

# ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS DE PEQUENO PORTE PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NA AMAZÔNIA ATRAVÉS DA LÓGICA DIFUSA

**Maria de Jesus Cruz Machado** – jemachado\_@hotmail.com

**Raissa Silva Damasceno** – raissadamasceno\_9@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 o uso da lógica difusa como ferramenta de auxílio para tomada de decisão quanto à implantação de sistemas fotovoltaicos de pequeno porte para geração de eletricidade que atendam a comunidades isoladas da Amazônia que à curto e médio prazo não serão beneficiadas pela eletrificação por extensão da rede elétrica convencional ou pelo atendimento diesel-elétrico, para tanto o presente trabalho apresenta um estudo de viabilidade técnica e ambiental preliminar, porém não aborda a questão econômica do projeto. Ressaltando que hoje as concessionárias de distribuição de energia elétrica do Brasil se veem diante do desafio de atingir as metas da universalização dos serviços públicos de energia e esse desafio se torna ainda maior quando os moradores, ainda sem esse benefício, encontram-se no interior da floresta Amazônica e em pequenas ilhas. Situações como estas são a realidade das concessionárias, cooperativas ou permissionárias que possuem a concessão das áreas tipicamente amazônicas. O presente trabalho propõe a implementação de um protótipo de programa computacional, denominado de Sistema de Avaliação de Viabilidade de Sistemas Fotovoltaicos, o qual considera os parâmetros mais relevantes do projeto de sistemas solares fotovoltaicos. Através da aplicação da lógica difusa, os resultados qualitativos obtidos através das experiências de engenheiros especialistas da área e por meio da linguagem natural, pode ser uma alternativa satisfatória na avaliação da viabilidade desse tipo de projeto.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Lógica Difusa, Região Amazônica

## 1. INTRODUÇÃO

A Terra recebe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia solar, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (CEPEL/CRESESB, 1999).

A energia solar é uma fonte renovável e não poluente, constituindo recursos alternativos opcionais para geração de energia elétrica. Atualmente milhares de sistemas fotovoltaicos, em regiões com radiação solar média diária na faixa de 3 a 6 kWh/m<sup>2</sup>, estão instalados ao redor do mundo, provendo pequenas potências, aplicações em redes independentes ou em sistemas individuais em regiões isoladas (Mahmoud, 1990).

A Amazônia Legal abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, parte do Maranhão e cinco municípios de Goiás. Ela representa 59% do território brasileiro, distribuído por 775 municípios. Por toda sua extensão a Amazônia é cortada por trechos de rios e por densa floresta que abriga pequenas ou médias comunidades isoladas e que por este contexto é um grande desafio no processo de eletrificação rural. Este cenário é propício à utilização de fontes alternativas de energia locais, em especial a tecnologia solar fotovoltaica.

Desta forma, faz-se necessário que seja analisada antecipadamente a viabilidade da prática desta tecnologia. 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 regionais envolvidas no processo.

Então, decidir se o SSFE é viável ou não leva os engenheiros projetistas a dúvidas quanto ao sucesso da instalação. A lógica nebulosa possui a propriedade de capturar e trabalhar com as incertezas e verdades parciais (descritas numa linguagem natural) envolvidas nesse problema de engenharia de forma sistemática e precisa, convertendo-as para um formato numérico de fácil manipulação pelos computadores (Shaw e Simões, 1999; Wang, 1997).

Daí a concepção deste trabalho, que disarta 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 Fotovoltaico (SAVSF), o qual é baseado na teoria dos conjuntos difusos.

O SAVSF utiliza apenas os parâmetros considerados mais relevantes do projeto, sendo empregado como uma ferramenta de auxílio na avaliação da viabilidade da implantação de sistemas de eletrificação fotovoltaicos de pequeno porte (cuja capacidade de instalação não exceda 10 kW) em localidades isoladas da Região Amazônica.

A implementação do SAVSF compreendeu três etapas distintas, a saber:

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

Por último, é feita uma avaliação do desempenho do SAVSF através de informações dos parâmetros de projeto para três locais fictícios.

A Fig. 1 mostra um esquema genérico de um Sistema Solar Fotovoltaico de Energia (SSFE).

