



## VIABILIDADE DE PEQUENOS SISTEMAS EÓLICOS E FOTOVOLTAICOS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL NO RIO GRANDE DO SUL

**Jorge A.V. Alé**

**Felipe Hernandez**

**Luísa M. N. Giacobbe**

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Núcleo Tecnológico de Energia e Meio Ambiente - NUTEMA

Avenida Ipiranga 6681, Prédio 30, Bloco 7, sala 152

Fone +55 051 320-3540 – Fax +55 051 320-3625 – villar@ee.pucrs.br

Caixa Postal 1429 – 90619-900 – Porto Alegre, RS, Brasil

***Resumo.** Este trabalho analisa a viabilidade técnico-econômica para implementação de sistemas autônomos eólicos e fotovoltaicos de pequeno porte em regiões carentes de eletrificação rural no Estado do Rio Grande do Sul. Os sistemas de energia eólica são dimensionados em função da distribuição de vento no local de estudo. Os sistemas fotovoltaicos são dimensionados com base na informação da radiação solar local, obtendo-se o número de painéis fotovoltaicos necessários. O objetivo é demonstrar o potencial de uso de sistemas energéticos de fontes renováveis nas áreas rurais do Rio Grande do Sul.*

***Palavras-chave:** Sistemas Eólicos, Sistemas Fotovoltaicos*

### 1. INTRODUÇÃO

O modelo de crescimento econômico adotado nas últimas décadas no Brasil foi a industrialização, a qual estimulou o crescimento das cidades e conduziu o sistema elétrico nacional a um modelo de geração centralizado (Prodeem, 1996). Em regiões afastadas, comunidades isoladas e áreas rurais as necessidades energéticas foram supridas por vários tipos de energéticos, tais como a gasolina, o álcool, diesel, gás liquefeito do petróleo e eletricidade. Este modelo não encorajou o desenvolvimento de sistemas de geração locais, tais como os recursos renováveis de energia. Atualmente este quadro está se revertendo em diferentes estados do Brasil.

No Estado do Rio Grande do Sul existem regiões na quais as taxas de eletrificação rural são baixas (Alé et al., 1996) e deve-se analisar alternativas que modifiquem esta situação. As dificuldades sócio-econômicas da população rural gera um processo de migração aos grandes centros urbanos, originando aglomerados periféricos que agravam o problema de extrema pobreza. A energização rural é um dos fatores que permitem elevar o nível de qualidade de vida dessas pessoas.

Em lugares afastados do fornecimento de energia convencional, os postos de saúde, postos de telecomunicações, escolas e casas podem ter uma estrutura muito mais adequada com o auxílio da energia elétrica. Com ênfase em estudar e fornecer informações que permitam contribuir com a melhoria da qualidade de vida dos habitantes das localidades em estudo, Candiota e Tavares, se aborda no presente trabalho o estudo da viabilidade e utilização dos sistemas eólicos e fotovoltaicos. Trata-se especificamente sobre o dimensionamento de tais sistemas e a quantificação dos custos ao comparar com a energia convencional.

Na Figura 1 é mostrada a localização geográfica das cidades estudadas no Estado do Rio Grande do Sul.

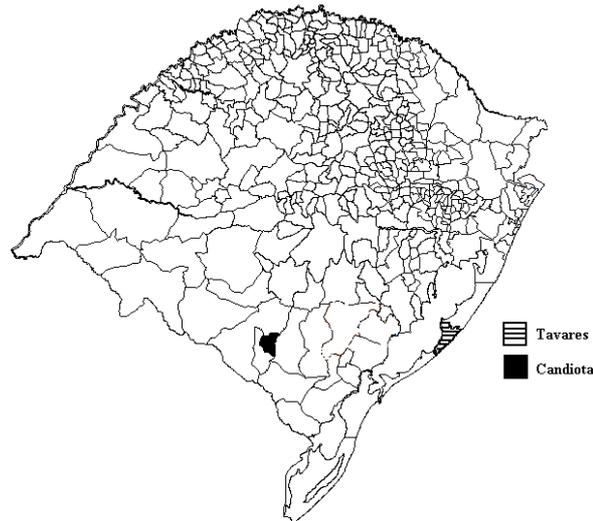


Figura 1 – Localização dos municípios de Candiota e Tavares

## 2. ASPECTOS SOCIO-ECONÔMICOS

O município de Tavares, localizado no litoral sul do Brasil (latitude 31°S), compreende uma área de 652,3 km<sup>2</sup> e se encontra a 223 km da Capital do Estado. Possui uma população de 5043 habitantes (FEE, 1997), onde 56,78% residem na zona rural. Sua economia está centrada no cultivo do arroz e principalmente da cebola, na criação de aves, bovinos e ovinos (ver Tabela 1).

