

## **EFEITOS DE DIFERENTES PERFIS DE CARGA SOBRE A CONFIABILIDADE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS**

**Vera L.H., Krenzinger A.\*\***

\* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Del Nordeste, Av. Las Heras nº 727, Resistencia, 3500, (Chaco) Argentina, Teléfono/Fax: 0054-3722-420076, e-mail:

lh\_vera@yahoo.com.ar

\*\* Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sarmento Leite nº 425, Porto Alegre, 90050-170, (Rio Grande do Sul) Brasil, Telefone: 0055-51-3308-6841, Fax: 0055-51-3316-6841, e-mail: arno@mecanica.ufrgs.br

### **RESUMO**

O desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos (SFA) depende, além de seu projeto técnico e da radiação solar que recebe, do perfil de carga ao qual será submetido. Neste trabalho apresentam-se os resultados, em uma base temporal horária, de simulações realizadas sobre um SFA para diferentes perfis de carga. A metodologia de simulação numérica utilizada baseia-se em balanços energéticos horários ao longo de um ano, e desta forma calcula-se a probabilidade que aconteça uma falha. A probabilidade de perda de carga no SFA foi simulada para quatro diferentes perfis de carga, e os resultados obtidos mostram a necessidade de aumentar a capacidade de geração ou de acumulação de energia para manter o mesmo grau de confiabilidade de um SFA.

**PALAVRAS CHAVE:** Sistemas Fotovoltaicos Autônomos, Confiabilidade.

### **ABSTRACT**

The performance of Stand-Alone Photovoltaic Systems (SAPS) depends, besides on its technical design and the solar irradiance, on the load profile. This article presents the results of simulations performed on SAPS for different load profiles, in hourly time basis. An hourly time step along one year was used to determine the Loss-of-Load Probability (LLP), simulated for 4 different load profiles and the results show the need for increasing the generation or accumulation capacity in order to maintain the same degree of reliability for different load profiles.

**KEYWORDS:** Loss-of-Load Probability, Photovoltaic Systems.

## INTRODUÇÃO

Como resultado da propagação de sistemas fotovoltaicos no mundo seu estudo ganhou importância, levando a utilizar diferentes metodologias de cálculo para prever o comportamento dos mesmos. Existem métodos baseados nos resultados obtidos através de softwares de simulação numérica que, em geral, são só aplicados para perfis de carga específicos (Celik, 2007), no entanto, o grau de confiabilidade encontra-se influenciado por sua distribuição temporal. Os perfis de carga em SFA variam significativamente dependendo da sua aplicação específica.

Diferentes metodologias para obter um dimensionamento ótimo de SFA foram desenvolvidas por vários autores, incluindo soluções analíticas e procedimentos numéricos. Estas metodologias são descritas e analisadas em detalhe por Benatallah et al. (2005) e Posadillo e Luque (2008). Este último apresenta também uma metodologia denominada híbrida onde utiliza métodos numéricos em conjunto com métodos analíticos para calcular a confiabilidade de um SFA.

Neste trabalho adotou-se a metodologia numérica de simulação para analisar a confiabilidade de um SFA submetido a diferentes perfis de carga. Esta confiabilidade é obtida através da combinação ótima da potência do sistema de geração fotovoltaica (FV) e a capacidade de armazenamento das baterias. Esta metodologia foi inserida dentro de um programa de simulação desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS denominado PVSize. Os modelos matemáticos utilizados para representar o comportamento de cada elemento do sistema são descritos por Vera (2004).

## ASPECTOS ECONÔMICOS DE UM PROJETO FOTOVOLTAICO

O detalhamento dos aspectos econômicos de um projeto é tão importante quanto a análise de viabilidade técnica. A definição de cada etapa e sua participação nos custos finais deve estar presente no levantamento dos encargos financeiros necessários para a análise de viabilidade do projeto.

A distribuição de custos em um SFA pode variar amplamente segundo as características de cada instalação, tornando cada projeto um estudo de caso em particular. O custo de implantação de sistemas fotovoltaicos autônomos apresenta variações no preço de 9 a 25 US\$/Wp. Kaizuca et al. (2007) relata como típico o valor de 13 US\$/Wp.

O modelo para análise financeira utilizado permite calcular automaticamente os indicadores básicos para julgar o investimento (Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno). A metodologia usada neste modelo segue o comportamento de fluxo de caixa utilizada no programa RETScreen (2005) e conceitos básicos de matemática.

## DEFINIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO A SIMULAR

A instalação a ser analisada encontra-se implantada na Floresta Nacional de Caxiuanã (Latitude: 1,67°N, Longitude: 50,44°O), a 350 km a oeste de Belém (estado do Pará). Nesta região o valor da irradiância global anual média, para uma superfície horizontal, é de 5,12

kWh/dia. Este lugar foi escolhido para este estudo, pois SFA foram instalados nesta região como alternativa para minimizar os gastos de fornecimento de combustível para grupos de geração a diesel, e os valores de implantação são conhecidos.

Para analisar o efeito de diferentes perfis de carga em SFA escolheram-se quatro tipos de consumos diários de 10 kWh/dia para intervalos horários de tempo. Os perfis escolhidos são apresentados na Fig. 1.

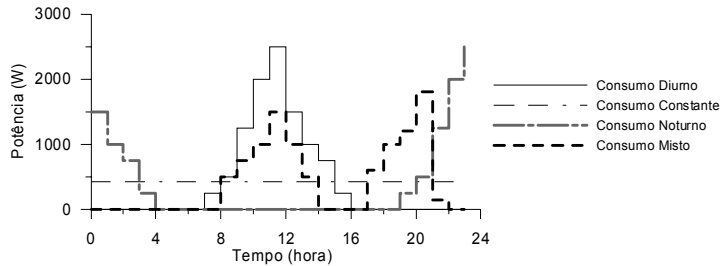


Fig. 1. Perfis de carga diários escolhidos para determinar seu efeito sobre a confiabilidade de um SFA.

O valor de 10 kWh dia não considera o efeito da eficiência do inversor, fato que produz que a carga real demandada seja maior. Este aumento na demanda estará diretamente associado ao ponto de trabalho do inversor. Considerando a eficiência do inversor a demanda energética diária é de aproximadamente 11 kWh/dia, produzindo um consumo anual de energia de aproximadamente 4 MWh.

Todos os elementos utilizados na simulação (Tabela 1) foram modelados segundo dados do próprio fabricante. Para o caso particular do controlador de carga utilizou-se na descarga uma tensão de corte que correspondente a um valor de estado de descarga da bateria de 50%, e para o corte por sobrecarga o valor adotado foi de 95 %.

Tabela 1. Custo dos Elementos que Constituem o Sistema, Tempo de Reposição ao Longo da Vida Útil do Sistema.

Componentes	Custo	Reposição (anos)	Tipo
Gerador FV (R\$/Wp)	13,8	-	Kyocera KC50T
Inversor (R\$/W)	2,75	10	Isoverter 3000
Baterias (R\$/Ah)	2,8	4	Automotivas 100Ah
Regulador (R\$/A)	27,3	10	Tristar 60
Instalação (%CI)	7,0	-	-
O&M (%CI)	1,0	1	-
Acessórios (%CI)	5,0	2	-

O custo inicial (CI) está formado pela soma dos valores investidos no sistema de geração, armazenamento e gerenciamento do sistema.

Os parâmetros empregados para realizar a análise financeira são: 25 anos de vida, custo de venda da energia gerada de 2,0 R\$/kWh, 9,6 % de reajuste anual no custo da energia, 6%

inflação anual e 10% de taxa mínima de atratividade (TMA). Os valores considerados representam a média dos valores dos últimos 10 anos no Brasil, exceto a TMA que depende da política de investimento e o valor do kWh. A taxa tributária considerada no cálculo é de 35% e 60 % do custo inicial investido será depreciado em 10 anos de forma linear.

### Determinação das falhas em um SFA para diferentes perfis de carga

O método de simulação numérica baseia-se em balanços energéticos horários ao longo de um ano onde se faz um seguimento do comportamento do sistema, para calcular, em função do tamanho dos módulos e das baterias, a probabilidade de uma falha ocorrer. A LLP está definida de duas formas diferentes, a primeira como a relação entre o déficit e a demanda de energia durante o tempo de funcionamento da instalação. A outra como a relação entre as horas em que se apresentaram estes déficits, durante o tempo de funcionamento da instalação (Ibrahim, 1995). Esta última é a utilizada neste trabalho por dar uma idéia concreta do tempo que o sistema falhou, sendo esta relação mais difícil de identificar trabalhando com valores de energia. Deve-se ter em conta que utilizando uma metodologia de cálculo ou outra, os valores de confiabilidade que se atingem são diferentes.