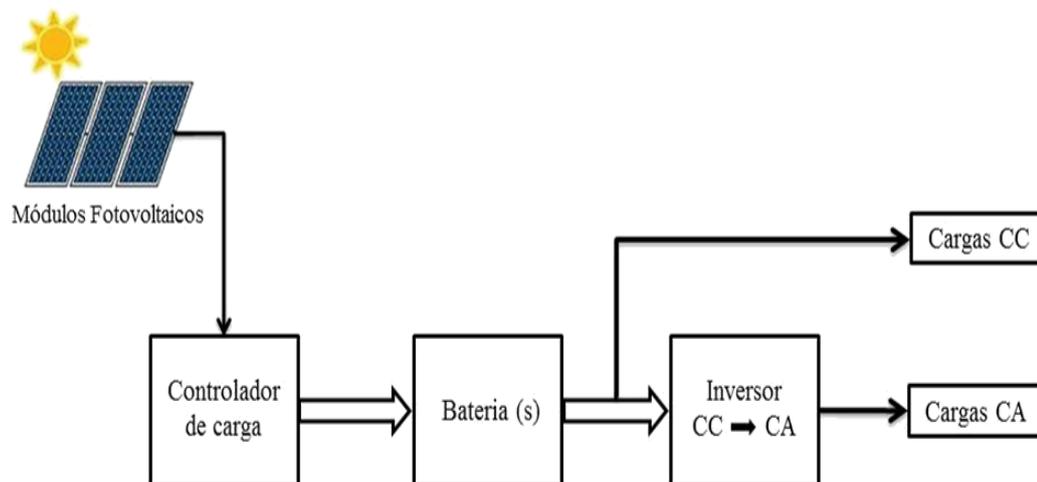


Figura 1 - Esquema de uma instalação fotovoltaica.

## 2. IMPLEMENTAÇÃO DO SAVSF

### 2.1 Escolha dos parâmetros de interesse para alimentação do sistema difuso e seleção dos mais relevantes

Dos parâmetros de projeto que atuam diretamente na viabilidade da implantação dos SSFE's, podem-se listar:

- A disponibilidade do recurso (Irradiação solar) - É um dos mais importantes parâmetros na avaliação, pois o projeto depende diretamente do potencial desta fonte.
- Disponibilidade de área para instalação - Este parâmetro também é muito importante, pois em alguns casos o porte do sistema é diretamente proporcional à disponibilidade de áreas para a instalação.
- Localização da comunidade/Acesso ao local - Esse parâmetro influencia nos custos adicionais de transporte, instalação, etc. dos SSFE's.
- A concentração das unidades consumidoras - Esse parâmetro atua nos custos adicionais com o dimensionamento das minirredes de distribuição e na qualidade da energia entregue aos consumidores. Caso não haja uma concentração razoável das unidades consumidoras, a forma alternativa de atendimento será o individualizado por pequenos sistemas.
- O custo de instalação do sistema - Outro parâmetro principal, uma vez que o mesmo é o maior limitador no dimensionamento dos SSFE's, mas não será abordado neste trabalho, pois o mesmo destina-se apenas a apresentar uma avaliação de viabilidade técnica e ambiental do sistema.
- O impacto ambiental - Parâmetro que atualmente é analisado arduamente pelos projetistas de sistemas de eletrificação. Contudo, para sistemas fotovoltaicos seus impactos são restritos ao visual e à ocupação de áreas.

Como pode ser observado, são muitos os parâmetros que o projetista precisa confrontar para executar a avaliação de viabilidade. Tais parâmetros em muitos casos não estão quantitativamente disponíveis aos projetistas e ainda dependem de outras variáveis.

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). Por isso, selecionaram-se os seguintes parâmetros de projeto considerados mais relevantes:

1. A disponibilidade do recurso (Irradiação média).
2. A disponibilidade de área.
3. O acesso ao local.
4. O impacto ambiental.

O elenco dos parâmetros supracitados baseou-se no fato que, em geral, as unidades consumidoras estão razoavelmente concentradas e que o custo da instalação seja somente avaliado após o dimensionamento do sistema.

