



MODELAMENTO DE SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO/FOTOVOLTAICOS: ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO EM ÁREAS RURAIS DE BRASIL E CUBA

Jorge A. Villar Alé

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Ave. Ipiranga 6681; Prédio 30, Porto Alegre, 90619-900; Brasil
e-mail: villar@ee.pucrs.br

Felipe Hernández García

Centro de Investigaciones de Energía Solar
Micro 3; Rpto Abel Santamaria; Santiago de Cuba, 90800; Cuba
e-mail: fhdez@ee.pucrs.br

***Resumo.** Brasil e Cuba enfrentam o problema da eletrificação em comunidades isoladas dos sistemas tradicionais de distribuição da energia elétrica. A alternativa mais econômica é aquela que emprega os recursos energéticos locais, tais como a energia solar e eólica através dos painéis fotovoltaicos e os geradores eólicos. É cada vez mais comum realizar uma análise integrada de tais sistemas, que nesta forma recebem o nome de sistemas híbridos e que tem demonstrado maior confiabilidade e vantagens econômicas que os sistemas independentes. Este trabalho apresenta uma metodologia para o desenho de sistemas híbridos eólico/fotovoltaicos, a qual é exemplificada para várias demandas em zonas não eletrificadas de Brasil e Cuba.*

***Palavras-chave:** Sistemas híbridos, Sistemas autônomos, Sistemas eólicos, Sistemas fotovoltaicos*

1. INTRODUÇÃO

Em Cuba (Alabart *et al.*, 1998) o 94% das residências estão eletrificadas, o montante restante representa umas 161,000 residências localizadas em zonas rurais com um estimado de 723,600 pessoas. Estima-se que para o ano 2000 o número de residências sem eletrificação se eleve a 200,000. Rio Grande do Sul é um dos estados do Brasil com maior índice de eletrificação rural, porém o 30% das propriedades rurais (ao redor de 150,000 famílias) carecem de energia elétrica (Alé *et al.*, 1996). É conhecido que para as zonas rurais não eletrificadas resulta conveniente realizar a eletrificação a partir de recursos energéticos locais. Brasil e Cuba contam com recursos solares e eólicos que permitem o uso de painéis fotovoltaicos e de geradores eólicos, e vários trabalhos tem-se desenvolvido para analisar a viabilidade de sistemas autônomos solares e eólicos na eletrificação rural (Alé *et al.*, 1996 (II), Alé *et al.*, 1999, Moreno *et al.*, 1996). Neste trabalho é apresentada uma metodologia para o dimensionamento de sistemas híbridos eólico fotovoltaicos, sendo demonstrado que

nas faixas de demandas estudadas os mesmos são mais econômicos que os sistemas independentes.

Como resultado do trabalho foram analisados vários painéis fotovoltaico, geradores eólicos e baterias disponíveis no mercado, correlacionando as suas capacidades com o custo. Posteriormente para satisfazer uma demanda média diária foram dimensionados sistemas eólicos e fotovoltaicos autônomos, assim como sistemas híbridos.

2. RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS

A Fig. 1 mostra os recursos eólico e solar das localidades estudadas: São Simão (latitude 30°S), Brasil, e Cayo Sabinal (latitude 22°N), Cuba. Ambas localidades são representativas de zonas agrícolas e costaneiras em desenvolvimento que carecem de eletrificação. A velocidade do vento foi reportada por Ocácia (1996) e por Menéndez & Moreno (1996), e a densidade da energia eólica foi estimada utilizando o fator de energia de Rayleigh ($k_e = 1.9$).

