

# FERRAMENTA DE AUXÍLIO PARA A ANÁLISE DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS DE GRANDE PORTE UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

**Max Alexandre Seabra do Nascimento** – maxseabra@ufpa.br

**Luis Carlos Macedo Blasques** – lblasqs@ufpa.br

**João Tavares Pinho** – jtpinho@ufpa.br

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA)

**Resumo.** O custo da instalação de usinas eólicas de grande porte conectadas ao sistema interligado nacional tem apresentado crescente redução nos últimos anos no Brasil. O vento é uma fonte inesgotável e renovável de energia elétrica, e usinas eólicas têm apresentado um retorno financeiro em prazos cada vez mais curtos. A viabilidade econômica é diretamente proporcional às características do local de instalação do sistema, e algumas considerações devem ser cuidadosamente analisadas previamente à instalação da usina, ou mesmo da estação anemométrica para o início da campanha de medições. A disponibilidade do recurso eólico é, obviamente, o fator mais preponderante na análise; no entanto, condições locais como a orografia (estudo das nuances do relevo de uma região); presença de obstáculos (vegetação, construções, etc.); disponibilidade de área para a instalação da usina, condições de acesso e características da rede elétrica para a interligação são muito importantes. A fim de auxiliar no processo de tomada de decisão sobre qual o local mais adequado para a instalação preliminar de estações anemométricas e, futuramente, da usina eólica, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta, com base na lógica fuzzy, que considera todos os fatores de interesse citados para apresentar um indicativo preliminar de viabilidade. Assim como é característico da lógica fuzzy, a experiência dos especialistas na construção das regras é de fundamental importância na análise. Além da disponibilidade do recurso eólico, o presente trabalho considera como principais características para a tomada de decisão, com base no atual cenário eólico verificado no Brasil, a disponibilidade de área para a instalação e as características de conexão à rede elétrica.

**Palavras-chave:** Sistemas eólicos, Aerogerador, Análise de viabilidade, Lógica fuzzy.

## 1. INTRODUÇÃO

A instalação de um sistema para o aproveitamento do recurso eólico deve partir do conhecimento da potencialidade eólica local e a aplicação do sistema. O primeiro ponto define desde a impossibilidade de instalação do sistema, casos de locais com potenciais muito baixos, até a definição do tipo de porte do sistema, casos de locais com bons potenciais. O segundo ponto define o tipo e o porte do sistema a ser instalado. Se a finalidade é o atendimento de uma carga local, caso de bombeamento de água, por exemplo, a instalação deverá ser feita obrigatoriamente em local próximo ao ponto de consumo, mesmo que haja outro com melhores condições de vento. Ao contrário, se a finalidade for a geração de energia elétrica para entrega ao sistema interligado, a instalação em um local mais distante, porém com melhores condições de vento, torna-se possível, pois a energia poderá ser transmitida para diversos e distantes pontos de consumo, através de subestações e linhas de transmissão e distribuição.

Com o objetivo definido no presente trabalho, a análise da viabilidade de implantação de sistemas eólicos para conexão à rede elétrica, alguns pontos de interesse serão apresentados e estudados de forma mais aprofundada, como as condições de vento na região (velocidade, direção); a orografia do local (estudo das nuances do relevo de uma região); os obstáculos (vegetação, construções, etc.); e a disponibilidade para conexão à rede (Pinho *et al*, 2008, Pinho *et al*, 2008a). De posse dessas análises, um sistema especialista auxilia na definição da viabilidade da implantação de sistemas eólicos para conexão à rede.

## 2. PARÂMETROS DE INTERESSE PARA A ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMAS EÓLICOS

### 2.1 Velocidade e direção do vento

A correta determinação do fluxo de vento num dado local passa necessariamente pela medição da velocidade e direção do vento, que são normalmente realizadas em locais mais próximos possíveis do local onde se pretende instalar o sistema eólico. O período mínimo indicado para as medições é o de 12 meses; porém, se possível, recomenda-se prolongar por períodos superiores, de forma a reduzir as incertezas associadas à variabilidade interanual dos ventos. A

Fig. 1 mostra um gráfico da variação do percentual de precisão para as medições de velocidade do vento com relação ao período da medição.

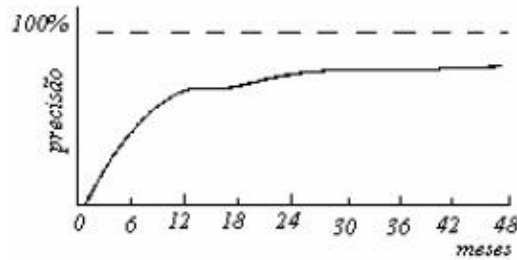


Figura 1- Duração da coleta de dados *versus* precisão nas estimativas. (Simões, 2004)

A velocidade do vento varia com a altura, dependendo, entre outros fatores, da rugosidade do terreno. Este fenômeno é denominado de perfil vertical de vento. A variação é mais rápida a alturas próximas ao solo, e a partir de uma altura limite, que pode variar desde alguns metros até centenas de metros acima do solo, a variação da velocidade não é mais influenciada pela rugosidade. A Fig. 2 apresenta um gráfico do perfil vertical de vento.

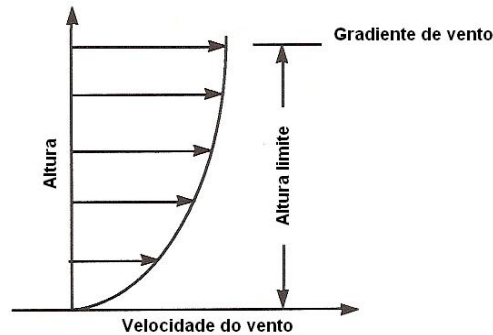


Figura 2- Variação da velocidade do vento com a altura. (Rohatgi *et al*, 1994)

As medições de velocidade do vento são normalmente obtidas a alturas que podem ir desde a altura padrão para análises meteorológicas (10 m), até alturas tão altas quanto as de instalação dos aerogeradores modernos, que atingem atualmente valores superiores a 100 m. De fato, recomenda-se que os dados sejam medidos o mais próximo possível da altura do rotor da turbina a ser instalada. Medições para avaliação do potencial eólico devem possuir no mínimo 2 sensores de velocidade de vento (um no topo e outro a uma altura média) e 1 sensor de direção de vento (no topo).

