

# PROTÓTIPO DE SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO: CARACTERÍSTICAS E POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Felipe Hernández García – [fhdez99@yahoo.com](mailto:fhdez99@yahoo.com)

Centro de Investigaciones de Energía Solar, Departamento de Electrificación

Arno Krenzinger – [arno.krenzinger@ufrgs.br](mailto:arno.krenzinger@ufrgs.br)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Jorge V. Alé – [yillar@puccrs.br](mailto:yillar@puccrs.br)

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

## 3.5 Sistemas fotovoltaicos autônomos e híbridos

**Resumo.** *Sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos constituem uma opção tecnológica que pode contribuir a reduzir as necessidades de energia elétrica no meio rural brasileiro. Este trabalho caracteriza um protótipo de sistema híbrido experimental e analisa os resultados obtidos com sua exploração. O sistema obedeceu a uma configuração de dois barramentos (de CC e CA), contando com geradores de praticamente igual tamanho (em torno de 400 W) e um banco de baterias de 300 Ah, com o que conseguiu satisfazer uma demanda média diária de 2,3 kWh. A partir do monitoramento realizado o vento e a radiação solar foram qualificados, determinando-se seus valores estatísticos, assim como os índices de complementaridade entre ambas fontes energéticas. Estes índices foram comparados com os recolhidos em mapas de complementaridade do Estado do Rio Grande do Sul. Como resultado é oferecido um novo mapa, com a indicação das regiões nas quais as fontes energéticas manifestam similares níveis de complementaridade e nas quais é de se esperar, que sistemas híbridos semelhantes ao protótipo estudado possam oferecer semelhantes prestações.*

**Palavras-chave:** *Energia solar e eólica, Sistemas Híbridos, Mapas de Complementaridade*

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo a ANEEL, no ano de 1999, apenas 71% das propriedades rurais do Brasil contavam com energia elétrica.

Dos estudos realizados por diversas fontes de vários países ainda não pode ser concluído se é a eletrificação quem leva ao progresso do campo, ou se pelo contrário são os resultados do progresso neste os que permitem a sua eletrificação. O que se é real é que a eletrificação é traduzida em um incremento do conforto, do nível de vida no meio rural, principalmente em decorrência da iluminação elétrica e das possibilidades para a refrigeração de alimentos e outros produtos e a utilização de equipamentos eletrodomésticos.

No Brasil, embora vários programas governamentais incentivaram a eletrificação rural alguns fatores contribuem ao não incremento significativo do nível da mesma, entre eles o econômico, pois resulta de um custo bastante elevado a manutenção de sistemas a diesel ou a extensão das linhas elétricas até usuários às vezes dispersos e afastados a grandes distâncias. Uma outra opção se mostra como alternativa sustentável, a partir da utilização de recursos energéticos locais, como os resultantes de quedas de águas, de resíduos agro-florestais ou ainda da energia solar e a eólica. Estas alternativas têm também um custo elevado, porém às vezes se mostram como as únicas tecnicamente factíveis e/ou de menor custo.

A utilização de sistemas eólicos e fotovoltaicos autônomos no Estado do Rio Grande do Sul é objeto de estudo de vários pesquisadores e vários são os exemplos de sistemas bem sucedidos no mesmo, a partir do acionar de algumas empresas que atuam no setor. Porém a radiação solar e o vento, como fontes renováveis de energia, não têm uma manifestação permanente durante o dia e seus níveis variam ao longo do ano por fenômenos sazonais e até locais. Deste modo os sistemas têm que ser dimensionados para a condição de mínima disponibilidade energética, o que resulta em um custo elevado dos seus geradores, devido a seu tamanho.

Neste trabalho é analisada a possibilidade de utilizar um sistema híbrido eólico-fotovoltaico no Estado, que permite o aproveitamento de ambas fontes de energia e que por tanto, ao possuir geradores de menor tamanho, poderia resultar em uma opção mais econômica para algumas regiões. A análise é baseada nos resultados obtidos com a exploração de um sistema híbrido no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, considerando índices e mapas de complementaridade entre as energias solar e eólica do Estado.

Os índices e mapas de complementaridade tornam-se uma ferramenta de muita utilidade para a avaliação inicial da possibilidade local de aceitar sistemas híbridos onde, estudos mais particulares determinarão as possibilidades reais assim como o tamanho adequado para cada tipo de componente.

O “protótipo” sugerido é capaz de fornecer, ao menos, uns 70 kWh mensais de energia elétrica o que constitui um nível de consumo bastante aceitável, inclusive semelhante ao utilizado por um grande número de usuários das grandes cidades.

## 2. CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO DE SISTEMA HÍBRIDO

O sistema híbrido empregado como referência para este trabalho esteve em funcionamento no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, recebendo a influência da radiação solar ocorrente na cidade de Porto Alegre, cujas coordenadas geográficas são: 30° de latitude Sul e 51° de longitude Oeste.

Os componentes do sistema híbrido foram um aerogerador de 400 W de potência nominal, um painel com 8 módulos fotovoltaicos de silício monocristalino, de potências que variam entre os 46 e os 65 W, um controlador de carga, um banco de baterias de 300 Ah, um inversor senoidal e um conjunto de cargas de corrente contínua e corrente alternada. A tensão em CC do sistema foi de 24 V.

Topologicamente, o sistema híbrido pode ser representado por uma configuração de dois barramentos, sendo estes o de corrente contínua, que interage com os geradores e cargas desse tipo, e o de corrente alternada, para a alimentação das cargas correspondentes.

A instalação contou também com um sistema de monitoramento que permitiu a medição das variáveis associadas.

Como o Laboratório está localizado em um vale, decidiu-se instalar um túnel ou gerador de vento para acionar o aerogerador. As mudanças na velocidade do vento foram realizadas através de um sistema de controle implementado em um computador que permitiu o acionamento automático do túnel e que facilitou a reprodução de diferentes padrões de velocidades do vento no mesmo (García *et al.*, 2002).

### 2.1 Características do gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico ou painel do sistema híbrido esteve montado sobre o telhado de um dos prédios do Laboratório, com inclinação de 30° e orientação Norte.