O número de falhas dependerá da capacidade do gerador ( $C_A$ ), definido como a relação entre os valores da energia produzida pelo gerador, e a capacidade do acumulador ( $C_S$ ) dividida pelo valor da energia consumida pela carga em um determinado intervalo de tempo. O valor de  $C_A$  depende das condições climáticas do lugar da instalação, ou seja, que é possível ter diferentes pares de valores de  $C_A$  e  $C_S$  que levam ao mesmo valor de LLP. Neste artigo os valores de LLP são calculados para valores de  $C_S$  que variam de 1 a 5.

## RESULTADOS

As curvas de LLP obtidas da simulação do SFA para os quatro perfis de carga são apresentadas na Fig. 2 em função de  $C_A$ . A Fig. 2 (a) apresenta o caso específico quando  $C_S=1$  onde a curva localizada na parte superior da figura obteve-se com o perfil de carga noturno, enquanto a curva mais próxima à região inferior obteve-se com o perfil de carga diurno. As curvas de LLP para os perfis de consumo misto e consumo constante mostram comportamentos similares e próximos. Nota-se para os quatro perfis que quando  $C_S=1$  as curvas de LLP variam significativamente para a mesma  $C_A$ .

Na Fig. 2 (b) os valores de LLP são obtidos quando  $C_S = 2$  e resulta em um comportamento semelhante ao apresentado na Fig. 2 (a), mas para o perfil noturno e diurno a distância entre as curvas de LLP para igual  $C_A$  diminuiu. Os valores de LLP para o perfil de consumo constante e misto apresentam um comportamento similar e se aproximam aos valores apresentados no perfil diurno. À medida que se aumenta a capacidade de armazenamento, as LLP para os quatro perfis continuam aproximando-se.

Nas Fig. 2 (c) e 2(d) são apresentadas as curvas de LLP para os perfis diurnos e noturnos quando a  $C_S$  vale 1, 2,3 e 5, nela observa-se que para iguais valores de  $C_S$  o valor de  $C_A$ , em determinados casos, deve ser aumentado para manter a mesma LLP. Desta forma, é possível que muitas combinações de  $C_S$  e  $C_A$  conduzam ao mesmo LLP, conclusão apresentada através da Fig. 3 (a) onde as curvas de LLP = 2% são obtidas utilizando diferentes combinações de  $C_S$  e  $C_A$ .

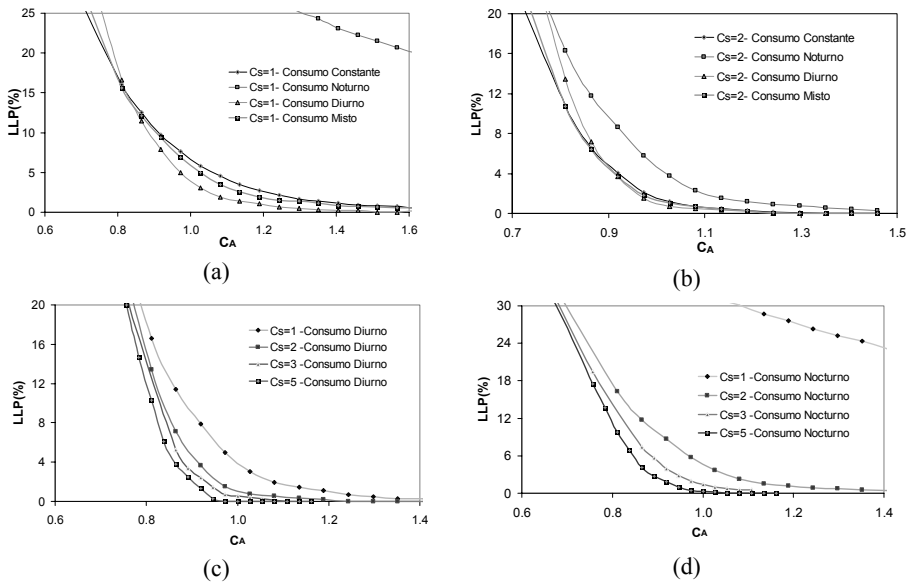


Fig. 2. Curvas De LLP Obtidas para Diferentes Configurações de  $C_S$  e  $C_A$ .

