

A Complementariedade no Tempo entre as Energias Hidrelétrica e Fotovoltaica

Alexandre Beluco, Paulo Kroeff de Souza, Arno Krenzinger

Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), UFRGS - Caixa Postal 15029
91501-970 Porto Alegre, RS - albeluco@iph.ufrgs.br

Recebido: 15/10/01 - revisão: 30/08/02 - aceito: 05/11/02

RESUMO

Dentre os sistemas de geração de pequeno porte baseados exclusivamente em uma fonte de energia, alguns têm alcançado competitividade técnica e econômica em várias aplicações. Destacam-se aí os sistemas baseados em energia hidrelétrica em pequena escala, em energia solar, em energia eólica e em energia de biomassa. Mas esses sistemas tendem a apresentar custos muito elevados quando projetados para não apresentar falhas no atendimento aos consumidores. Sistemas baseados em mais de uma fonte, mesmo com custos iniciais elevados, podem resultar em índices razoáveis de atendimento aos consumidores, ainda mais se forem baseados em fontes que se apresentem complementares no tempo. Este artigo discute a questão da complementariedade entre fontes de energia, com ênfase na complementariedade entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica, propõe índices matemáticos adimensionais para a avaliação de diferentes graus de complementariedade e identifica, de modo preliminar, a complementariedade entre essas fontes no Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: complementariedade energética; aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte; aproveitamentos fotovoltaicos.

INTRODUÇÃO

O panorama de crise energética configurado nas últimas décadas, com os “choques” do petróleo, as crescentes preocupações com o meio ambiente, a redução do número de locais propícios a grandes aproveitamentos hidrelétricos, entre outros motivos, têm incentivado a procura de alternativas para obtenção de suprimentos de energia.

As fontes renováveis têm sido bastante estudadas tanto em laboratório quanto em condições reais, sendo que algumas delas alcançam competitividade técnica e econômica em várias aplicações. Destacam-se aí os sistemas baseados em energia hidrelétrica em pequena escala e em energias solar, eólica e de biomassa.

Os sistemas baseados em fontes renováveis enfrentam dificuldades de aceitação, pelos custos elevados de instalação, pela eficiência final relativamente baixa, por representarem problemas relativamente complexos de controle e exigirem dos usuários adaptação a rotinas de conservação de energia, além de dificuldades locais ou intrínsecas a cada tipo de aproveitamento.

Nesse contexto, a utilização de mais de uma fonte de energia, possivelmente apresentando algum tipo de complementariedade, pode amenizar as exigências sobre o controle e garantir menos falhas no atendimento ao consumo sem aumentos inviáveis nos custos, entre outras vantagens.

Este artigo discute a complementariedade entre fontes de energia, com ênfase na complementariedade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica, e trata tam-

bém da avaliação de diferentes graus de complementariedade. Ao final, é apresentada uma avaliação, em caráter preliminar, sobre a complementariedade entre essas fontes ao longo do Estado do Rio Grande do Sul e é discutido o aproveitamento dessa complementariedade em sistemas para conversão de energia.

COMPLEMENTARIEDADE

A palavra *complementariedade* (ou *complementaridade*) pode ser interpretada como capacidade para servir de complemento. A expressão *complementariedade energética* refere-se então à capacidade de uma ou mais fontes de apresentarem disponibilidades energéticas complementares no tempo, no espaço ou em ambos. A complementariedade *no espaço* pode existir quando as disponibilidades energéticas de uma ou mais fontes se complementam ao longo de uma região. A complementariedade *no tempo* pode existir quando as disponibilidades apresentam períodos que se complementam ao longo do tempo em uma mesma região.

Há poucas referências discutindo ou identificando a complementariedade entre fontes de energia. O livro de McVeigh (1977), por exemplo, identifica a complementariedade entre as energias solar e eólica ao longo do território da Grã Bretanha. Uma complementariedade presumivelmente espacial. O artigo de Kruangpradit & Tayati (1996) cita o uso de energia solar para complementação de um aproveitamento hidrelétrico já existente em Ban Khun Pae, no

norte da Tailândia. Como os aproveitamentos situam-se próximos, consistiria em complementariedade no tempo.

A complementariedade também pode existir se forem consideradas as disponibilidades energéticas de uma ou mais fontes ao longo de uma extensa região e ao longo do tempo. Como exemplo, pode ser citada a complementariedade no tempo e no espaço que ocorre para a disponibilidade de energia hidráulica ao longo do território brasileiro e ao longo de um ano, comentada como um dos argumentos em favor do interligamento dos sistemas energéticos Sul-sudeste e Norte-nordeste, ou mesmo de sistemas energéticos na América do Sul, conforme discutido por Damazio et al. (1997).

O aproveitamento eficiente de diferentes tipos de complementariedade envolve obviamente um gerenciamento eficiente da energia disponível e da energia acumulada em dispositivos de armazenamento, que assumem importância vital nesse tipo de sistema de geração.

COMPLEMENTARIEDADE ENERGÉTICA NO TEMPO

Neste artigo, a atenção é centrada na complementariedade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica. As disponibilidades energéticas dessas duas fontes, em determinado local, podem ser consideradas complementares no tempo de um modo “perfeito” se apresentarem períodos iguais e os seus respectivos valores mínimos (ou máximos) distantes entre si de um intervalo correspondente à metade desse período; e se apresentarem ainda valores médios iguais e relações iguais entre os seus respectivos valores máximos e mínimos.

A Figura 1 apresenta duas curvas senóides para exemplificar um caso de complementariedade perfeita, que podem ser interpretadas como as disponibilidades hídrica (vazão) e solar (insolação) máxima diária ao longo de um ano. Essas curvas são idealizadas, e podem também representar as potências disponibilizadas pelos geradores, ou ainda outras fontes de energia.