Os módulos fotovoltaicos utilizados foram adquiridos através de diferentes projetos de pesquisas e portanto têm potências diferentes. Esta peculiaridade foi aproveitada em pesquisas prévias para estudar as associações de módulos e comprovar a influência das diferenças entre os mesmos sobre o funcionamento de um painel. Como não se tinham outros módulos disponíveis, o painel foi mantido nesta pesquisa, inclusive na sua configuração série/paralelo, para não desestruturar as conexões já realizadas. Salienta-se que associações com módulos de diferentes modelos podem ser necessárias quando um painel tem sua potência expandida e modelos iguais aos originais não estão disponíveis. Para conseguir uma tensão de 24 V deveram ser conectados dois módulos em série, conforme mostra a Fig. 1. A Tab. 1 mostra as características elétricas dos módulos fotovoltaicos empregados (modelos Siemens), extraídas das suas curvas de potências, as quais foram levantadas em uma bancada refrigerada sobre condições padrão.

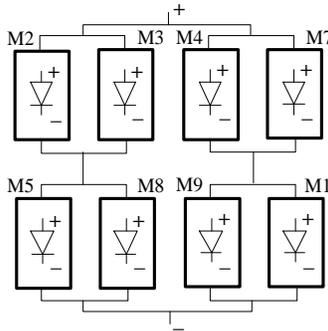


Figura 1 – Associação dos módulos fotovoltaicos no sistema híbrido experimental.

### 2.2 Características do gerador eólico

O aerogerador empregado no sistema híbrido é uma unidade do modelo Air 403, de 400 W de potência nominal. Este modelo conta com uma turbina eólica de 3 pás, acionada a barlavento e acoplada diretamente ao gerador elétrico, o qual é constituído por um alternador sem escovas e com ímãs de *neodymium* no seu rotor. Algumas das características da máquina são mostradas na Tab. 2.

Embora este aerogerador seja muito robusto e confiável, alguns pesquisadores e técnicos reclamaram sobre a produtividade anunciada pelos fabricantes, a partir da não observância da potência na máquina para as correspondentes velocidades do vento. Esta informação é oferecida com o nome de curva de potência, a partir da qual, com diversos métodos, pode estimar-se a energia fornecida por um aerogerador sobre determinado regime de vento.

Tabela 1. Características elétricas dos módulos fotovoltaicos utilizados.

Módulo	No. De células	$P_m$ (W)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)
No.1	36	66,1	16,32	4,05	21,32	4,51
No.2	36	62,5	16,07	3,89	21,05	4,33
No.3	33	48,6	15,56	3,12	19,70	3,48
No.4	33	48,4	15,56	3,11	19,59	3,38
No.5	33	48,6	15,62	3,11	19,60	3,38
No.7	33	46,1	15,49	2,98	19,58	3,30
No.8	30	41,7	14,03	2,97	17,73	3,27
No.9	30	40,2	13,85	2,91	17,77	3,20
Total		420,0				

Fonte: Hecktheuer e Krenzinger, 2000

Tabela 2. Características do aerogerador.

Parâmetro	Valor
Tensão nominal	24 V
Potência nominal	400 W
Velocidade nominal	12,5 m/s
Velocidade de partida	3,0 m/s
Número de pás	3
Diâmetro da turbina	1,15 m
Área da turbina	1,04 m <sup>2</sup>

Fonte: Southwest Windpower, 1999

A curva de potência dos micro e pequenos aerogeradores pode ser obtida com o mesmo procedimento com que é realizada para os aerogeradores de grande porte. O procedimento conhecido como método de *bins* considera intervalos regulares de velocidades do vento (comumente 1 m/s) nos quais determina-se o valor médio da potência produzida. A curva de potência é traçada com estes valores e o valor médio da velocidade do vento de cada intervalo considerado e é o documento que permite estimar a potência que estaria fornecendo um aerogerador para uma determinada velocidade do vento.

Os aerogeradores de grande porte, por estarem conectados a redes de altas demandas, podem fornecer o máximo da sua potência para cada velocidade do vento. Isto não necessariamente acontece nas instalações autônomas, onde a demanda varia em função do estado de carga das baterias e dos consumidores que estão ligados a cada instante.

Para conferir a curva de potência do aerogerador assim como para estudar a influência do estado de cargas das baterias sobre o comportamento do mesmo, foram realizadas experiências varrendo toda a faixa de velocidades do vento do túnel para tensões constantes do banco de baterias. Os incrementos na velocidade do vento foram da ordem de 1 m/s; a tensão por sua vez foi incrementada 1 V em cada experiência. A Fig. 2 mostra os resultados.

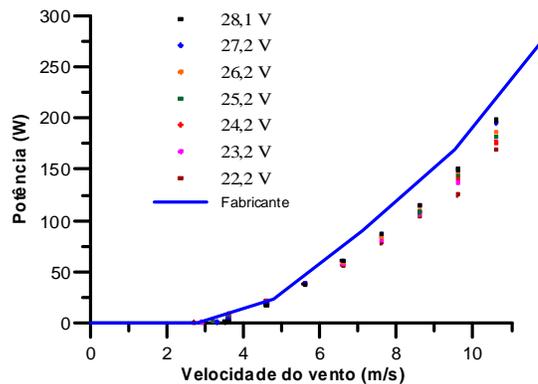


Figura 2 – Dependência da potência do aerogerador com a tensão do sistema.

A tendência das medições na Fig. 2 sugere que para velocidades do vento acima das que foram medidas, as diferenças entre as potências produzidas para diferentes tensões do sistema sejam maiores. Da mesma forma, os resultados sugerem que a curva do fabricante poderia estar superdimensionada, sendo que a extrapolação das medições revela que a potência nominal não seria fornecida a 12,5 m/s, mas sim ao redor de 15 m/s. A Tab. 3 mostra que este “detalhe” não é pouco significativo, pois a potência, e portanto a energia fornecida, é no mínimo 24% inferior quando

considerada a velocidade nominal da máquina (12,5 m/s). Para obter esta estimativa foram ajustados os pontos da Fig. 2 a polinômios de segundo grau.

Tabela 3. Diferenças relativas entre a potência nominal dada pelo fabricante (400 W) e a possível de se obter a 12,5 m/s.

Tensão do banco de baterias (V)	Potência estimada a 12,5 m/s (W)	Diferença relativa (%)
22,2	251	37
24,2	254	36
26,2	273	32
28,1	306	24

### 2.3 Características do banco de baterias

Um banco de baterias consiste de várias baterias conectadas em série e/ou paralelo para alcançar a tensão e a capacidade de acumulação necessárias para a adequada operação do sistema. Valores típicos de tensão são de 12, 24 e 48 V, sendo que são mais comuns baterias de chumbo-ácido de 6 e 12 V.

No dimensionamento do banco de baterias de uma instalação participam vários fatores, como o padrão energético da fonte primária e a magnitude da carga e a sua importância, entre outros. Para o sistema híbrido analisado, o critério foi mais do tipo técnico, tendo sido escolhido um banco adequado para um regime de carga em 10 h à corrente máxima dos geradores do sistema (em torno de 20 A).