Podem existir situações em que sejam necessários dados de velocidade do vento a alturas diferentes àquelas de medição; neste caso, recorrem-se a métodos estatísticos ou às leis logarítmicas ou exponenciais (lei das potências) para uma estimativa o mais confiável possível dos dados na altura desejada. A Eq. (1) refere-se à lei das potências, que é amplamente utilizada nos estudos de energia eólica.

$$v_{Z1} = v_{Zref} \left( \frac{Z_1}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Onde:

$Z_1$ : Altura na qual se deseja obter a velocidade;

$Z_{ref}$ : Altura de referência, da qual se conhecem os dados;

$v_{Z1}$ : Velocidade que se deseja calcular;

$v_{Zref}$ : Velocidade conhecida na altura de referência;

$\alpha$ : Coeficiente de rugosidade tabelado, ou experimentalmente determinado.

## 2.2 Orografia

A orografia constitui um dos elementos mais importantes na caracterização dos ventos em um dado local, já que a complexidade do terreno em análise (plano, elevações de declive suave ou terreno montanhoso) influenciará no perfil da velocidade do vento. As montanhas, por exemplo, podem alterar as características do ar em movimento de diferentes formas. O aquecimento das encostas das montanhas durante o dia e o arrefecimento durante a noite fazem com que o ar

adjacente à montanha aqueça ou arrefeça por condução e mistura, e a diferença de temperatura entre o ar nas proximidades da montanha e o ambiente circundante dará origem ao aparecimento de brisas. O vento sobre as montanhas cria gradientes de pressão na direção do fluxo, que juntamente com o atrito com a superfície pode produzir a separação desse fluxo, fenômeno que provoca turbilhões em esteira a montante e a jusante da montanha, podendo atingir distâncias de várias vezes a altura da montanha, dependendo do declive da mesma. (Simões, 2004)

Quando a separação ocorre a jusante da montanha, a esteira produzida pode ir até 10 ou 20 vezes a altura do cume da elevação, enquanto que, quando ocorre a montante, os turbilhões produzidos juntam-se na base da mesma e são constringidos pela sua presença. Neste caso, a esteira não vai além de duas alturas da montanha. Este fenômeno é quase inexistente em elevações de inclinação suave, e nesta situação, verifica-se um aumento da velocidade do vento e aumento de energia, que pode ir até 2 vezes o valor obtido sem a perturbação do terreno. (Simões, 2004) A Fig. 3 mostra a aceleração do vento sobre uma elevação.

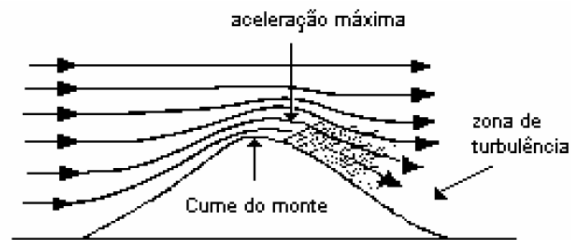


Figura 3- Aceleração do vento sobre uma elevação. (Simões, 2004)

Alguns indicadores de potencialidade de vento, disponíveis por classe de potência (Frade, 2000), que podem ser observados são:

- ✓ desfiladeiros, passagens e gargantas em áreas de frequente gradiente de pressão forte;
- ✓ vales longos estendendo-se entre montanhas;
- ✓ planícies e platôs em altas elevações;
- ✓ planícies e vales com escarpas persistentes e vento associado a gradientes elevados de pressão;
- ✓ picos de montanhas;
- ✓ locais de áreas costeiras.

A orientação das linhas formadas pelos pontos mais altos da montanha, no sentido longitudinal, em relação à direção predominante do vento, é um fator importante na determinação da quantidade de aceleração do vento sobre o relevo. A forma dos montes condiciona o fluxo, tornando-se num fator importante para a escolha do local, como mostra a Fig. 4.

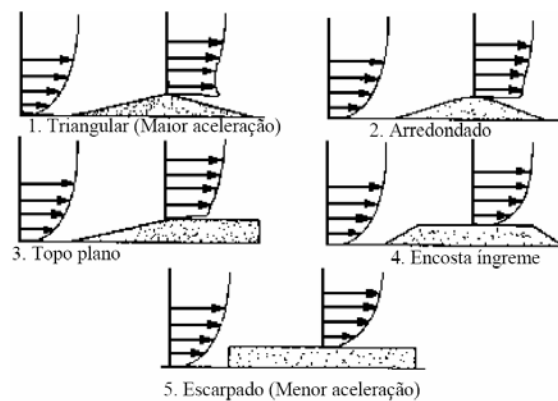


Figura 4- Forma dos montes por ordem de preferência. (Simões, 2004)

### 2.3 Rugosidade e obstáculos

A rugosidade do local escolhido é outro dos parâmetros considerados indispensáveis na análise de potencial eólico, uma vez que influencia de forma determinante o fluxo de vento junto ao solo e conseqüentemente a energia disponível na região de interesse. O termo rugosidade significa, no sentido mais geral, a característica de ocupação do solo de uma dada região ou local (vegetação, zonas de cultivo, etc.). O local ideal é caracterizado por rugosidade homogênea e reduzida, sendo, no entanto, mais frequente encontrar locais onde existem vários tipos de rugosidade que se interpenetram. (Simões, 2004) Os dados devem ser obtidos com base em visitas ao local pretendido para uma identificação das diferentes tipologias e correta aferição das suas dimensões. As classes de rugosidade do terreno de

acordo com suas características são apresentados na Tab. 1, onde o comprimento de rugosidade  $Z_0$  determina a altura na qual a velocidade horizontal do vento tende a zero. É assim chamado porque é normalmente relacionado à altura dos elementos de rugosidade do terreno. Embora não seja uma extensão física, pode ser considerado como uma escala de comprimento de uma representação da rugosidade da superfície. Como uma aproximação, o comprimento de rugosidade é de aproximadamente um décimo da altura dos elementos de rugosidade da superfície. Por exemplo, grama curta de 0,01 m de altura tem um comprimento de rugosidade de aproximadamente 0,001 m.

Tabela 1. Classes de rugosidade de acordo com as características do terreno.

