

MODELO DE DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO PARA SISTEMAS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS EM AMBIENTES RURAIS¹

CARLOS E. C. NOGUEIRA², HANS H. ZÜRN³

RESUMO: Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de novo modelo para dimensionamento de sistemas integrados de recursos energéticos renováveis, aplicados a ambientes rurais, a partir da utilização de ferramentas de simulação e otimização desenvolvidas em MATLAB 6.0. O dimensionamento realizado apresenta custo mínimo e atende a determinado nível de confiabilidade desejado para o sistema, baseado no conceito de probabilidade de perda de fornecimento de energia à carga (LPSP) para horas consecutivas. Um modelo de otimização é apresentado e três diferentes cenários de dimensionamento são calculados e comparados, mostrando a flexibilidade na elaboração de diferentes concepções de projeto. Os resultados obtidos contemplam o dimensionamento completo dos dispositivos de conversão energética e análise de custos do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: recurso renovável, metodologia de dimensionamento, modelo de otimização.

OPTIMIZED SIZING MODEL FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS IN RURAL AREAS

ABSTRACT: The purpose of this research was to develop a methodology for sizing integrated renewable energy systems, useful for rural areas, using simulation and optimization tools developed in MATLAB 6.0. The sizing model produces a system with minimum cost and high reliability level, based on the concept of loss of power supply probability (LPSP) for consecutive hours. An optimization model is presented and three different sizing scenarios are calculated and compared, showing flexibility in the elaboration of different project conceptions. The obtained results show a complete sizing of the energy conversion devices and a long-term cost evaluation.

KEYWORDS: renewable resource, sizing methodology, optimization model.

INTRODUÇÃO

Sistemas integrados de energia são normalmente caracterizados pela utilização conjunta e otimizada dos recursos energéticos renováveis disponíveis em determinada localidade, tipicamente áreas remotas ou rurais.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos visando ao dimensionamento de recursos energéticos renováveis (isolados ou integrados). Dimensionamento de sistemas energéticos híbridos (solar e eólico), com ênfase no custo e/ou desempenho do sistema, foram apresentados por BEYER & LANGER (1996), PROTOGEROPOULOS et al. (1997) e CELIK (2003). Estudos de sistemas integrados, em que diferentes fontes energéticas são combinadas, foram realizados por ROZAKIS et al. (1997), BASSAM (2001) e NAKATA et al. (2005). Modelos de otimização de sistemas utilizando programação linear foram propostos por RAMAKUMAR et al. (1986), KHELLA (1997) e CORMIO et al. (2003). Cálculos probabilísticos envolvendo a probabilidade de perda de fornecimento de energia à carga (ou, do inglês, loss of power supply probability - LPSP) foram utilizados por BOROWY &

¹ Extraído da Tese de Doutorado do primeiro autor.

² Eng^o Agrícola e Eng^o Eletricista, Prof. Adjunto, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, CCET/UNIOESTE, Cascavel - PR, Fone: (0XX45) 220-3153, e-mail: cecn@correios.net.br.

³ Eng^o Mecânico-Eletricista, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Elétrica, CTC/UFSC, Florianópolis - SC.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 17-8-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 28-6-2005

SALAMEH (1996) e OFRY & BRAUNSTEIN (1983), como medida da confiabilidade do suprimento de energia.

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de novo modelo de dimensionamento de sistemas energéticos para áreas rurais, utilizando recursos renováveis locais (solar, eólico, hidráulico e biomassa) e atendendo aos critérios de custo mínimo e confiabilidade. A importância do trabalho está vinculada aos amplos benefícios sociais que um processo de energização rural otimizado pode desencadear para o País.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração do modelo de dimensionamento, foram utilizadas ferramentas de simulação e otimização desenvolvidas em MATLAB 6.0.

Dados horários de carga, radiação solar e velocidade do vento, bem como dados mensais de vazão disponível de uma queda d'água e disponibilidade de dejetos animais para produção de biogás, são utilizados no dimensionamento. Tanto parâmetros técnicos referentes aos diversos dispositivos de conversão energética, tais como painel fotovoltaico, gerador eólico, microcentral hidrelétrica, biodigestor e banco de baterias, como parâmetros econômicos, tais como custo inicial dos equipamentos, custo de manutenção, vida útil, taxa de juros anual, subsídios governamentais, prazos de pagamento e prazos de carência, são disponibilizados no modelo.