Como a tensão nominal do sistema híbrido seria de 24 V, escolheu-se uma combinação de 2 baterias de 12 V em série. Foram escolhidas baterias automotivas de chumbo-ácido, livres de manutenção e 150 Ah de capacidade (Delphi Freedom modelo DF150). Para atender o critério técnico seriam necessários cerca de 200 Ah de modo que foi duplicada a combinação série, obtendo-se uma associação série/paralela de 300 Ah de capacidade. Isto permitiu que uma maior quantidade de energia primária fosse aproveitada, pois de outro modo, com o carregamento do banco, os controladores de carga barrariam a conversão.

### 2.4 Outros componentes

**Controladores de carga.** O papel do controlador de carga da instalação é o de proteger o banco de baterias contra cargas e descargas excessivas. Igualmente são protegidos os aparelhos consumidores, cuja vida ver-se-ia diminuída ao trabalhar fora das suas especificações técnicas.

Para a proteção do banco de baterias contra sobrecargas o aerogerador dispõe de um controlador interno, que interrompe o fornecimento de energia quando a tensão alcançar um valor previamente determinado. Tal valor pode ser ajustado, através de um potenciômetro disposto na parte exterior do corpo da máquina.

O controle da descarga do banco de baterias é uma opção que geralmente acompanha os equipamentos que controlam o consumo nas instalações autônomas. O sistema fotovoltaico do Laboratório contava com um controlador que realizava estas funções. Seu princípio de funcionamento, para o caso da carga, era baseado na modulação do período de fornecimento, segundo a magnitude da corrente do painel, até impedir o passo da mesma, quando as baterias estavam carregadas. Tal princípio é ótimo para as instalações autônomas mas dificultava a qualidade da medição da corrente fornecida. Por outro lado, tinha-se a intenção de estudar a influência do estado de carga do banco de baterias sobre o comportamento da instalação e por isto seria necessária a regulação dos níveis de carga/descarga.

Por estes motivos foi elaborado um controlador de carga híbrido, através do qual foi possível a regulação manual e automática dos níveis de tensão. O equipamento eletrônico permitiu o funcionamento autônomo e automático da instalação. Neste último caso seria comandado por um controlador digital implementado no computador encarregado do monitoramento e controle da instalação. A função autônoma foi permanente, pois permaneceu como proteção redundante durante o funcionamento automático.

O equipamento incorpora a chamada histerese, ligando e desligando os elementos de acionamento, constituídos por relés eletromagnéticos, em níveis de tensões diferentes do banco de baterias. Nas experiências recolhidas no presente trabalho o equipamento operou com os níveis de tensão indicados na Tab. 4.

Tabela 4. Níveis de tensão do controlador de carga.

Tensão de:	Automático		Autônomo	
	Painel	Carga	Painel	Carga
interrupção (V)	28,5	21,9	28,2	22,2
re-conexão (V)	25,2	24,8	25,2	24,8

**Elementos de consumo (carga elétrica).** O painel fotovoltaico e o aerogerador forneceram energia elétrica através do barramento de corrente contínua às cargas do mesmo tipo e ao banco de baterias. Quando o fornecimento foi superior à

demanda, o banco de baterias absorveu o excedente. De outro modo, quando a demanda era superior, o banco de baterias era o encarregado de suprir o déficit.

O barramento de corrente contínua esteve distribuído por toda a sala do prédio que suportava o painel fotovoltaico e a ele estiveram conectadas 6 lâmpadas fluorescentes de 20 W para a iluminação interna (com seus respectivos reatores). Outros consumidores foram conectados ao barramento através das várias tomadas que foram distribuídas pela sala.

Para reproduzir a demanda de instalações reais foi construída uma interface eletrônica, comandada através do computador que permitiu que vários níveis de carga fossem ativados ao longo do dia. A interface permite até 256 níveis de carga ( $2^8$ ), sendo que duas das suas saídas aceitam cargas de até 350 W cada uma. Das outras 6 saídas, 5 aceitam cargas de até 280 W e a outra aceita até 420 W.

O barramento de corrente alternada foi alimentado através de um inversor senoidal conectado ao barramento de corrente contínua. Foi empregado um inversor de 600 W (120 V e 60 Hz), permitindo o funcionamento ininterrupto do computador e da unidade de aquisição de dados do sistema de monitoramento.

**Sensores empregados.** Um conjunto de variáveis foi monitorado para o acompanhamento do sistema híbrido durante sua etapa de funcionamento, entre elas a tensão e a corrente do aerogerador (contínua e rms), a rotação da turbina e a temperatura do corpo da máquina; do painel fotovoltaico sua corrente, a tensão e a corrente de cada módulo e a temperatura de 3 deles e, do banco de baterias, a tensão e a corrente. Também foram monitoradas a corrente consumida pelas cargas, a radiação solar sobre o plano do painel, a temperatura ambiente, a velocidade e a direção do vento local. A radiação solar sobre o plano horizontal foi medida eventualmente.

Como sensor da radiação solar no plano inclinado foi empregado um piranômetro *Kipp and Zonen* modelo CM11, cuja constante de calibração foi aferida com um piranômetro *Eppley PSP* disponível no Laboratório.

A velocidade e a direção do vento local foram monitoradas com a intenção de caracterizar o vento local, num mastro a 10 m de altura, visando a continuidade de pesquisas eólicas, e para estimar a influência das mesmas sobre a velocidade do vento do túnel e sobre a temperatura dos módulos fotovoltaicos. Os sensores empregados foram um anemômetro de conchas e uma veleta, modelos #40C e #200P, respectivamente, da marca *NRG Systems*.

As temperaturas foram monitoradas com sensores PT100 e NTC, colados na face posterior dos módulos e no corpo do aerogerador, calibrados empregando um banho termostático com temperatura controlada.

Como sensores de corrente foram empregados *shunts*, intercalados nos condutores correspondentes e com parâmetros apropriados à corrente circulante. Por exemplo, de 60 mV e 5 A para os módulos fotovoltaicos.

A totalidade destes sensores forneceu o sinal em unidades de tensão ou resistência elétrica. Estes sinais, assim como as tensões dos diferentes componentes do sistema foram monitoradas com uma Unidade de Aquisição de Dados, modelo HP-34970A, gerenciada por um sistema automatizado implementado no computador (García *et al.* 2005).