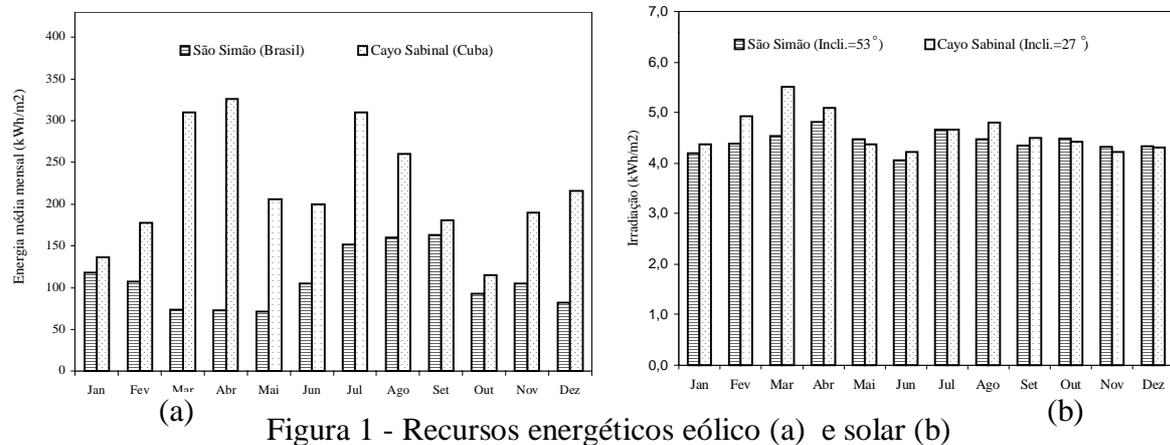


Figura 1 - Recursos energéticos eólico (a) e solar (b)

O ângulo de inclinação ótimo para os módulos fotovoltaicos, assim como aos níveis de radiação solar no plano inclinado dos mesmos foram estimados empregando as correlações de Collares-Pereira e Ralb e a de Hay e McKay (Hernández, 1999), com um coeficiente de reflexão do entorno (albedo) de 0.2. No caso de São Simão, os módulos são instalados com uma inclinação de 53° há o Norte. No caso de Cayo Sabinal a melhor inclinação corresponde a 27° há o Sul. A inclinação escolhida para cada localidade é a que reporta o maior nível de radiação dentre todos os meses críticos.

3. SISTEMAS AUTÔNOMOS INDEPENDENTES

Os sistemas estudados tem uma tensão nominal de 12V de corrente contínua com armazenamento de energia em baterias e são dimensionados para satisfazer uma demanda média diária de energia L (Wh).

3.1 Sistemas fotovoltaicos

São dimensionados segundo a seguinte equação (Lorenzo & Krenzinger, 1984):

$$N_{pv} = \frac{L}{I_m V_{cc} H_{sp}} \quad (1)$$

onde I_m (A) e V_{cc} (V) são respectivamente a corrente pico e a tensão nominal do painel fotovoltaico escolhido, H_{sp} (h) é o número diário médio mensal de horas de sol pico no plano inclinado para o mês crítico, e N_{pv} é o número de painéis fotovoltaicos em paralelo necessários para satisfazer a demanda. Para compensar algumas perdas, efeitos do ambiente sobre os painéis fotovoltaicos e outros fatores, é comum incrementar o valor de L na Eq. 1 entre 10% e 30%.

No presente trabalho foram considerados os preços dos painéis fotovoltaicos entre 10 e 120 Wp de 5 firmas produtoras. A Fig. 2a mostra na faixa de interesse o custo unitário por Watt pico de tais painéis.

3.2 Sistemas eólicos

Geradores eólicos são construídos numa maior faixa de potência, sendo possível dimensionar o sistema com apenas um gerador. A equação utilizada para o dimensionamento considerando o mês crítico é:

$$N_{wt} = \frac{L}{T \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv} \quad (2)$$

onde N_{wt} é o número de geradores conetados em paralelo, T é o número de horas (h) do período considerado, $P(v)$ representa a curva de potência do gerador (W) e $f(v)$ é a distribuição de velocidades do vento da localidade analisada, a qual pode ser representada pela função de distribuição de Weibull:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (3)$$

sendo k e c os fatores de forma e de escala respectivamente. Neste trabalho é considerado $k = 2$ (distribuição de Rayleigh).

