

MAPAS DE COMPLEMENTARIDADE ENTRE ENERGIA SOLAR E EÓLICA PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Gilberto Pianezzola – gpianezzola@yahoo.com.br

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1.2 Potencial Solar e Eólico

Resumo. O uso das energias fotovoltaica e eólica em conjunto, explorando a sua complementaridade, pode viabilizar economicamente e permitir um uso confiável deste sistema, denominado sistema híbrido fotovoltaico-eólico. Este trabalho apresenta a elaboração de mapas de complementaridade do potencial solar e eólico para um melhor aproveitamento destes sistemas híbridos no Estado do Rio Grande do Sul. Os valores da radiação solar horizontal e da velocidade dos ventos foram obtidos das médias trimestrais correspondentes as quatro estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) e da média anual. De posse de mapas da velocidade dos ventos a 50 metros de altura de solo e da rugosidade no Estado do Rio Grande do Sul foi realizada a leitura individual dos dados dos mapas e feita a correção da altura para obtenção da velocidade do vento a 10 metros do solo. Os dados referentes à radiação solar horizontal também sofreram uma correção da inclinação, para a obtenção da radiação incidente em uma superfície inclinada, na busca do melhor rendimento do módulo fotovoltaico. A partir dos dados corrigidos, foram utilizadas equações para a obtenção dos índices de complementaridade e geração de seus respectivos mapas. Conclui-se que há regiões no Rio Grande do Sul nas quais a implementação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico é mais recomendada do que sistemas singelos.

Palavras-chave: Mapas de Complementaridade, Energia Solar, Energia Eólica, Sistema Híbrido

1. INTRODUÇÃO

Atualmente dispõe-se de dados isolados de radiação solar e velocidades dos ventos no Estado do Rio Grande do Sul, o que dificulta uma análise mais específica para uso de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico neste Estado.

Para a identificação de locais geográficos viáveis para o uso de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico torna-se necessário o conhecimento concomitantemente do potencial solar e eólico no local geográfico onde será gerada a energia elétrica neste sistema, explorando a complementaridade de ambas fontes energéticas.

A representação desta complementaridade na forma de mapas pode auxiliar na análise preliminar de possíveis regiões no Estado do Rio Grande do Sul para a implementação de sistemas autônomos de pequeno porte.

2. METODOLOGIA EMPREGADA PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os mapas com os dados existentes são os da velocidade média do vento a 50 metros de altura, rugosidade e radiação solar horizontal no Estado do Rio Grande do Sul. É necessária a transformação da velocidade do vento de 50 para 10 metros de altura, visando a utilização de aerogeradores de pequeno porte, que utilizam torres com alturas menores. Para um melhor aproveitamento da radiação solar nas quatro estações do ano é feita a correção da radiação solar horizontal para radiação so-

lar inclinada a 45°. Um ângulo igual ao da latitude (30°) é utilizado para obter a máxima energia ao longo do ano, mas como o consumidor alvo das instalações propostas é isolado da rede de distribuição, optou-se por adotar o ângulo de inclinação igual a 45°, para proporcionar maior uniformidade de radiação solar ao longo do ano.

2.1 Metodologia para a leitura dos mapas consultados

As grandezas numéricas são expressas nos mapas através das variações nas cores dos pixels, sendo cada cor associada a um respectivo valor numérico, a utilização de um paleta com essas variações nas cores e os respectivos valores correspondentes às mesmas é o referencial para a obtenção dos valores numéricos da grandeza a qual se refere o mapa.

Um programa computacional desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS realiza a leitura das cores nos pixels dos mapas e, através da função específica do Visual Basic.NET: `getpixel(x,y)`, retorna o valor numérico correspondente à cor do pixel, conforme as cores e valores existentes no paleta referencial.

A cada grupo de nove pixels é calculada a média dos valores numéricos associados às respectivas cores desse grupo e esse valor médio será atribuído a todos os nove pixels desse grupo.

O programa computacional inicia a leitura a partir do segundo pixel da segunda linha e segue a leitura no sentido da esquerda para a direita; de três em três pixels, até encontrar um pixel com uma cor correspondente do paleta de cores, utilizado como referencial, e a partir deste calcula a média dos valores numéricos associados à sua cor e dos outros oito pixels em torno do mesmo, num total de nove pixels, e assim sucessivamente até o final da linha de pixels. A seguir realiza a leitura da terceira linha abaixo, sempre no sentido da esquerda para a direita, seguindo a mesma metodologia descrita acima até a leitura da última linha, conforme visualizado nas Fig. 1 e 2.