### 3. AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E EXTRAPOLAÇÃO DE RESULTADOS

Durante o período de funcionamento foram realizadas várias experiências para estudar o comportamento da instalação. Para isto, o painel fotovoltaico operou por efeito da radiação solar incidente no local e o aerogerador a partir de séries de velocidade do vento previamente elaboradas e reproduzidas através do túnel.

As séries foram armazenadas em arquivos de dados com um valor de velocidade do vento por linha. A cada minuto, o computador leu o valor de uma linha e, por intermédio da interfase, reproduz a velocidade correspondente no túnel. As séries de velocidades do vento foram geradas artificialmente a partir de um programa computacional de livre circulação disponibilizado na internet pelo Laboratório de Pesquisas de Energias Renováveis da Universidade de Massachusetts (UMASS, 2000). O procedimento solicita o valor médio desejado para a série de velocidades do vento, entre outros parâmetros, e gera um arquivo com um valor de velocidade por linha.

A carga da instalação foi perfilada mediante o acionamento manual e automático de consumidores constituídos por lâmpadas incandescentes, fluorescentes e pelo inversor senoidal que alimentou durante algum tempo a unidade de aquisição de dados e o computador do sistema de monitoramento e controle. O perfil de carga durante o funcionamento automático não respondeu a nenhum padrão em particular, estando dirigido fundamentalmente a permitir que ambos geradores trabalhassem sem interrupção, isto é, minimizando o acionamento do controlador de carga.

#### 3.1 Funcionamento

Os resultados mostrados nesta seção têm por objetivo oferecer uma visão do funcionamento integrado dos diversos componentes do sistema híbrido, a partir das relações entre os geradores e suas energias primárias correspondentes, somado ao papel do banco de baterias para garantir a satisfação da demanda. Os resultados correspondem a valores médios horários.

A Fig. 3 mostra que, como era de se esperar, o perfil da potência produzida pelos geradores segue o perfil das fontes primárias correspondentes. Em relação ao aerogerador, comprova-se que a máxima potência produzida tem valor semelhante ao máximo observado durante a sua caracterização. Já o painel fotovoltaico, cujos módulos totalizam 420 W, forneceu uma potência máxima em torno de 300 W, inclusive durante dias de céu limpo. Esta redução tão significativa (ao redor de 28%) é motivada pela ação conjunta da influência da temperatura sobre o painel e o fato do

painel estar constituído por módulos diferentes, incluindo dois de apenas 30 células, que modificam significativamente a forma da curva I-V.

Em geral, a energia demandada pela carga foi sempre satisfeita, ora pela energia fornecida pelos geradores exclusivamente, como pode ser observado nos períodos em que a corrente das baterias é nula, ora pela extração de parte da energia necessária do banco de baterias (às 10 e 12 h, por exemplo), ora pela extração da maior parte da energia necessária do banco de baterias, como acontece depois das 17 h no dia mostrado.

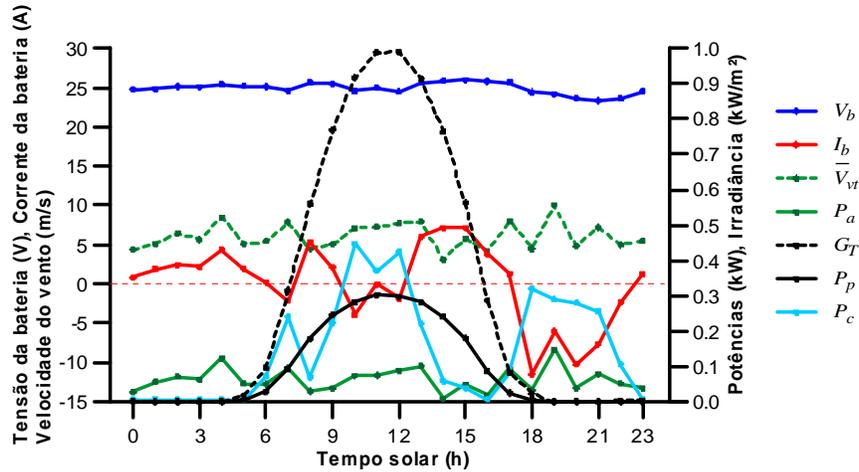


Figura 3 – Comportamento do sistema híbrido durante um dia de funcionamento ( $V_b$ ,  $I_b$ : tensão e corrente das baterias,  $\overline{V}_{vt}$ : velocidade do vento no túnel (média),  $P_a$ ,  $P_p$ ,  $P_c$ : potências do aerogerador, o painel fotovoltaico e as cargas,  $G_T$ : irradiância sobre o plano do painel).

A Tab. 5 resume a análise energética de dois dias de funcionamento: o correspondente à Fig. 3, que foi um dia de céu claro, e o dia anterior, correspondente a um dia parcialmente nublado. Comprova-se que embora a capacidade da componente solar seja maior, a possibilidade de manifestação do vento conjuntamente, ou em diferentes horas do dia, pode resultar em energias diárias semelhantes, demonstrando a possibilidade de complementação das energias solar e eólica, uma vez integradas em um sistema híbrido.

Tabela 5. Balanço de energia de dois dias de funcionamento.

	Produção (kWh)				Demanda (kWh)	
	Eólica		Solar		Dia	Noite
Tipo de dia	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite
Parc. Nublado	0,64	0,90	1,04	-0,02	1,83	0,34
Ensolarado	0,80	0,69	2,24	-0,01	2,56	0,97
Total	3,03		3,26		5,72	

A Tab. 6 mostra a energia média diária do sistema híbrido durante o período de funcionamento, correspondente às estações outono e inverno. Observa-se que existe diferença entre a energia fornecida e a consumida pelas cargas do sistema. Esta diferença de energia é armazenada no banco de baterias. A energia disponível para cada tipo de recurso foi determinada considerando a área da turbina do aerogerador e do painel fotovoltaico, a partir dos valores de velocidade do vento do túnel e da radiação solar sobre o plano inclinado.

Tabela 6. Energia média diária do sistema híbrido no período outono-inverno.