Para a análise econômica foram considerados os preços de geradores eólicos entre 140W e 10kW de potência nominal de 9 firmas produtoras, porém não foi possível contar com a curva característica de todos eles. A Fig. 2b mostra o custo unitário por Watt de potência nominal de tais geradores.

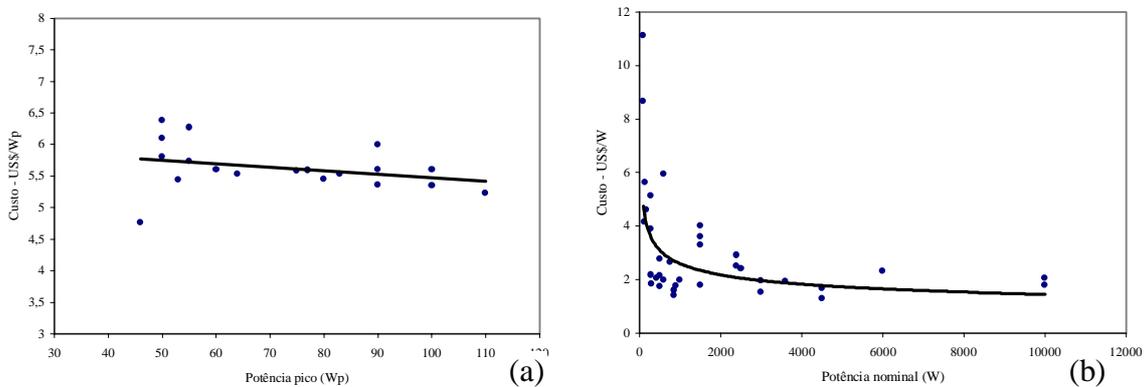


Figura 2 - Custo unitário de painéis fotovoltaicos (a) e geradores eólicos comerciais (b)

4. SISTEMAS HÍBRIDOS

Estes sistemas combinam as energias solar e eólica proporcionando uma maior confiabilidade e economia. Os sistemas estudados tem as mesmas características mencionadas para os sistemas autônomos independentes. Existem vários métodos para o dimensionamento de sistemas híbridos (RHPS)(Protogeropoulos *et al.*, 199), alguns deles baseados em análises teóricas. No presente trabalho a energia fornecida pelo sistema híbrido é dada por:

$$E_{pv} + E_{wt} > L \quad (4)$$

onde E_{pv} (Wh) e E_{wt} (Wh) representam respectivamente a energia média diária entregue pelos sistemas fotovoltaico (PVS) e eólico (WTS) durante o mês crítico:

$$E_{pv} = I_m V_{cc} H_{sp} N_{pv} \quad (5)$$

$$E_{wt} = N_{wt} \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad (6)$$

Sendo f a fração de energia que representa a participação do PVS no RHPS o número de painéis é determinado como:

$$N_{pv} = \frac{f L}{I_m V_{cc} H_{sp}} \quad (7)$$

A razão entre a energia produzida pelo PVS e a demanda é:

$$C_{pv} = \frac{E_{pv}}{f L} \quad (8)$$

O dimensionado do WTS é realizado segundo a porção de energia que é necessária para satisfazer a demanda:

$$E_{wt} = (1 - f)L \quad (9)$$

A razão entre a energia produzida pelo WTS e a demanda é:

$$C_{wr} = \frac{E_{wt}}{(1 - f)L} \quad (10)$$

A razão para o sistema de armazenamento segundo a demanda é:

$$C_{Bat} = \frac{V_B C_B PD_M}{L} \quad (11)$$

onde V_B (V) e C_B (Ah) são a tensão e a capacidade nominal da bateria, e PD_M é a máxima profundidade de descarga permitida para a mesma.

4.1 Análises de custo

O custo total de um sistema ($Custo_T$) é representado pelo capital inicial, os custos de operação e manutenção, taxas de interesse, subsídios e outros. Neste trabalho é realizada uma análise simplificada considerando só os custos mais significativos, correspondentes aos painéis fotovoltaicos ($Custo_{pv}$), os geradores eólicos ($Custo_{wt}$) e as baterias ($Custo_B$).

$$Custo_T = Custo_{pv} + Custo_{wt} + Custo_B \quad (12)$$

Segundo foi mencionado, foram analisados os custos dos painéis fotovoltaicos, os geradores eólicos e as baterias das principais firmas produtoras. Destaca-se a relação custo-potência dos geradores eólicos (Fig. 2b), a qual em comparação com os painéis (Fig. 2a) diminui em maior proporção com o aumento da potência.

