência considerável em relação à variação dos parâmetros de vegetação de cultivos realizado dentro das terras arrendadas, com influências na produção de energia que variam, dependendo da altura do aerogerador, de 5% a 6% com a presença de cultura de soja até uma variação de aproximadamente 9% a 14% para a presença da cultura de pinus. A redução do fator de capacidade varia de a 2,2% a 5,6%, dependendo do tipo de cultivo.

Para o caso da cultura de eucalipto em áreas adjacentes, mesmo posicionada na região de maior frequência de formação de esteira sobre os aerogeradores, a sua presença apresenta pouca influência na produção final de energia (cerca de 2% para uma nacela posicionada a 80 m de altura e cerca de 1% para uma posicionada a uma altura de 100 m) quando comparado com o impacto da presença de culturas dentro das terras estudadas. A redução do fator de capacidade para esta caso é de somente 0,5%.

Como o esperado e verificado nas figuras, ocorre uma diminuição da influência dos parâmetros de vegetação à medida em que a altura da nacela dos aerogeradores é aumentada.

5.5 INTERFERÊNCIA DA ALTURA DE DESLOCAMENTO

Para as culturas de soja e cana-de-açúcar, não houve diferenças consideráveis de velocidade de vento para as alturas de 80 e 100 m quando comparados os resultados das equações 3 e 5. Desta forma exclui-se a necessidade de considerar a altura de deslocamento como parâmetro inserido pra o cálculo de produção de energia nestes dois cenários. Já para a cultura de *Pinus eliottis*, a altura de deslocamento do perfil logarítmico interfere no resultado de velocidades de vento às alturas estudadas neste projeto.

Através da Tabela 5.7 podemos analisar a real significância sobre a consideração do deslocamento do plano zero para o cálculo de produção de energia para turbinas com uma altura de 80 m de nacela.

Tabela 5.7 Perda em produção de energia de uma fazenda eólica através da presença da cultura de *Pinus eliottis*

Cenário	Metodologia	80 m	
		V90	REpower M92
Pinus	Parametrização anual sem rugosidade equivalente	-13,1%	-13,3%
	Parametrização anual com rugosidade equivalente	-14,1%	-14,1%

Uma vez que é inserido na rosa de rugosidade o valor equivalente à sua classe, e que este parâmetro tem sensibilidade a variações de somente uma casa depois da vírgula, nota-se nos cálculos de rugosidade equivalente dependente da altura de deslocamento que o método é pouco sensível às suas variações. O método mais sensível, como o método de deslocamento da altura de nacela do aerogerador poderia apresentar resultados distintos e uma comparação entre as metodologias tornaria-se interessante para trabalhos futuros.

6. CONCLUSÕES

A metodologia ATLAS mostrou-se como uma metodologia válida e confiável para análise do impacto da variação de parâmetros quando comparada com o cálculo de produção de energia discretizado (*Measure*) no local da instalação da torre anemométrica; sendo que este último descreve com menor erro possível o regime de ventos na altura da nacela quando uma turbina é posicionada no mesmo local de medições de vento.

As metodologias WindPRO – *Measure e Weibull* apresentam resultados muito distintos da metodologia WindPRO - ATLAS, quando utilizadas para a análise de produção de energia dentro das terras do projeto. Portanto, não são recomendadas para estudo de produção de energia em terrenos com características que diferem das características de vegetação do local de instalação da torre anemométrica.

Os cenários que apontam a necessidade correção do perfil logarítmico de velocidade de vento através da consideração da altura de deslocamento são os cenários que representam a presença de cultura de pinus.

A análise de produção de energia para os cenários caracterizados pela presença de cana-de-açúcar, soja e eucalipto através do método de parametrização da rosa de rugosidades com a variação das características da vegetação ao longo do ciclo de crescimento, se torna relevante quando analisado a produção de energia dentro de cada período determinado. Porém a metodologia se torna irrelevante quando analisado o total de energia gerado ao longo de todo o período. O método mais simplificado de análise de produção de energia através da média dos parâmetros obtidos ao longo do ciclo de crescimento se torna suficiente para a última análise.