Fonte	Fornecida (kWh)	Disponível (kWh)	Demanda (kWh)
Eólica	1,02	4,16	
Solar	1,33	15,38	
Total	2,35		

### 3.2 Caracterização do potencial eólico do túnel de vento durante o período de avaliação do sistema híbrido

Os dados de velocidade do vento no túnel com os quais operou o sistema híbrido durante o período de avaliação, foram reduzidos a valores médios a cada 10 minutos. Esta informação serviu de base para a caracterização energética do potencial eólico e para a determinação dos parâmetros de forma ( $k$ ) e de escala ( $c$ ) da função de distribuição de Weibull:

$$f(V_v) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V_v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

A Tab. 7 resume os parâmetros estatísticos e energéticos do vento do túnel de vento. O fator de energia,  $k_e$ , e a densidade de potência,  $\overline{P}_v$ , foram determinados pelas seguintes expressões, onde  $V_{vi}$  é a  $i$ -ésima amostra da velocidade do vento no túnel e  $N$  é o número total de amostras:

$$k_e = \frac{\sum V_{vi}^3}{N \left(\frac{\sum V_{vi}}{N}\right)^3} \quad (2)$$

$$\overline{P}_v = \frac{1}{2} \rho k_e \overline{V}_v^3 \quad (3)$$

Tabela 7. Parâmetros estatísticos e energéticos do vento do sistema híbrido durante o período de avaliação.

Velocidade média (m/s)	6,00
Desvio padrão (m/s)	2,70
Fator de energia	1,60
Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )	211

Os parâmetros da função de distribuição de *Weibull* foram determinados empregando os métodos dos mínimos quadrados e do desvio padrão, e aparecem recolhidos na Tab. 8.

Tabela 8. Parâmetros da função de distribuição de *Weibull* para o vento do túnel e indicadores energéticos determinados a partir destes parâmetros.

	Desvio padrão	Mínimos quadrados
Fator de forma ( $k$ )	2,35	2,69
Fator de escala ( $c$ ) (m/s)	6,72	6,75
Fator de energia →	1,65	1,50
Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> ) →	214	194

Considerando os indicadores calculados, por proximidade com os valores reais, considerou-se que os parâmetros da função de distribuição de *Weibull* são os determinados pelo método do desvio padrão.

### 3.3 Potencial eólico e solar no Estado do Rio Grande do Sul. Sistemas híbridos

A Fig. 4-a mostra um mapa da radiação solar horizontal media anual diária no Estado do Rio Grande do Sul, identificando-se potenciais entre 13 a 15 MJ/m<sup>2</sup>. Como é conhecido, a inclinação das superfícies contribui a um incremento da energia que elas recebem nos meses em que os dias são mais curtos e portanto, elevam-se os potenciais dos valores médios correspondentes, como é mostrado na Fig.4-b, onde foi considerada uma inclinação de 45° (Pianezzola, 2006). Porém, estes são valores médios o que significa que ainda existirão meses nos quais a radiação solar terá valores inferiores àqueles, os quais se constituem nos períodos críticos, para cujos potenciais terão que ser dimensionados os sistemas fotovoltaicos.

Em relação ao vento, a Fig. 5-a mostra o mapa da velocidade média anual (SEMC, 2002), comprovando-se que, em sua maior parte o Estado possui um bom potencial eólico. Porém, o vento tem as mesmas limitações que a radiação solar em quanto a sua manifestação anual, com meses nos quais sua velocidade é baixa e por outro lado, ele não está presente em todas as regiões do Estado.

Segundo a ANEEL, em 1999, o Estado do Rio Grande do Sul era um dos mais eletrificados do Brasil, porém, ao redor do 15% das suas propriedades rurais não contavam com energia elétrica. Um consumo de 2,3 kWh/dia, como o analisado neste trabalho, equivale a aproximadamente 70 kWh mensais, o qual se encontra na faixa de consumo de uma parte significativa dos usuários das cidades e que oferece um nível adequado para a satisfação de necessidades básicas nas residências rurais. Reconhece-se que o equipamento necessário para satisfazer esta demanda, representa um custo elevado para programas de eletrificação, mas não está longe de significar uma possibilidade real para proprietários com recursos econômicos, que hoje estariam empregando geradores a base do petróleo ou seus derivados, que vem limitadas suas horas de serviço elétrico. As perspectivas para este segmento de consumidores são a de maiores limitações, devido

aos constantes e irreversíveis incrementos no preço do petróleo. A Tab. 9 mostra os aparelhos que poderia ter um usuário com uma demanda desta magnitude.

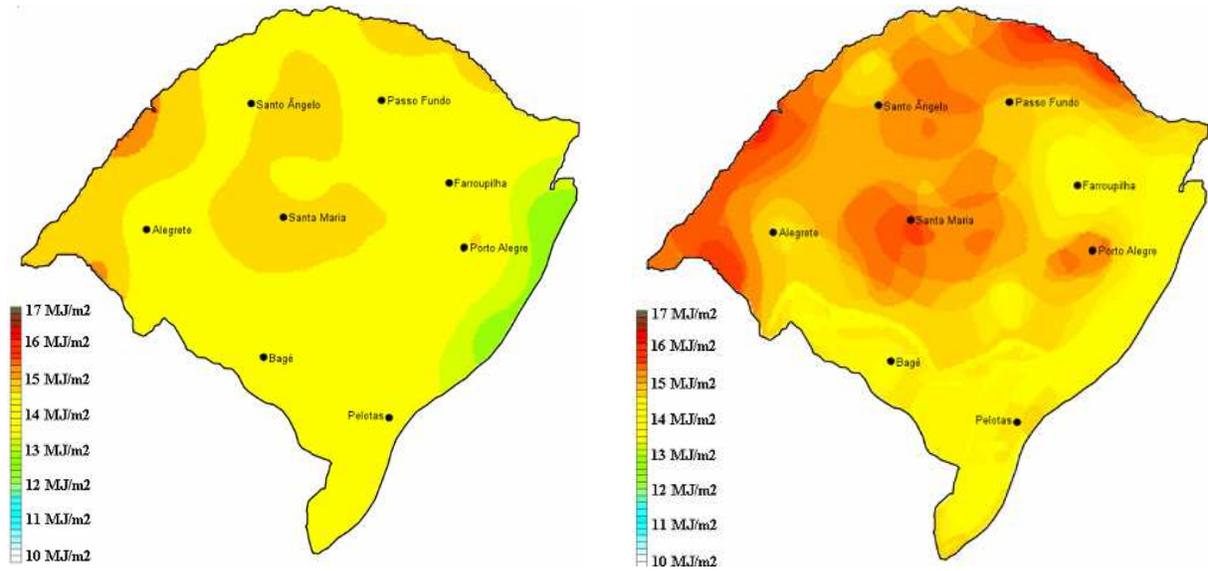


Figura 4 – Mapas de radiação solar global média anual diária: (a) Sob a horizontal: b- Sob inclinação de 45°.

