

LÓGICA DIFUSA APLICADA NA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS DE PEQUENO PORTE PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NA AMAZÔNIA

Raissa Silva Damasceno – raissadamasceno_9@hotmail.com

Maria de Jesus Cruz Machado – jemachado_@hotmail.com

Claudio Fábio de Oliveira Barbosa – cfob@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Elétrica

Resumo. Este trabalho discorre sobre a aplicação da lógica difusa como uma ferramenta auxiliar para tomada de decisão quanto à implantação de sistemas eólicos de pequeno porte para geração de eletricidade em comunidades isoladas da Amazônia, as quais não são beneficiadas com o fornecimento convencional de energia elétrica. Para tanto, é implementado um protótipo de programa computacional, denominado Sistema de Avaliação da Viabilidade de Sistemas Eólicos (SAVSE), tal protótipo foi baseado em uma modelagem adequada do raciocínio dos engenheiros especialistas em sistemas eólicos regionais. Em termos da aplicação da lógica difusa, os resultados qualitativos obtidos revelam que o emprego dessa estratégia pode ser uma alternativa satisfatória na avaliação da viabilidade.

Palavras-chave: Energia Eólica, Lógica Difusa, Amazônia.

1. INTRODUÇÃO

A Região Amazônica constitui-se atualmente como um desafio à universalização dos serviços de eletricidade, dadas às características intrínsecas do próprio meio rural (pequenas vilas dispersas e isoladas, baixa densidade demográfica, infraestrutura precária, eleva distância dos grandes centros, locais remotos e situados muitas vezes em emaranhados de rios, etc.). Tais características, somadas ao fator econômico, inviabilizam a tradicional eletrificação por extensão da rede elétrica.

Barbosa *et al* (2004), destaca duas alternativas de geração para atendimento destas áreas:

- Geração diesel-elétrica – atualmente o mais significativo vetor da matriz energética regional em sistemas isolados, porém com elevado custo operacional (compra, transporte e distribuição do óleo diesel), baixa qualidade no serviço prestado e forte emissor de gases de efeito estufa (GEE).

- Geração com fontes renováveis – alternativa promissora, especialmente na Região, pois emprega as fontes de energia que estão em um processo natural e contínuo de renovação na natureza (Boyle, 2004), como a solar, a eólica, a hidráulica e a biomassa encontradas nas áreas de abrangência dessas pequenas vilas, que, dependendo das diversas tecnologias de conversão, poderão ser utilizadas para geração de eletricidade.

Neste contexto, os sistemas de eletrificação denominados de alternativos, como é o caso dos sistemas eólicos (Fig. 1), apresentam-se como uma forma importante do uso das energias renováveis para o atendimento descentralizado dessas pequenas demandas através de minirredes de distribuição, ou ainda, individualizado.

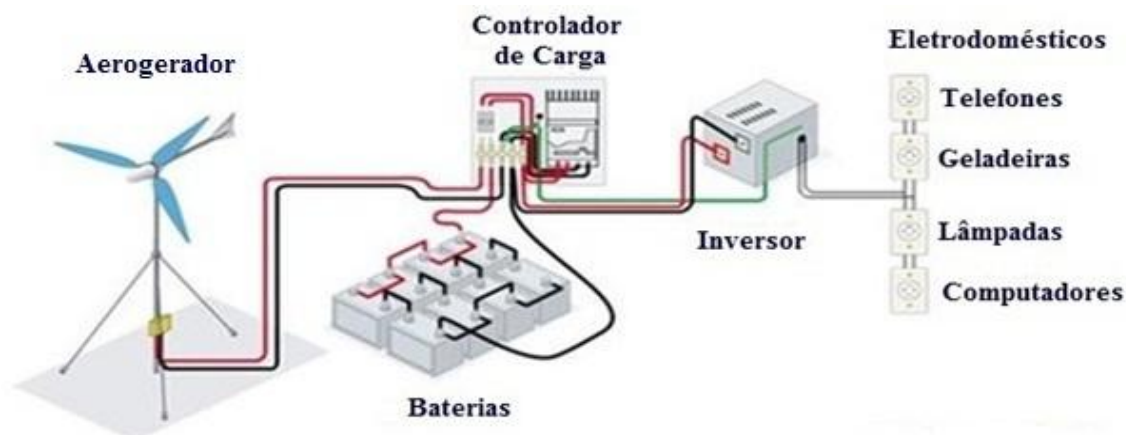


Figura 1– diagrama de blocos de um sistema eólico isolado.