A cidade tem uma situação energética muito precária comparada com outras localidades no estado. Isto se deve à limitações no sistema de distribuição na cidade de Tavares quanto à expansão de linhas mais longas que 9,5 km (Alé et al., 1996). Esta situação coloca os sistemas que usam energias renováveis como opções que devem ser consideradas de maneira a resolver esses problemas. No que se refere aos recursos eólicos existem dados recentes disponíveis, os quais mostram a velocidade média próxima a 5 m/s a 10 m de altura. Isto é um bom indicativo da viabilidade de utilização de sistemas eólicos. Em relação à radiação solar não se dispõe de informação exata da localidade, por isso foram utilizados os dados mais próximos segundo a localidade em estudo. Tendo informação da radiação solar média mensal das cidades de Rio Grande ( latitude 32°S) e Porto Alegre (latitude 31°S).

Outra região estudada é a da cidade de Candiota. Localizada no centro-sul do Estado (latitude 31,53°S), compreende uma área de 597,2 km<sup>2</sup> e se encontra a 400 km da Capital do Estado. Possui uma população de 7518 habitantes (FEE, 1997), onde 58,66% residem na zona rural. Sua economia está centrada no cultivo do arroz e do milho, na criação de aves, bovinos e ovinos (ver Tabela 1). Sua população rural mais carente se encontra afastada do centro urbano e dispersa umas das outras, o que inviabiliza o fornecimento de energia elétrica

convencional devido à necessidade de grandes extensões de rede de distribuição. Esta situação se mostra adequada para utilizar-se fontes alternativas de energia localizadas junto ao ponto de consumo. Dados locais mostram a velocidade média do vento em 6 m/s a 10 m de altura. Por não se possuir informação exata da radiação solar no local, tomou-se dados da cidade mais próxima, Bagé (Latitude 31,33°S), obtidos junto ao CEPEL.

Tabela 1. Quantidade dos principais produtos da produção agropecuária

<b>Culturas</b>	<b>Tavares</b>	<b>Candiota</b>
Arroz	9964	2400
Milho	1680	1600
Cebola	36225	---
Aves	23448	32120
Bovinos	17282	188244
Ovinos	25100	386831

Fonte: Resumo Estatístico Municipal - FEE, 1997.

A Tabela 2 apresenta, comparativamente, mais alguns dados dos municípios estudados.

Tabela 2. Dados sócio-econômicos dos municípios

<b>Dados sócio-econômicos dos Municípios</b>	<b>Tavares</b>	<b>Candiota</b>
População	2180 – urbana 2863 - rural	3108 – urbana 4410 – rural
Renda per Capta (R\$) – ano 1994	1236	1253
Total PIB (R\$) – ano 1994	6 267 575	8 202 180

Fonte: Resumo Estatístico Municipal - FEE, 1997.

Na Tabela 3 apresentamos o consumo de energia elétrica para os consumidores dos municípios de Tavares e Candiota atendidos pelo sistema de distribuição de energia elétrica convencional.

Tabela 3. Consumo de energia elétrica, ano base 1995

<b>Município</b>	<b>Setores</b>	<b>Consumo Anual (MWh)</b>	<b>Consumo Percentual (%)</b>
<b>Tavares</b>	residencial	760	29,69
	industrial	57	2,22
	comercial	279	10,9
	setor público	357	13,95
	rural	1107	43,24
	outros	---	---
	total	2560	100
<b>Candiota</b>	residencial	2885	5,56
	industrial	46366	89,4
	comercial	648	1,25
	setor público	902	1,74
	rural	239	0,46
	outros	823	1,59
	total	51863	100

Fonte: Resumo Estatístico Municipal - FEE, 1997.