5. RESULTADOS

Para as localidades de São Simão (Brasil) e Cayo Sabinal (Cuba) foram analisadas várias demandas médias diárias de energia. Os recursos energéticos disponíveis em São Simão permitem realizar uma análise para os RHPS a partir de pequenas demandas, mostrando ser economicamente atrativos. Em Cayo Sabinal, o maior potencial eólico permite dimensionar WTS mais econômicos que os RHPS para pequenas demandas, para maiores demandas os RHSP são competitivos com os WTS.

Para ambas localidades, foram considerados 05 dias de autonomia no dimensionamento dos sistemas de armazenamento para os sistemas independentes, e 02 dias para os sistemas híbridos. Os resultados a seguir mostram: I) Para São Simão uma análise para demandas de 0.5kWh, 0.7kWh e 1.1kWh por dia. II) Para Cayo Sabinal uma análise para demandas de 5.0kWh, 7.0kWh e 9.0kWh por dia.

5.1 Análises para São Simão

Geralmente o dimensionamento de um PVS é realizado a partir de um painel fotovoltaico determinado. Para obter o sistema mais econômico devem ser testados vários painéis, porém o processo torna-se lento. Uma solução para uma avaliação prática é dada na Fig. 3. A Fig. 3a é obtida a partir da Eq. 1, com um incremento de 20% na demanda e considerando que os painéis entregam em condições reais de funcionamento um 70% da sua potência pico P_M (W); isto é:

$$N_{pv} = \frac{1.2 L}{0.7 P_M H_{sp}} \quad (12)$$

A Fig. 3b mostra os custos estimados dos painéis fotovoltaicos segundo a equação de correlação da Fig. 2a. Uma rápida comprovação de ambas figuras mostra que, por exemplo, para um consumo médio diário de 200 a 250Wh apenas um painel de entre 90 e 110Wp pode ser a solução mais econômica para satisfazer a demanda.

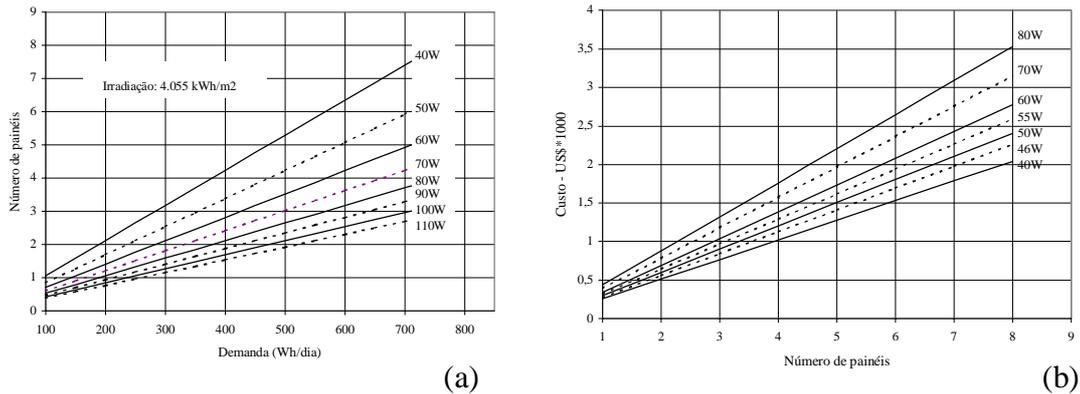


Figura 3 – Análise para o dimensionamento de PVS - São Simão

A Tabela 1 resume o dimensionamento dos PVS, WTS e RHPS para três demandas típicas selecionadas na localidade de São Simão. Cada configuração corresponde à opção mais econômica correspondente.