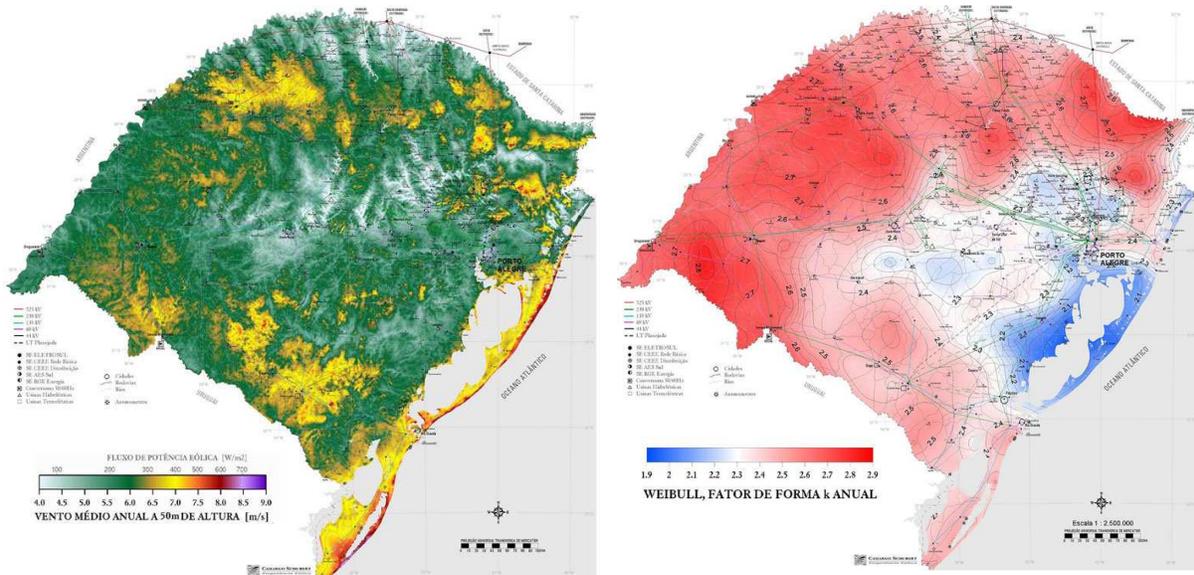


Figura 5 – Mapas de (a) velocidade média anual do vento e (b) fator de forma no Estado (a 50 m de altura).

Tabela 9. Demanda energética diária de consumidores elétricos para o sistema híbrido no Estado.

Equipamento	Quantidade	Potência (W)	Tempo (h/dia)	Energia (Wh/dia)
Lâmp. para quartos e corredor	3	20	1	60,0
Lâmp. para sala e cozinha	2	20	4	160,0
Lâmp. para banheiro	1	20	1	15,0
TV	1	30	3	90,0
Radio	1	6	3	18,0
Bomba d'água	1	115	1,5	172,5
Geladeira	1	*	13,5	1.714,0
Total				2.229,5

Fonte inicial: Hecktheuer, 1997.

Considerar sistemas puros para satisfazer esta demanda, isto é, fotovoltaicos ou eólicos, poderia significar incrementar em 100% o número de módulos, porcentagem esta que é ainda maior no caso do aerogerador, pois seriam necessários 2,25 unidades, ou seja, 3 delas. É certo que poderia ser utilizado um aerogerador de maior potência, mas neste caso, como na opção fotovoltaica, o incremento do tamanho está associado ao incremento do custo da instalação.

A Tab. 10 mostra um perfil de velocidades do vento considerando um valor de 7 m/s a 50 m de altura. Os valores foram determinados pela Eq. 4, considerando um comprimento de rugosidade,  $z_0$ , de 0,03 m, empregado como referência em análises expeditas. Comprova-se que para alturas próximas dos 15 m a velocidade do vento é comparável à considerada no sistema híbrido analisado, podendo esperar-se que nas regiões do Estado as quais correspondam as cores próximas do amarelo (no mapa da Fig. 5-a), o aerogerador do sistema possa ter um comportamento semelhante.

Tabela 10. Perfil de velocidades do vento considerando uma velocidade de 7 m/s a 50 m de altura.

Altura (m)	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Velocidade (m/s)	5,48	5,86	6,14	6,35	6,52	6,66	6,79	6,90	7,00

$$V_{v2} = V_{v1} \frac{\ln(Z_2/z_0)}{\ln(Z_1/z_0)} \quad (4)$$

onde  $V_{v1}$  é a velocidade do vento (7 m/s) na altura de referência,  $Z_1$  (50 m).

Contudo, não apenas a velocidade do vento é suficiente para avaliar a qualidade do vento numa localidade, pois como revela a Eq. 3, ventos de igual velocidade média podem ter comportamento energético diferente. O parâmetro  $k_e$ , pode ser determinado a partir do fator de forma,  $k$ , da função de distribuição de *Weibull*:

$$k_e = \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma^3(1 + 1/k)} \quad (5)$$

onde  $\Gamma$  é a função Gamma.

Como mostra a Fig. 5-b, fatores de forma próximos do obtido durante o funcionamento do sistema híbrido estudado se manifestam em amplas regiões do Estado, nas quais, em teoria, sistemas eólicos semelhantes ao analisado poderiam fornecer semelhante quantidade de energia elétrica.

Os sistemas híbridos têm a vantagem de poder aproveitar o potencial eólico e o solar, contribuindo à minimização dos sistemas singelos, e dos custos, devido à possibilidade de contar com um fornecimento energético primário uma maior parte do tempo. No entanto, a complementaridade entre ambas energias terá um papel fundamental neste propósito, ou seja, as localidades ideais serão aquelas nas quais o vento e a radiação solar apresentem seus valores máximos alternadamente ao longo do período (e correspondentemente seus valores mínimos).

Beluco *et al.*, 2003, apresentaram vários índices de complementaridade, que permitem estimar a qualidade de um local para uma aplicação híbrida hidrelétrica- fotovoltaica. O índice sobre a amplitude,  $i_a$ , versa sobre a relação entre as proporções dos valores máximos e mínimos de ambas as fontes; o índice do tempo,  $i_t$ , avalia o intervalo de tempo entre os valores mínimos, e o índice da energia,  $i_e$ , relaciona os valores médios de ambas as fontes. Estes índices foram adaptados por Pianezzola e Krenzinger, 2007, para elaborar mapas de complementaridade solar e eólica no Estado, que permitiriam, a priori, uma rápida estimativa das localidades que poderiam aproveitar mais vantajosamente as qualidades dos sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos.