Porém, a avaliação da viabilidade desses sistemas quanto aos muitos parâmetros de projeto (parâmetros técnicos, econômicos, sociais e ambientais), torna-se uma tarefa muito complicada e dispendiosa, além de necessitar da experiência dos projetistas, dada a natureza imprecisa e própria das inúmeras variáveis regionalizadas envolvidas no

processo. Logo, decidir se o sistema desse tipo é viável ou não leva os engenheiros projetistas a dúvidas quanto ao sucesso da instalação. Shaw e Simões (1999) e Wang (1997) destacam que a lógica difusa possui a propriedade de capturar e trabalhar com as incertezas e verdades parciais descritas numa linguagem natural de forma sistemática e precisa, convertendo-as para um formato numérico de fácil manipulação pelos computadores.

Daí a concepção deste trabalho, que discorre sobre a implementação e aplicação de um protótipo de sistema difuso (múltiplas entradas e única saída) do tipo fuzzificador e defuzzificador, denominado de Sistema de Avaliação de Viabilidade de Sistemas Eólicos (SAVSE). O SAVSE é uma ferramenta de auxílio na avaliação da viabilidade da implantação de sistemas de eletrificação do tipo eólico de pequeno porte em localidades isoladas da Amazônia. Para tanto, faz-se uso apenas dos parâmetros considerados mais relevantes de projeto de tais sistemas.

A implementação do SAVSE compreende três etapas, a saber:

- Identificação dos parâmetros de projeto e seleção dos mais relevantes.
- Aquisição do conhecimento.
- Modelagem e desenvolvimento do sistema.

A avaliação do desempenho do SAVSE é realizada através de informações dos parâmetros de projeto para três locais fictícios.

2. PARÂMETROS DE PROJETO PARA AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DE SISTEMAS EÓLICOS

2.1 Identificação dos Parâmetros de Projeto

Dos parâmetros de projeto que atuam diretamente na viabilidade da implantação dos sistemas eólicos, podem-se listar (Pinho *et al.*, 2008):

- A disponibilidade do recurso eólico – é um dos principais parâmetros na avaliação, pois dependendo do potencial desta fonte, pode-se optar ou não pela instalação do sistema.
- Rugosidade - A rugosidade do local é também um parâmetro considerado importante na avaliação do potencial eólico, pois o mesmo tem implicação direta na forma do fluxo de vento junto ao solo e, conseqüentemente, na energia disponível.
- Disponibilidade de área para instalação - Este parâmetro é muito importante, pois em alguns casos o porte do sistema é diretamente proporcional à disponibilidade de áreas para a instalação. De nada servirá atender aos demais requisitos, se não houver área suficiente para instalação do sistema.
- O custo de instalação do sistema – outro parâmetro importante, uma vez que o mesmo é o maior limitador no dimensionamento dos sistemas.
- A sustentabilidade do sistema (gerenciamento, operação e manutenção) – parâmetro também importante na avaliação, o qual, quando não observado, leva ao insucesso os sistemas.
- O custo da extensão da rede elétrica – esse parâmetro atua pela não opção do uso do sistema eólico, caso o custo de extensão de rede seja bem inferior ao da instalação e operação do mesmo.
- Condição de acesso ao local – esse parâmetro influencia nos custos de transporte e instalação dos sistemas.
- A concentração das unidades consumidoras – esse parâmetro atua nos custos adicionais com o dimensionamento das minirredes de distribuição e na qualidade de energia entregue aos consumidores. Caso não haja uma concentração razoável das unidades consumidoras, opta-se pelo suprimento individualizado por pequenos sistemas.
- O impacto da eletricidade no cotidiano dessas famílias (impacto socioeconômico) – esse parâmetro mostra o quanto a eletricidade trouxe de benefícios ou mazelas às comunidades que não possuíam a mesma.
- O impacto ambiental – parâmetro que na atual conjuntura mundial é analisado arduamente pelos projetistas de sistemas de eletrificação. Contudo, para sistemas eólicos seus impactos são restritos ao visual, ao sonoro e à ocupação de áreas.