As curvas da Figura 1 apresentam períodos iguais a 1 ano, valores médios iguais a 1, valores mínimos iguais a 0,8 e valores máximos iguais a 1,2. O valor mínimo da primeira curva está situado em 0,75 ano e o valor mínimo da segunda em 0,25 ano. A complementariedade entre essas duas curvas pode ser caracterizada como perfeita na medida em que os valores mínimos estão defasados entre si de um intervalo igual a 0,5 ano, a diferença entre os valores máximos e mínimos é igual a 0,4, em ambos os casos, e os respectivos valores médios são iguais entre si.

As potências ou as energias diárias disponibilizadas por geradores em um aproveitamento híbrido também podem ser consideradas complementares no tempo, mesmo que as disponibilidades não o sejam de uma forma completa. As

disponibilidades podem apresentar uma complementariedade imperfeita, e os geradores podem ser dimensionados e operados de forma que as energias disponibilizadas apresentem valores médios iguais ao longo de um ano. Da mesma forma, o emprego de reservatórios pode melhorar as complementariedades no tempo e entre as diferenças entre valores máximos e mínimos, conforme Beluco (2001).

GRAUS DE COMPLEMENTARIEDADE ENERGÉTICA NO TEMPO

A necessidade de avaliar o quanto duas funções que não são perfeitamente complementares se aproximam da situação mostrada na Figura 1 naturalmente sugere a criação de índices matemáticos adimensionais, com valores entre zero e um, que considerem as características discutidas.

Sem a intenção de esgotar o assunto, e em virtude de não terem sido localizados na literatura, após exaustiva pesquisa bibliográfica, índices que fossem apropriados para definir claramente e avaliar a complementariedade no tempo em todas as suas variantes, são apresentadas definições que foram julgadas apropriadas para representar diferentes gradações da noção de complementariedade discutida na seção anterior.

Em princípio, esses índices mostram-se suficientes para o dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica, podendo também ser aplicados a outras situações.

As duas funções apresentadas na Figura 1 podem representar as disponibilidades energéticas de duas fontes, ou as potências disponibilizadas por dois geradores, ou ainda as energias diárias disponibilizadas por dois geradores. Essas funções serão empregadas como exemplo para a elaboração de um índice de complementariedade, mas não devem em conjunto descrever as disponibilidades hídrica e solar em determinado local. A disponibilidade solar apresenta variações com períodos anuais e diários e sua descrição exige o desenvolvimento de uma função que reproduza esses efeitos.

O índice de complementariedade no tempo, denominado como índice de complementariedade total (para diferenciar de uma de suas componentes), i_c , é então um índice elaborado para expressar o grau de complementariedade entre as disponibilidades de duas fontes de energia. Ele é definido de acordo com a Equação (1) e inclui a avaliação da defasagem no tempo (este sim, um índice de complementariedade no tempo), da relação entre as médias e entre as amplitudes:

$$i_c = i_t i_e i_a \quad (1)$$

Nessa equação, i_t é o índice de complementariedade no tempo, i_e é o índice de complementariedade entre os va-

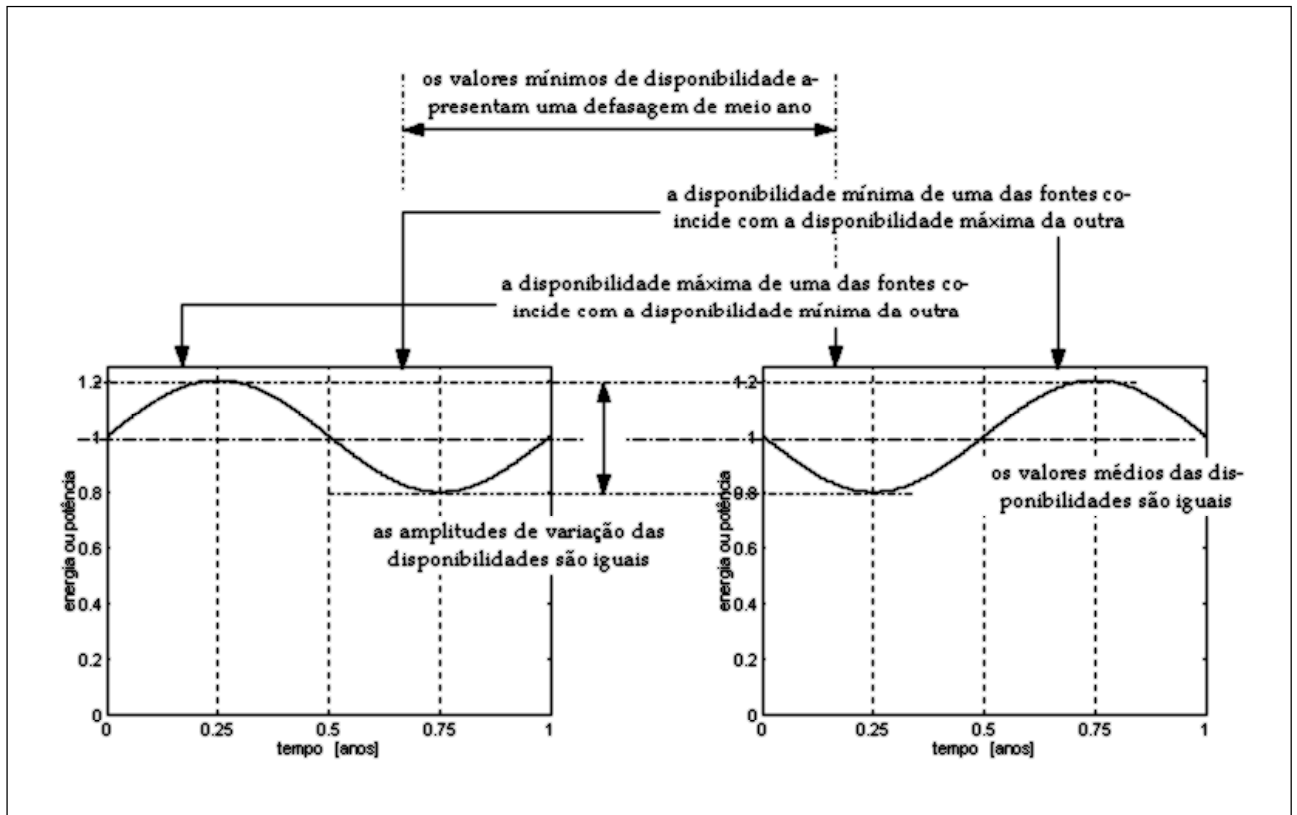


Figura 1. Funções matemáticas que caracterizam as disponibilidades energéticas de duas fontes consideradas perfeitamente complementares ao longo de um ano.

lores médios de disponibilidade e i_a é o índice de complementariedade entre as amplitudes de variação das disponibilidades energéticas.