Comparando as Tabelas 2 e 3 observa-se o baixo índice de eletrificação da população rural, principalmente na área do município de Candiota. Este fornecimento deficiente se deve a fatores tais como: são propriedades localizadas em áreas remotas, de difícil acesso, com baixas densidades populacionais; ou ainda propriedades localizadas em fim de linha de redes de distribuição, e estas não têm como atender suas demandas.

A eletrificação destas propriedades traz um significativo aumento da qualidade de vida para estas populações carentes, proporciona melhores condições de trabalho e contribui para o desenvolvimento local. Como resultado, observa-se uma diminuição da evasão destas populações para os grandes centros urbanos, o que contribui para conter o aumento da miséria nestes locais.

### **3. METODOLOGIA**

Três aspectos foram abordados na metodologia: a demanda de energia, os recursos energéticos locais e as características técnicas dos equipamentos utilizados na transformação da energia para atender a este consumo. A demanda elétrica de energia foi obtida a partir dos aparelhos considerando-se uma residência típica. Os recursos energéticos de radiação solar e eólicos correspondem aos mais próximos da localidade em estudo sendo recompilados e analisados em Alé et al. (1996). A informação das características técnicas dos equipamentos a serem utilizados foram levantadas a partir de catálogos de fabricantes.

Foram realizados dois tipos de análise. Na primeira se estuda o dimensionamento de um sistema fotovoltaico de pequeno porte em duas situações:

- a) Para uma residência rural que não conta com nenhum tipo de energização.
- b) Para a mesma residência estudando o efeito do dimensionamento do sistema quando se utilizam lâmpadas de baixo rendimento.

Na segunda análise, se quantifica a energia fornecida por sistemas eólicos de pequeno porte e o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos equivalentes que permitam atender à mesma demanda. Com base em catálogos de fabricantes, foram selecionadas para análise três tipos de turbinas que abrangem a faixa de sistemas de pequeno porte. Com as curvas de potência de tais sistemas e as características eólicas do local se obteve a energia anual gerada. Com esta informação foram dimensionados os sistemas fotovoltaicos equivalentes para fornecer a mesma energia, utilizando os dados de radiação solar do local. Posteriormente, os custos de energia destes sistemas foram determinados utilizando-se o método do valor presente.

#### **3.1 Demanda energética**

Dois tipos de demanda de energia foram considerados para uma casa rural típica:

a) O primeiro, denominado cenário *I*, considera uma casa com lâmpadas de alta eficiência, televisão, rádio, liquidificador e bomba d'água. Neste cenário é obtida uma demanda anual de energia de 161 kWh.

b) O segundo consumo, denominado cenário *II*, corresponde à mesma residência usando lâmpadas de baixa eficiência (alto consumo) e também adicionando um refrigerador. Nessas condições, o cenário *II* apresenta um consumo anual de energia de 1020 kWh. O levantamento detalhado de tais consumos é apresentado por Alé et al. (1996).

#### **3.2 Sistemas eólicos**

A energia anual gerada (EAG) por cada sistema eólico é determinada a partir da curva de distribuição de frequência do vento no local e das curvas características de potência das turbinas eólicas comerciais.

$$EAG = T \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv \quad (1)$$

Onde  $T$  é o número de horas em um ano,  $P(v)$  é a variação de potência da turbina em função da velocidade e obtida em catálogos de fabricantes. O termo  $f(v)$  representa a curva de distribuição de frequência do vento no local. Usando a distribuição de Weibull para a velocidade, temos que:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (2)$$

Onde  $c$  é o fator de escala e  $k$  é o fator de forma da distribuição.

Para Tavares temos uma velocidade média anual do vento de 5m/s, o fator de escala  $c=5,76$ m/s e o fator de forma  $k=2,19$ ; para Candiota temos a velocidade média de 6m/s, utilizando o método de Rayleigh, para  $k=2$  temos  $c=7,36$ m/s.

Os seguintes critérios foram considerados para a análise dos sistemas eólicos: uma vez que as características eólicas do local são conhecidas, a energia anual gerada pelas pequenas turbinas é determinada. Turbinas de 150W, 600W e 1,5kW foram selecionadas. Da distribuição de velocidade do vento e da curva de potência característica de cada turbina se determina a energia anual gerada, considerando uma altura de 18 metros para as turbinas. A Tabela 4 apresenta a energia anual gerada em ambas as localidades.