## 2.2 Aquisição do conhecimento

Definidos na seção anterior os parâmetros de interesse a serem avaliados (Pinho *et al*, 2008), a experiência dos engenheiros em SSFE's foi determinante para atribuição de pesos e valores a cada uma das variáveis envolvidas na avaliação. Os quatro itens apresentados anteriormente: Irradiância média, disponibilidade de área, acesso ao local e impacto ambiental são considerados como variáveis linguísticas de entrada do sistema especialista. Por sua vez, a variável de saída define a viabilidade de implantação do sistema, sendo considerada neste trabalho como: inviável, parcialmente viável e viável. Logo, as informações acerca dos parâmetros de projetos e se é inviável, ou parcialmente viável, ou viável o emprego dos SSFE's para a eletrificação constituem o conhecimento adquirido.

Do conhecimento adquirido, pode-se então classificar as variáveis selecionadas como entradas e saída nos seguintes conjuntos difusos conforme mostram a Tab. 1 e a Tab. 2, respectivamente.

Tabela 1. Classificação das entradas em conjuntos difusos.

Entradas			
Irradiância Média <sup>1</sup> (IM) (W/m <sup>2</sup> )	Disponibilidade de Área (DA) (0 a 10 Pts)	Acesso ao Local (AL) (0 a 10 Pts)	Impacto Ambiental (IA) (0 a 10 Pts)
IM < 375 – Baixa	DA < 4 – Nenhuma	AL < 4,5 – Difícil	IA < 4,5 – Pouco
375 ≤ IM < 475 – Média	4 ≤ DA < 6 – Pouca	4,5 ≤ AL < 8,5 – Bom	4,5 ≤ IA < 8 – Moderado
IM ≥ 475 – Alta	6 ≤ DA < 8 – Moderada	AL ≥ 8,5 – Excelente	IA ≥ 8 – Muito
	DA ≥ 8 – Muita		

<sup>1</sup> Radiações médias anuais.

Tabela 2. Classificação da saída em conjuntos difusos.

Saídas		
x < 50% – Inviável	50% ≤ x < 85% – Parcialmente Viável	x ≥ 85% – Viável

## 2.3 Modelagem e desenvolvimento do sistema

A fim de modelar o SAVSF, foram seguidas as seguintes etapas: a fuzzificação que corresponde à transformação dos dados de entrada iniciais em suas respectivas variáveis linguísticas, e a defuzzificação que é a representação da variável linguística traduzida a um valor numérico. Na modelagem utilizou-se como ferramenta o software Matlab<sup>®</sup>, na sua versão 7.1 e o manual do toolbox da lógica fuzzy (Fuzzy Logic Toolbox, 2000).

Na etapa de fuzzificação optou-se pelas funções de pertinência trapezoidais com exceção da variável “Disponibilidade de área” na qual foi utilizada também a forma triangular. As Fig. 2 a 5 apresentam os gráficos das funções de pertinência de entrada.

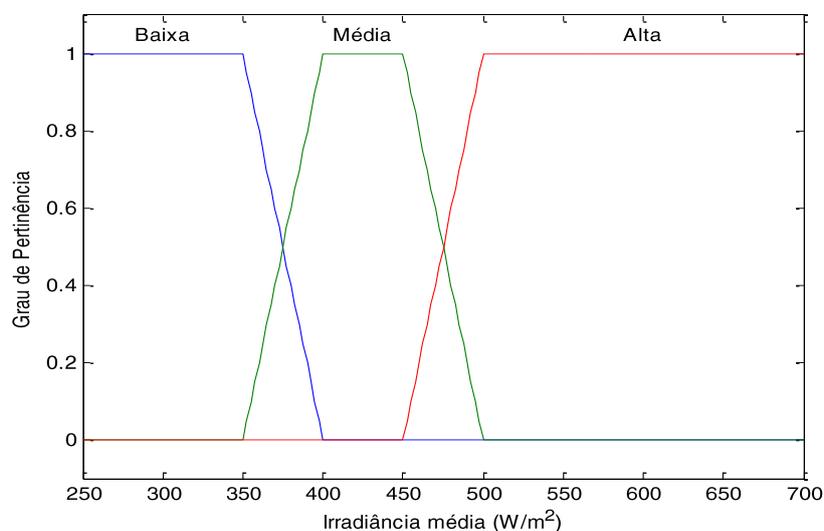


Figura 2 – Funções de pertinência de entrada - Irradiância média.