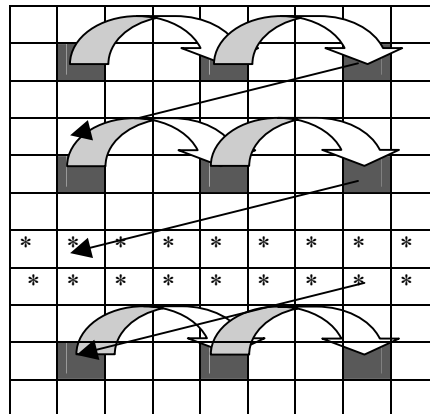


Figura 1 - Sentido da varredura de leitura

$i - 1, j - 1$	$i - 1, j$	$i - 1, j + 1$
$i, j - 1$	i, j	$i, j + 1$
$i + 1, j - 1$	$i + 1, j$	$i + 1, j + 1$

Figura 2 - Nove pixels componentes da média

Quando o programa computacional encontra um ou mais pixels sem uma cor correspondente no paleta estes pixels são desconsiderados para o cálculo do valor médio do grupo dos nove pixels que se deseja determinar o valor correspondente.

Nos pontos cujas cores nos mapas correspondiam a marcações suplementares tais como redes de transmissão, nomes de cidades, etc., que iriam prejudicar a execução do trabalho de leitura, foi realizada a substituição dos mesmos manualmente, por pontos com cores correspondentes aos valores no entorno destes pontos existentes no paleta referencial.

Os mapas utilizados como referência para a radiação solar horizontal são os apresentados por Martinazzo, C. A., (2004) e os mapas para a velocidade do vento a 50 m e da rugosidade foram extraídos de SEMC, (2002).

Inicialmente, foi realizada a leitura dos mapas da radiação solar horizontal dos meses centrais das 4 estações do ano e da radiação solar horizontal anual do Estado do Rio Grande do Sul, através do programa citado, para a determinação da disponibilidade da energia solar.

Através do mesmo programa computacional, foi realizada a leitura dos mapas das velocidades do vento a 50 metros de altura nos meses centrais das 4 estações do ano, anual e do mapa da rugosidade do Estado do Rio Grande do Sul, para a determinação da disponibilidade da energia eólica.

Os mapas da velocidade do vento a 50 metros de altura e da rugosidade tiveram seu formato físico adequado aos mapas da radiação solar horizontal, de forma a se obter a mesma quantidade de valores correspondentes.

De cada mapa se obteve uma imagem, que foi convertida em uma planilha com 254 linhas (Latitude) e 251 colunas (Longitude) da região correspondente aos dados necessários dos mapas. Cada linha corresponde aproximadamente a 1'35" e cada coluna a 1'54". Há uma correspondência direta entre linhas e latitudes e entre colunas e longitudes. Essas planilhas eletrônicas são adequadas para a realização dos cálculos necessários para as etapas seguintes do trabalho.

2.2 Obtenção dos dados de irradiação solar em uma superfície inclinada a partir da energia solar horizontal

A metodologia utilizada para o cálculo da irradiação solar inclinada a partir da irradiação solar horizontal no mês central da estação do ano, \overline{H} , foi a do Modelo Isotrópico.

Considerou-se, para o hemisfério sul, a inclinação β igual a -45° , e a latitude ϕ para o Estado do Rio Grande do Sul igual a -30° e o albedo ρ sendo 0,2.

Em Duffie e Beckman, (1991), é determinada, para o dia típico do mês central de cada estação, o valor da irradiação solar média inclinada, $\overline{H_T}$, através da Eq.(1).

$$\overline{H_T} = \overline{H_b} R_b + \overline{H_d} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \overline{H} \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \rho \quad (1)$$

onde:

$\overline{H_T}$ é a Irradiação global inclinada diária em média mensal;

$\overline{H_b}$ é a Irradiação global direta diária em média mensal;

R_b é o fator de correção;

$\overline{H_d}$ é a Irradiação difusa diária em média mensal;

\overline{H} é a Irradiação global diária em média mensal.