Tabela 4. Energia anual gerada pelos sistemas eólicos

	Tavares (v=5,0m/s)	Candiota (v=6,0m/s)
Potência (kW)	Energia Anual (kWh/ano)	Energia Anual (kWh/ano)
0,15	180,48	309,96
0,60	526,70	1001,22
1,5	2433,09	4239,48

Observa-se que a turbina de 150W forneceria uma energia média de 15,7kWh/mês para a cidade de Tavares ou 25,83kWh/mês considerando Candiota. Isto permitiria suprir as necessidades energéticas da residência típica do cenário *I* (13,44kWh/mês). No caso do sistema fotovoltaico este consumo equivale a uma potência instalada equivalente de 184Wp.

### 3.3 Sistemas fotovoltaicos

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico deve-se conhecer a radiação solar no plano horizontal para cada mês do ano. Esta pode ser obtida em estações meteorológicas. Pela falta desta informação para a localidade de Tavares (latitude 31°S), foram utilizados os dados correspondentes à cidade de Porto Alegre (latitude 30°S). Para a cidade de Candiota (latitude 31,53°) utilizou-se dados de Bagé (latitude 31,33°). Posteriormente esta radiação foi calculada para incidência no plano do módulo fotovoltaico. Recomenda-se que os coletores sejam instalados com sua face voltada para o norte e inclinados com um ângulo igual à latitude mais 15°, permitindo um maior aproveitamento energético durante todo o ano. Para a região de

Candiota se utilizou uma inclinação de 47° e para Tavares 45°. A radiação média mensal diária no plano horizontal e no plano inclinado do coletor são mostradas nas Fig.2 e Fig.3.

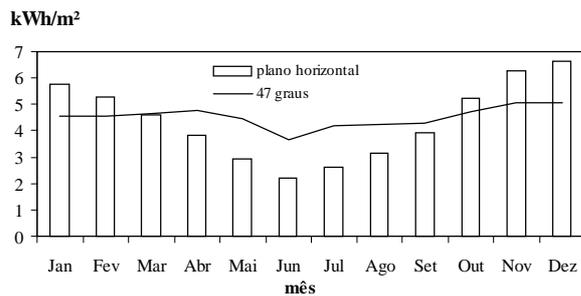


Figura 2 – Radiação solar para Tavares.

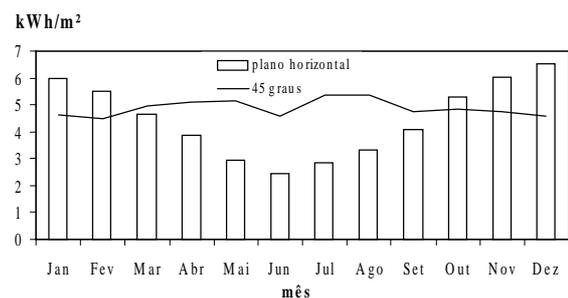


Figura 3 – Radiação solar para Candiota.

O dimensionamento é realizado em função do mês que tem a menor radiação solar e a maior demanda de energia ou método do mês crítico (Lorenzo e Krezinger, 1984). Em nosso caso, isto corresponde a uma radiação de 3,65kWh/m<sup>2</sup> para Candiota e Tavares. Assim, o número mínimo de módulos foi determinado. Os seguintes resultados foram obtidos com este método:

- a) Cenário I : 04 (46Wp) painéis fotovoltaicos, 3 baterias de 95Ah e regulador de carga para 12V. O custo total deste sistema é US\$2371,00.
- b) Cenário II: 25 (46Wp) painéis fotovoltaicos, 13 baterias de 95Ah e regulador de carga para 12V. O custo total deste sistema é US\$7820,00.

Substituindo as lâmpadas de alta eficiência por lâmpadas incandescentes, a mesma residência do cenário I (13,44kWh/mês) consome 31,08kWh/mês. Isto significa mais de 100% de aumento no consumo elétrico para manter o mesmo iluminamento. O custo das lâmpadas de alta eficiência usadas é de US\$256,00, enquanto que as incandescentes custam no total US\$13,00.