Os valores das energias solar e eólica geradas a cada hora podem ser calculados por dois métodos: (a) utilizar diretamente os dados horários sequenciais de radiação solar e velocidade do vento existentes (RAUSCHENBACH, 1980, e DALENCE, 1990), ou (b) ajustar funções densidade de probabilidade a esses dados e calcular as energias médias horárias para um dia típico no mês (BOROWY & SALAMEH, 1996).

O dimensionamento ótimo dos dispositivos de conversão energética é realizado para períodos determinados de n horas consecutivas, calculados iterativamente. A importância dessa metodologia está em evitar que, ao longo de um ano, qualquer desses períodos apresente déficit energético maior que o estabelecido pela LPSP. O modelo de otimização, detalhado a seguir, utiliza programação linear para minimizar o custo do sistema e atender à confiabilidade desejada. O algoritmo utilizado para resolver a programação linear é baseado no método primal-dual de pontos interiores.

O modelo de otimização pode ser representado como:

$$\text{Minimizar } c'x' \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a } \begin{cases} Ax' \leq b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

A função-objetivo, a ser minimizada, consiste na somatória dos custos associados aos dispositivos de conversão energética, sendo expressa por:

$$c_{(1,2n+5)} = \left[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5 \ \overbrace{0 \ \cdots \ 0}^{2n} \right] \quad (3)$$

$$x_{(1,2n+5)} = \left[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \overbrace{x_6 \ \cdots \ x_{n+5}}^n \ \overbrace{x_{n+6} \ \cdots \ x_{2n+5}}^n \right] \quad (4)$$

em que,

C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 - custos unitários, convertidos a valor presente, do painel fotovoltaico, gerador eólico, microcentral hidrelétrica, biodigestor e banco de baterias, respectivamente, US\$;

X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 - quantidades a serem otimizadas dos dispositivos energéticos citados;

n - número de horas consecutivas consideradas para o cálculo do dimensionamento otimizado;

X_6 a X_{n+5} - variáveis utilizadas para atender à LPSP estabelecida no projeto, adimensional, e

X_{n+6} a X_{2n+5} - variáveis utilizadas para permitir a ocorrência de excedentes energéticos, adimensional.

As restrições apresentadas no modelo são representadas pelas variáveis A e b, expressas como:

$$A_{(2n+1, 2n+5)} = \begin{bmatrix} -AA' & -BB' & -CC' & -DD' & -(ka EE)' & -FF & FF \\ AA' & BB' & CC' & DD' & (ka EE - EE)' & FF & -FF \\ & & & GG & & & \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_{(2n+1, 1)} = \begin{bmatrix} -LL' \\ LL' \\ LPSP \sum_{i=1}^n Lh_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

sendo:

$$AA_{(1, n)} = \begin{bmatrix} Eh1_1 & \sum_{i=1}^2 Eh1_i & \sum_{i=1}^3 Eh1_i & \dots & \sum_{i=1}^n Eh1_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$BB_{(1, n)} = \begin{bmatrix} Eh2_1 & \sum_{i=1}^2 Eh2_i & \sum_{i=1}^3 Eh2_i & \dots & \sum_{i=1}^n Eh2_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$CC_{(1, n)} = \begin{bmatrix} Eh3_1 & \sum_{i=1}^2 Eh3_i & \sum_{i=1}^3 Eh3_i & \dots & \sum_{i=1}^n Eh3_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$DD_{(1, n)} = \begin{bmatrix} Eh4_1 & \sum_{i=1}^2 Eh4_i & \sum_{i=1}^3 Eh4_i & \dots & \sum_{i=1}^n Eh4_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$EE_{(1, n)} = \begin{bmatrix} \overbrace{E \dots E}^n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$E = Cbat \quad Profdesc \quad Efbat \quad (12)$$

$$FF_{(n, n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$GG_{(1, 2n+5)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \overbrace{1 \cdots 1}^n & \overbrace{0 \cdots 0}^n \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$LL_{(1, n)} = \frac{\begin{bmatrix} Lh_1 & \sum_{i=1}^2 Lh_i & \sum_{i=1}^3 Lh_i & \cdots & \sum_{i=1}^n Lh_i \end{bmatrix}}{E_{finv}} \quad (15)$$

em que,

Eh1, Eh2, Eh3, Eh4 - energias produzidas, hora a hora, pelas unidades de geração consideradas (painel fotovoltaico, gerador eólico, microcentral hidrelétrica e biodigestor, respectivamente), kWh;