Já para o caso de estudo de produção de energia através da presença de vegetações altas dentro das terras estudadas, como no caso da presença do pinus, o resultado é outro: a metodologia de análise produção através da parametrização da rosa de rugosidades com as características anuais da vegetação apresenta resultado consideravelmente distinto da metodologia mais simplificada.

Os resultados obtidos através da metodologia WindPRO – ATLAS demonstram uma relevância da variação dos parâmetros na previsão da produção de energia e, dessa forma, atentam para a necessidade da correta caracterização do terreno estudado.

REFERÊNCIAS

- CASTRO, RUI M.G. **Introdução à Energia Eólica**. Universidade Técnica de Lisboa, 2008. 88p.
- CHOUDHURY, B.J; MONTEITH, J.L. **A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.1988. 114:373–398.
- DELLWIK E, JENSEN NO, LANDBERG L. **Wind and Forests – General Recommendations for Using WASP**. BWEA Tree Worksho. Risø National Laboratory. 2004
- ENERGI –OG MILJODATA (EMD). **WindPRO Kapitel 1 – Kurzbeschreibungen**.
- FOELKEL, C. **Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores**. Eucalyptus Online Book & Newsletter. 2005. 133p
- GARDINER B. **Airflow Over Forests and Forest Gaps**. BWEA Tree Workshop Forestry Commission. March 2004.
- GIEBEL,G. **Description of NWP, Mesoscale and CFD models**. Risø National Laboratory.2002. 51p
- PETRY, A.P.; MATTUELA, J.L. **Análise do Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia empregando o “Software” Livre Alwin**. Porto Alegre, 2007.
- RICH, P.M., J. CHEN, S.J. SULATYCKI, R. VASHISHT, AND W.S. WACHSPRESS. **Calculation of leaf area index and other canopy indices from gap fraction: a manual for the LAI-CALC software**. Kansas Applied Remote Sensing Program Open File Report. 1995.
- RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004.212p. – (INPE-12271-TDI/983).
- ROBALLO, S; FISCH, G. **Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): parte I - aspectos observacionais**. Rev. bras. meteorol. [online]. 2008, vol.23, n.4
- SCHMIDT, B e D. **Grundkurs Windenergie**. 2001. 69 p.
- SCHULTZ. H. R. **Modelling water use and carbon assimilation vineyards with different canopy structures and varietal strategies during water deficit**. PS2001, 2004
- SEMC. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. 2002
- SOLvent - PLANUSGSBÜRO FÜR REGENERATIVE ENERGIE TECHNIK. **Gutachten und Ertragsprognose**. 2008. 40 p

TOLEDO FILHO, M.R. **Estudo Micrometeorológico de cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**. Tese de doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 150 p.

TONINI, H. **Crescimento em altura de *pinus elliottii* engelm., em três unidades de mapeamento de solo, nas regiões da serra do sudeste e litoral, no estado do Rio Grande do sul**. Santa Maria, 2000. 113p

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. **Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil**. Rev. Árvore [online]. 2003, vol.27, n.2, pp. 159-170.

INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Terceira edição brasileira em língua portuguesa. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003. 120 p.

KAIMAL, J.C., FINNIGAN J.J. **Atmospheric Boundary Layer Flows**. Oxford University Press, New York, Oxford, 1994. 280p.

LANG, A.R.G; MCMURTRIE, R.E. **Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from transmittances of the sun's beam**. Agricultural and Forest Meteorology, 58:79-92, 1992.

LYRA, G.B. ; PEREIRA, A. R. **Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida**. Revista Brasileira de Geofísica (2007) 25(2): 187-197.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados gerais do projeto