$Z_0$ [m]	Característica do terreno	Classe de rugosidade
1,00	Cidades	3
	Floresta	
0,50	Subúrbios	
0,30	Barreiras de proteção	2
0,20	Muitas árvores e/ou arbustos	
0,10	Fazenda com muitos obstáculos	
0,05	Fazenda com poucos obstáculos	1
0,03	Fazendas com poucos prédios, árvores, etc	
	Aeroportos com áreas de prédios e árvores	
0,01	Aeroportos, rodovias, áreas de grama rala ou cultivo cortado	0
$5 \cdot 10^{-3}$	Terra nua (lisa)	
10	Superfície com neve (lisa)	
$3 \cdot 10^{-4}$	Superfície de areia (lisa)	
10	Mar, lagoas e lagos	

Podem existir nas proximidades da torre anemométrica ou do aerogerador elementos de sombreamento que não podem ser classificados como rugosidade. Neste caso, denominam-se obstáculos, e é necessário proceder à sua correta identificação e caracterização, para considerar sua influência no fluxo do vento. Os obstáculos podem ser de várias naturezas: edifícios, barreiras vegetais, ou mesmo grandes estruturas de pedra.

A presença dos obstáculos pode representar em alterações significativas no fluxo de vento e, conseqüentemente, na produção energética. As perturbações produzidas por obstáculos como edifícios aumentam em altitude a jusante (após o edifício). O fluxo é obstruído pelo edifício formando uma esteira ainda a montante do mesmo. Após a passagem pelo obstáculo forma-se uma esteira em forma de ferradura que se estende ainda a alguma distância para jusante.

A instalação dos aerogeradores deve evitar locais que sofram a influência destes obstáculos, por isto se dá preferência a locais inseridos nas classes de rugosidade 1 ou 2 da Tab. 1. Na impossibilidade de se instalar o sistema em locais com estas características, os equipamentos de medição e geração devem ser instalados em locais mais livres possíveis da zona de influência. Algumas precauções a serem tomadas para evitar a influência de obstáculos ao posicionar o sistema eólico são: (Simões, 2004)

- ✓ a uma distância a montante de mais do que duas vezes a altura do edifício;
- ✓ a uma distância mínima a jusante de dez ou mesmo vinte vezes a altura do edifício;
- ✓ pelo menos 3 a 5 vezes a direção transversal do edifício, se o sistema eólico está colocado transversalmente ao mesmo em relação ao fluxo.

A Fig. 5 mostra a zona de perturbação do vento na presença de um obstáculo, onde deve-se evitar a instalação de sistemas eólicos.

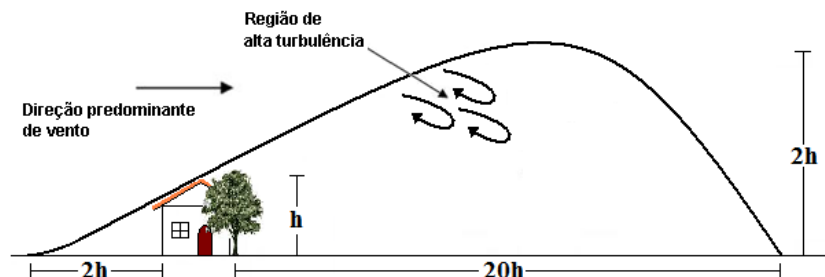


Figura 5- Fluxo de vento perturbado pela presença de um edifício. (Pinho *et al*, 2008a)

No caso de barreiras vegetais, além da altura e profundidade do obstáculo, sua porosidade também influencia no fluxo de vento. Por porosidade entende-se a percentagem de área aberta que se pode visualizar quando se olha através de uma barreira vegetal. Os coeficientes de porosidade de cada obstáculo são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Coeficientes de porosidade atribuídos aos obstáculos. (Simões, 2004)

Aparência da barreira	Porosidade (P)
Sólida (parede)	0
Muito densa	<0,35
Densa	0,35 – 0,50
Aberta	>0,50

## 2.4 Deformação na vegetação

Em situações de análises preliminares, onde não se dispõe ainda de medições de dados eólicos, particularmente a velocidade e a direção de vento, a vegetação da região a ser estudada pode servir como indicativo do potencial eólico disponível. Alguns tipos de árvores e arbustos, quando sofrem a ação de fatores ambientais como o vento, frequentemente são deformadas (inclinadas) e, medindo-se este grau de deformação, pode-se estimar a média anual de vento do local onde a vegetação está disposta. A Fig. 6 apresenta um exemplo de deformidade causada pelo vento em uma árvore na costa nordeste do Brasil.



Figura 6- Deformação causada pelo vento em árvore na costa nordeste do Brasil. (Pinho *et al*, 2008a)

Uma forma de se estimar a velocidade do vento tendo como base a deformação da vegetação é através de índices de deformidade de árvores, aplicável para árvores coníferas (índice de Griggs-Putnam) e hemisféricas (índice de Barsch). Um exemplo da classificação através do índice de Griggs-Putnam é mostrada na Fig. 7, bastante semelhante à classificação pelo índice de Barsch.

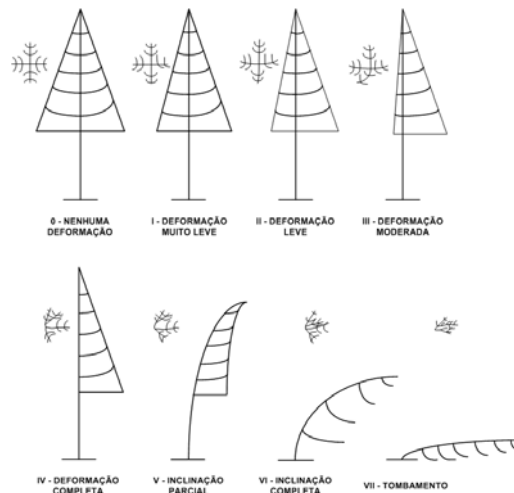


Figura 7- Índice de Griggs-Putnam. (Pinho *et al*, 2008a)

Ambos os índices são divididos em classes, e representam a forma assimétrica da coroa e a deflexão do tronco causados pelo vento. Quanto mais alto o valor do índice, mais forte é o indicativo de potencialidade eólica. Uma forma de se estimar numericamente a velocidade de vento através da deformação de árvores é por meio da fórmula de Ponce-Mattio, Eq. (2). A velocidade do vento é calculada encontrando-se um índice de deformidade  $D$ , e de posse desse valor, usa-se a Eq. (3) para encontrar a velocidade de vento ( $v$ ), em m/s, estimada a 30 m de altura. (Rohatgi *et al*, 1994)

$$D = \frac{A}{B} + \frac{C}{45^\circ} \quad (2)$$

$$v = 3,62 + 46D \quad (3)$$

A Fig. 8 apresenta a forma de se obter os valores de A, B e C para o cálculo da estimativa da velocidade de vento, para árvores coníferas e hemisféricas.