É necessário evitar confusões entre os índices i_c e i_t . O primeiro fornece uma avaliação da complementariedade entre as disponibilidades energéticas consideradas, apresentando três componentes, conforme (1), englobando a complementariedade no tempo e “outras” complementariedades. O segundo é justamente uma dessas componentes, relacionada unicamente à complementariedade das disponibilidades energéticas ao longo do tempo.

O índice de complementariedade no tempo, i_t , é definido conforme a Equação (2) e avalia o intervalo de tempo entre os valores mínimos das disponibilidades das duas fontes de energia. Se esse intervalo corresponder à metade do período, o índice resultará na unidade. Se corresponder a zero, ou seja, se os valores mínimos coincidirem no tempo, o índice resultará nulo. Os valores intermediários guardam uma relação linear entre si.

Nesse índice, D_h é o dia correspondente ao valor máximo de disponibilidade hídrica, d_h é o dia correspondente ao valor mínimo de disponibilidade hídrica, D_s é o dia correspondente ao valor máximo de disponibilidade solar e d_s é o dia correspondente ao valor mínimo de disponibilidade solar. Essa expressão pode ser reescrita como em (3), para

facilitar as estimativas, supondo que as diferenças $(D-d)$ sejam sempre iguais a meio ano:

$$i_t = \frac{|d_h - d_s|}{\sqrt{|D_h - d_h| |D_s - d_s|}} \quad (2)$$

$$i_t = \frac{|d_h - d_s|}{\sqrt{180 \cdot 180}} = \frac{|d_h - d_s|}{180} \quad (3)$$

O índice de complementariedade de energia, i_e , é definido conforme a Equação (4) e avalia a proporção entre os valores médios das funções de disponibilidade. Se os valores médios forem iguais, o índice deve resultar na unidade. Conforme sejam diferentes, o índice deve se afastar da unidade, tendendo a zero. Os valores intermediários também guardam uma relação linear entre si:

$$i_e = 1 - \left(\frac{E_h - E_s}{E_h + E_s} \right) \quad (4)$$

Nesse índice, E_h corresponde à energia total anual disponibilizada pelo gerador hidrelétrico e E_s corresponde à energia total anual disponibilizada pelo gerador fotovoltaico. O índice i_e deve associar o valor 0 às situações em que o

coeficiente assume os valores 0 e 2 e associar o valor 1 à situação em que o coeficiente assume o valor 1.

O índice de complementariedade entre as amplitudes, i_a , é definido conforme a primeira equação em (5) e avalia a relação entre as proporções dos valores máximos e mínimos das duas funções de disponibilidade energética. Se as diferenças forem iguais, o índice resultará na unidade, e conforme sejam diferentes o índice se afasta desse valor, tendendo a zero, conforme a Figura 2.

Nesse índice, δ_h e δ_s correspondem a uma manipulação com as diferenças entre os valores máximo e mínimo respectivamente das energias diárias disponibilizadas pelos geradores hidrelétrico e fotovoltaico. A Figura 2 mostra o comportamento do índice i_a , em função dessas duas diferenças, para δ_s igual a 2, podendo ser reconstruída para qualquer valor de δ_s . Mais adiante é indicado o valor adotado para o Estado do Rio Grande do Sul.

As diferenças δ_h e δ_s são obtidas da segunda e da terceira equações em (5), onde $E_{d h \text{ máx}}$ e $E_{d h \text{ mín}}$ correspondem às energias disponibilizadas pelo gerador hidrelétrico respectivamente nos dias de maior e de menor duração no ano, isto é, nos dias de maior tempo e de menor tempo de insolação, $E_{d s \text{ máx}}$ e $E_{d s \text{ mín}}$ correspondem às energias disponibilizadas pelo gerador fotovoltaico respectivamente nos dias de maior e de menor duração no ano, e $E_{d c}$ corresponde à energia diária consumida pelas cargas, considerada constante ao longo do dia e do ano.

Esse índice foi elaborado a partir das considerações apresentadas no apêndice.

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

$$\delta_h = 1 + \frac{E_{d h \text{ máx}} - E_{d h \text{ mín}}}{E_{d c}} \quad (5)$$

$$\delta_s = 1 + \frac{E_{d s \text{ máx}} - E_{d s \text{ mín}}}{E_{d c}}$$

O valor utilizado neste trabalho para δ_s , conforme Beluco (2001), é 1,1496, considerado para todo o Estado do Rio Grande do Sul. O valor de δ_h pode variar bastante, em função da disponibilidade hídrica no local do aproveitamento e da capacidade instalada do gerador hidrelétrico, mas dificilmente assumirá valores maiores do que os mostrados na Figura 2. Além disso, pela maneira como foi definido, nunca será menor que um, correspondente a uma situação em que a turbina do aproveitamento hidrelétrico turbina sempre a mesma vazão, que apresenta um tempo de recorrência muito baixo, ou uma frequência muito alta.