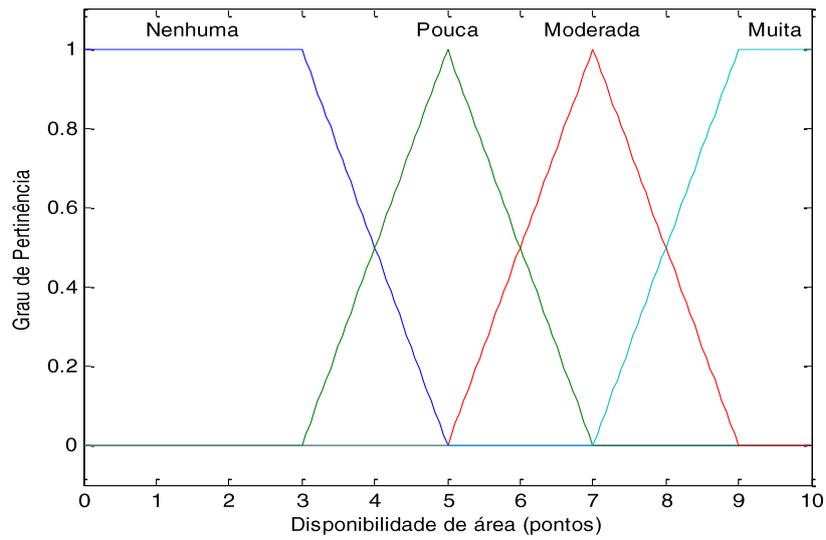


Figura 3 – Funções de pertinência de entrada - Disponibilidade de área.

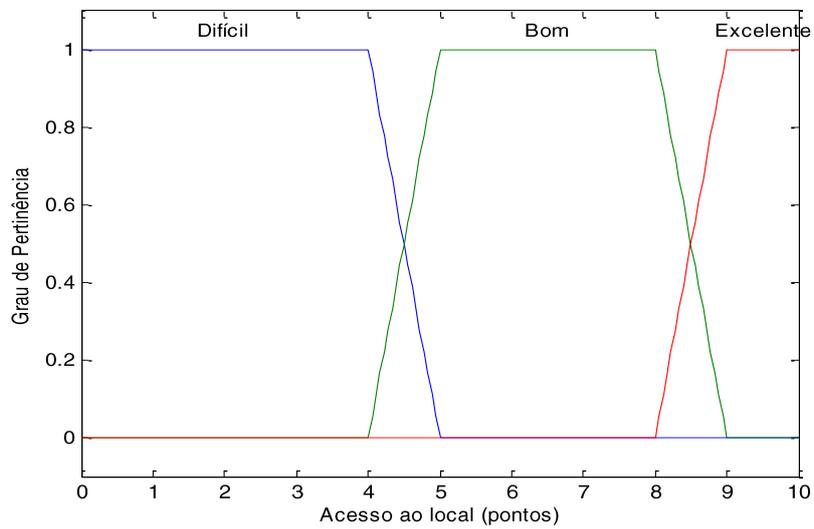


Figura 4 – Funções de pertinência de entrada - Acesso ao local.

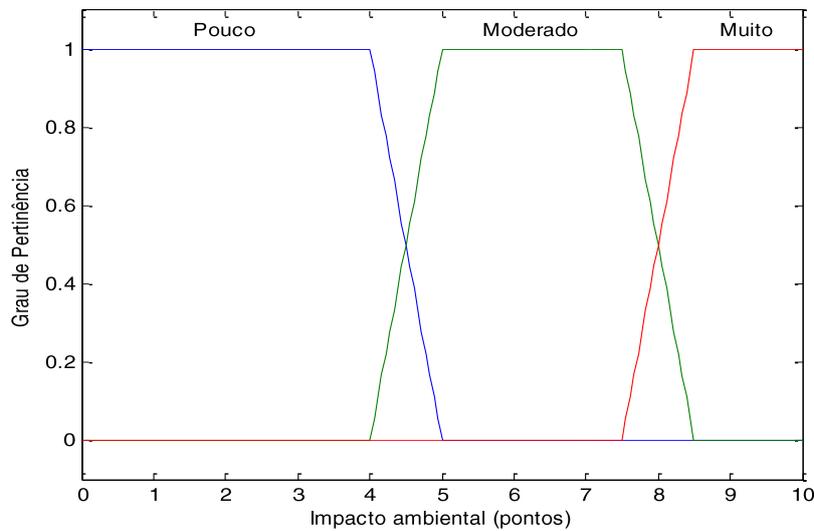


Figura 5 – Funções de pertinência de entrada - Impacto ambiental.