### 3.4 Sistema de armazenamento

As baterias são o elemento de armazenamento de energia utilizadas nos sistemas eólicos e fotovoltaicos. A variabilidade temporal dos recursos de radiação solar e também dos recursos eólicos levam a ter que prever ou estimar os dias que o sistema terá autonomia para fornecer energia quando não se conta com radiação solar suficiente ou quando os ventos não movimentam as pás das turbinas. Isto é um fator importante no dimensionamento do sistema, influenciando também nos custos do mesmo. O dimensionamento do número de baterias foi realizado estimando-se 03 dias consecutivos sem sol (para sistemas fotovoltaicos) ou 03 dias sem vento (para sistemas eólicos). Foi considerado uma taxa de profundidade de descarga de 70% estimando-se uma vida útil de 05 anos para uma bateria chumbo-ácida nacional. Observa-se que nestas condições de dimensionamento o sistema apresenta uma vida útil inferior a cinco anos.

## 4. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DOS SISTEMAS

A implementação de sistemas autônomos de energia eletrificação rural nas propriedades de baixa renda é um problema sócio-econômico. Portanto é importante a identificação dos custos envolvidos quando tais sistemas sejam instalados sob ações governamentais ou programas que permitam a liberação de verbas para eletrificação rural em localidades carentes e isoladas do país. Em tal situação o panorama de importação e transporte dos componentes não seria o mesmo do realizado pelo produtor rural. Além disto, programas de financiamento

de bancos a pequenos produtores rurais com baixas taxas de juros permitiriam acelerar a viabilidade econômica de tais sistemas.

No presente trabalho adotamos o método do custo anualizado de energia para estimar o custo da energia gerada (COE):

$$COE = \frac{CTI \times FVP + O \& M}{EAG} \quad (US\$/kWh) \quad (3)$$

Onde *CTI* é o custo total dos equipamentos e instalação, *EAG* a energia anual gerada (kWh/ano) e *O&M* o custo de manutenção (US\$/ano). O fator de valor presente (*FVP*) é definido como:

$$FVP = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

Onde *i* é a taxa anual de juros e *n* é a vida útil do sistema em anos.

O *COE* nos dá uma indicação da viabilidade do custo da energia, comparando diversos sistemas verifica-se a melhor opção técnico-econômica.

Para a quantificação dos custos de energia, o cenário abordado no presente trabalho considera o custo internacional das turbinas e módulos fotovoltaicos incluindo os reguladores de carga, conversores, baterias e estruturas. Apresenta-se também a incidência das taxas de juros. No caso da aquisição do equipamento pelo próprio produtor rural, um segundo cenário deveria acrescentar a tais custos as despesas estimadas considerando taxa de importação e transporte internacional. Os valores estimados dos custos de instalação, *O&M* e transporte local são resumidos na Tabela 5 como função do custo total dos sistemas. Taxas de juros e vida útil dos sistemas estão incluídas nesta tabela.

Tabela 5. Parâmetros estimados para eólica e fotovoltaica

Sistema	Energia Eólica	PV
Custo anual de manutenção	2%	1%
Custo de instalação local	5%	3%
Transporte local	0,5%	0,5%
Taxa de juros	6%	6%
Vida útil (anos)	20	30

O percentual de 2% do custo total para *O&M* é um valor usual na indústria eólica (Gipe, 1993). O valor de 1% para *O&M* em sistemas fotovoltaicos foi adotado do SolarVision (1982). Os percentuais de instalação e transporte local consideram a realidade local. Para a vida útil dos sistemas eólicos adotou-se um valor conservativo de 20 anos, apesar de sistemas eólicos modernos possuírem uma disponibilidade de até 30 anos, assim como os sistemas fotovoltaicos. Nesta análise reparo e substituição de componentes não são considerados.

## 5. RESULTADOS

Empregando o cenário *I* (161 kWh/ano) e cenário *II* (1020 kWh/ano) obtivemos os custos dos sistemas eólicos (WTS) e dos sistemas fotovoltaicos (PVS) e o custo da energia. Como mostrado na Figura 4 *a* e *b*. Nas duas ilustrações observamos que os sistemas eólicos são mais econômicos que os sistemas fotovoltaicos.