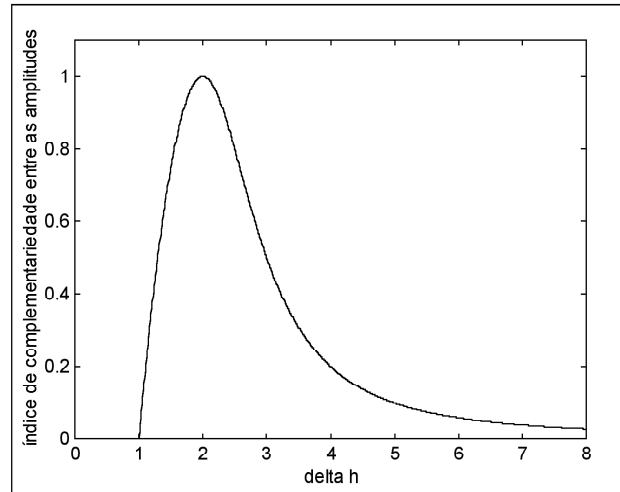


Figura 2. Comportamento do índice i_a , em função de δ_h , para δ_s igual a 2.

O índice de complementariedade entre as amplitudes de variação das disponibilidades energéticas é definido para incluir na avaliação a diferença entre as disponibilidades máxima e mínima das fontes de energia. No caso de uma das fontes não apresentar diferença de disponibilidade ao longo do período considerado, é impossível considerá-la para fins de complementariedade, resultando em índice i_a nulo. Se as duas fontes apresentarem as disponibilidades com a mesma diferença entre os respectivos valores máximo e mínimo, podem ser consideradas como complementares, devendo o índice atribuir-lhes valor máximo.

As funções da Figura 1, utilizadas para a criação dos índices de complementariedade, podem ser utilizadas para descrever de modo idealizado a disponibilidade instantânea hidráulica ou hidrelétrica e a disponibilidade máxima diária solar ou fotovoltaica. A descrição da disponibilidade instantânea solar ou fotovoltaica exige uma composição de três funções senóides, como descrito por Beluco (2001), para descrever os períodos anuais e diários consecuentes dos movimentos da Terra em torno de seu eixo e em torno do Sol.

O cálculo dos índices em situações reais pode ser auxiliado por ajustes pelo método dos mínimos quadrados com base em dados médios mensais. A Figura 3 mostra dados de precipitação média mensal e de radiação solar média mensal incidente sobre uma superfície plana, obtidos na estação climatológica de Taquari da FEPAGRO. A mesma figura mostra, superpostas aos dados mensais, curvas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados.

A determinação dos valores dos índices deve ser qualitativa, a partir de uma avaliação de curvas como as da Figura 3. O mínimo de disponibilidade solar ocorre no mês de julho, enquanto o mínimo de disponibilidade hídrica ocorre aproximadamente no mês de maio, com valores não muito maiores que esse mínimo desde o mês de janeiro. Por outro lado, o máximo de disponibilidade hídrica ocorre no

mês de agosto, enquanto o máximo de disponibilidade solar ocorre em dezembro.

A avaliação da complementariedade entre as energias depende das potências instaladas dos geradores hidrelétricos (turbina hidráulica e gerador elétrico) e fotovoltaico (área dos módulos fotovoltaicos). A avaliação da complementariedade entre as amplitudes exige a suposição sobre o perfil de demanda diário dos consumidores, e também é de difícil avaliação a partir dos dados disponíveis. Entretanto, uma avaliação preliminar é efetuada para permitir a confecção dos mapas apresentados adiante.

A intensidade média mensal de precipitação não dá uma boa informação de disponibilidade hídrica, para fins de geração de energia. Entretanto, nas menores bacias hidrográficas, as variações de vazão apresentam pouca defasagem em relação às variações de precipitação, e as amplitudes de variação se apresentam semelhantes.

A determinação dos índices com base em dados de vazão pode ser efetuada da mesma forma, com base em uma curva ajustada para dados médios mensais. Certamente, o emprego de dados diários, tanto para disponibilidade hídrica quanto para disponibilidade solar, fornecerá melhores resultados.

COMPLEMENTARIEDADE NO TEMPO ENTRE AS ENERGIAS HIDRELÉTRICA E FOTOVOLTAICA NO RS

Com o objetivo de apenas visualizar grandes áreas de complementariedade, os índices de complementariedade no tempo e entre as amplitudes, além do índice de complementariedade final, foram calculados para o Estado do Rio Grande do Sul a partir de uma base de dados mensais publicada pela Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias (FEPAGRO, 1989, 2000). Foram considerados dados de disponibilidade hídrica (precipitação mensal) e de disponibilidade solar (radiação solar mensal incidente sobre uma superfície horizontal).

Os resultados são mostrados respectivamente na Figura 4, na Figura 5 e na Figura 6. Este último foi elaborado supondo que o índice de complementariedade de energia assume valor unitário em todo o Estado. Os mapas mostram também (em pontos pretos) algumas das maiores cidades gaúchas.

A malha de interpolação dos dados foi obtida com o método de Kriging, com o uso do *software* Surfer na versão 3.2, resultando em uma matriz de 1200 linhas por 1200 colunas. Nos três mapas foram construídas linhas de nível, sobrepostas a uma imagem elaborada em tons de cinza, de acordo com as escalas mostradas. Na Figura 4, foram construídas linhas de nível para valores de i_t entre 0,20 e 1,00, em intervalos de 0,20. Da mesma forma, na Figura 5 foram construídas linhas para valores de i_a entre 0,60 e 1,00,