Após a etapa de fuzzificação, definiram-se as regras difusas *SE ... ENTÃO*, a partir do conhecimento adquirido junto aos especialistas.

Com o uso dos mapas de regras, por meio de uma simples vistoria, constitui uma maneira de otimizar o número de regras e, por conseguinte, o esforço computacional. Os mapas de regra que compõem a base de conhecimento são mostrados três dos 12 mapas formulados nas tabelas 3, 4 e 5.

Com a associação de todas as variáveis de entrada, o número de regras total do sistema seria de 108 regras (3x4x3x3); no entanto, através do estabelecimento de pesos maiores de determinadas regras em relação a outras, o sistema ficou reduzido a 54 regras (3x3x3x2).

Tabela 3 – Mapa de regras difusas.

Im – Alta Da - Moderada		Ia		
		Pouco	Moderado	Muito
Al	Difícil	Parcialmente viável	Inviável	Inviável
	Bom	Viável	Parcialmente viável	Parcialmente viável
	Excelente	Viável	Viável	Parcialmente viável

Tabela 4 – Mapa de regras difusas.

Im – Alta Da - Muita		Ia		
		Pouco	Moderado	Muito
Al	Difícil	Viável	Parcialmente viável	Inviável
	Bom	Viável	Viável	Viável
	Excelente	Viável	Viável	Viável

Tabela 5 – Mapa de regras difusas.

Im – Alta Da - nenhuma		Ia		
		Pouco	Moderado	Muito
Al	Difícil	INVIÁVEL		
	Bom			
	Excelente			

Foi determinado, por exemplo, que se a variável de entrada “Irradiância média” assumir o valor “baixo”, o resultado da variável de saída “viabilidade” será “inviável”, bem como se a variável de entrada “disponibilidade de área” assumir o valor “nenhuma” o resultado da variável de saída será “inviável” independentemente das demais variáveis.

O processo de defuzzificação do sistema iniciou-se com a seleção das funções de pertinência de saída, que de forma análoga à fuzzificação, foram selecionadas as trapezoidais (Fig. 6).

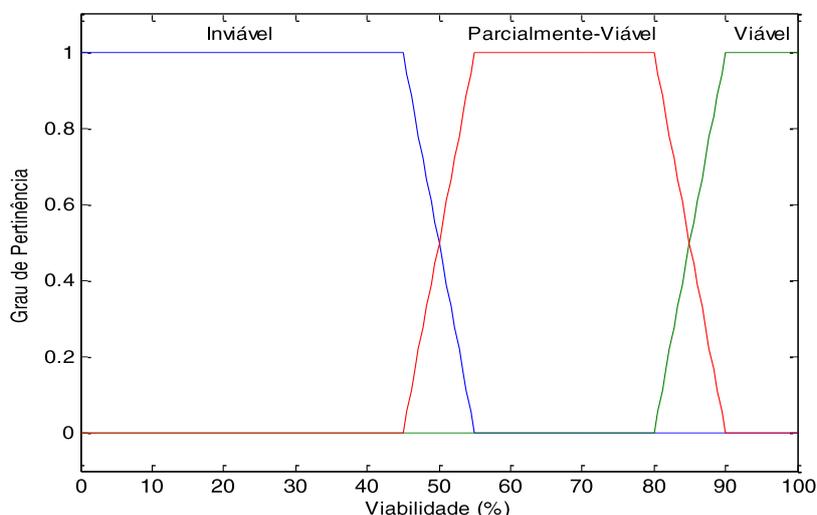


Figura 6 - Funções de pertinência de saída (Viabilidade).

Posteriormente, realizou-se a defuzzificação das variáveis por meio do método da Média do Máximo (M-o-M), a fim de converter um conjunto difuso de saída do sistema em um valor *crisp* correspondente ao grau (%) da viabilidade da implantação do sistema fotovoltaico. Segundo Shaw e Simões (1999), o M-o-M é o recomendado para problemas que envolvem decisões qualitativas.

Em resumo, o SAVSF é constituído por funções de pertinências trapezoidais com exceção da disponibilidade de área na qual foi usado um misto de funções trapezoidais e triangulares, fuzzificador trapezoidal, inferência difusa máx-prod e defuzzificador média do máximo. A Fig. 7 mostra um esquema em diagrama de bloco do sistema difuso implementado.