Na Fig. 3 (b) os valores de LLP são determinados em função de custo de eletricidade por kWh quando  $C_S=2$ . Nela observa-se que para um SFA com um perfil de consumo noturno, o valor do kWh para uma LLP do 1,5% é de 1,88 R\$/kWh e produz uma TIR de 10,7%. Enquanto que o mesmo sistema com um perfil de carga diurno precisa um valor de venda de 1,71 R\$/kWh para atingir o mesmo valor de LLP, e uma TIR=12,1%. Realizando este procedimento para outras relações de  $C_S$  e  $C_A$  pode-se obter a melhor relação técnica e econômica que satisfaça o nível de LLP desejado.

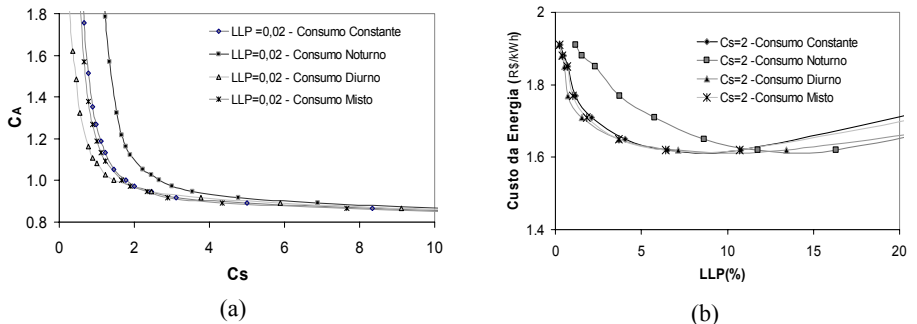


Fig. 3. (a) Curva de LLP de 2% para os Quatro Perfis de Carga Simulados. A Curva (b) Apresenta a LLP em Função do Valor de Venda de Energia para um Sistema com  $C_S=2$ .

É importante destacar que o custo de eletricidade por kWh calculado e apresentado na Fig. 3(b) inclui só uma fração da energia produzida, já que a energia excedente é perdida.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho determinou-se que a confiabilidade de um SFA varia consideravelmente quando é submetido a perfis de carga diferentes, especialmente quando as capacidades de armazenamento são pequenas (próximas de um dia). Quando a capacidade de armazenamento aumenta, seu efeito na confiabilidade do sistema se reduz. Portanto, quando é necessária um  $LLP < 0.02$  e não se conhece a distribuição temporal da demanda, a capacidade de bateria deveria ser de pelo menos dois dias.

O perfil de carga noturno foi o que apresentou as maiores LLP e custos iniciais, mais elevados, ao mesmo tempo resultou eletricidade gerada mais cara. Neste tipo de sistemas o nível de LLP e o custo de sistema são altamente dependentes do correto dimensionamento da capacidade de armazenamento.

Por outro lado, o perfil de carga diurno, com seus consumos máximos nos horários de zênite solar, foi o que apresentou os menores valores de LLP, e o sistema FV projetado para este perfil mostrou ser o que gera o kWh mais barato. Se um nível de LLP de 0.002 é aceitável, sistemas com um dia de capacidade armazenamento são adequados para este tipo de perfil. Se o critério fosse um sistema sem falhas, a capacidade de bateria deve ser aumentada já que aumentar ou o número de módulos FV não resultaria em uma diminuição da LLP.

A curva de LLP tem um limite assintótico com relação à capacidade de armazenamento, isto significa que o aumento do número de módulos FV não conduz a uma diminuição na LLP. Por tanto, uma vez que a LLP alcança o limite assintótico, deve ser aumentada a capacidade de armazenamento para obter um LLP menor.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, entidade governamental brasileira promotora do desenvolvimento científico e tecnológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benatiallah A. Et al (2005) A Comparison of Simplified and Statistical Methods of Sizing Photovoltaic Installation for a Remote Dwelling in the Saharan Region. *Journal of the Human-Environmental System*. 8; 1–6.
- Celik A.N. (2007). Effect of different load profiles on the loss-of-load probability of stand-alone photovoltaic systems. *Renewable Energy* 32, 2096–2115
- Ibrahim O. E. (1995) Sizing Stand-Alone Photovoltaic Systems for Various Locations in Sudan, *Applied Energy* 52, 133-140.
- Kaizuka et al.(2007) Trends In Photovoltaic Applications– Latest Results From The IEA PVPS Programme Surveys, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September, Milan, Italy.
- Posadillo R. e López Luque R (2008) Approaches for developing a sizing method for stand-alone PV systems with variable demand *Renewable Energy* 33, 1037–1048
- RETScreen (2005) Clean Energy Project Analysis. Third Edition, Minister of Natural Resources, Canada .
- Vera L.H. (2004) Programa para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.