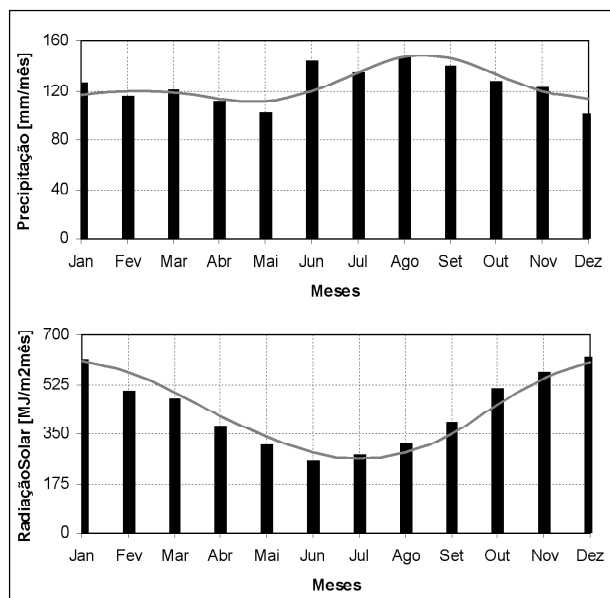


Figura 3. Dados de precipitação média mensal e insolação média mensal, para a estação climatológica da FEPAGRO em Taquari, RS. Curvas ajustadas (sobrepostas aos dados apresentados) pelo método dos mínimos quadrados.

em intervalos de 0,10. Por fim, na Figura 6 foram construídas linhas para valores de i_c entre 0,20 e 1,00, em intervalos de 0,20.

Observa-se que aproximadamente 58% da área do Estado apresenta valores de i_t maiores que 0,60, correspondente a defasagens entre valores mínimos de disponibilidade maiores que 72 dias, apresentando seus melhores valores desde a região das minas, passando pela depressão central até a fronteira noroeste. Observa-se também que aproximadamente 50% da área do Estado apresenta valores de i_a maiores que 0,80, correspondente a diferenças de cerca de 50% entre as amplitudes de variação de disponibilidades hídrica e solar, apresentando seus melhores valores nos extremos leste e oeste. Por fim, aproximadamente 4,67% da área do Estado apresenta valores de i_c maiores que 0,70, aproximadamente 45% maiores que 0,60 e cerca de 45% maiores que 0,50. Entretanto, observa-se claramente que a área mais apropriada, segundo o índice de complementariedade no tempo, não aparece como a mais apropriada segundo o índice de complementariedade entre as amplitudes. O índice de complementariedade final apresenta conseqüentemente valores intermediários nessa região, apresentando seus melhores valores na fronteira entre oeste e noroeste do Estado.

É necessário ressaltar que, nesses três mapas, as escalas de tons de cinza são diferentes. No primeiro e no terceiro mapas, os tons mais claros correspondem a valores dos índices próximos de zero. No segundo mapa os tons mais claros correspondem a valores do índice em torno de 0,50.

A utilização de dados médios mensais resulta incorreta no caso do cálculo do índice de complementariedade no

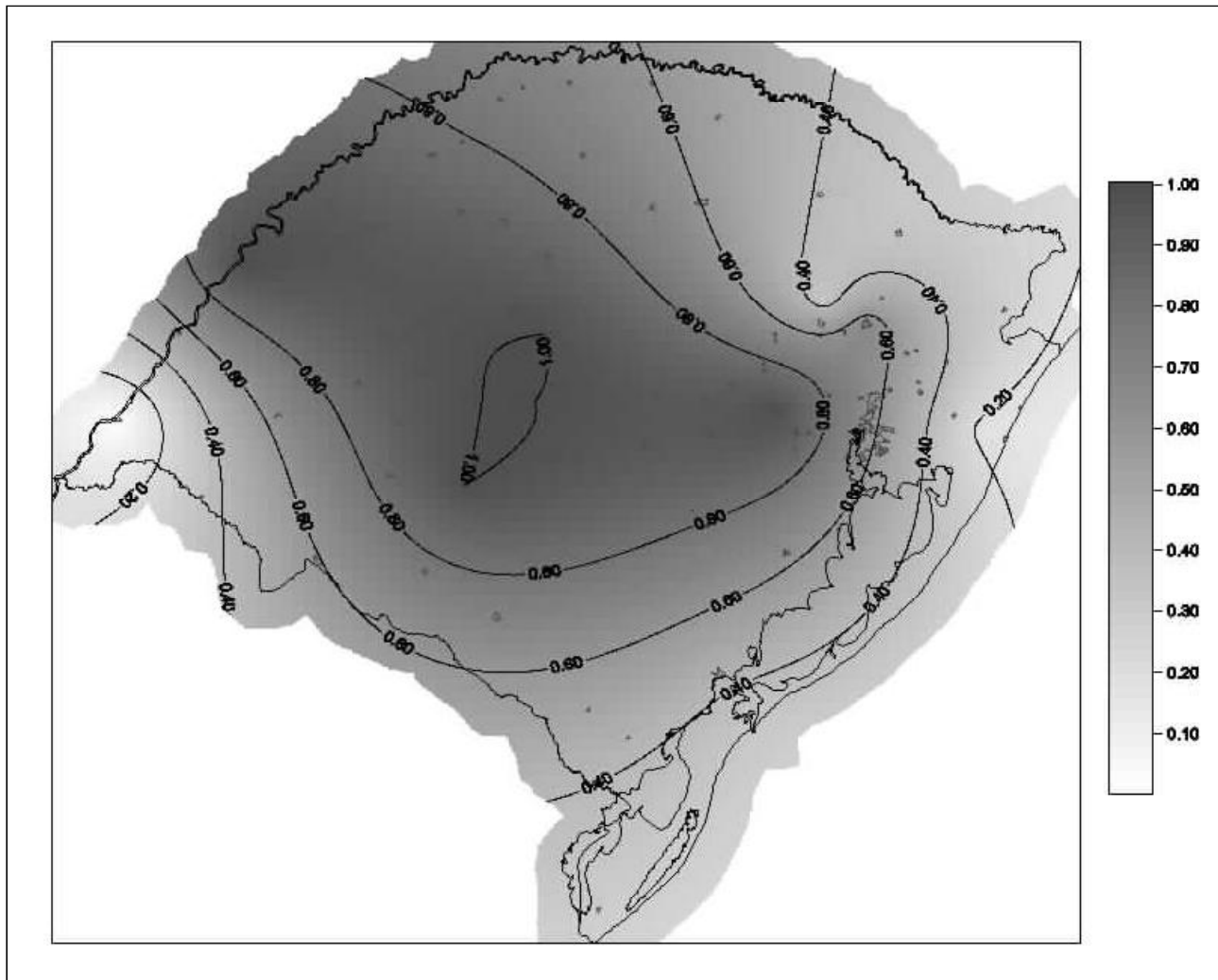


Figura 4. Complementariedade no tempo entre as disponibilidades hídrica e solar, calculada com base em dados de precipitação mensal e radiação solar mensal incidente sobre um plano horizontal, no RS.