A Fig. 6 mostra os mapas de complementaridade para os períodos outono-inverno e inverno-verão. A Fig. 6-a não sugere uma limitação do uso dos sistemas híbridos no Estado, comparando com a Fig.6-b, apenas existirão menos regiões de boa complementaridade nesse período. Contudo, em qualquer região os sistemas funcionarão normalmente, cada componente aportando sua energia correspondente. Mas o mapa significativo é o da Fig. 6-b, que mostra que nos meses de inverno, quando é baixa a quantidade de radiação solar recebida, sistemas eólicos poderão complementar o funcionamento de sistemas fotovoltaicos, e vice-versa no caso do verão, contribuindo a minimizar o tamanho dos geradores correspondentes.

### 3.4 Comportamento do “protótipo” do sistema híbrido no Estado

No mapa da Fig. 6, as regiões com cores em tons verde-amarelo seriam aquelas nas quais obter-se-ia a maior complementaridade energética temporal entre as componentes eólica e solar. Em princípio significa que embora ambas as fontes possam se manifestar conjuntamente ao longo do período, em uma parte significativa deste se alternam entre si. Mais precisamente, isto significa que durante o inverno um sistema eólico poderia complementar apropriadamente a um sistema fotovoltaico em determinadas áreas se os mesmos formarem parte de um sistema híbrido.

Contudo, estes mapas também não são suficientes para escolher os locais mais apropriados para as aplicações, porque eles não mostram o conteúdo energético das fontes. Há necessidade então de utilizar ambos tipos de mapas, uns para sinalizar a conveniência complementar e outros para indicar a conveniência energética.

Considerando que a radiação solar apresenta valores aproximados em todo o Estado, deve-se prestar maior atenção à velocidade do vento.

Para o caso particular do protótipo que está sendo analisado, a Fig. 5 e a Tab. 10 mostram que há zonas no sul, sudoeste, norte-sudeste e no litoral do Estado, onde o vento manifesta características semelhantes às que atuaram sobre a instalação estudada. Isto também acontece em outras áreas de menor tamanho, não visualizadas nos mapas devido à resolução que estes possuem.

Em função da complementaridade, os mapas da Fig. 6 sugerem a instalação dos sistemas híbridos no centro e no norte do Estado, no sudoeste, sul-sudeste e em algumas áreas do sul e do litoral.

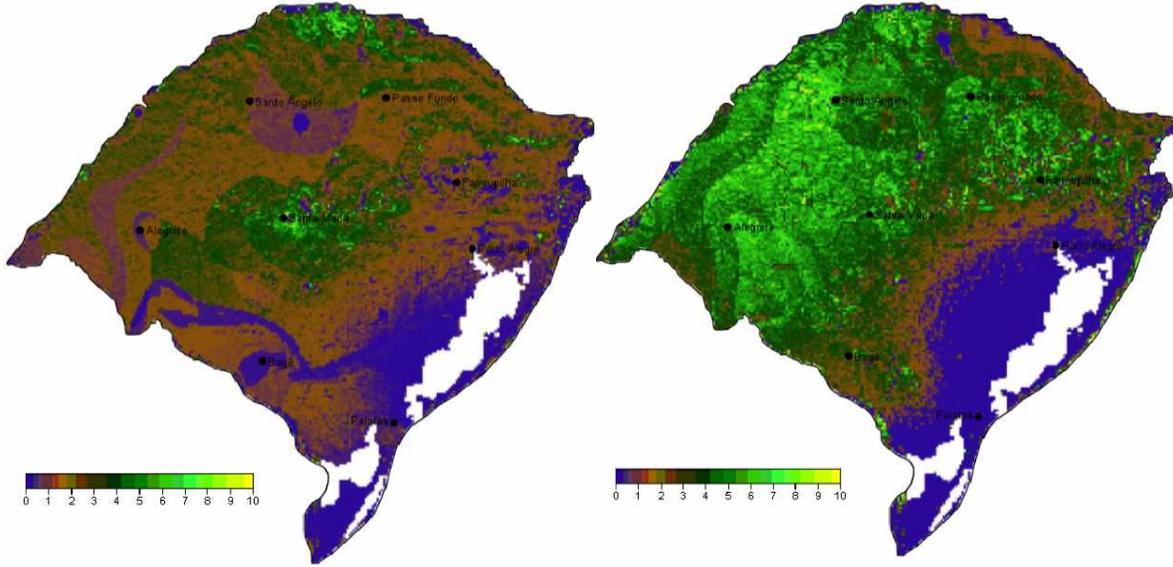


Figura 6 – Índice de complementaridade de tempo e energia entre outono e inverno (a) e entre inverno e verão (b).

As Eqs. 6, 7 e 8 apresentam os índices de complementaridade de amplitude,  $i_a$ , de tempo e energia,  $i_{et}$ , e o total,  $i_t$ :

$$i_a = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(\delta_e - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2} \right] \left\{ 1 - \tanh[2^8(\delta_e - \delta_s)] \right\} + \frac{1}{2} \left[ \frac{(1 - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2 + (\delta_e - \delta_s)^2} \right] \left\{ 1 + \tanh[2^8(\delta_e - \delta_s)] \right\} \quad (6)$$

$$\delta_e = 1 + \frac{E_{e\max} - E_{e\min}}{E_{e\max}} \quad (6a)$$

$$\delta_s = 1 + \frac{E_{s\max} - E_{s\min}}{E_{s\max}} \quad (6b)$$

$$i_{et} = \frac{E_{s1} - E_{s2}}{E_{sA}} \frac{E_{e2} - E_{e1}}{2 E_{eA}} \quad (7)$$

$$i_t = i_a i_{et} \quad (8)$$

onde  $E_{e\max}$ ,  $E_{e\min}$ ,  $E_{s\max}$  e  $E_{s\min}$  correspondem aos valores máximos e mínimos da energia eólica e solar entre as diversas estações ou períodos,  $E_{e1}$ ,  $E_{e2}$ ,  $E_{s1}$  e  $E_{s2}$ , representam as energias em determinados períodos e,  $E_{sA}$  e  $E_{eA}$ , constituem os valores totais do período (Pianezzola e Krenzinger, 2007).

Os valores destes índices foram calculados para o sistema híbrido analisado obtendo-se:

$$i_a = 0,695, \quad i_{et} = 0,973 \quad \text{e} \\ i_t = 0,676$$

A Fig. 7-a mostra o mapa de complementaridade total para o Estado, determinado por Pianezzola e Krenzinger (2007). Com esta informação foi realizado um processamento da imagem através de um conjunto de softwares, basicamente para identificar as cores correspondentes ao valor do índice determinado para o sistema híbrido estudado ( $\pm 3\%$ ), resultando no mapa da Fig. 7-b.

As áreas coloridas em vermelho correspondem às mais propícias para o funcionamento no Estado de sistemas híbridos semelhantes ao protótipo estudado.