2.2 Seleção dos Parâmetros Relevantes Para Alimentação do Sistema Difuso

Como pode ser observado, são muitos os parâmetros que o projetista precisa conferir em estudos para executar a avaliação de viabilidade. Tais parâmetros em muitos casos não estão quantitativamente disponíveis aos projetistas e ainda dependem de outras variáveis. Nestes casos a experiência do engenheiro contará muito para a execução do projeto.

Para a obtenção de uma boa qualidade e segurança nos resultados oriundos do sistema difuso, o vetor de entrada deve ser composto de todas as possíveis variáveis, isto é, quanto maior o vetor melhor será a resposta; todavia, um grande vetor, aliado ao número de conjuntos difusos classificatórios, torna o sistema difuso bastante complexo (Wang, 1997). Portanto, selecionaram-se os seguintes parâmetros de projeto considerados mais relevantes:

1. A disponibilidade da fonte renovável (velocidade de vento);
2. A disponibilidade de área para instalação;
3. A rugosidade do solo;
4. O impacto ambiental;
5. A condição de acesso ao local.

A seleção, neste trabalho, baseou-se no fato de que, em geral, as unidades consumidoras estão concentradas; é técnica e economicamente inviável a extensão de rede elétrica pelas concessionárias; e que o custo da instalação seja somente avaliado após o dimensionamento do sistema.

3. AQUISIÇÃO DO CONHECIMENTO

Com os parâmetros de interesse já definidos, e com a ajuda e experiência de engenheiros especialistas da área foi feita a atribuição de pesos e valores a cada uma das variáveis envolvidas na avaliação. Os cinco parâmetros escolhidos são as variáveis linguísticas de entrada do sistema especialista; a variável de saída define a viabilidade de implantação do sistema, sendo consideradas três conclusões distintas: sistema inviável, sistema parcialmente viável e sistema viável.

Observa-se então a classificação das variáveis selecionadas como entradas nos seguintes conjuntos difusos conforme mostrado na Tab. 1.

Tabela 1. Variáveis Linguísticas de entrada e Classificação.

Entrada – Variáveis Linguísticas	Classificação
Velocidade média do Vento (m/s)	$V < 3,5$ m/s --- Insuficiente $3,5 \leq V < 7,5$ m/s --- Baixa $7,5 \leq V < 9$ m/s --- Média $V \geq 9$ m/s --- Alta
Rugosidade do Terreno (m)*	$Z_o < 0,01$ m --- Excelente $0,01 \leq Z_o < 0,1$ m --- Boa $0,1 \leq Z_o < 0,3$ m --- Razoável $Z_o \geq 0,3$ m --- Péssima
Disponibilidade de Área (m²)	$DA < 400$ m ² --- Nenhuma $400 \leq DA < 600$ m ² --- Moderada $DA \geq 600$ m ² --- Muita
Impacto Ambiental (0 a 10 Pts)**	$IA < 5$ pts --- Fraco $5 \leq IA < 9$ pts --- Moderado $IA \geq 9$ pts --- Forte
Condições de Acesso (0 a 10 Pts)***	$CA < 4$ pts --- Muito Difícil $4 \leq CA < 6$ pts --- Difícil $6 \leq CA < 9$ pts --- Bom $CA \geq 9$ pts --- Excelente

* Definido através da Tab. 2.

** Definido através da Tab. 3.

*** Definido através da Tab. 4.

Tabela 2. Rugosidade de acordo com o terreno. (Simões, 2004).

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

Tabela 3. Impacto Ambiental.