tempo, na medida em que não permitem uma determinação precisa dos períodos das disponibilidades energéticas, e no caso do índice de complementariedade entre amplitudes, na medida em que mascaram os valores máximos e mínimos de variação.

Entretanto, esses mapas permitem a localização de áreas a serem inicialmente investigadas visando o aproveitamento de complementariedade. Resultados menos expeditos podem ser obtidos, por exemplo, com a utilização de vazões determinadas por estudos de regionalização, como o efetuado por CEEE e IPH (1991) para o RS e parte de SC, com a ressalva que a aplicação desses estudos é restrita a bacias maiores que cerca de 100 km².

No caso do índice de complementariedade no tempo, os semiperíodos das disponibilidades hídrica e solar foram considerados como iguais a meio ano, conforme é sugerido na Equação (3), e foram localizados os meses correspondentes aos valores mínimos de disponibilidade. É recomen-

dada a utilização de dados (no mínimo) diários de vazão, de uma série temporal com algumas décadas, para cálculos mais precisos envolvendo esse índice.

No caso do índice de complementariedade entre as amplitudes, os dados de precipitação não permitem uma boa avaliação da disponibilidade hídrica, na medida em que a vazão em determinada seção de um rio depende ainda de outros fatores. Entretanto, como a relação entre precipitações máxima e mínima se aproxima da relação entre vazões máxima e mínima nas menores bacias, justamente o campo de aplicação para a maioria dos sistemas implementados a partir deste trabalho, obtém-se, dentro de certos limites, uma avaliação razoável.

O cálculo desses índices com base em dados de energia disponibilizada pelos equipamentos de conversão (potências máximas, mínimas e médias disponibilizadas pelos geradores hidrelétrico e fotovoltaico e energias disponibilizadas ao longo de um ano) permitiria uma avaliação do em-

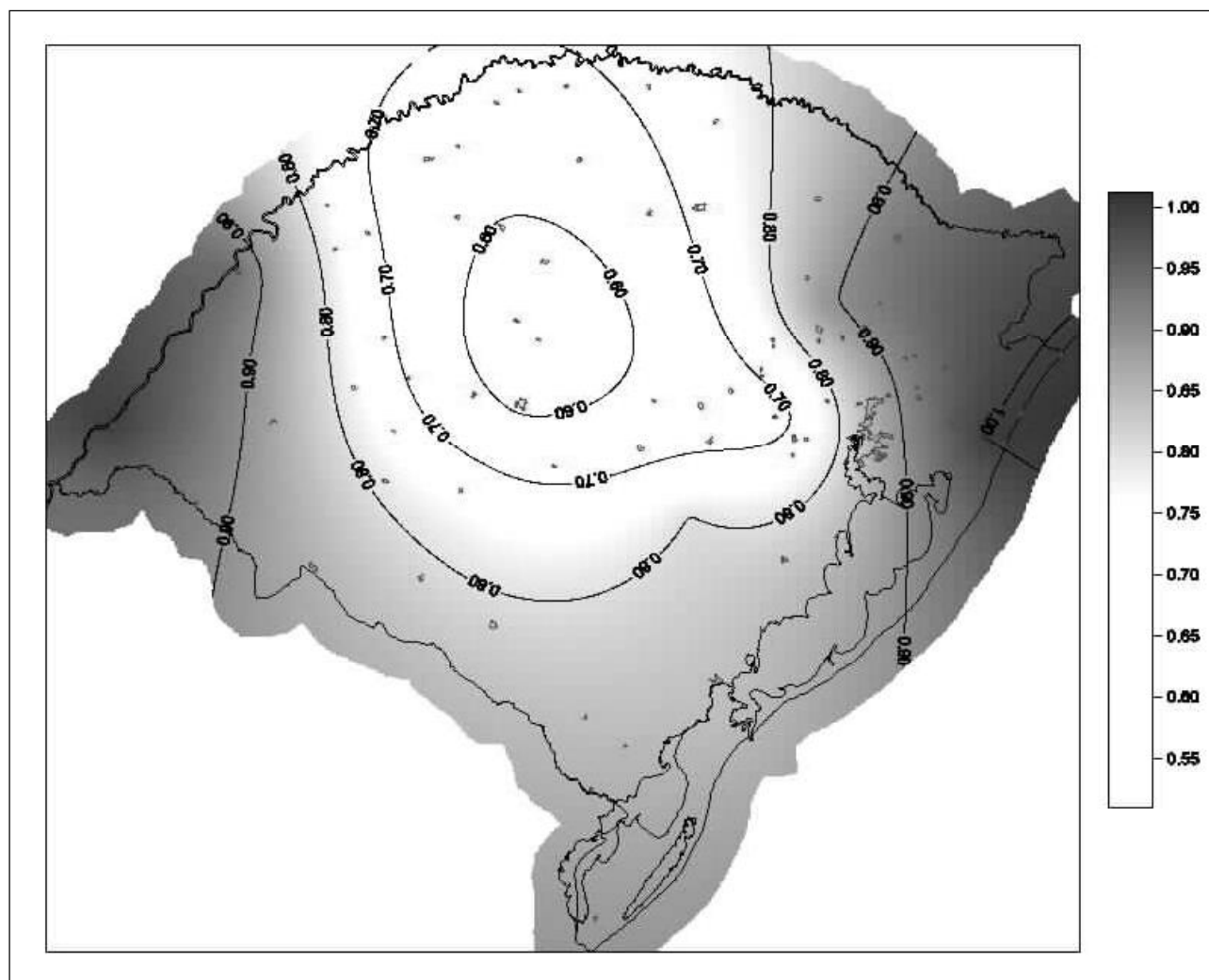


Figura 5. Complementariedade entre as amplitudes de variação das disponibilidades hídrica e solar, calculada com base em dados de precipitação mensal e radiação solar mensal incidente sobre um plano horizontal, no RS.