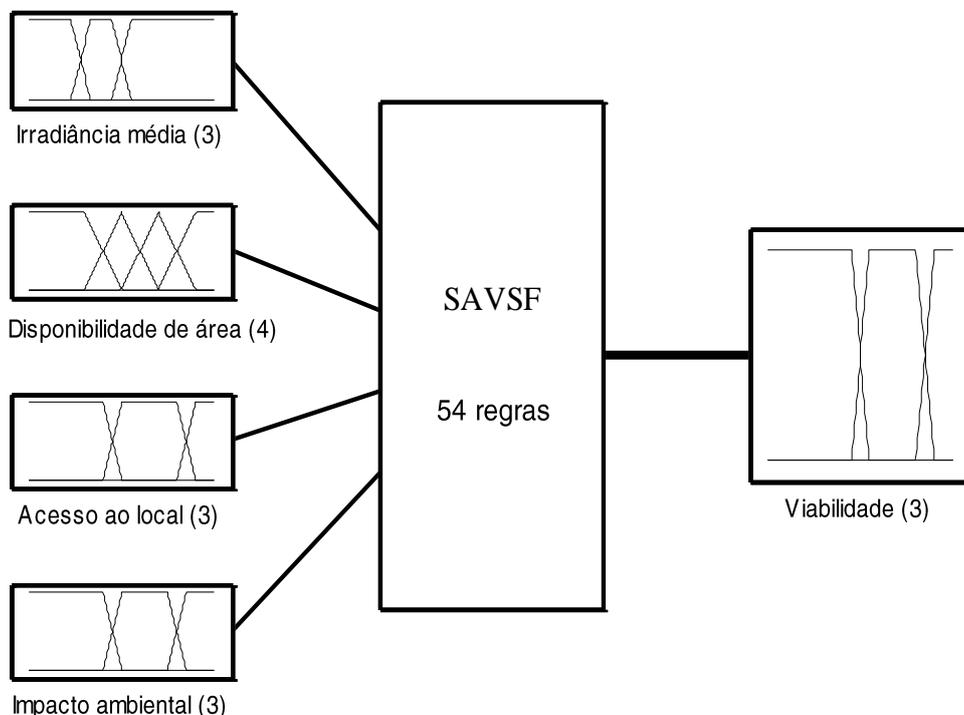


Figura 7 - Esquema em diagrama de bloco do SAVSF criado no Matlab®.

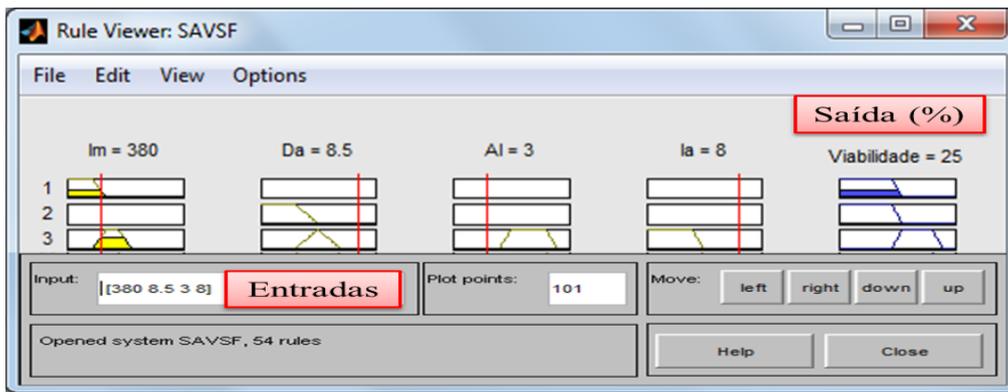
### 3 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Para avaliar o SAVSF utilizando a lógica difusa, são considerados os valores de entrada expressos na Tab. 6 para três ensaios (locais fictícios).