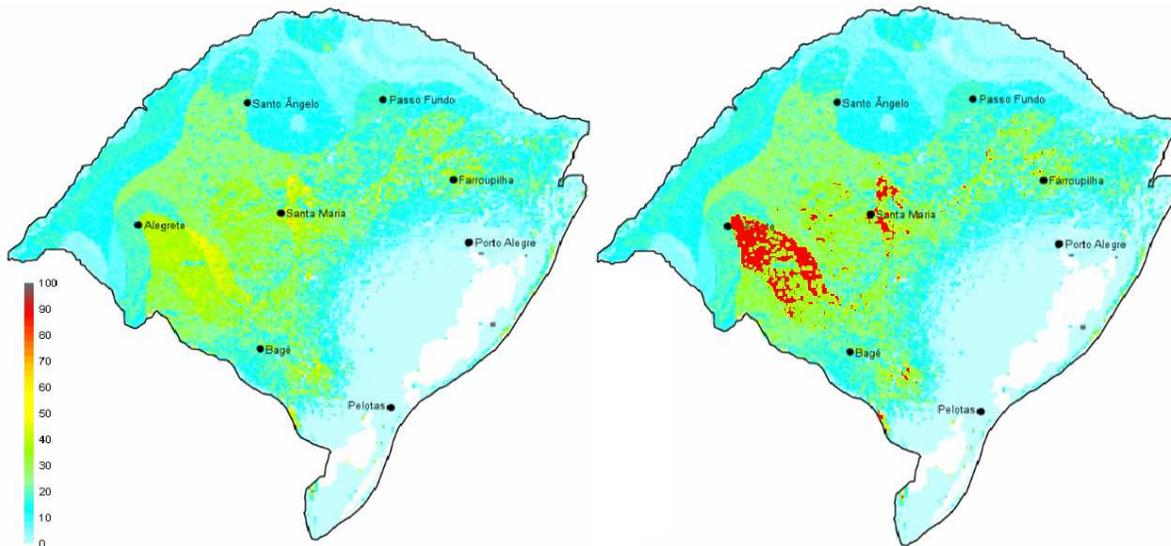


Figura 7 – (a) Mapa de complementaridade total para o Estado do Rio Grande do Sul. (b) Regiões de possível utilização de sistemas híbridos semelhantes ao protótipo analisado.

#### 4. CONCLUSÕES

Sistemas eólicos e fotovoltaicos autônomos constituem alternativas que contribuiriam a aliviar a situação de falta de eletricidade no meio rural do Brasil e do Estado do Rio Grande do Sul. A integração destes sistemas em um sistema híbrido resulta, em algumas áreas, uma opção mais econômica, pois a possibilidade de contar com energia primária uma maior parte do tempo permite que os geradores correspondentes sejam dimensionados com um tamanho menor.

Os índices de complementaridade entre as energias solar e eólica constituem um bom parâmetro, para uma estimativa inicial das áreas mais propícias para a implementação dos sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos, nas quais, estudos locais mais específicos poderão oferecer resultados mais precisos e determinantes.

O protótipo de sistema híbrido analisado neste trabalho mostrou as potencialidades da aplicação para satisfazer uma demanda comum. Com ele, cada sistema aportou cerca de 50 % da energia demandada no período, aproveitando a abundância de radiação solar durante o dia e a possibilidade de manifestação do vento conjuntamente ou em outros horários. As proporções entre as energias individuais dependerão de cada aplicação em particular e principalmente, das características da radiação solar e da velocidade do vento na região.

Este trabalho mostrou a utilidade dos mapas de complementaridade para a identificação espacial das regiões onde um protótipo de sistema híbrido, bem caracterizado no Laboratório, poderia operar com semelhantes prestações no Estado, oferecendo a possibilidade de um consumo mensal em torno dos 70 kWh para os residentes rurais. A metodologia utilizada para a obtenção deste mapa pode ser empregada para iguais propósitos uma vez dimensionados outros sistemas híbridos para satisfazer outras demandas de consumidores típicos no Estado.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para o desenvolvimento da pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2002, Atlas de Energia Elétrica do Brasil.
- Beluco, A. Souza, P. K. Krenzinger, A., 2003, A complementaridade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 1.
- García, F. H. Krenzinger, A. Prieb, C. W. M. Alé, J. A. V., 2005, Ferramentas para o monitoramento e controle de sistema híbrido eólico-fotovoltaico. ELETRISUL, Porto Alegre.
- García, F. H. Krenzinger, A. Alé, J. A. V., 2002, Bancada Experimental para Estudo de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos. AGRENER, Campinas.
- Hecktheuer, L. A. e Krenzinger, A., 2000, Medição da Curva Característica I-V de Módulos Fotovoltaicos. X Congresso Ibérico e V Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, São Paulo.

- Hecktheuer, L.A., 1997, Sistemas Alternativos para a Eletrificação de Pequenas Propriedades Rurais do Município de Canguçu, Utilizando o Potencial Energético Local, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Pianezzola, G. e Krenzinger, A., 2007, Mapas de Complementaridade entre Energia Solar e Eólica para o Estado do Rio Grande do Sul. I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza.
- Pianezzola, G., 2006, Mapas de Complementaridade dos Potenciais Solar e Eólico no Estado do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Secretaria de Minas, Energia e Comunicações (SEMC), 2002, Atlas Eólico do Estado do Rio Grande do Sul.
- Southwest Windpower, 1999, Air 403. A nova turbina de 400 watt !. Manual do proprietário.
- University of Massachusetts (UMASS), College of Engineering, 2000. <http://www.ecs.umass.edu>.

#### **WIND-PV HYBRID SYSTEM PROTOTYPE: CHARACTERISTICS AND POSSIBILITIES OF USE IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL**

**Abstract.** *Wind-pv hybrid systems constitute a technological option that can contribute to reduce the necessities of electrical energy in the Brazilian countryside. This work characterizes a prototype of experimental hybrid system and analyzes the results obtained during its operation. The system has a two bars configuration (CC and CA) mounted with similar size generators (about 400W) and a 300 Ah batteries bank capable of satisfying a 2,3 kWh daily mean load. The data recorded allowed to rate the wind and the solar radiation determining their statistical values as well as the complementarity indexes between them. These indexes have been compared to those collected in maps of complementarities of the State of Rio Grande do Sul. As a result, a new map is offered in which regions where the energy resources show similar levels of complementarities, and therefore where hybrid systems similar to the one studied can offer similar results, are highlighted.*

**Key words:** *solar and wind Energy, Hybrid Systems, Complementarity Maps*