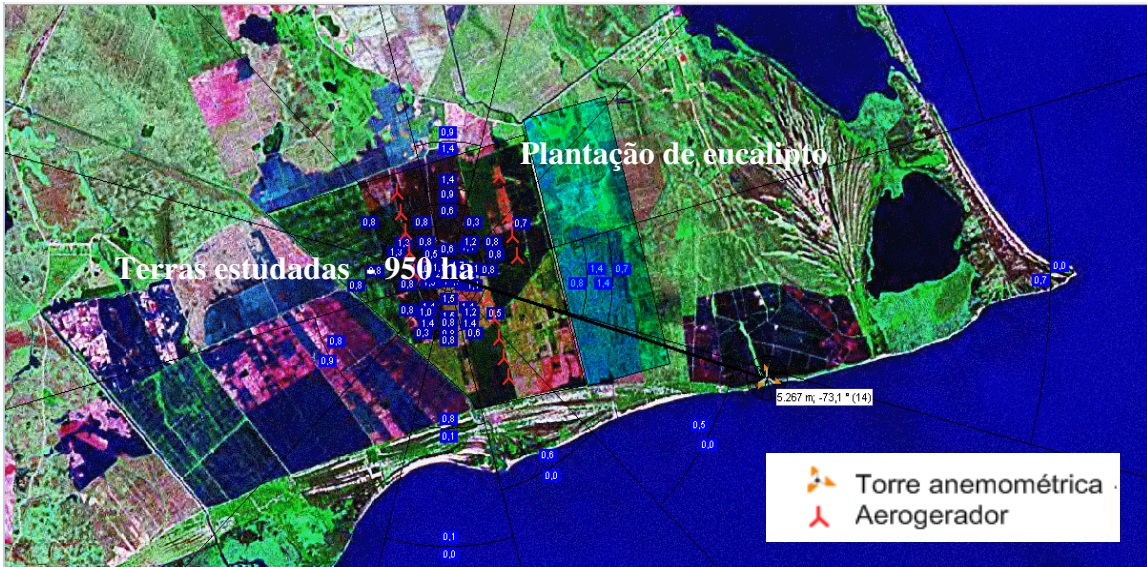


Figura A.1 - Visualização do projeto e área estudada

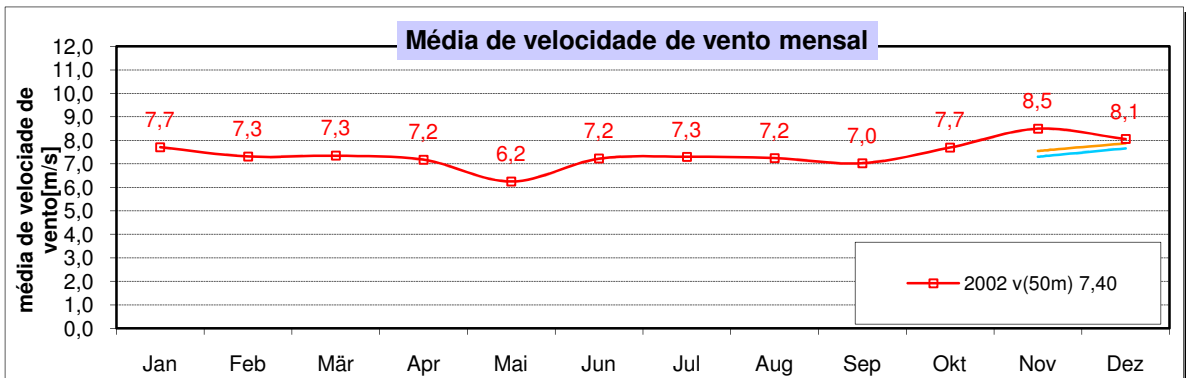


Figura A.2 Média de velocidade de vento mensal

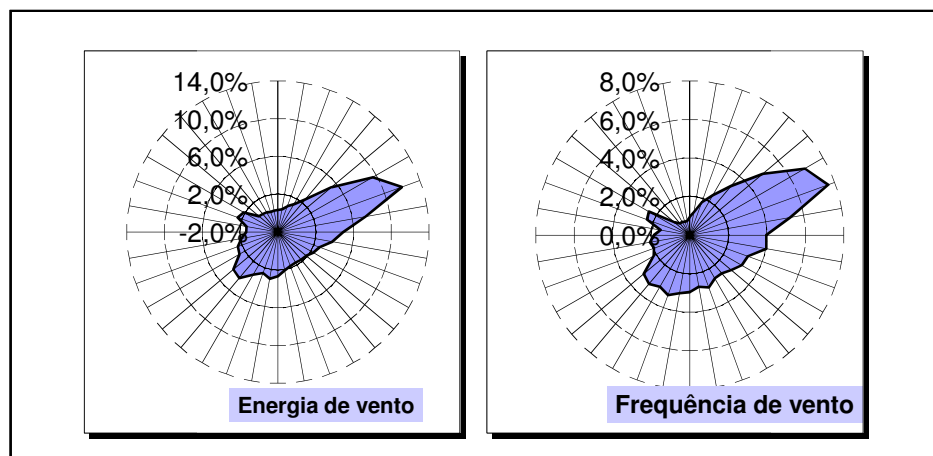


Figura A.3 Distribuição da frequência de energia de vento (W/m^2) e velocidade de vento (m/s) por direção