Cbat - capacidade de armazenamento energético da bateria, kWh;

Lh - energia horária consumida pela carga, kWh;

ka - valor referente ao nível inicial de carga da bateria, adimensional, podendo variar de 0 (bateria completamente descarregada) a 1 (bateria completamente carregada);

Profdesc - profundidade de descarga da bateria, adimensional, podendo variar de 0 a 1;

Efbat - eficiência de carga da bateria, adimensional, podendo variar de 0 a 1, e

Efinv - eficiência do inversor, adimensional, podendo variar de 0 a 1.

Observando as matrizes A e b, verifica-se que cada linha representa uma restrição ao modelo de otimização, totalizando três restrições.

A primeira restrição estabelece que a soma acumulada, hora a hora, da energia gerada pelas diversas fontes energéticas, considerando o armazenamento no banco de baterias, deve ser maior ou igual à soma acumulada, hora a hora, das necessidades energéticas da carga. Desse modo, o dimensionamento dos dispositivos de conversão energética é realizado considerando as necessidades de atendimento à carga e o respeito ao limite mínimo de carga permitido nas baterias (profundidade de descarga máxima estabelecida em projeto), protegendo-as contra danos ou diminuição drástica da vida útil. Nesse caso, poderá haver déficit de energia que não será suprido pela carga mínima armazenada nas baterias.

A segunda restrição, semelhante à primeira, considera também as necessidades de atendimento à carga, respeitando o limite máximo de energia suportado pelas baterias. Nesse caso, poderá haver produção excedente de energia que não será armazenada. Essa energia excedente poderá ser dissipada em resistores e utilizada para aquecimento de água. Um controlador de cargas deve ser utilizado para manter o nível de carga das baterias nos limites desejados.

A terceira restrição estabelece o limite máximo permitido para a probabilidade de perda de fornecimento de energia à carga (LPSP).

Pode-se verificar, nas duas primeiras restrições, que as ocorrências de déficits ou excedentes de energia são permitidas e viabilizadas pela matriz FF. No entanto, os eventuais déficits energéticos (quantificados pela LPSP) serão limitados na terceira restrição, e os eventuais excedentes energéticos serão limitados na própria função-objetivo, que visa a minimizar os custos de geração. Portanto, o modelo desenvolvido garante que o sistema atenda aos critérios de custo mínimo e confiabilidade, não limitando ou restringindo os valores das demais variáveis.

Uma pequena comunidade rural foi considerada para a realização do dimensionamento otimizado dos recursos energéticos renováveis, conforme apresentado no modelo. Além dos recursos solar e eólico disponíveis no local, a comunidade conta ainda com uma queda d'água de 5 m de altura, com vazões que variam de 0,08 a 0,14 m³ s⁻¹ ao longo do ano, e 30 cabeças de gado bovino adulto,

cujos dejetos podem ser utilizados na produção de biogás para geração de energia elétrica (BARRERA, 1993). Os dados referentes à carga e aos parâmetros técnico-econômicos dos dispositivos de conversão energética estão apresentados a seguir:

- Carga: energia elétrica com potências horárias uniformemente distribuídas ao longo do ano, variando de zero a 15 kW.

- Painel fotovoltaico: fabricante e modelo: Kyocera LA51; potência máxima: 51 W; área do painel: 0,438 m²; tensão de máxima potência (Vmp): 16,9 V; tensão de circuito aberto (Voc): 21,2 V; corrente de máxima potência (Imp): 3,02 A; corrente de curto-circuito (Isc): 3,25 A; coeficiente térmico de corrente (α): 1,6 mA °C⁻¹; coeficiente térmico de tensão (β): -144 mV °C⁻¹; custo inicial considerado: 5.000 US\$ kW⁻¹; custo de manutenção: 0,005 US\$ kWh⁻¹, e vida útil: 20 anos.