Impacto	Pontos
Pequena ocupação de área, baixo ruído produzidos pelo rotor eólico, nenhuma mortalidade de pássaros devido ao choque com o rotor eólico.	0 a 4
Moderada ocupação de área e de ruído produzidos pelo rotor eólico, índice de mortalidade de pássaros devido ao choque com o rotor eólico inferior aos índices de outras causas de mortes de pássaros.	5 a 9
Ocupação de área que poderia ser utilizada para outros fins, nível de ruído incomodo para as pessoas e animais produzidos pelo rotor eólico, elevado índice de mortalidade de pássaros devido ao choque com o rotor.	9 a 10

Tabela 4. Condições de Acesso ao local.

Forma de acesso ao local	Pontos
Aéreo; caminhando ou com animais de carga.	0 a 3
Rodoviário em precário estado de conservação; Fluvial sem infraestrutura portuária.	4 a 5
Rodoviário e fluvial com infraestrutura adequada	6 a 8
Rodoviário em bom estado de conservação	9 a 10

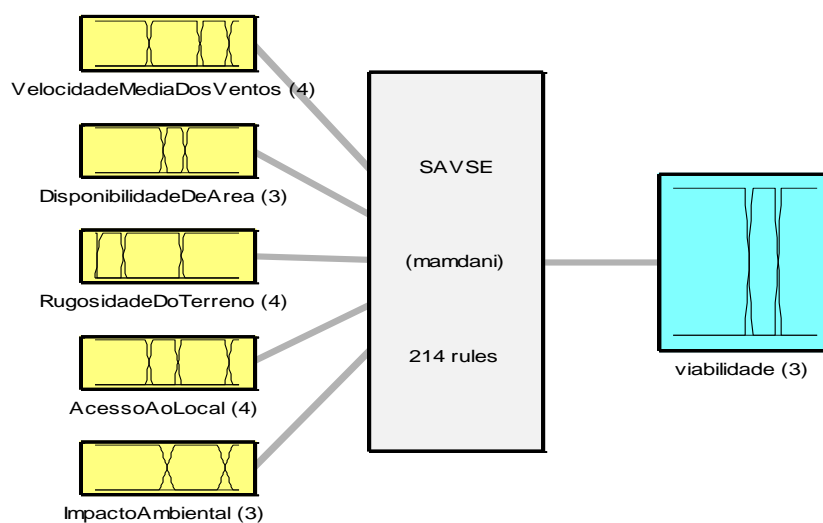
Com relação à variável de saída, neste caso, a viabilidade da implantação do sistema eólico, foi classificada nos conjuntos difusos como mostra a Tab. 5.

Tabela 5. Saída, Resposta do Sistema.

Saída	Classificação
Viabilidade, em %	$V < 50$ --- Inviável
	$50 \leq V < 70$ --- Parcialmente Viável
	$V \geq 70$ --- Viável

Quando a saída do sistema for “viável” ou “inviável”, tem-se nestes casos uma conclusão precisa da avaliação. Porém, quando a saída for “parcialmente viável” a avaliação precisa ser complementada com outros parâmetros para que a decisão de implantação do sistema tenha sucesso. Como exemplo, neste caso de parcialidade, tem-se que se um sistema cuja viabilidade é dita parcial em função da rugosidade ser considerada regular, tal sistema pode-se tornar viável aumentando-se a altura da torre, tornando o sistema um pouco mais oneroso, porém viável.

Para realizar a modelagem do SAVSE utilizou-se o *Toolbox* de lógica difusa do programa computacional MATLAB, versão 7.1 e o manual Fuzzy Logic Toolbox (2000). Essa modelagem englobou as etapas referentes à estrutura do sistema lógico difuso, a saber: fuzzificação das variáveis, a inferência difusa e a defuzzificação. A Fig. 2 mostra o sistema difuso implementado.



System SAVSE: 5 inputs, 1 outputs, 214 rules

Figura 2. Sistema SAVSE implementado.