2.3 Obtenção dos dados da velocidade do vento a 10 metros de altura

Conforme citado em Carvalho, et al. (2003), a velocidade do vento em uma altura qualquer pode ser estimada através de diversas relações, uma delas, conhecida como lei logarítmica, descreve o perfil da velocidade através da Eq.(2):

$$V(h) = V_{ref} \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad (2)$$

onde:

V é a velocidade do vento calculada na altura h ;

h é a altura na qual se deseja saber a velocidade do vento;

h_{ref} é a altura de referência de medição da velocidade do vento;

V_{ref} é a velocidade do vento medida nesta altura de referência;

z_0 é a rugosidade.

A utilização da Eq.(2) não leva em consideração a temperatura e a pressão atmosférica, fatores estes que também influenciam a velocidade do vento, portanto, deve-se levar em consideração esta limitação.

3. ÍNDICES DE COMPLEMENTARIDADE

Em um sistema híbrido a energia total gerada será a soma das energias solar e eólica devendo-se levar ainda em consideração a sua complementaridade de amplitude e temporal.

Para que seja explorada a característica da complementaridade entre as fontes de energia solar e eólica torna-se necessário conhecer as disponibilidades energéticas quanto a sua variação de amplitude, aos períodos considerados e os valores de amplitude estimados.

A complementaridade entre as fontes de energia solar e eólica pode ser quantificada mediante índices apropriados.

Neste trabalho foram determinados três índices, o índice de complementaridade de amplitude, o índice de complementaridade de energia e tempo e o índice de complementaridade total.

Beluco, (2001), faz uma avaliação da complementaridade entre a energia solar e a energia híbrida e afirma que o índice de complementaridade entre as amplitudes avalia a relação entre as proporções dos valores máximos e mínimos de duas funções de disponibilidade energética.

Se fosse realizada uma avaliação baseada em médias mensais, a amplitude considerada para a energia solar disponível seria a diferença entre o mês de maior radiação e o mês de menor radiação. O mesmo se aplicaria para a energia eólica. Como os mapas da velocidade do vento a 50 m de altura estavam disponíveis apenas para 4 estações (e não mensalmente), foi decidido trabalhar com os dois recursos energéticos na base de tempo trimestral. Na determinação do índice de complementaridade entre as amplitudes o que importa é a variação relativa do recurso e não o potencial energético. Se um dos recursos em estudo não varia ao longo do ano, a complementaridade será nula. Se as duas fontes energéticas apresentarem a mesma diferença entre seus valores máximo e mínimo podem ser consideradas como complementares.

Do trabalho de Beluco, (2001), foram adaptadas as Eq.(3) e (4) para calcular o índice de complementaridade entre as amplitudes, i_a .

$$i_a = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(\delta_e - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2} \right] \cdot \left\{ 1 - \tanh \left[2^8 (\delta_e - \delta_s) \right] \right\} + \frac{1}{2} \left[\frac{(1 - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2 + (\delta_e - \delta_s)^2} \right] \cdot \left\{ 1 + \tanh \left[2^8 (\delta_e - \delta_s) \right] \right\} \quad (3)$$

$$\delta_e = 1 + \frac{E_{emáx} - E_{emin}}{E_{emáx}} \quad , \quad \delta_s = 1 + \frac{E_{smáx} - E_{smin}}{E_{smáx}} \quad (4)$$

onde:

$E_{em\acute{a}x}$ é o valor máximo de energia eólica disponível entre as 4 estações do ano;

$E_{em\acute{i}n}$ é o valor mínimo de energia eólica disponível entre as 4 estações do ano;

$E_{sm\acute{a}x}$ é o valor máximo de energia solar disponível entre as 4 estações do ano;

$E_{sm\acute{i}n}$ é o valor mínimo de energia solar disponível entre as 4 estações do ano.

No denominador das equações para o cálculo do δ_e e δ_s foi utilizado o valor da máxima energia disponível eólica e solar.

Neste trabalho o índice de complementaridade entre as amplitudes, i_a , encontrado é multiplicado pelo valor dez, de tal forma que este índice é igual a dez quando as proporções dos valores máximos e mínimos das duas funções de disponibilidade energética forem iguais e, conforme sejam diferentes, o índice se afasta do dez, tendendo a zero.