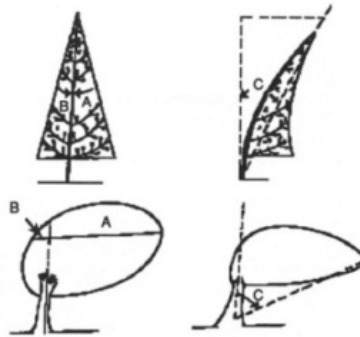


Figura 8- Cálculo de A, B e C, para estimativa da velocidade de vento. (Rohatgi *et al*, 1994)

A ausência de deformação não implica em um recurso eólico inexistente, pois algumas espécies de árvores são mais sensíveis à influência do vento que outras. Árvores em uma floresta fechada, por exemplo, estão bem próximas, e os ventos podem soprar de mais de uma direção predominante, não ocorrendo portanto a deformação das mesmas. A análise deste indicativo de vento deve ser realizada em árvores isoladas ou em pequenos grupos esparsos. O uso da deformação das árvores deve ser utilizado somente como um indicativo e não como uma ferramenta principal para a escolha de um local para a instalação de um sistema eólico.

### 3. PARÂMETROS DE INTERESSE PARA ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA FUZZY

A avaliação preliminar, como o próprio nome sugere, é a primeira etapa a ser realizada quando se deseja identificar as áreas onde o aproveitamento do recurso eólico é potencialmente viável. Esta avaliação apresenta como vantagem a rapidez e o baixo custo, porém, sua desvantagem está relacionada com a imprecisão da avaliação, devendo ser utilizada apenas como um indicativo de potencial, e não como a única forma de análise.

Em países como o Brasil, onde a energia eólica ainda está em fase de crescimento e se dispõe de áreas em abundância para a instalação de usinas eólicas, faz-se muito importante que o empreendedor disponha de uma ferramenta para auxílio no processo de tomada de decisão do local mais adequado para a instalação de um sistema eólico. Novamente, cita-se que a ferramenta apresentada no presente trabalho fornece apenas indicativos de viabilidade, devendo ser comprovada através de medições anemométricas *in loco*, até mesmo pelo fato desta ser uma exigência do Governo Federal para a participação de empreendimentos eólicos em leilões de energia. A ferramenta pode, inclusive, servir de auxílio para a definição dos locais mais apropriados para se iniciar campanhas de medição. Países onde a energia eólica já se encontra em estágio avançado de desenvolvimento, e a disponibilidade de áreas já é restrita, a ferramenta pode se tornar igualmente importante, uma vez que qualquer fator pode ser determinante para que um sistema se torne viável.

Os sub-itens a seguir apresentam as análises consideradas no presente trabalho, assim como as estratégias para obter os valores de interesse para a alimentação dos sistema especialista. (Pinho *et al*, 2008)

#### 3.1 Velocidade de vento

Este é o parâmetro mais importante na análise, uma vez que a potência eólica é proporcional ao cubo da velocidade. Pode ser obtida através de:

**Medições específicas no local.** Como já citado, a forma mais indicada para obtenção de valores médios da velocidade de vento em determinado local é através de medições *in loco* com estratégias específicas para determinação de potencialidade eólica, como a instalação de dois ou mais anemômetros, a alturas mais próximas possíveis da altura do cuba da turbina.

**Obtenção de dados de estações meteorológicas próximas.** Se disponíveis, estes dados podem ser bastante úteis, dependendo da finalidade da estação. Se com fim específico para o aproveitamento eólico para geração de eletricidade, como em casos onde haja a presença de projetos já desenvolvidos ou em fase de desenvolvimento em locais próximos, os dados podem ser utilizados de forma mais confiável. Se com outras finalidades, como estações meteorológicas instaladas em aeroportos ou para fins agrícolas, os dados podem indicar a presença ou não de bom potencial eólico. Atualmente, existem disponíveis uma série de programas computacionais que estimam a potencialidade em eólica determinado local, com base em dados medidos em locais próximos.

**Consulta a atlas eólicos.** Os dados obtidos em atlas eólicos podem apontar regiões de maiores potenciais, assim como apresentar estimativas de valores médios de velocidade de vento em determinadas áreas, normalmente apresentados em valores anuais ou sazonais. Quanto mais alta for a resolução do mapa, ou quanto mais precisa for a base de dados utilizada na estimativa, mais confiáveis serão os dados.

**Visita ao local.** A visita ao local é muito importante para a avaliação de todos os pontos de interesse na presente análise. Esta etapa é rápida, apresenta custos moderados, relacionados ao deslocamento e à aquisição de equipamentos de medição portáteis, e possui precisão diretamente proporcional à experiência do observador. Como desvantagens estão a necessidade de deslocamento ao local, que implica em maiores custos e tempo, o caráter subjetivo de algumas análises, principalmente nas etapas que envolvem informações obtidas com moradores locais, e o fato da etapa não ser conclusiva por si só.

Para estimativa prévia da velocidade de vento, as principais ações a serem desenvolvidas em visitas ao local são:

✓ Observação de indicadores naturais: analisada assim que se chega ao local, pois além dos indicadores serem facilmente observados, ela garante uma melhor confiabilidade à avaliação. Indicadores naturais de bom potencial eólico e a forma de cálculo foram apresentadas anteriormente.

✓ Medições instantâneas com instrumentos portáteis: anemômetros portáteis podem ser utilizados para medições instantâneas e avaliação geral da potencialidade eólica do local. A parcela de erro deste tipo de medição encontra-se na possibilidade do dia da visita ser um dia atípico na localidade, fazendo com que a medição realizada venha a ser sobre ou subestimada.

✓ Informações obtidas com moradores locais: é a conversa com moradores para coleta de informações sobre as características meteorológicas da região. Informações sobre a velocidade de vento podem ser obtidas, principalmente com aqueles moradores mais antigos. Essas informações podem confirmar, ou não, os dados obtidos através das observações visuais e através da medição com instrumentos portáteis.