APÊNDICE B – Parâmetros agrometeorológicos

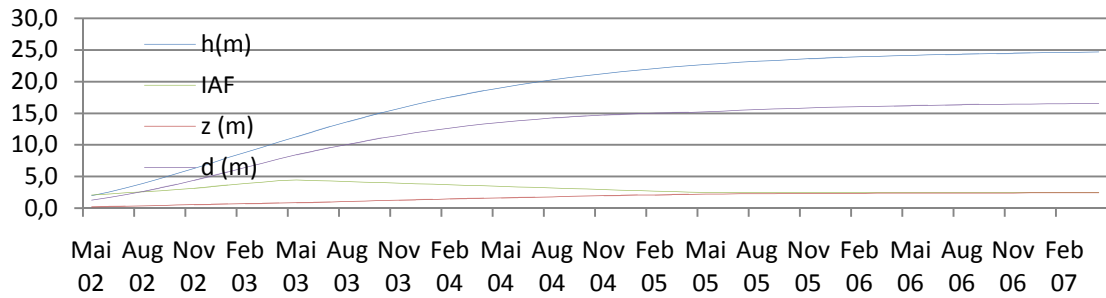


Figura B.1 – Variação de parâmetros agrometeorológicos ao longo do ciclo de crescimento da cultura de *Pinus eliottis* (h e IAF - Fonte: Embrapa e Tonini, 2000)

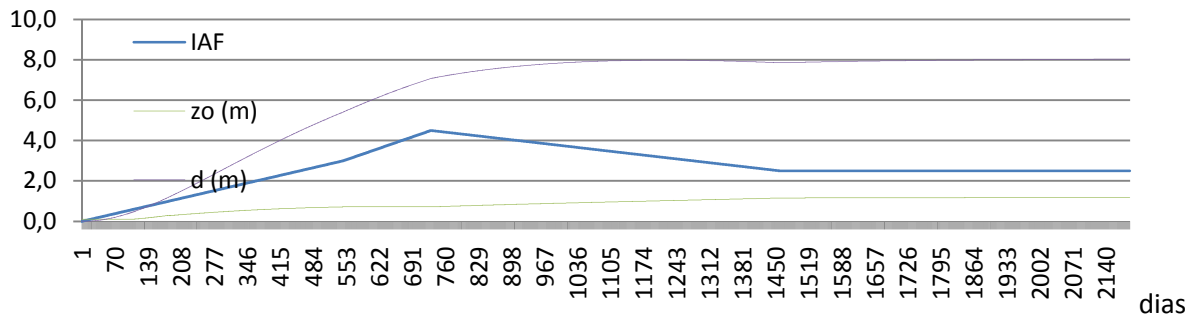


Figura B.2 – Variação de parâmetros agrometeorológicos ao longo do ciclo de crescimento da cultura de *Eucaliptus grandis* (h e IAF- Fonte: Embrapa e Foelkel,2005)

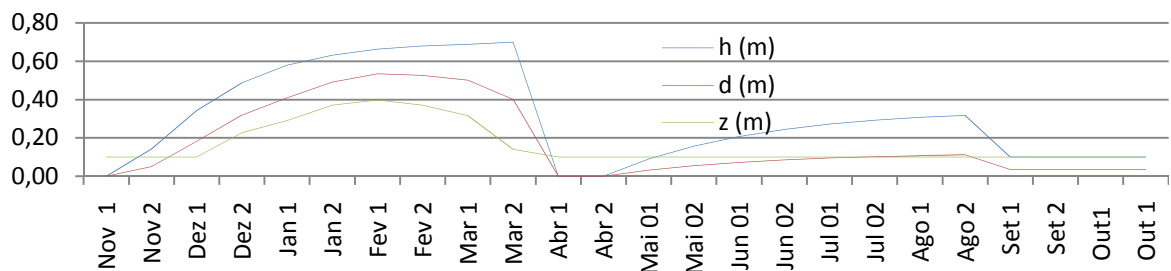


Figura B.3 – Variação de parâmetros agrometeorológicos ao longo do ciclo de crescimento da cultura de *Glycine Max* (h e IAF- Fonte: Rizzi,2004)