Por outro lado, de nada valeria duas fontes energéticas apresentarem boa variação de amplitude se os máximos e mínimos coincidissem no tempo. Conforme Beluco, (2001), a complementaridade no tempo pode existir quando as disponibilidades energéticas de duas ou mais fontes apresentam períodos que se complementam ao longo do tempo em uma mesma região.

Neste trabalho foi considerado o período entre as estações climáticas do ano.

É necessário fazer uma ponderação entre as energias solar e eólica para o cálculo do índice de complementaridade de tempo e energia.

Para a ponderação da energia solar foi considerado que, aproximadamente, o valor máximo de energia solar diária é de 25 MJ/m^2 , o valor mínimo de 9 MJ/m^2 e o valor médio anual de 17 MJ/m^2 , e substituindo esses valores na Eq.(5):

$$E_s = \frac{E_{sm\acute{a}x} - E_{sm\acute{i}n}}{E_{sm\acute{e}d}} \quad (5)$$

obtém-se $E_s = 0,94$, que na ponderação das energias disponíveis, vai ser considerado como valor unitário.

Para a ponderação da energia eólica é considerado que, aproximadamente o valor referencial da máxima e da mínima velocidade do vento respectivamente igual a 8 m/s e 4 m/s , seria obtida aproximadamente uma faixa para a energia eólica entre 50 MJ/m^2 e 6 MJ/m^2 . Considerando o valor médio anual de energia eólica de 22 MJ/m^2 e, substituindo esses valores na Eq.(6):

$$E_e = \frac{E_{em\acute{a}x} - E_{em\acute{i}n}}{E_{em\acute{e}d}} \quad (6)$$

obtém-se o valor de $E_e = 2$, que será o considerado na ponderação das energias disponíveis.

Fazendo-se a ponderação entre as energias solar e eólica é obtida a Eq.(7):

$$i_{et} = E_s \cdot \frac{E_e}{2} \quad (7)$$

O índice de complementaridade de tempo e energia é definido pela Eq.(8):

$$i_{et} = \frac{E_{s1} - E_{s2}}{E_{sA}} \cdot \frac{E_{e2} - E_{e1}}{2E_{eA}} \quad (8)$$

onde:

i_{et} é o índice de complementaridade de tempo e energia;

E_{s1} é o valor de energia solar disponível correspondente a uma determinada estação do ano;

E_{s2} é o valor de energia solar disponível correspondente à outra estação do ano;

E_{sA} é o valor de energia solar disponível anual;

E_{e1} é o valor de energia eólica disponível correspondente a uma determinada estação do ano;

E_{e2} é o valor de energia eólica disponível correspondente à outra estação do ano;

E_{eA} é o valor de energia eólica disponível anual.

Por exemplo, considerando a estação 1 sendo a primavera e a estação 2 sendo o outono se obtém o cálculo do índice de complementaridade de tempo e energia entre as estações primavera e outono. Neste trabalho o índice de complementaridade de tempo e energia, i_{et} , encontrado é multiplicado pelo valor dez, de tal forma que se este índice apresentar o valor zero significa que não há complementaridade de tempo e energia, das energias solar e eólica, entre estas duas estações do ano. Se apresentar um valor positivo, indicará que há uma complementaridade de tempo e energia entre essas estações. Os cálculos que resultarem valores negativos serão considerados como sendo zero. Se o valor obtido for dez indicará que a complementaridade entre as fontes energéticas é máxima, ou seja irão se complementar no tempo e energia.

O índice de complementaridade total nos indica o grau de complementaridade entre as disponibilidades energéticas das duas fontes energéticas, avaliando conjuntamente a defasagem no tempo e a proporção entre as amplitudes.

O índice de complementaridade total é obtido mediante a Eq.(9):

$$i_t = i_a \cdot i_{et} \quad (9)$$

onde:

i_t é o índice de complementaridade total;

i_a é o índice de complementaridade entre as amplitudes;

i_{et} é o índice de complementaridade de tempo e energia.

Os valores para o índice de complementaridade são arbitrados no momento da sua concepção. Foram escolhidos valores entre 0 e 10 para o índice de complementaridade entre amplitudes e para o índice de complementaridade de tempo e energia. Os limites de valores para o índice de complementaridade total serão, evidentemente, 0 e 100. Um índice 100 para complementaridade total estaria indicando uma zona 100% complementar. Para apresentar o índice de complementaridade total foram selecionadas as estações de inverno e verão.