- Gerador eólico: fabricante e modelo: Vergnet GEV4; potência máxima: 1,1 kW; tensão de geração: 220 V; velocidade inicial do vento para geração energética: 2,5 m s⁻¹; velocidade nominal do vento, após a qual a geração é constante: 10 m s⁻¹; velocidade final do vento para geração energética: 22 m s⁻¹; custo inicial considerado: 1.800 US\$ kW⁻¹; custo de manutenção: 0,012 US\$ kWh⁻¹, e vida útil do equipamento: 20 anos.

- Microcentral hidrelétrica: queda bruta: 5 m; rendimento do conjunto turbina-gerador: 0,7; custo inicial considerado: 1.500 US\$ kW⁻¹; custo anual de manutenção: 5% do custo inicial e vida útil do equipamento: 20 anos.

- Biodigestor: eficiência de coleta: 0,9; eficiência do biogás para produção de energia elétrica: 0,25; produção de biogás a partir de dejetos de bovinos: 0,4 m³ animal⁻¹ dia⁻¹; taxa de produção de biogás ao longo dos meses: varia de 100% (para os meses mais quentes) a 40% (para os meses mais frios); poder calorífico do biogás: 5,815 kWh m⁻³; custo inicial considerado: 150 US\$ m⁻³ de gasômetro; custo anual de manutenção: 5% do custo inicial; custo anual de mão-de-obra: 20 US\$ m⁻³ de gasômetro; custo do gerador elétrico: 300 US\$ kW⁻¹, e vida útil do equipamento: 20 anos.

- Banco de baterias: tipo de bateria: chumbo-ácido de ciclo profundo; capacidade de armazenamento energético: 1,2 kWh (100 Ah, 12 V); profundidade de descarga: 0,8; eficiência da bateria: 0,85; eficiência do inversor: 0,9; custo inicial considerado: 100 US\$ kWh⁻¹, e vida útil do equipamento: 4 anos.

Considerou-se que todos os equipamentos são financiados à taxa de juros de 12% ao ano, por um período de dois anos, sem prazos de carência para o início do pagamento e sem quaisquer subsídios governamentais. Os custos indicados podem apresentar variações conforme o modelo do equipamento, o local e tecnologia de instalação, a disponibilidade de mão-de-obra local, etc.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando os parâmetros técnicos fornecidos pelos fabricantes do painel fotovoltaico e do gerador eólico, e os dados horários sequenciais de radiação solar e velocidade do vento, foram calculadas as energias solar e eólica geradas a cada hora. A partir do modelo de otimização apresentado, foram realizadas três simulações de dimensionamento, caracterizadas por diferentes índices de confiabilidade (LPSP) estabelecidos em projeto (1%; 5% e 10%), para períodos de 72 h consecutivas. Os resultados do dimensionamento para os três cenários são apresentados na Tabela 1.

Verifica-se que, quanto maior o valor estabelecido para a LPSP, menor a exigência de confiabilidade para o sistema e, portanto, menos robusto o dimensionamento realizado e menores os custos obtidos. A carga não-atendida indica a perda de fornecimento de energia que ocorre em determinados períodos, sendo esse déficit distribuído ao longo do ano, de modo que nenhum período

de 72 h consecutivas possa apresentar percentual de perda maior que o estabelecido pela LPSP. Os três cenários apresentam quantidades nulas de painéis fotovoltaicos, devido ao maior custo desses equipamentos em relação aos demais.

TABELA 1. Resultados do dimensionamento energético otimizado para três cenários.