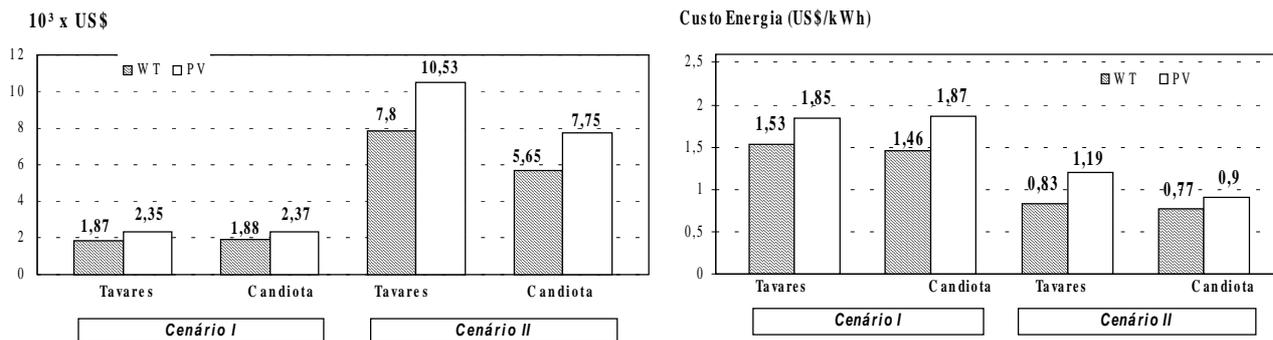


Figura 4 – a) Custo dos sistemas WTS e PVS b) Custo da energia para WTS e PVS

### 5.1 Custo da energia

Nesta etapa do trabalho utiliza-se a informação da energia anual gerada pelos sistemas eólicos obtidas na Tabela 2. Os sistemas fotovoltaicos são dimensionados para suprir a mesma energia. Na análise econômica considera-se que os sistemas são isentos de taxas de importação e de transporte internacional. Desta forma se obtém uma análise comparativa entre o Custo da Energia (COE) dos sistemas eólico e o sistema fotovoltaico, como mostrado na Tabela 6 e Figura 5, para a região de Candiota e a uma taxa de juros anual de 6%.

Tabela 6. Custo da energia para WTS e PVS

WTS	situação 1	situação 2	situação 3
Potência - kW	0,15	0,60	1,50
Energia Anual (kWh/ano)	312,82	1014,85	4305,64
CTI (US\$)	1883,00	2700,00	7568,00
COE (US\$/kWh)	0,84	0,46	0,35
PVS	situação 1	situação 2	situação 3
Potência - Wp	230	782	3128
Cost (US\$)	2590,00	5728,00	19107,00
COE (US\$/kWh)	1,00	0,70	0,60

Em relação aos custos de energia COE (Fig.5), observa-se que os sistemas eólicos tornam-se mais econômicos na medida que aumenta a potência instalada.

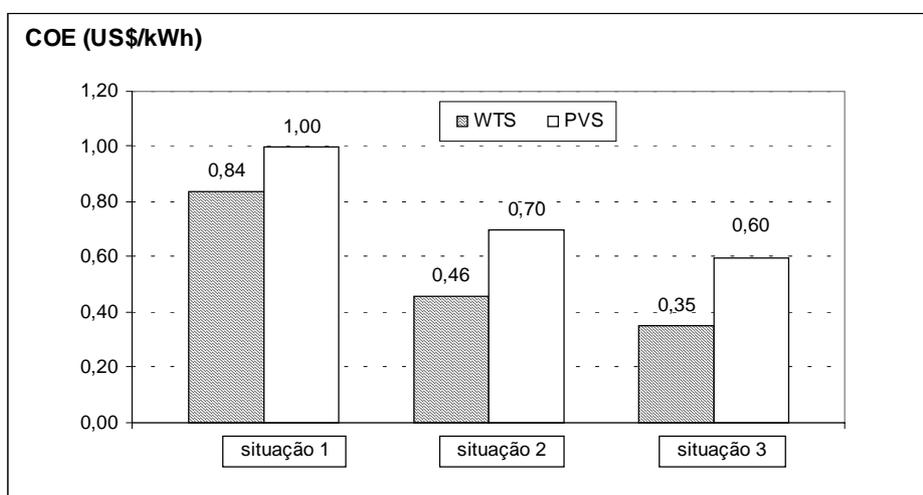


Figura 5 – Custo da energia para sistemas eólicos (WTS) e fotovoltaicos (PVS)

## 6. CONCLUSÕES

Em termos de recursos energéticos, os municípios de Tavares e Candiota apresentam-se promissores para implementação de sistemas eólicos. Considerando o mesmo número de dias de autonomia dos sistemas, e com base nos recursos energéticos levantados, os sistemas eólicos mostram-se mais econômicos que os sistemas fotovoltaicos.