É importante salientar que a falta de complementaridade não significa falta de recurso energético. Por exemplo, a complementaridade de tempo e energia pode ser baixa em uma região em que sempre haja muito vento e também muita radiação solar. Neste caso em vez de utilizar um sistema híbrido, poderia ser utilizado um sistema singelo. Os dados de complementaridade não são suficientes para fazer um dimensionamento otimizado, devem ser combinados com os dados de disponibilidade energética dos recursos selecionados.

4. RESULTADOS

Após a determinação dos valores dos índices de complementaridade de tempo e energia, amplitude e total são gerados os mapas destes índices para o Estado do Rio Grande do Sul.

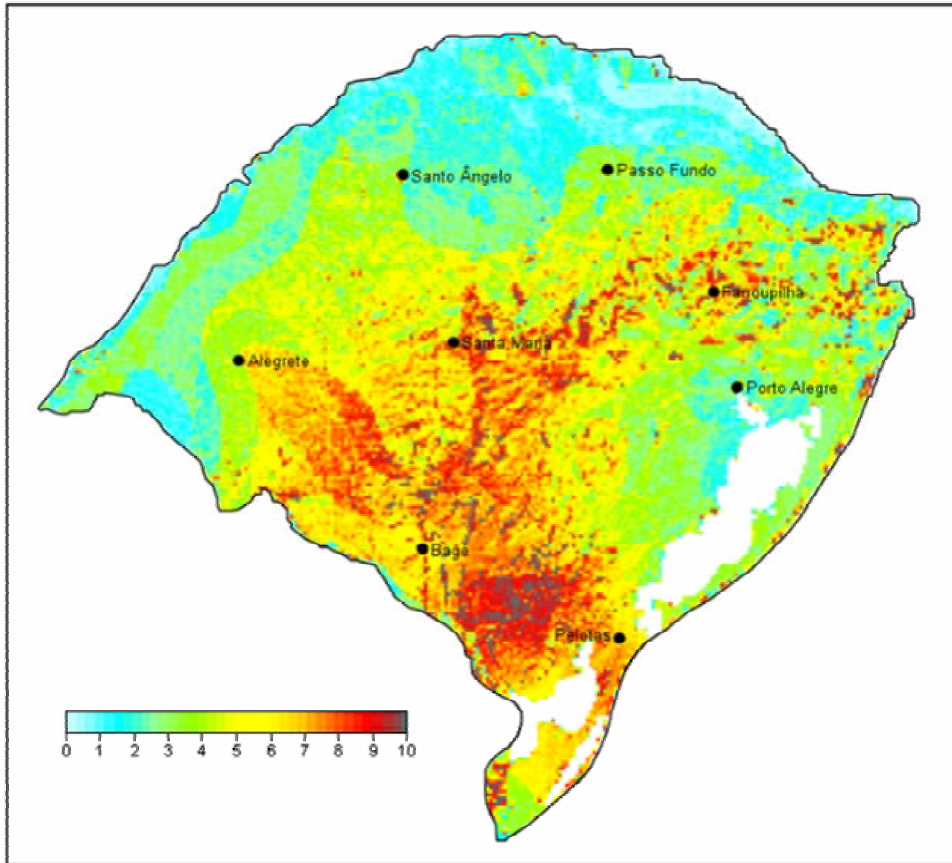


Figura 3 - Índice de complementaridade de amplitude

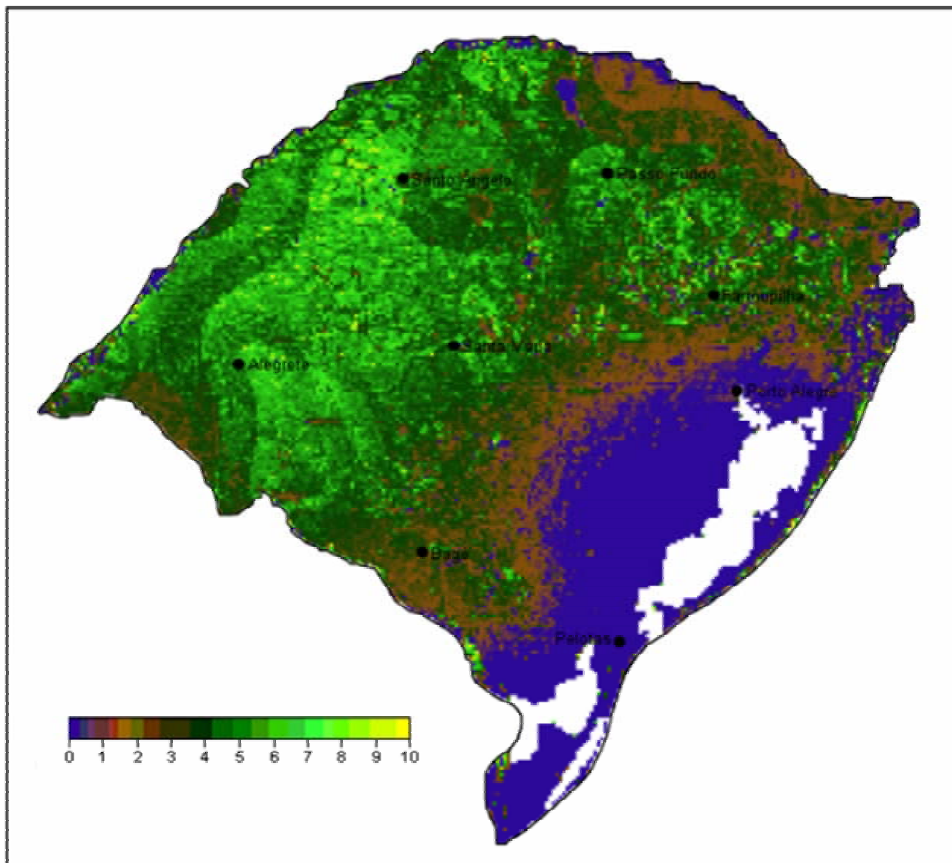


Figura 4 - Índice de complementaridade de tempo e energia entre inverno e verão