### 3.2 Disponibilidade de área para a instalação

Este parâmetro também é muito importante, pois em alguns casos a viabilidade de usinas eólicas para conexão à rede está fortemente relacionada com o porte da usina, e este é diretamente proporcional à disponibilidade de áreas para a instalação. De nada servirá atender aos demais requisitos, se não houver área suficiente para instalar o sistema. A disponibilidade de áreas para a instalação pode ser verificada também em visitas ao local; se disponíveis a questão passa a ser fundamentalmente econômica.

### 3.3 Rugosidade

Além do espaço físico, deve-se atentar para a presença de possíveis obstáculos que não possam ser retirados, e que podem prejudicar a conversão eólica. A rugosidade do terreno também é fator a ser considerado na análise de viabilidade, apesar de não ser totalmente determinante na maioria dos casos. Visitas ao local e consultas a mapas orográficos e de rugosidade podem fornecer bons indicativos.

### 3.4 Condições de acesso ao local

O porte dos equipamentos componentes de um sistema eólico vem crescendo bastante, principalmente os aerogeradores e suas torres. Quanto maior o porte, maior a dificuldade em seu transporte e instalação, já que áreas de difícil acesso podem influenciar na decisão quanto à instalação do sistema. Áreas de mar aberto sem a possibilidade de uma embarcação transitar de forma segura, estradas com condições impróprias, e locais onde a única forma de acesso seja por via aérea ou naval, são exemplos de locais que dificultam a instalação de sistemas de geração utilizando a fonte eólica.

Neste ponto, também importante mas não determinante, inspeções visuais são muito importantes. Consultas a mapas rodoviários ou rotas aéreas e marítimas também podem ser realizadas.

### 3.5 Disponibilidade de conexão à rede

Este ponto é particularmente importante se considerada a atual situação do Brasil, e de países em estágios semelhantes de desenvolvimento da fonte eólica. Muitos dos locais que apresentam excelente potencial eólico no Brasil ainda estão muito distantes de grandes centros de consumo, e apresentam aquelas denominadas de “redes fracas”, ou seja, um sistema elétrico incapaz de receber novos e consideráveis aportes de energia gerada. Mesmo em locais próximos a grandes centros de consumo, existem muitos sistemas elétricos com tais características no Brasil.

Apesar deste ponto não inviabilizar tecnicamente a instalação de empreendimentos eólicos, uma vez que reforços de rede podem ser tecnicamente possíveis em quase qualquer condição, a ferramenta aqui desenvolvida considera este como um ponto muito importante na análise. Tal consideração se deve ao fato citado anteriormente, do Brasil ainda possuir áreas em abundância com excelentes potenciais para a instalação de sistemas eólicos. Desta forma, o fator econômico é ainda mais preponderante, e o reforço de rede é um investimento altíssimo em alguns casos. Espera-se que esta situação seja contornada com o passar do tempo, e investimentos na rede elétrica sejam realizados antes mesmo da instalação de usinas eólicas.

## 4 ANÁLISE DE VIABILIDADE UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

### 4.1 Breve introdução sobre a lógica fuzzy

Os seres humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos, baseados em informações imprecisas ou aproximadas. A estratégia adotada pelos operadores humanos é também de natureza imprecisa e geralmente possível de ser expressa em termos lingüísticos (Tanscheit, 2004).

A Lógica *Fuzzy* pode ser utilizada para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras lingüísticas (Tanscheit, 2004). Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma *se ... então*, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a Lógica *Fuzzy* fornece o ferramental matemático para se lidar com as tais regras lingüísticas.

A utilização da Teoria *Fuzzy* pode ocorrer em diversas áreas do conhecimento, e possui como principais vantagens a formulação através de regras obtidas através de especialistas ou geradas através de dados numéricos, e a não necessidade de um modelo matemático formal.

### 4.2 Concepção do sistema fuzzy

Definidos na seção anterior os parâmetros de interesse a serem avaliados, a experiência dos autores (Pinho *et al*, 2008) foi determinante para atribuição de pesos e valores a cada uma das variáveis envolvidas na análise. Os cinco itens apresentados anteriormente, velocidade média do vento, disponibilidade de área, rugosidade, condições de acesso e disponibilidade para conexão à rede são consideradas como variáveis de entrada do sistema especialista; a variável de saída define a viabilidade preliminar de implantação do sistema, sendo consideradas três conclusões distintas: sistema inviável, sistema parcialmente viável (parcial ou total) e sistema viável.

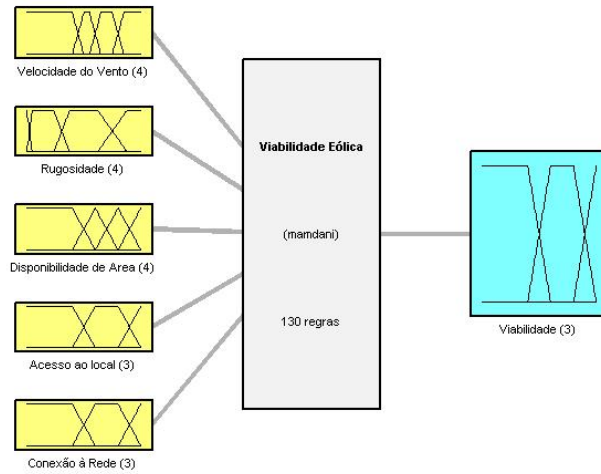
A Tab. 3 mostra as variáveis com os respectivos valores *crisp* e *fuzzy*.

Tabela 3. Valores *crisp* e *fuzzy* das variáveis do sistema.

Entradas				
Velocidade Média do Vento (m/s)	Disponibilidade de Área (0 a 10 Pts)	Rugosidade (m)	Condições de Acesso (0 a 10 Pts)	Disp. conexão à rede (0 a 10 Pts)
$V_m > 8$ – <b>Muito Boa</b>	$x > 9$ – <b>Muita</b>	$x \leq 0,01$ – <b>Classe 0</b>	$x > 9$ – <b>Excelente</b>	$x > 9$ – <b>Forte</b>
$6 < V_m \leq 8$ – <b>Boa</b>	$7 < x \leq 9$ – <b>Moderada</b>	$0,01 < x \leq 0,1$ – <b>Classe 1</b>	$5 < x \leq 9$ – <b>Razoável</b>	$5 < x \leq 9$ – <b>Média</b>
$4,5 < V_m \leq 6$ – <b>Média</b>	$5 < x \leq 7$ – <b>Pouca</b>	$0,1 < x \leq 0,3$ – <b>Classe 2</b>	$x \leq 5$ – <b>Difícil</b>	$x \leq 5$ – <b>Fraca</b>
$V_m \leq 4,5$ – <b>Baixa</b>	$x \leq 5$ – <b>Nenhuma</b>	$x > 0,3$ – <b>Classe 3</b>		
Saídas				
$x \leq 5$ pts – <b>Inviável</b>		$5 < x \leq 7$ pts – <b>Parcialmente Viável</b>		$x > 7$ pts – <b>Viável</b>