prego da complementariedade na operação do sistema. A elaboração do terceiro mapa, para a complementariedade total entre as disponibilidades consideradas, exigiu que fosse lançada uma suposição para a complementariedade entre energias médias.

Uma avaliação precisa e confiável de complementariedade em determinado local deve ser baseada em dados de vazão e em dados de radiação solar incidente, e deve considerar dados diários. O conhecimento do desempenho de um aproveitamento híbrido a partir de simulações computacionais e de estudos experimentais, permite a avaliação dos efeitos da complementariedade sobre o dimensionamento do sistema, e pode justificar um estudo mais amplo e mais completo para caracterização de complementariedade.

A ANA (Agência Nacional de Águas) centraliza, desde janeiro de 2002, dados de estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas de todo o país, que podem ser utilizados para identificação de complementa-

riedade. Entretanto, poucas estações apresentam séries temporais longas e completas de radiação solar ou de descarga. Além disso, as séries para rios em bacias menores devem ser obtidas a partir da transposição de dados para bacias maiores. Por fim, de todos os dados disponíveis, nem todos haviam sido consistidos até a finalização deste artigo.

APROVEITAMENTOS HÍBRIDOS BASEADOS EM ENERGIAS HIDRELÉTRICA E FOTOVOLTAICA

A complementariedade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica pode ser aproveitada com o uso de sistemas híbridos baseados nessas duas fontes. Esses aproveitamentos podem apresentar várias configurações diferentes. Os dois geradores podem ser coloca-

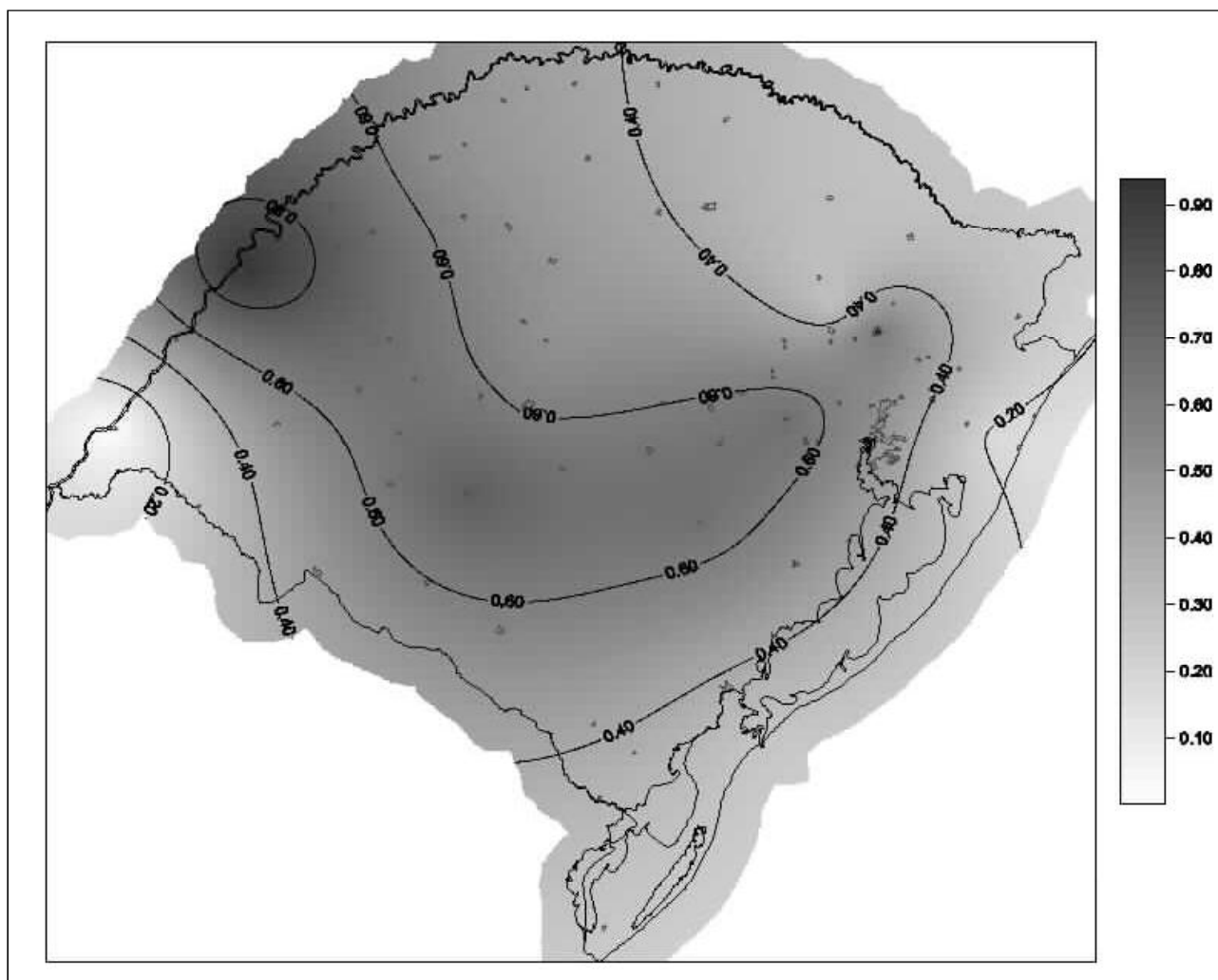


Figura 6. Complementariedade total entre as disponibilidades hídrica e solar, avaliada pelo índice de complementariedade, calculada com base em dados de precipitação mensal e radiação solar mensal incidente sobre um plano horizontal, no Estado do RS.