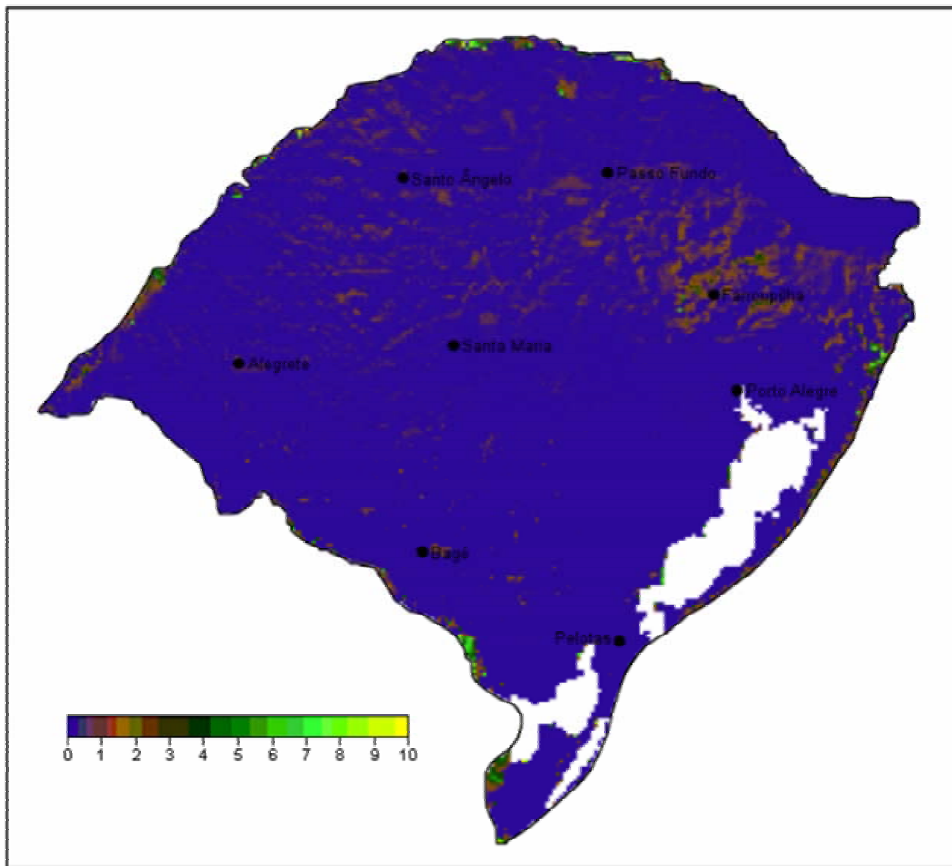


Figura 5 - Índice de complementaridade de tempo e energia entre outono e verão

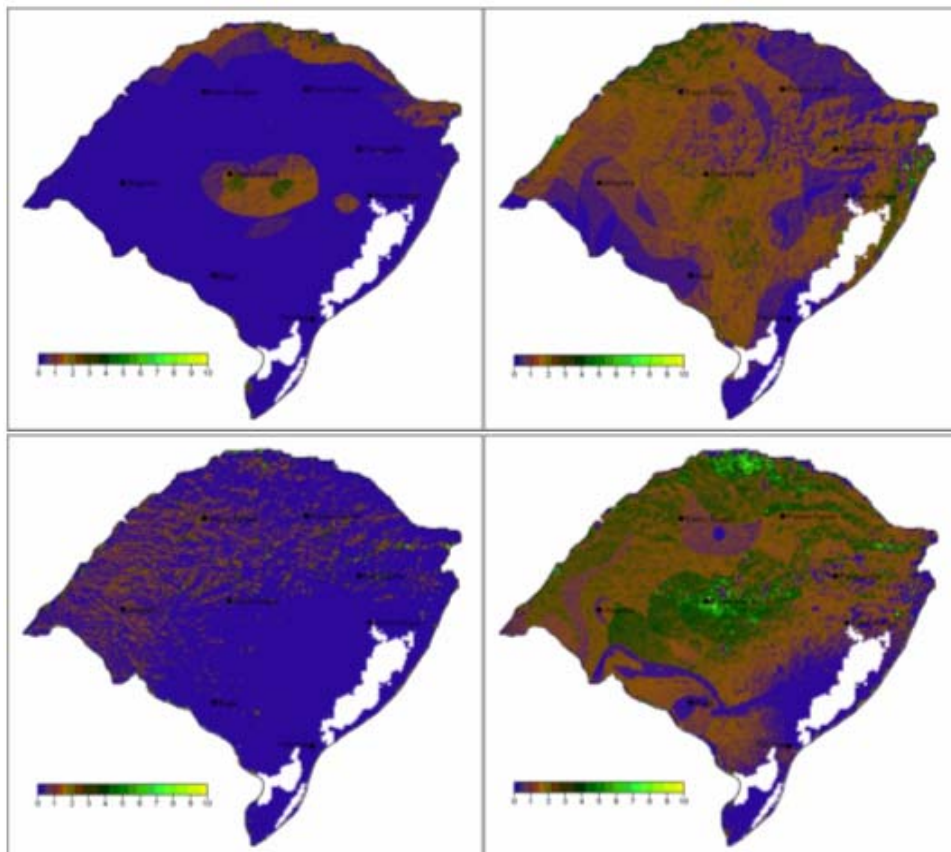


Figura 6 - Índice de complementaridade de tempo e energia entre as diferentes estações do ano

Na figura 6 visualiza-se, respectivamente, da esquerda para direita e de cima para baixo, os índices de complementaridade de tempo e energia entre outono e primavera, primavera e verão, inverno e primavera e, outono e inverno.