Com a associação de todas as variáveis de entrada, o número de regras total do sistema seria de 576 regras ($4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 4$, números de conjuntos representativos das variáveis de entrada); no entanto, através do estabelecimento de pesos maiores de determinadas regras em relação a outras, o sistema fica reduzido a 214 regras. Determinou-se, por exemplo, que se a variável de entrada “velocidade de vento” assumir o valor “insuficiente”, 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. 3 (a) a (f).

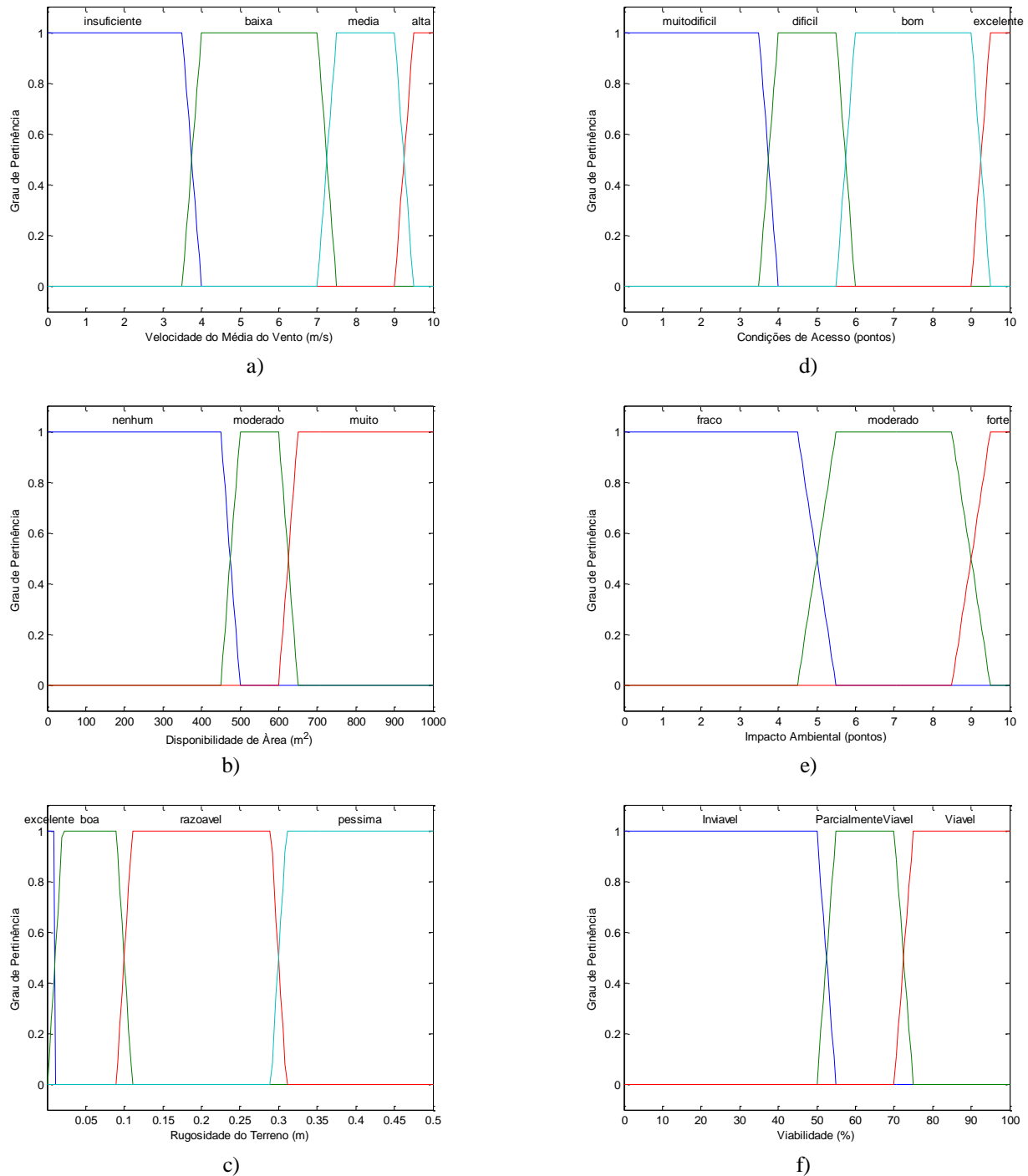


Figura 3. Funções de Pertinência do Sistema SAVSE.