A entrada “rugosidade” pode ser definida com o auxílio da Tab. 1. As variáveis de saída foram assim determinadas por se considerar um componente subjetivo em algumas análises, ou seja, valores de saída “inviável” ou “viável” indicam de forma suficientemente precisa a conclusão da análise; no entanto, a saída “parcialmente viável” foi implementada pois algumas análises indicam sistemas em zonas limiares de viabilidade, e o perfil do empreendedor deve definir a melhor conclusão. Como exemplo, um sistema cuja viabilidade é considerada parcial em função da conexão à rede ser considerada média pode se tornar viável para um empreendedor que tenha outras usinas eólicas a serem instaladas em locais próximos.

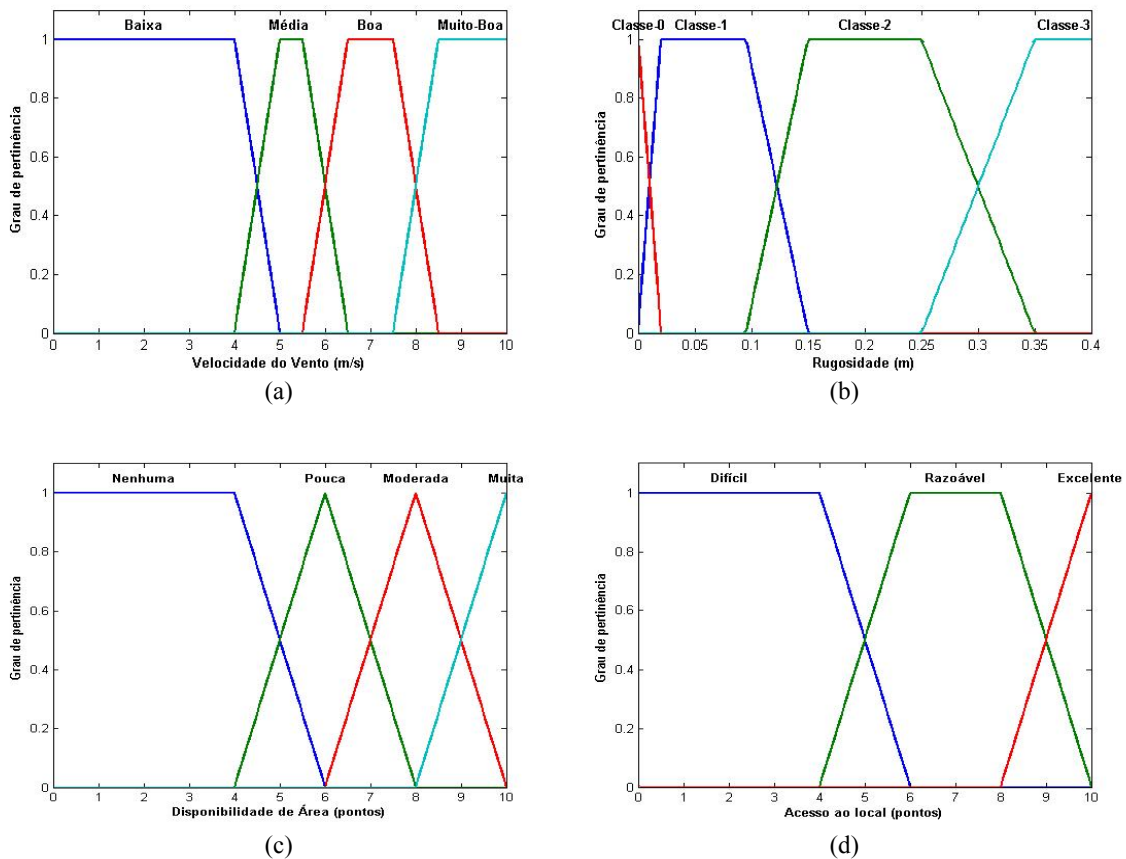
A Fig. 9 mostra o sistema *fuzzy* criado com o auxílio da ferramenta “toolbox” do programa computacional Matlab®.



Sistema Viabilidade Eólica: 5 entradas, 1 saída, 130 regras

Figura 9- Sistema *fuzzy* criado no Matlab®.

Com a associação de todas as variáveis de entrada, o número de regras total do sistema seria de 576 regras; no entanto, através do estabelecimento de pesos maiores de determinadas regras em relação a outras, o sistema ficou reduzido a 130 regras. Foi determinado, por exemplo, que se a variável de entrada “velocidade de vento” assumir o valor “baixo”, o resultado da variável de saída “viabilidade” será “inviável”, independentemente dos valores das outras variáveis de entrada; a mesma saída será verificada caso a variável de entrada “disponibilidade de área” assumir o valor “nenhuma”. As funções de pertinência do sistema estão mostradas na Fig. 10.