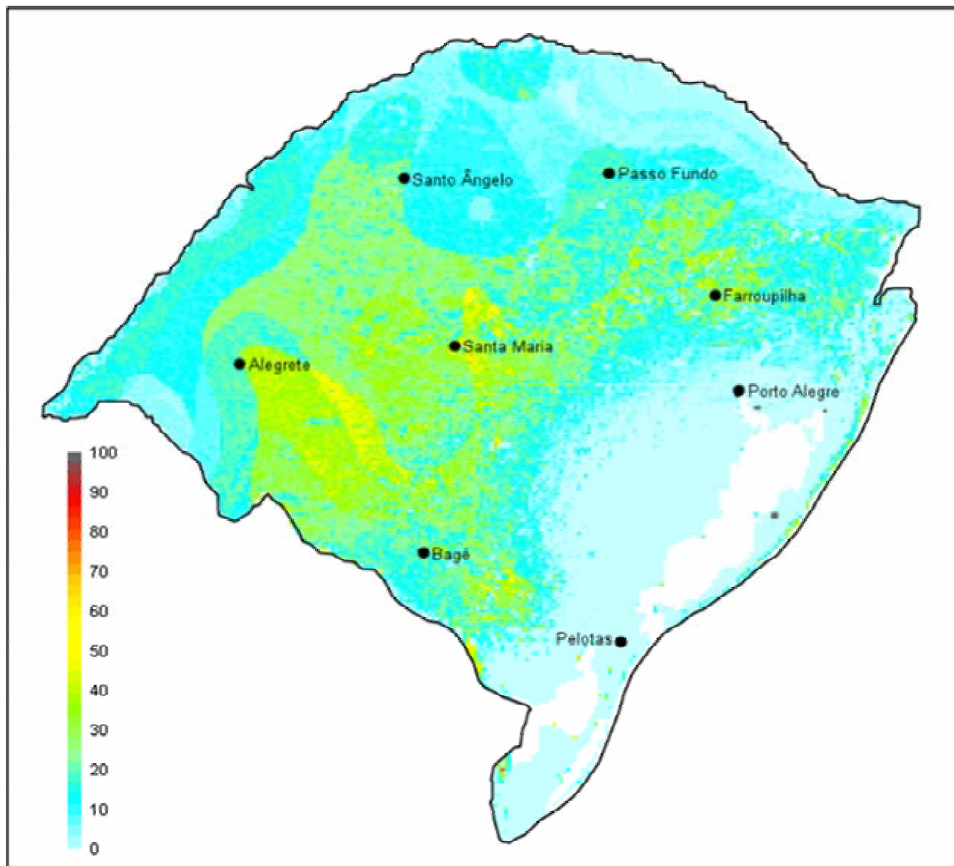


Figura 7 - Índice de complementaridade total (amplitude x tempo e energia entre inverno e verão)

5. CONCLUSÕES

Nos mapas dos índices de complementaridade de tempo e energia pode-se identificar a maior complementaridade entre as estações inverno e verão e a menor entre as estações outono e verão.

Nos mapas dos índices de complementaridade de amplitude pode-se observar que existe uma variação muito grande nos valores. Ao norte do Estado há uma menor complementaridade de amplitude, não significando uma falta do recurso energético porém indica apenas que não são complementares na amplitude.

Os mapas de complementaridade evidenciam regiões que podem ser pontos de partida para um estudo mais aprofundado do uso de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico nas mesmas, obviamente não pode ser a única fonte de consulta para esta decisão, devendo-se considerar critérios técnicos, financeiros e aspectos locais da região considerada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Beluco, A., 2001. Bases para uma metodologia de dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica, Tese de Doutorado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Carvalho, P., 2003. Geração eólica; Imprensa Universitária. Universidade Federal do Pernambuco, Fortaleza, Brasil.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Martinazzo, C. A., 2004. Modelos de Estimativa de Radiação Solar para Elaboração de Mapas Solarimétricos, Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- SEMC, 2002. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do estado do Rio Grande do Sul. "Atlas Eólico do Rio Grande do Sul". A. Camargo Odilon e Secretaria de Energia, Minas e Comunicações do Estado do Rio Grande do Sul.

***Abstract.** The usage of Wind and Solar energy sources combined, taking advantage of their complementarity, can make a hybrid eolic-photovoltaic arrangement, operating as a stand-alone electricity generation system, to be economically viable and technically reliable. The development of wind to solar complementarity maps for the State of Rio Grande do Sul is very important to a better utilization of such systems at this region of Brazil. After a survey of the existing data and methods for estimating the solar radiation and wind speed distribution, the values of the trimestral averages corresponding to the four seasons of the year (Summer, Autumn, Winter and Spring) and the yearly average were calculated, allowing the development of the wind and solar resources complementarity maps to be used in the sizing of eolic-photovoltaic systems. The methodology used to obtain wind speed data at 10 m height consisted in scanning 50 m height wind speed maps and rugosity maps, and then correcting this data to the elevation of 10 m. The horizontal solar radiation data was also modified to obtain the incident tilted radiation for a better yield of the photovoltaic modules in Winter. The conclusion is that there are regions in Rio Grande do Sul in which the implementation of eolic-photovoltaic hybrid systems are more recommendable than single photovoltaic or wind systems, thus allowing an additional option for the usage of renewable energy sources.*

Key words: Complementarity Maps, Solar Energy, Wind Energy, Hybrid System