Para a etapa de defuzzificação das variáveis, utiliza-se o método da Média do Máximo (M-o-M), de modo que o conjunto difuso de saída do sistema seja convertido em um valor *crisp* correspondente ao grau (%) da viabilidade da implantação do sistema eólico. O M-o-M é utilizado devido ao mesmo ser recomendado para problemas que envolvem decisões qualitativas (Shaw e Simões, 1999).

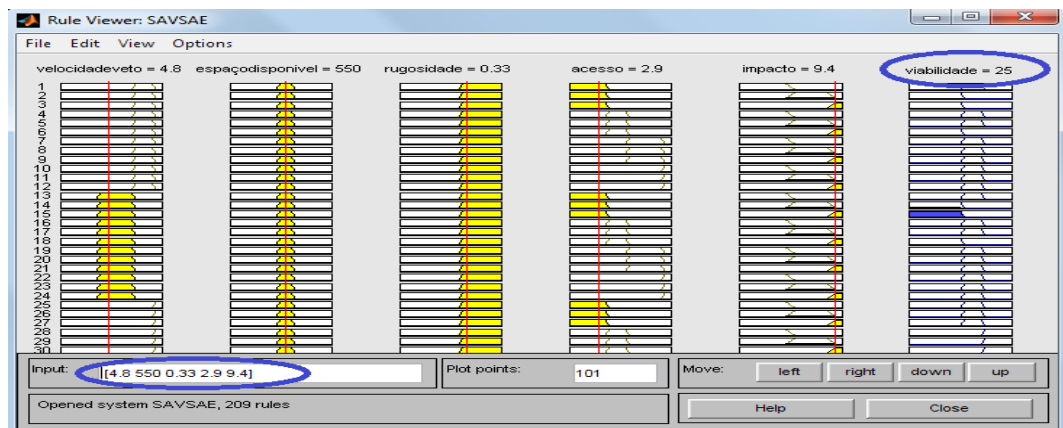
4. VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Para avaliação do sistema, realizaram-se diversos ensaios onde foram atribuídos valores fictícios às Variáveis de Entrada e, em seguida, avaliada a resposta (Variável de Saída). Para exemplificar casos onde a Variável de Saída apresenta valores diferentes quanto à viabilidade de implantação dos sistemas eólicos, tem-se a tab. 6.

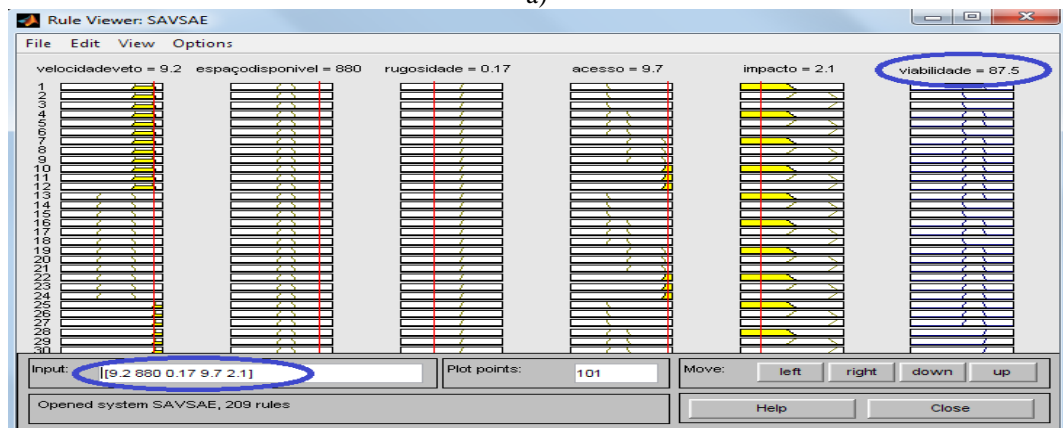
Tabela 6. Valores para Variáveis de Entrada e calculo da Saída do sistema.