Tabela 1. Dimensionamento dos sistemas – São Simão

0.5 kWh	Eólico	Fotovoltaico	Híbrido
WTG	280W	-----	140W
PV	-----	2x110=220Wp	1x53=53Wp
Bateria	345Ah	345Ah	186Ah
0.7 kWh	Eólico	Fotovoltaico	Híbrido
WTG	280W	-----	280W
PV	-----	4x70=280Wp	2x70=140Wp
Bateria	420Ah	420Ah	186Ah
1.1 kWh	Eólico	Fotovoltaico	Híbrido
WTG	280W	-----	280W
PV	-----	7x70=490Wp	4x70=280Wp
Bateria	700Ah	700Ah	372Ah

A Fig. 4a mostra os custos dos diferentes sistemas para as três demandas, comprovando-se que nestas faixas os RHPS constituem a opção mais econômica. A Fig. 4b destaca que com o aumento da demanda incrementa-se a diferença entre os custos dos PVS e o RHPS, porém diminui entre os WTS e os RHPS.

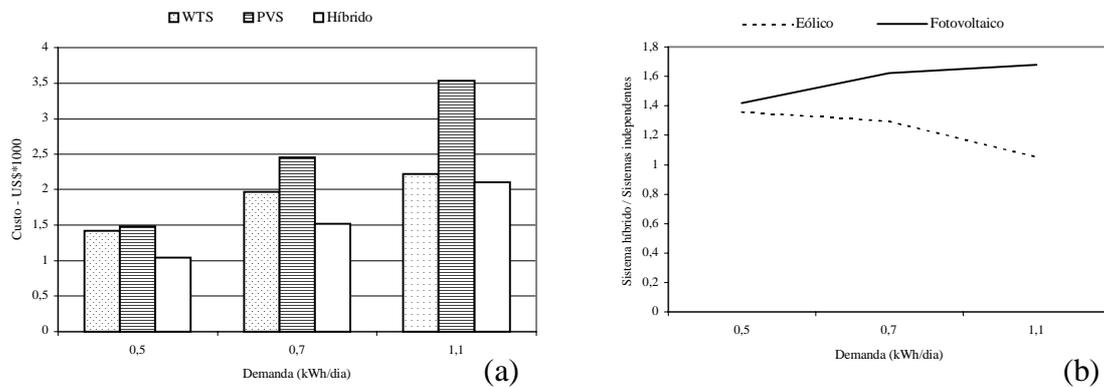


Figura 4 - Análise de custo dos sistemas - São Simão

5.2 Análises para Cayo Sabinal

A Fig. 5a mostra o número de painéis estimados para satisfazer uma faixa de demandas médias diárias entre 1.0kWh e 11.0kWh na localidade de Cayo Sabinal, sendo confeccionada a partir da Eq. 12. A Fig. 5b mostra o custo estimado do número de painéis fotovoltaicos necessários para satisfazer as demandas estudadas; novamente é utilizada a equação de correlação da Fig. 2a.