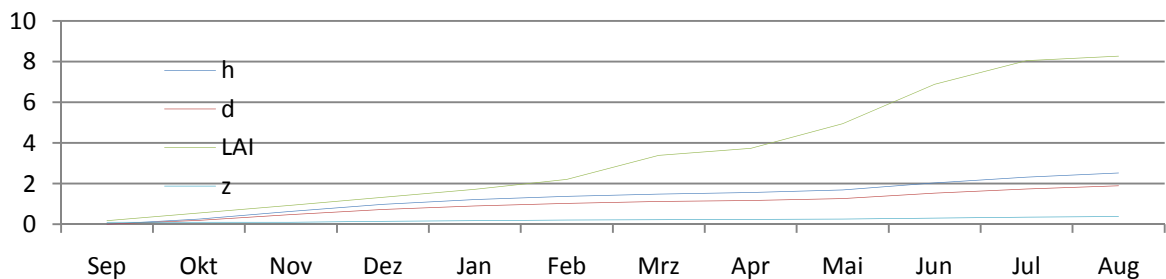


Figura B.4 – Variação de parâmetros agrometeorológicos ao longo do ciclo de crescimento da cultura de *Saccharum officinarum* (z₀ e d- Fonte: Toledo Filho,2001)

ANEXOS

ANEXO A - Registros de densidade de probabilidade

A.1 Distribuição de Weibull

Os registros da densidade de probabilidade ganham importância se puderem ser descritos por expressões analíticas. Têm sido sugeridas várias distribuições probabilísticas para descrever o regime de ventos, que tem como base a velocidade média dos ventos, mas a distribuição de *Weibull* é normalmente considerada como a mais adequada. A expressão matemática da função densidade de probabilidade de *Weibull*. (PETRY E MATTUELA,2007)

A distribuição de *Weibull* obedece à equação:

$$F(v) = \frac{c}{a} \left[\frac{v}{a} \right]^{c-1} e^{-\left[\frac{v}{a} \right]^c} \quad (\text{A.1})$$

onde c é parâmetro ou fator de forma da distribuição dos ventos (adimensional) e a é parâmetro ou fator de escala, dado em m/s.

A.2 Distribuição de Rayleigh

Uma aplicação útil da distribuição de Rayleigh ocorre na fase em que não se dispõem de dados experimentais e se pretende caracterizar sumariamente um local, unicamente a partir da velocidade média anual. (PETRY E MATTUELA,2007)

$$F(v) = \frac{\pi}{2} \left[\frac{v}{v_{ma}} \right] e^{-\left(\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_{ma}} \right)^2 \right)} \quad (\text{A.2})$$

onde v_{ma} é a velocidade média anual, dada em m/s

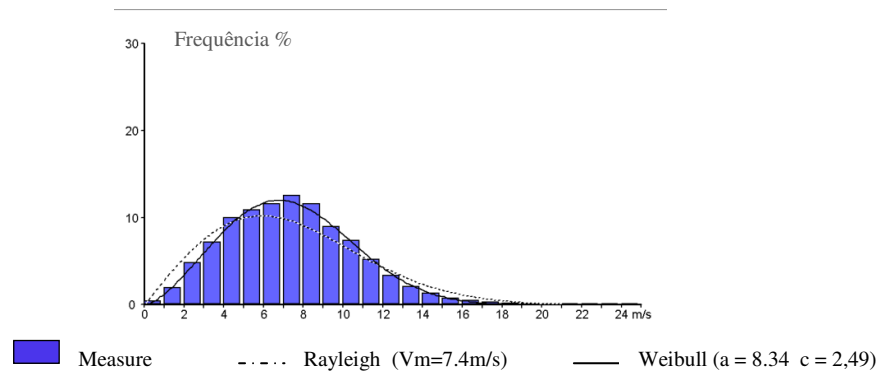


Figura A.1 - Distribuição de probabilidades *Weibull* e *Rayleigh* e de frequência de velocidade de vento (*Measure*)