Variáveis de Entrada	Local 1	Local 2	Local 3
Velocidade do Vento (m/s)	Baixa (4,8)	Alta (9,2)	Baixa (4,6)
Espaço Disponível (m ²)	Moderado (550)	Muito (880)	Moderado (480)
Rugosidade (m)	Péssima (0,33)	Razoável (0,17)	Razoável (0,294)
Condições de Acesso (Pts)	Muito Dificil (2,9)	Excelente (9,7)	Muito Dificil (3,7)
Impacto Ambiental (Pts)	Forte (9,4)	Fraco (2,1)	Moderado (8)
Viabilidade (%)	25	87,5	62,5

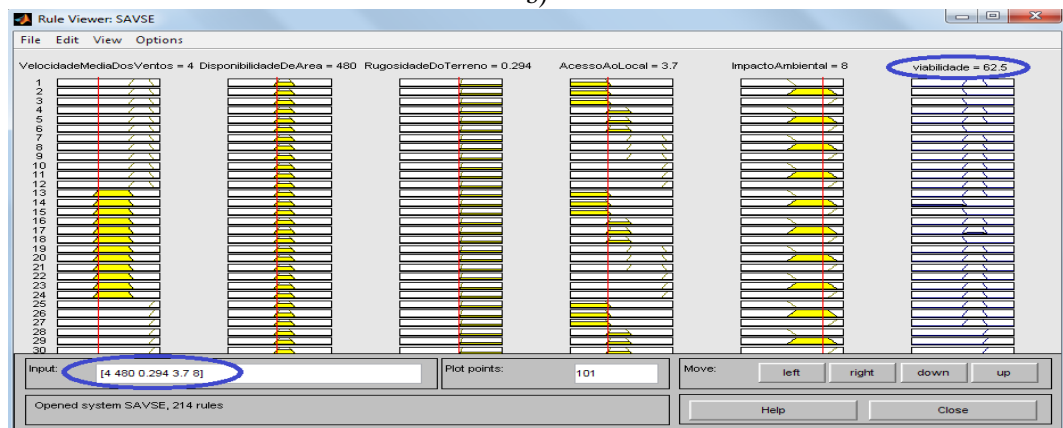
A representação gráfica do sistema difuso, com as entradas definidas na Tab. 6 e as saídas determinadas, está ilustrada na Fig. 4 (a) a (c). Na fig. 4, os destaques nos cantos superiores direitos apresentam o valor, em porcentagem, para a viabilidade de implantação de um sistema eólico gerador de eletricidade nos locais hipotéticos. Os destaques nos cantos esquerdos inferiores apresentam os valores de entrada para as Variáveis.



a)



b)



c)

Figura 4. Representação gráfica do sistema difuso com Valores de Entrada e resposta da Saída.

As regras ativadas são:

Local 1: SE (velocidade é **Baixa**) E (rugosidade é **Péssima**) E (área é **Moderada**) E (acesso é **Muito Difícil**) E (impacto é **Forte**) Então (viabilidade é **Inviável**).

Local 2: SE (velocidade é **Alta**) E (rugosidade é **Razoável**) E (área é **Muita**) E (acesso é **Excelente**) E (impacto é **Frac**) Então (viabilidade é **viável**).

Local 3: SE (velocidade é **Baixa**) E (rugosidade é **Razoável**) E (área é **Moderada**) E (acesso é **Muito Difícil**) E (impacto é **Moderado**) Então (viabilidade é **Parcialmente Viável**).

Quando se analisa o local 1, sem a ajuda computacional, é notório que suas características não são favoráveis a implantação do sistema, pois mesmo possuindo a velocidade de vento razoável para geração de eletricidade tem-se a rugosidade do terreno como péssima e acesso ao local muito difícil, o que torna este sistema muito caro caso opte-se construí-lo, desconsiderando também neste caso o forte impacto ambiental. Quando é feita a avaliação de dados pelo SAVSE, confirma-se numericamente o quanto este sistema é inviável.