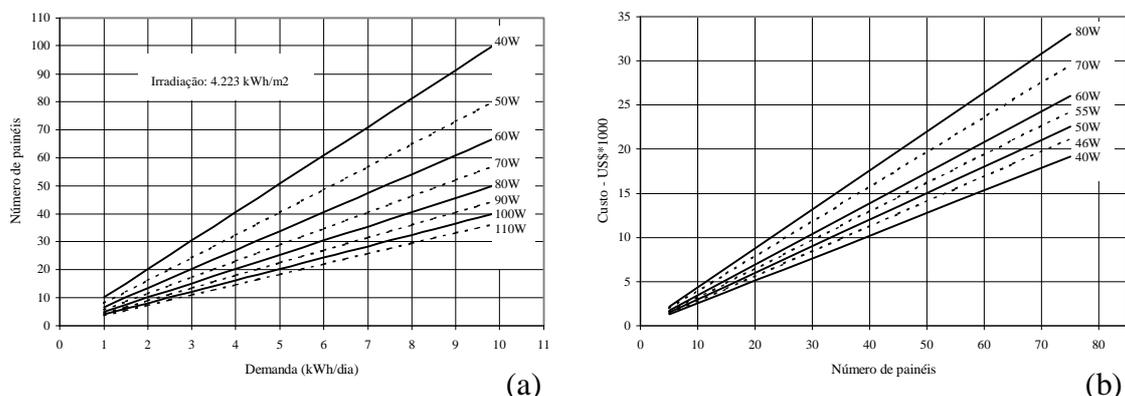


Figura 5 – Análise para o dimensionamento de PVS - Cayo Sabinal

A Tabela 2 resume o dimensionamento dos PVS, WTS e RHPS para três demandas típicas definidas na localidade de Cayo Sabinal. Cada configuração corresponde à opção mais econômica correspondentemente.

Tabela 2. Dimensionamento dos sistemas – Cayo Sabinal

5.0k Wh	Eólico	Fotovoltaico	Híbrido
WTG	1500W	-----	850W
PV	-----	38x46=1748Wp	10x46=460Wp
Bateria	3000Ah	3000Ah	1200Ah
7.0k Wh	Eólico	Fotovoltaico	Híbrido
Turbine	1500W	-----	850W
PV	-----	53x46=2438Wp	24x46=1104Wp
Bateria	4200Ah	4200Ah	1700Ah
9.0kWh	Eólico	Fotovoltaico	Híbrido
WTG	3000W	-----	2x850=1700W
PV	-----	68x46=3128Wp	12x46=552Wp
Bateria	5400Ah	5400Ah	2200Ah

A Fig. 6a mostra os custos dos diferentes sistemas para as três demandas estudadas, comprovando-se que nesta faixa os RHPS constituem a opção mais econômica. Para o caso da demanda de 7.0kWh/dia esta figura revela uma pequena diferença entre os custos do WTS e o RHPS pois não foi possível analisar um gerador eólico mais apropriado devido ao desconhecimento das curvas de potência; porém a Fig. 6b revela que a tendência, ao igual que na localidade de São Simão, é à diminuição da diferença entre os custos dos WTS e os RHPS quando incrementa-se a demanda.

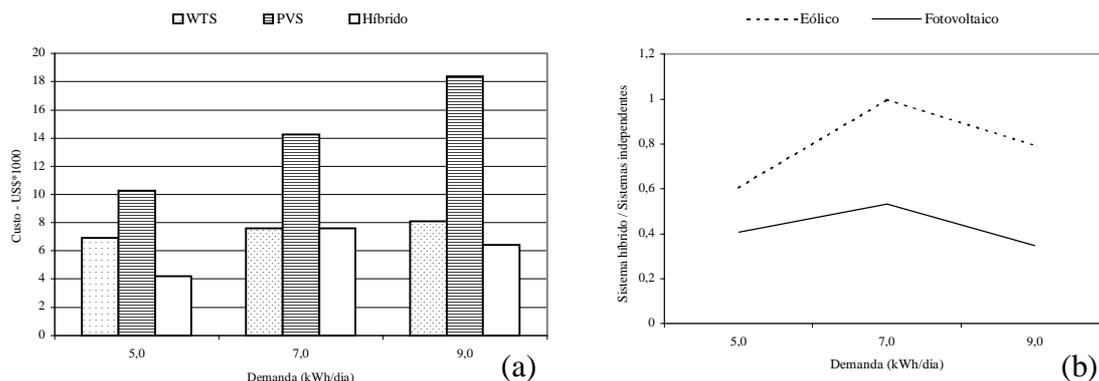


Figura 6- Análise de custo dos sistemas - Cayo Sabinal

4.3 Análises de sistemas híbridos

A análise precedente mostrou que os WTS tem um custo menor do que os PVS nas localidades analisadas quando satisfazem uma demanda dada. Por esta razão foi considerada uma maior participação dos geradores eólicos nos sistemas híbridos. A partir da energia entregue por um gerador eólico determinado, o déficit na demanda foi fornecido por painéis fotovoltaicos. Para ambas localidades o mês crítico de radiação solar passou há outros meses com maior disponibilidade de energia solar possibilitando a seleção de PVS de menor tamanho (e custo). O incremento de energia solar durante o mês crítico para São Simão foi de 10%, e para Cayo Sabinal foi de 5%.