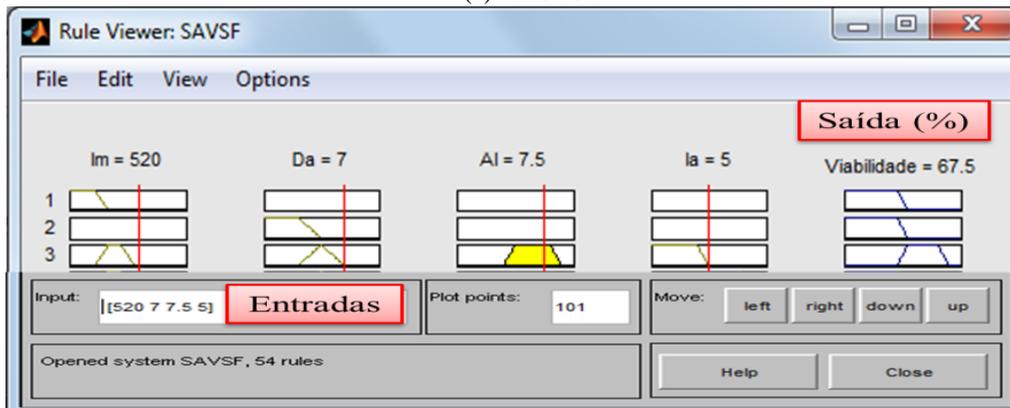
Tabela 6. Valores das variáveis de entrada para os três ensaios (locais fictícios).

Variáveis de entrada	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Irradiância média	Média (380 W/m <sup>2</sup> )	Alta (520 W/m <sup>2</sup> )	Média (425 W/m <sup>2</sup> )
Disponibilidade de área	Muita (8,5 pts)	Moderada (7 pts)	Muita (9 pts)
Acesso ao local	Difícil (3 pts)	Bom (7,5 pts)	Bom (6 pts)
Impacto ambiental	Muito (8 pts)	Moderado (5 pts)	Pouco (3 pts)

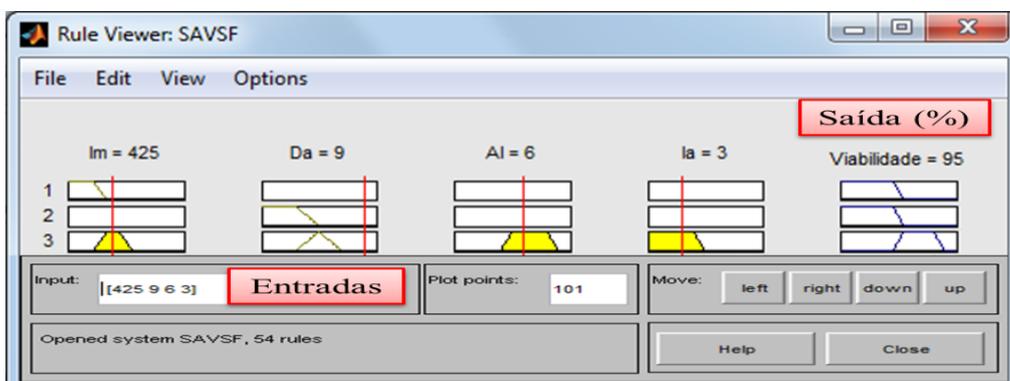
A representação gráfica do sistema difuso para as entradas dos três ensaios e suas respectivas saídas está ilustrada na Fig. 8 (a) a (c). Na Fig. 8 os destaques nos cantos superiores direitos apresentam o valor, em porcentagem, para a viabilidade de implantação de um sistema fotovoltaico gerador de eletricidade nos locais hipotéticos. Os destaques nos cantos esquerdos inferiores apresentam os valores de entrada para as Variáveis.



(a) Ensaio 1.



(b) Ensaio 2.



(c) Ensaio 3.

Figura 8 - Representação gráfica dos valores de entrada e saída.

Portanto, as regras acionadas conforme os valores definidos na Tab. 3 são:

- **Ensaio 1:** SE (IM é Média) E (DA é Muita) E (AL é Difícil) E (IA é Alto) Então (viabilidade é Inviável).
- **Ensaio 2:** SE (IM é Alta) E (DA é Moderada) E (AL é Bom) E (IA é Moderado) Então (viabilidade é Parcialmente viável).
- **Ensaio 3:** SE (IM é Média) E (DA é Muita) E (AL é Bom) E (IA é Baixo) Então (viabilidade é Viável).