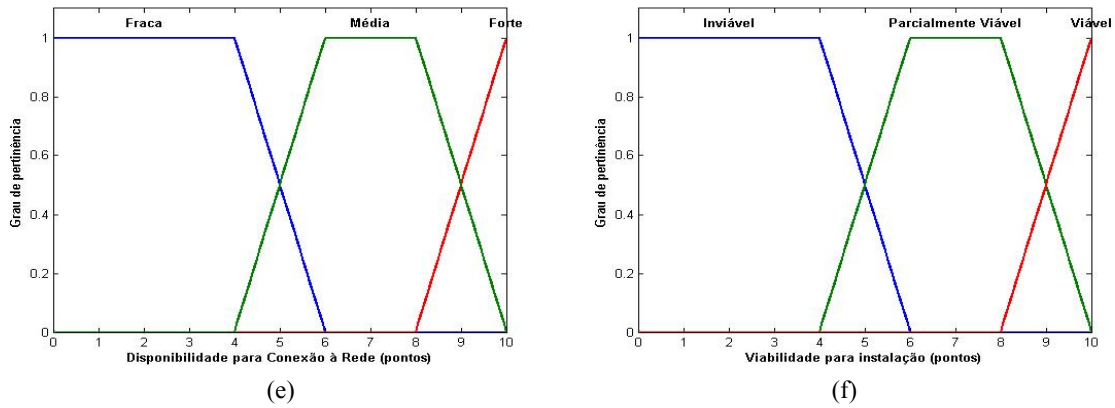
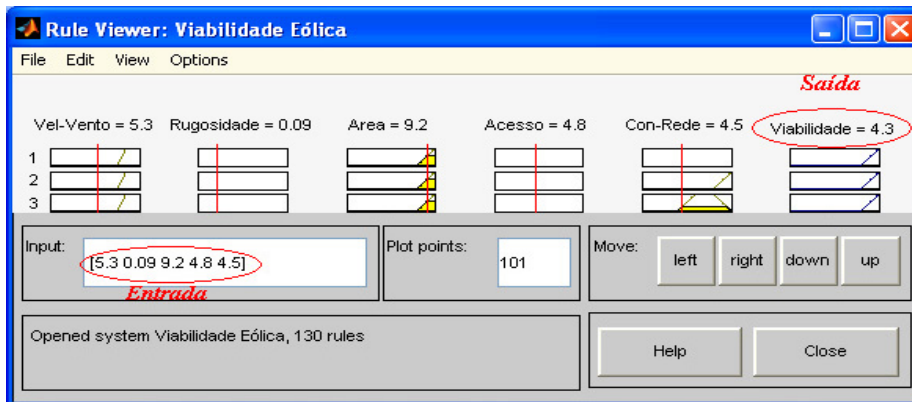


Figura 10- Funções de pertinência: (a) velocidade do vento, (b) rugosidade, (c) disponibilidade de área, (d) condições de acesso, (e) conexão à rede e (f) viabilidade.

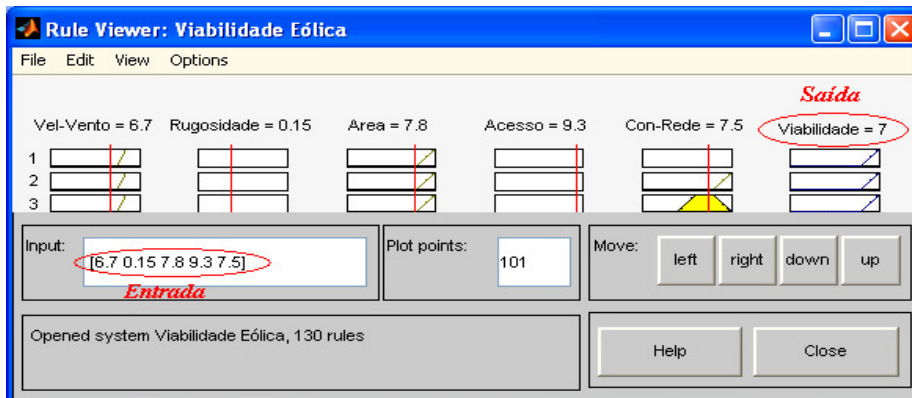
Para exemplificar o método de análise de viabilidade utilizando a lógica *fuzzy*, são considerados os valores aleatórios de entrada expressos na Tab. 4 para três locais fictícios. A representação gráfica do sistema *fuzzy*, com as entradas definidas na Tab. 4 e as saídas calculadas, está ilustrada na Fig. 11.

Tabela 4. Valores das variáveis de entrada para os três locais fictícios.

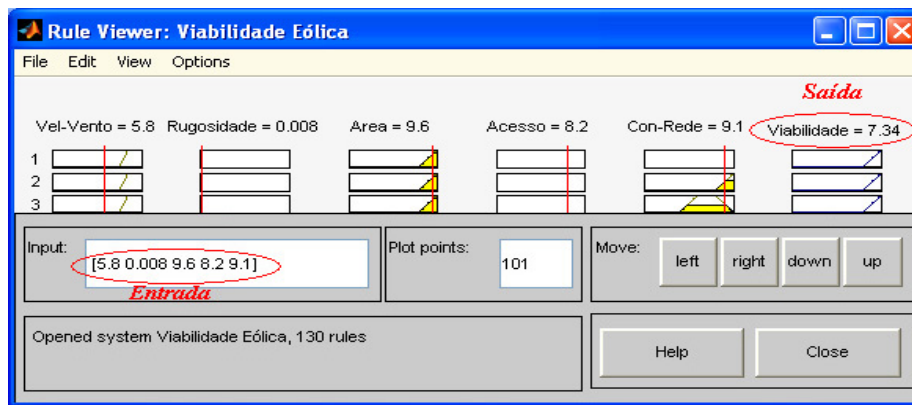
Variáveis de entrada	Local 1	Local 2	Local 3
Velocidade do vento	Média (5,3 m/s)	Boa (6,7 m/s)	Média (5,8 m/s)
Disponibilidade de área	Muita (9,2 pts)	Moderada (7,8 pts)	Muita (9,6 pts)
Rugosidade	Classe 1 (0,09 m)	Classe 2 (0,15 m)	Classe 0 (0,008 m)
Condições de acesso	Difícil (4,8 pts)	Excelente (9,3 pts)	Razoável (8,2 pts)
Conexão à rede	Fraca (4,5 pts)	Média (7,5 pts)	Forte (9,1 pts)



(a)



(b)



(c)

Figura 11- Representação gráfica dos valores de entrada e saída: (a) local 1, (b) local 2 e (c) local 3.

Utilizando-se os valores definidos na Tab. 4, tem-se as seguintes regras ativadas:

- ✓ **Local 1:** SE (velocidade é **Média**) E (rugosidade é **Classe 1**) E (área é **Muita**) E (acesso é **Difícil**) E (conexão à rede é **Fraca**) Então (viabilidade é **Inviável**).
- ✓ **Local 2:** SE (velocidade é **Boa**) E (rugosidade é **Classe 2**) E (área é **Moderada**) E (acesso é **Excelente**) E (conexão à rede é **Média**) Então (viabilidade é **Parcialmente viável**).
- ✓ **Local 3:** SE (velocidade é **Média**) E (rugosidade é **Classe 0**) E (área é **Muita**) E (acesso é **Razoável**) E (conexão à rede é **Forte**) Então (viabilidade é **Viável**).