	Cenário 1 LPSP = 1%	Cenário 2 LPSP = 5%	Cenário 3 LPSP = 10%
Número de painéis fotovoltaicos	0	0	0
Número de geradores eólicos	4	4	3
Potência da microcentral hidrelétrica (kW)	3,1	3,0	2,8
Volume do biodigestor para armazenamento do biogás (m ³)	4,0	1,7	4,2
Número de baterias	63	59	49
Energia total gerada (kWh ano ⁻¹)	38.880	37.101	34.601
Energia útil (kWh ano ⁻¹)	30.991	30.920	30.627
Energia excedente (kWh ano ⁻¹)	7.889	6.181	3.974
Carga total (kWh ano ⁻¹)	30.994	30.994	30.994
Carga não-atendida (kWh ano ⁻¹)	3	74	367
Custo total do projeto (US\$)	36.813	33.926	30.042
Custo por kWh produzido (US\$ kWh ⁻¹)	0,158	0,146	0,130

Na Tabela 2, apresenta-se a análise de custos para o Cenário 1, considerando um período de 20 anos. Na tabela, todos os custos são dados em US\$ e os consumos energéticos em kWh. Na coluna 2, mostra-se o custo inicial dos equipamentos de conversão energética (de acordo com o dimensionamento indicado na Tabela 1). Na coluna 3, apresenta-se o custo anual de operação e manutenção do sistema, incluindo eventuais custos referentes a seguros, taxas diversas, etc. Na coluna 4, apresenta-se o custo total anual do sistema, obtido pelo somatório das duas colunas anteriores. Na coluna 5, mostra-se o fator de valor presente anual, calculado com uma taxa de juros de 12%, utilizado para converter valores futuros de custo e energia (WILLIS & SCOTT, 2000). Na coluna 6, mostra-se o resultado do produto das duas colunas anteriores e representa o custo total anual convertido a valor presente. Na coluna 7, apresenta-se o consumo anual de energia, obtido da multiplicação da energia útil gerada pela eficiência do inversor utilizado. Na coluna 8, mostra-se o resultado do produto das colunas 5 e 7, e representa o consumo anual de energia convertido a valor presente.

Verifica-se que, na Tabela 2, contempla-se a distribuição temporal dos custos normalmente utilizados para o dimensionamento de sistemas energéticos. O somatório dos itens da coluna 6 representa o custo total do sistema convertido a valor presente, e o somatório dos itens da coluna 8 representa o consumo total de energia convertido a valor presente. A relação entre esses dois valores fornece o custo total da energia consumida pelo sistema (0,158 US\$ kWh⁻¹), índice de grande importância na avaliação econômica comparativa de projetos de sistemas energéticos.

O dimensionamento dos sistemas energéticos e os custos apresentados nas tabelas anteriores são fundamentais para a tomada de decisões em projetos de energização rural, considerando critérios técnicos e econômicos. O modelo de dimensionamento representa, portanto, uma ferramenta de auxílio para o estudo das configurações energéticas a serem implantadas numa comunidade rural, considerando os recursos energéticos disponíveis no local e as necessidades das cargas a serem atendidas.

TABELA 2. Análise de custos para o Cenário 1.

Ano	CI	COM	CT	FVP	CTVP	ET	ETVP
1	11.569,81	463,99	12.033,80	1,000	12.033,80	27.891,63	27.891,63
2	11.569,81	463,99	12.033,80	0,893	10.744,47	27.891,63	24.903,24
3	0,00	463,99	463,99	0,797	369,89	27.891,63	22.235,03
4	0,00	463,99	463,99	0,712	330,26	27.891,63	19.852,71
5	3.993,96	463,99	4.457,96	0,636	2.833,11	27.891,63	17.725,63
6	3.993,96	463,99	4.457,96	0,567	2.529,56	27.891,63	15.826,46
7	0,00	463,99	463,99	0,507	235,07	27.891,63	14.130,77
8	0,00	463,99	463,99	0,452	209,89	27.891,63	12.616,76
9	3.993,96	463,99	4.457,96	0,404	1.800,49	27.891,63	11.264,96
10	3.993,96	463,99	4.457,96	0,361	1.607,58	27.891,63	10.058,00
11	0,00	463,99	463,99	0,322	149,39	27.891,63	8.980,36
12	0,00	463,99	463,99	0,287	133,39	27.891,63	8.018,18
13	3.993,96	463,99	4.457,96	0,257	1.144,25	27.891,63	7.159,09
14	3.993,96	463,99	4.457,96	0,229	1.021,65	27.891,63	6.392,04
15	0,00	463,99	463,99	0,205	94,94	27.891,63	5.707,18
16	0,00	463,99	463,99	0,183	84,77	27.891,63	5.095,70
17	3.993,96	463,99	4.457,96	0,163	727,19	27.891,63	4.549,73
18	3.993,96	463,99	4.457,96	0,146	649,28	27.891,63	4.062,26
19	0,00	463,99	463,99	0,130	60,34	27.891,63	3.627,02
20	0,00	463,99	463,99	0,116	53,87	27.891,63	3.238,41
Total					36.813,20		233.335,13
Custo do Sistema (US\$ kWh⁻¹):			0,158				