De tal modo, observa-se na representação gráfica do ensaio 1 que a combinação das entradas “Acesso ao local” e “Impacto ambiental” assumirem seus piores níveis torna a implantação deste tipo de sistema inviável. Ao julgar uma faixa intermediária que corresponde ao ensaio 2, que apresenta um nível alto de Irradiância média, e com uma faixa média das outras variáveis de entrada o sistema de avaliação responde com uma viabilidade parcial como saída. Neste caso, saída “parcialmente viável”, a avaliação ainda precisa ser complementada com outros parâmetros para que a decisão de implantação do sistema tenha sucesso. Como exemplo, tem-se que se um sistema fotovoltaico cuja viabilidade é dita parcial em função do impacto ambiental moderado pela ocupação de área, tal sistema pode-se tornar viável pela utilização de áreas de coberturas de edificações ou áreas sem uso específico. No ensaio 3 tem-se entradas

que são consideradas favoráveis para a implementação de um sistema solar fotovoltaico para aproveitamento energético.

Através das regras ativadas nestes ensaios (locais fictícios) obtiveram-se os resultados esperados, confirmando assim que as informações dadas pelos especialistas são essenciais na concepção da base de regras do sistema difuso.

#### 4 CONCLUSÃO

Em quase todas as circunstâncias a energia solar é aplicável devido à sua simplicidade de instalação e portabilidade. Além disso, conta para sua popularização o fato de ser uma fonte de energia limpa que privilegia o meio ambiente, com uma longa vida útil e autossuficiência energética sem custos de combustíveis. A introdução desta fonte na matriz energética requer o conhecimento do seu comportamento para que sua geração seja considerada tanto no planejamento da expansão quanto na transmissão.

Sabe-se que o desempenho do gerador fotovoltaico é muito influenciado pelas condições climáticas, especialmente a irradiância, fator este abordado com ênfase na avaliação de viabilidade desse tipo de projeto. Neste trabalho foi proposta uma metodologia simples através do uso da lógica difusa, o que possibilitou uma modelagem adequada do raciocínio dos engenheiros de sistemas de eletrificação solar fotovoltaicos.

Os resultados qualitativos obtidos revelam que o SAVSF constitui uma ferramenta para a avaliação da viabilidade de implantação deste tipo de sistema.

Pode-se ressaltar ainda que o SAVSF trabalha com uma base de conhecimento adequada e local. Entretanto, com implicação de obter resultados mais confiáveis, deve ser realizado um maior aprimoramento dessa base, como, por exemplo, o emprego de um maior número de entradas e ainda aumentar o número de conjuntos difusos representativos.

#### Agradecimentos

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

#### REFERÊNCIAS

- CEPEL/CRESESB - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: 1999. 204p.
- Fuzzy Logic Toolbox (2000) – User's Guide, Version 2, The MathWorks, Inc.
- Mahmoud, M., Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan. IEE Proceedings, v.137, n.6, p.391-4, 1990.
- 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.
- Shaw, I. S. e Simões, M. G. (1999). *Controle e Modelagem Fuzzy*. Editora Edgard Blücher LTDA, 1a. edição, São Paulo, SP.
- Wang, L. X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. International edition, Prentice Hall Internacional.

#### FEASIBILITY EVALUATION IN THE IMPLEMENTATION OF SMALL SCALED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION IN AMAZON THROUGH FUZZY LOGIC

**Abstract.** *This document presents a study about using fuzzy logic as an auxiliary tool in order to make decisions about the implementation of small scaled photovoltaic solar systems to generate electricity to the isolated communities of the Amazon Region that in short and long term will not be benefitted by electricity provided for the extension of conventional electrical network or diesel generation, for both this paper presents a technical feasibility study and preliminary environmental, but does not address the project's economic. Nowadays, Brazilian power utilities face the challenge of reaching the goals of universalization of the electrical energy public services and this challenge becomes even bigger when the populations not yet served reside in the inner Amazon Forest or in small islands. Situations like those are reality for power utilities, cooperatives and grantees that possess permits to operate in typical Amazonian areas. This work aims at the implementation of a diffuse system prototype, namely, Photovoltaic Systems Viability Analysis System which takes into consideration the most relevant parameters of the project of photovoltaic systems. Through the application of fuzzy logic, the qualitative results obtained through the experiences of engineers with specialization in the area and through natural language, it can be seen as a satisfactory alternative in the viability analysis of this kind of project.*

**Key-words:** *Solar power, Fuzzy Logic, Amazon Region*