Assim, observa-se que os valores numéricos para a variável de saída “viabilidade”, em destaque nos cantos superiores direitos das telas da Fig. 11, correspondem às faixas de “inviável” (local 1), “parcialmente viável” (local 2) e “viável” (local 3), confirmando as informações dadas pelo analista para a construção da base de regras do sistema *fuzzy*. No exemplo, um ponto a destacar, que reforça a funcionalidade da ferramenta e comprova o que foi comentado anteriormente, é a observação de situações localizadas em faixas intermediárias de viabilidade. Os locais 2 e 3 apresentam resultados finais muito próximos, 7 e 7,34, respectivamente, como observado na Fig. 11. A tabela de regras (Tab. 3) indica que a faixa superior da viabilidade parcial é 7, o que insere o local 2, propositadamente no exemplo, no limiar entre a viabilidade parcial e a viabilidade. Apesar de bons valores de velocidade média, o sistema considera que todas as outras condições (com exceção do item “condições de acesso”, que tem peso menor na análise) estão em faixas médias a baixas. Os itens “disponibilidade de área” (moderada) e “conexão à rede” (média), de maior peso na análise, são determinantes para a conclusão de viabilidade parcial. De forma análoga, o local 3 também encontra-se próximo do limiar, sendo sua viabilidade indicada, mesmo apresentando valores médios de velocidade de vento, em função da muita disponibilidade de área e da forte conexão à rede, principalmente, além de baixos índices e rugosidade no local. Novamente, reforça-se aqui o comentário de que algumas decisões, em faixas limiares de viabilidade, podem ser conclusivas a partir de uma característica particular do empreendedor.

## 5. CONCLUSÃO

A análise da viabilidade de implantação de um sistema eólico está fundamentada em estudos realizados sobre diversos aspectos da região de instalação. Para que se possa efetuar-la de maneira suficientemente precisa, são necessários dados precisos sobre o regime de ventos na região, pois sabe-se que as condições dos ventos podem variar significativamente de um local para outro, mesmo que próximos. Além da potencialidade eólica, outros parâmetros também impactam na análise de viabilidade, e quanto maior o número de ferramentas que se dispuser para conhecê-los e avaliá-los, mais confiável será o resultado.

Medições precisas no local de instalação são onerosas e demandam certo tempo, no mínimo de 1 ano. A medição é essencial em locais de potencial tal que se justifique a instalação de usinas eólicas; porém, em locais de baixo potencial, onde não há viabilidade de instalação, ela pode ser dispensada, ou ao menos considerá-la como não prioritária em determinado momento.

A dificuldade na obtenção de dados preliminares, ou o desconhecimento da influência de determinadas variáveis na análise, torna muitas vezes esta análise totalmente subjetiva, e o resultado final pode variar de uma condição de baixa ou nenhuma viabilidade, até uma condição de viabilidade. Velocidades médias de vento muito altas ou muito baixas podem definir, por si só, a viabilidade do sistema; porém, velocidades situadas em faixas intermediárias tornam a análise menos elementar.

O sistema especialista aqui proposto, baseado na lógica *fuzzy*, busca fornecer a análise prévia para a instalação do sistema de medição, em um primeiro momento, e a instalação do sistema de geração em um momento posterior. As variáveis de entrada do sistema foram definidas com base na experiência dos desenvolvedores, por serem consideradas

determinantes para o estudo. O peso de cada variável foi inserido como restrição às regras do sistema, o que torna a ferramenta mais simples, exigindo menor esforço computacional, sem ter sua confiabilidade comprometida. Os resultados observados indicam que a ferramenta apresenta características interessantes, como a rapidez da análise, a objetividade, dentro do possível, das relações entrada-saída, e a simplicidade de utilização. Esta última característica pode fazer com que a ferramenta se adapte facilmente a condições particulares, consideravelmente diferentes das estabelecidas, através de simples modificações dos valores e/ou pesos das regras. Até mesmo a inserção ou a exclusão de variáveis pode ser realizada de maneira simples.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio do CNPq e da FAPESPA, no âmbito do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA).

### **REFERÊNCIAS**

- Frade, L. C. S., 2000. Estudo da Potencialidade de Energia Eólica no Litoral do Estado do Pará. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Pinho, J. T., Barbosa, C. F. O., Pereira, E. J. S., Souza, H. M. S., Blasques, L. C. M., Galhardo, M. A. B., Macêdo, W. N., 2008. Manual de Implantação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel para Geração de Energia Elétrica, MME, Brasília.
- Pinho, J. T., Barbosa, C. F. O., Pereira, E. J. S., Souza, H. M. S., Blasques, L. C. M., Galhardo, M. A. B., Macêdo, W. N., 2008a. Sistemas Híbridos – Soluções Energéticas para a Amazônia, MME, Brasília.
- Rohatgi, J. S.; Nelson, V., 1994. Wind Characteristics – An Analysis for the Generation of Wind Power, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- Simões, T., 2004. Base de dados do potencial energético do vento em Portugal – Metodologia e Desenvolvimento. 2004. 106 f.. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Tanscheit, R., 2004. Sistemas Fuzzy, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

### **SUPPORT TOOL FOR FEASIBILITY ANALYSIS OF THE INSTALLATION OF LARGE-SCALE WIND SYSTEMS USING FUZZY LOGIC**

**Abstract.** *The installation costs of large-scale grid-connected wind parks are presenting a considerable reduction for the recent past years on Brazil. The wind is an abundant and renewable energy source and wind parks are presenting an economic feedback at smaller periods of time. The economic feasibility is directly proportional to the characteristics of the installation site and some aspects have to be carefully analyzed prior to the wind park installation, or even to the anemometric station installation, for the beginning of the wind resource assessment campaign. The wind resource availability is obviously the most determinant factor for the analysis; however, local characteristics such as the orography (study of the relief of a region), presence of obstacles (vegetation, buildings, etc.), area availability for the wind park installation, access conditions, and characteristics of the power system for the grid-connection are very important factors. Aiming to support the process of decision making on what is the most appropriated site for the preliminary installation of anemometric stations and, in the future, the wind park, the present work proposes the development of a tool, based on fuzzy logic, that considers all the interest factors mentioned above to present a preliminary feasibility indicative. As a typical characteristic of the fuzzy logic, the specialist's experience at the building of the rules is essential for the analysis. Besides the availability of the wind resource, the present work considers as main characteristics for the decision making, based on the present Brazilian wind scenery, the area availability for the installation and the characteristics of the grid connection.*

**Keywords:** *Wind systems, Wind turbine, Feasibility analysis, Fuzzy logic.*