Com relação ao local 2 já era esperado sua viabilidade, pois este local possui todas as características favoráveis à implantação de um sistema eólico. Observa-se ainda que se algumas características pudessem ser melhoradas, o resultado poderia ser de 100% de viabilidade.

No local 3, observa-se que todos os valores dos parâmetros de projeto foram escolhidos de maneira que estes ficassem na metade da escala de razoabilidade de cada conjunto. De acordo com isso, o resultado parcialmente viável comprova o que intuitivamente era aguardado como resposta do sistema. Mais uma vez comprovando a eficiência do SAVSE como ferramenta de auxílio de análise de viabilidade de instalação de sistemas eólicos.

5. CONCLUSÃO

A avaliação da viabilidade de instalação de sistemas eólicos está intimamente ligada a estudos do local de interesse para a instalação. Conhecer as características do vento em tal região é de fundamental importância para o sucesso do sistema instalado, porém este não é o único fator que deve ser avaliado. Observa-se que diversos parâmetros da região em estudo influenciam também na decisão de instalação. Os engenheiros em sistemas eólicos detêm o conhecimento em avaliar estes parâmetros pela experiência adquirida ao longo de anos de trabalhos desenvolvidos.

O sistema especialista aqui proposto, baseado na lógica difusa, busca fornecer através da experiência dos engenheiros um instrumento para avaliação da viabilidade de instalação dos sistemas eólicos na Região Amazônica. Portanto, o SAVSE trabalha com uma base de conhecimento adequada e local.

Rapidez e coerência na obtenção dos resultados e a simplicidade de utilização são as principais características verificadas do SAVSE. Entretanto, com implicação de obter resultados mais confiáveis, deve ser realizado um maior aprimoramento da base de conhecimento, como, por exemplo, o emprego de um maior número de entradas e ainda aumentar o número de conjuntos difusos representativos ou alterar os pesos das regras. Estas modificações podem ser facilmente realizadas dada a simplicidade de utilização desta ferramenta de avaliação.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Campus Universitário de Tucuruí – CAMTUC – UFPA – Brasil.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, C. F. de O., Pinho, J. T., Pereira, E. J. da S., Galhador, M. A. B., Vale, S. B. do E., Maranhão, W. M. de A. Situação da Geração Elétrica através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas frente a Universalização da Energia Elétrica. Agrener GD 2004, Campinas, São Paulo, 2004.
- Boyle, G. Renewable Energy – Power for Sustainable Future. Second Edition. The open University, Oxford, 2004.
- Fuzzy Logic Toolbox (2000) – User’s Guide, Version 2, The MathWorks, Inc.
- Pinho, J. T., Barbosa, C. F. O., Pereira, E. J. S., Souza, H. M. S., Blasques, L. C. M., Galhador, M. A. B., Macêdo, W. N., 2008a. Sistemas Híbridos – Soluções Energéticas para a Amazônia, MME, Brasília.
- Shaw, I. S. e Simões, M. G. (1999). *Controle e Modelagem Fuzzy*. Editora Edgard Blücher LTDA, 1a. edição, São Paulo, SP.
- 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.
- Wang, L. X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. International edition, Prentice Hall Internacional.

LOGIC FUZZY APPLIED TO FEASIBILITY EVALUATION IN THE IMPLEMENTATION OF SMALL SCALED WIND SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION IN AMAZON

***Abstract.** This paper discusses the application of fuzzy logic as an auxiliary tool for decision making regarding the deployment of wind systems small to generate electricity to isolated communities of the Amazon, which do not benefit from conventional supply of electricity. Therefore, it is implemented a prototype software called Sistema de Avaliação da Viabilidade de Sistemas Eólicos (SAVSE), this prototype was based on an adequate modeling of the reasoning of engineers specialized in regional wind systems. In terms of application of fuzzy logic, qualitative results show that the use of this strategy can be a satisfactory alternative in the feasibility evaluation.*

Keywords: Wind Energy, Fuzzy Logic, Amazon.