A Fig. 7 mostra a energia gerada por WTS, PVS e RHPS dimensionados para satisfazer demandas de 0.5kWh/dia e 5.0kWh/dia nas localidades de São Simão e Cayo Sabinal respectivamente. Verifica-se para ambos exemplos que o excedente de energia anual dos PVS é o menor de todos, assim como que a energia gerada pelos geradores eólicos nos RHPS pode ser superior à demanda durante vários meses.

No RHPS de São Simão o excedente máximo da componente WTS pode ser do 39% durante o mês de Setembro em tanto que o máximo déficit pode ser de 28% durante o mês de Maio. A componente PVS pode contribuir com 34% da demanda média anual, com um máximo de 37% durante o mês de Abril e um mínimo de 31% durante o mês de Junho. Para Cayo Sabinal o excedente máximo de energia da componente WTS pode alcançar o 51% durante o mês de Abril e o máximo déficit pode acontecer durante o mês de Outubro com 26%; a componente PVS pode contribuir com 38% da demanda média anual, com um máximo de 43% durante o mês de Setembro e um mínimo de 33% durante o mês de Maio.

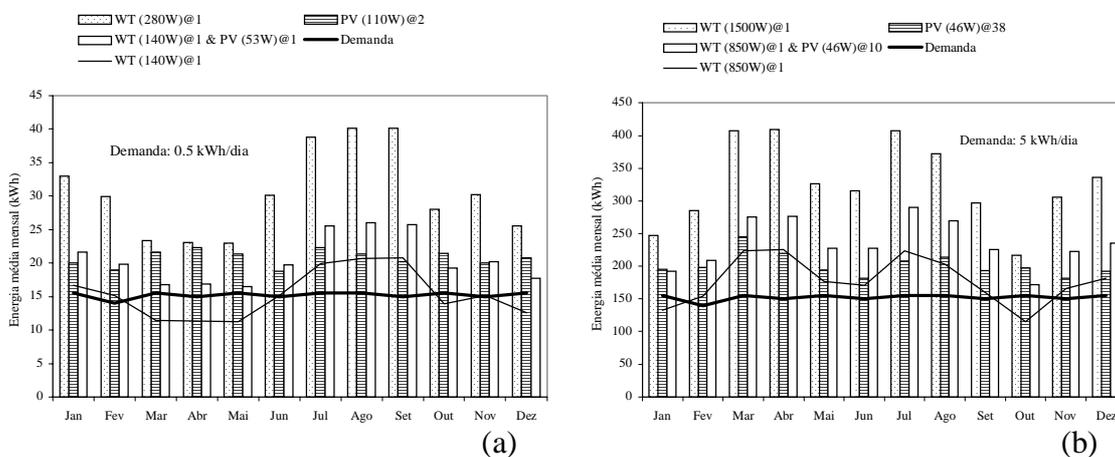


Figura 7 - Energia gerada pelos WTS, PVS e RHPS em São Simão (a) e Cayo Sabinal (b)

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi estabelecida uma metodologia para avaliar a potencialidade de sistemas híbridos eólico/fotovoltaicos empregando recursos energéticos de Brasil e Cuba. Inicialmente foram verificadas correlações de custo dos principais componentes de WTS e PVS. A análise realizada para os painéis fotovoltaicos permite determinar de modo prático o seu tamanho nos PVS e RHPS, assim como seus custos respectivos.