Uma descrição detalhada dos custos dos equipamentos mostraria que com o dimensionamento realizado, considerando três dias de autonomia com 70% de profundidade de descarga, as baterias tem peso considerável em relação ao custo total do sistema. Uma opção para otimização da relação custo benefício dos sistemas, reduzindo o armazenamento de energia, sem prejudicar a confiabilidade dos mesmos, seria a utilização de sistemas auxiliares, como moto-geradores de pequeno porte ou utilização outros sistemas híbridos. Os aspectos relacionados com custos de importação e transporte internacional devem ser analisados, assim como a influência do número de dias de autonomia, observando-se desta forma, quanto modifica-se o cenário considerado. A análise econômica apresentada foi realizada num período de instabilidade econômica, onde a desvalorização do Real frente à moeda Americana (R\$1,00=US\$1,80) apresenta modificações significativas nos custos dos equipamentos.

Algumas das dificuldades observadas para viabilizar a curto-prazo a implementação de sistemas eólicos e fotovoltaicos no estado são: altas taxas de juro, elevados custos dos sistemas a nível nacional, custo elevados de importação e carência de programas estaduais para inserir as energias renováveis e linhas de financiamento para produtores rurais de baixa renda. Acreditamos que uma boa forma de divulgação e efetivação da tecnologia em estudo seria a de criar condições para inserir, em lugares estratégicos e representativos do estado, sistemas pilotos demonstrativos que permitam estudar e monitorar *in locuo* as vantagens e dificuldades dos sistemas.

## REFERÊNCIAS

- Aguilera J., Lorenzo E., 1996, "Rural Photovoltaic Electrification Programme on the Bolivian High Plateau"., Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.4, pp. 77-84.
- Alé, Duarte, Bitterncourt et al., 1996 "Sistemas Eólicos y Fotovoltaicos de Pequeno Porte Para Electrificação Rural no Rio Grande do Sul, Brasil. Parte I e II" VI Simpósio Peruano de Energia Solar e II Seminário Internacional de Energias Renovables, Tacna, Peru.
- Boletim Energia Renovável, 1996 - Associação Brasileira das Empresas de Energia Renovável e Eficiência Energética. Brasil, Vol.1 No1.
- Gipe, P., 1993, "Wind Power for Home and Business: Renewable Energy for 1990s and Beyond". Real Goods Independend Living Book. 413pp.
- Heuser, S. E., 1997, "Resumo Estatístico Municipal", Fundação de Economia e Estatística
- Lorenzo E., Krenzinger A., 1984 "Manual de las Instalaciones de Energia Solar Fotovoltaica", UPM/IES/LS/3984.
- PRODEEM, 1996, "Programa para o Desenvolvimento da Energia nos Estados e Municípios", Informativo, Ministério de Minas e Energia, CEPTEL.
- SolarVision, 1982, "Photovoltaic System Design" SolarVisions Publications. 279pp.

## **FEASIBILITY OF WIND AND PHOTOVOLTAICS SMALL SYSTEMS FOR RURAL ELECTRIFICATION IN STATE OF RIO GRANDE DO SUL**

***Abstract.** This work analyzes the technical-economical feasibility aspects for the implementation of wind and photovoltaic autonomous systems in areas which lack rural electrification in Rio Grande do Sul state, Brazil. The size of the wind energy systems is calculated as a function of the wind speed distribution in the site. Solar radiation data are analyzed in order to define the size of the photovoltaic systems, thus determining the number of photovoltaic units needed. From the previous information we get the costs of energy production through the systems as compared to the costs of expanding the conventional electric power grid. The aim is to show the potential use of electric renewable systems in the rural areas of Rio Grande do Sul state.*

***Keywords:** Wind Systems, Solar Systems*