CONCLUSÕES

Para todos os cenários, o dimensionamento realizado garante um sistema de custo mínimo e nível de confiabilidade desejado, sendo este estabelecido para períodos de horas consecutivas. O modelo desenvolvido, quando comparado com outros encontrados nas referências (RAMAKUMAR, 1986 e RAMAKUMAR, 1992), apresenta grande flexibilidade para a realização de simulações que visam ao dimensionamento otimizado de sistemas energéticos rurais, sendo bastante útil para profissionais que atuam na área de Engenharia Agrícola.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT/UFSC), UNIOESTE e CAPES, pelo apoio dado a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- BARRERA, P. *Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural*. São Paulo: Ícone Editora, 1993. 106 p.
- BASSAM, N.E. Renewable energy for rural communities. *Renewable Energy*, Great Britain, v.24, n.3, p.401-8, 2001.
- BEYER, H.G.; LANGER C. A method for the identification of configurations of PV/wind hybrid systems for the reliable supply of small loads. *Solar Energy*, Kidlington, v.57, n.5, p.381-91, 1996.

- BOROWY, B.S.; SALAMEH, Z.M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, New York, v.11, n.2, p.367-75, 1996.
- CELIK, A.N. Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods. *Energy Conversion & Management*, Kidlington, v.44, p.1951-68, 2003.
- CORMIO, C.; DICORATO, M.; MINOIA, A.; TROVATO, M. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Great Britain, v.7, p.99-130, 2003.
- DALENCE, G.W.H. *Modelagem probabilística de fontes eólicas de energia integradas em sistema de potência convencional*. 78 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.
- KHELLA, A.F.A. Egypt: energy planning policies with environmental considerations. *Energy Policy*, Great Britain, v.25, n.1, p.105-15, 1997.
- NAKATA, T.; KUBO, K.; LAMONT, A. Design for renewable energy systems with application to rural areas in Japan. *Energy Policy*, Great Britain, v.33, n.2, p.209-19, 2005.
- OFRY, E.; BRAUNSTEIN, A. The loss of power supply probability as a technique for designing stand-alone solar electrical (photovoltaic) systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, California, v. PAS-102, n.5, p.1171-5, 1983.
- PROTOGEROPOULOS, C.; BRINKWORTH, B.J.; MARSHALL, R. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar PV-wind power systems with battery storage. *International Journal of Energy Research*, Great Britain, v.21, p.1-15, 1997.
- RAMAKUMAR, R.; ABOUZAHR, I.; ASHENAYI, K. A knowledge-based approach to the design of integrated renewable energy systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, New York, v.7, n.4, p.648-59, 1992.
- RAMAKUMAR, R.; SHETTY, P. S.; ASHENAY, K. A linear programming approach to the design of integrated renewable energy systems for developing countries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, New York, v.EC-1, n.4, p.18-24, 1986.
- RAUSCHENBACH, H.S. *Solar cell array design handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1980. 230 p.
- ROZAKIS, S.; SOLDATOS, P.G.; PAPADAKIS, G.; KYRITSIS, S.; PAPANTONIS, D. Evaluation of an integrated renewable energy system for electricity generation in rural areas. *Energy Policy*, Great Britain, v.25, n.3, p.337-47, 1997.
- WILLIS, H.L.; SCOTT, W.G. *Distributed power generation: planning and evaluation*. New York: Marcel Dekker, 2000. 597 p.