Os dados relativos à localidade de São Simão (Brasil) mostram um balance dos recursos renováveis. A média anual de horas de sol pico por dia é de 4.42, e a velocidade média anual do vento é de 5m/s a 10m de altitude. Com tais recursos os resultados mostram que os RHPS são competitivos com os sistemas independentes desde pequenas demandas (superior a 500Wh/dia). Os dados relativos à localidade de Cayo Sabinal (Cuba) mostram um excelente potencial eólico, com uma média anual de 6.3m/s; sendo de 4.62 a média anual de horas de sol pico por dia. Estas características permitem que os WTS sejam a opção mais econômica para satisfazer baixas demandas, sendo que os RHPS são competitivos para demandas superiores a 5.0kWh/dia.

Deve ser salientado que na presente metodologia a viabilidade de implementar o sistema híbrido fundamenta-se unicamente numa análise comparativa dos custos de instalação dos sistemas, para uma determinada demanda. Uma continuidade do presente trabalho permitirá estabelecer novos critérios de desenho analisando também os custos de energia de cada um dos sistemas e a participação mais apurada da contribuição energética de cada um dos sistemas que formam o sistema híbrido, assim como a comparação com a energia de geradores diesel e o custo pela extensão de redes elétricas de distribuição.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da PUCRS (Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul), FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CIES (Centro de Investigaciones de Energía Solar).

REFERÊNCIAS

- Alabart J.A., Batista. I., *et al.*, 1998, Sistemas Solares Fotovoltaicos, eds KarEn, Berlín.
- Alé, J.V., Duarte, O.F.P. *et al.*, 1996, Sistemas Eólicos e Fotovoltaicos de Pequeno Porte para Eletrificação Rural no Rio Grande do Sul, Brasil. Parte I, Anais do VI Simpósio Peruano de Energía Solar e II Seminario Internacional de Energías Renovables, Perú.
- Alé, J.V., Duarte, O.F.P. *et al.*, 1996, Sistemas Eólicos e Fotovoltaicos de Pequeno Porte para Eletrificação Rural no Rio Grande do Sul, Brasil. Parte II, Anais do VI Simpósio Peruano de Energía Solar e II Seminario Internacional de Energías Renovables, Perú.
- Alé, J.V. and Hernández, F., 1999, Wind and Photovoltaics Autonomous Systems for Rural Electrification in State of Rio Grande do Sul, Brazil, European Wind Energy Conference, France (in press).
- Hernández. F., 1999, Dimensionamento e Simulação de Sistemas Híbridos Autônomos para a Geração de Eletricidade, Dissertação de Mestrado (em progresso).
- Lorenzo, E. and Krenzinger, A., 1984, Manual de las Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica, UPM/IES/LS/3984.
- Menéndez, M., Moreno, C., 1996, Utilization of Hybrid Systems in Cuba, Proceedings of the European Union Wind Energy Conference, Sweden.

- Moreno, C., Soltura R. *et al.*, 1996, The Use of Wind Energy in Cuba, Proceedings of the European Union Wind Energy Conference, Sweden.
- Ocácia, G.C., 1996, Medidas e Potenciais de Vento,. Anais do II Fórum de Energia e Meio Ambiente, Brasil.
- Protogeropoulos, C., Marshall, R.H. and Brinkworth, B.J., Techno-Economic Optimization of Autonomous Wind/Photovoltaic Renewable Systems with Battery Storage, Proceedings of the 12th European Photovoltaic Energy Conference, pp. 264-267.
- Sagrillo, M., 1998, Apples and Oranges, Home Power, n. 65, pp. 18-32.

MODELING HYBRID WIND-SOLAR SYSTEMS: STUDY OF IMPLEMENTATION IN RURAL AREAS OF BRAZIL AND CUBA.

Abstract. Brazil and Cuba share a common history of a serious problems related to the electrification of their isolated communitities. The more economic alternative for the electrification is that one that uses the local energy features, such as the solar and wind energy through the photovoltaics panels and the wind turbines. It is more and more frequently to make an integrated analysis of such systems, that in this form receive the name of hybrid systems. They have demonstrated a great reliability and economic advantages than stand alone systems. This work presents a methodology for the design of hybrid wind/photovoltaic systems, which is exemplified for some demands in zones not electrified of Brazil and Cuba.

Key-words: Hybrid systems, Stand alone systems, Wind and PV systems.