dos em paralelo em um barramento de corrente contínua (cc) ou de corrente alternada (ca). Podem ser utilizados conversores de potência baseados em dispositivos de estado sólido, como inversores e retificadores, ou eletromecânicos, com a ligação dos barramentos efetuada com um motor e um gerador conectados. É possível armazenar energia antes do processo de conversão (em reservatório de água) e depois do processo de conversão (em baterias, em volantes, em reservatório de ar comprimido etc.). Podem ser alimentadas cargas em cc e em ca, e também podem ser acionados sistemas de bombeamento (inclusive fotovoltaicos) para preenchimento do reservatório. O aproveitamento hidrelétrico pode ainda ser concebido com a utilização de bomba e motor de indução em modo reverso, ao invés de turbina e gerador síncrono, resultando em menores custos de implantação (Beluco, 1994).

De modo geral, os sistemas baseados em disponibilidades com maior complementariedade no tempo (que pode ser avaliada pelos índices propostos anteriormente), apresentam menos falhas no atendimento da demanda dos consumidores (Beluco, 2001). Então, no mapa da Figura 4 podem ser localizadas regiões onde ocorre melhor complementariedade entre as disponibilidades hídrica e solar. Nas regiões onde o índice de complementariedade no tempo não atinge valores satisfatórios, a condição de complementariedade pode ser atingida com o uso de um reservatório, que teria o efeito de aproximar a defasagem entre os mínimos de disponibilidade do valor de meio ano, sugerido como o valor ideal. E regiões com valores menores do índice de complementariedade no tempo certamente exigirão reservatórios com maior volume para acumulação para que o desempenho do sistema se aproxime daquele baseado em disponibilidades complementares.

Observou-se que pequenas diferenças na amplitude de variação das disponibilidades hídrica e solar também levam a sistemas com melhor desempenho (Beluco, 2001). O mapa da Figura 5 mostra as regiões com melhor índice de complementariedade entre as amplitudes e conseqüentemente, segundo este quesito, melhor desempenho no atendimento das demandas dos consumidores. Nas regiões com valores mais baixos desse índice, o desempenho de sistemas de geração também pode ser melhorado com o uso de reservatórios, que podem ser utilizados para melhorar a amplitude de variação da disponibilidade hídrica, aproximando-a do valor sugerido para uma complementariedade perfeita, que é o mesmo apresentado pela disponibilidade solar. E, da mesma forma, regiões com valores menores do índice de complementariedade entre as amplitudes certamente exigirão reservatórios com maior volume para melhorar o desempenho do sistema.

É interessante observar que, nesses dois mapas, as regiões que exigiriam reservatórios para melhorar os desempenhos de sistemas de geração e aproximá-los do desempenho de sistemas equivalentes baseados em disponibilidades complementares praticamente não coincidem. Qualitativamente, observa-se que as regiões que dispensariam reservatórios, considerando a complementariedade no tempo, exigiriam reservatórios em função da complementariedade entre as amplitudes, e vice versa. Mas deve-se ressaltar que os valores mais baixos do índice de complementariedade entre as amplitudes, no mapa, são maiores que 0,50.

Uma projeção para os custos apresentada por Beluco et al. (2002) mostra que os custos por energia gerada em aproveitamentos hidrelétricos fotovoltaicos devem se situar entre R\$ 10,00/MWh a R\$ 15,00/MWh e R\$ 220,00/MWh, devendo este limite superior ser reduzido nos próximos anos, acompanhando as tendências de redução de custos de módulos fotovoltaicos.

O trabalho de Beluco et al. (2002) discute diferentes configurações de aproveitamentos hidrelétricos fotovoltaicos. Aquelas com barramento de cc podem atender demandas de alguns poucos quilowatts. Por outro lado, um banco de baterias projetado, por exemplo, para atender 110 V, possibilitando potências maiores com correntes menores, mantendo a mesma capacidade de armazenamento, assumiria dimensões exageradas. Um barramento de ca permite o atendimento de potências maiores.

O aproveitamento da complementariedade entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica pode ser viável através de sistemas híbridos de pequenas potências, com poucos quilowatts, para o atendimento de pequenas demandas, ou com sistemas de porte maior, inclusive com as unidades geradores (hidrelétrica e fotovoltaica) possivelmente distantes entre si e interligadas pelo sistema energético.

CONCLUSÕES

Este artigo discutiu a questão da complementariedade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica, propôs índices matemáticos adimensionais para avaliação de diferentes graus dessa complementariedade e identificou, de forma preliminar, a complementariedade entre essas fontes no Estado do Rio Grande do Sul e discutiu brevemente o aproveitamento dessa complementariedade em sistemas para conversão de energia.

Observou-se que em cerca de 45% do Estado o índice de complementariedade alcançou valores maiores que 0,50. Observou-se que aproximadamente 58% da área do Estado apresenta valores de complementariedade no tempo maiores que 0,60, correspondente a defasagens entre valores mínimos de disponibilidade maiores que 72 dias, apresentando seus melhores valores desde a região das minas, passando pela depressão central até a fronteira noroeste. Observou-se também que aproximadamente 50% da área do Estado apresenta valores de complementariedade de energia maiores que 0,80, correspondente a diferenças de cerca de 50% entre as amplitudes de variação de disponibilidades hídrica e solar, apresentando seus melhores valores nos extremos leste e oeste.

Sugere-se uma “segunda etapa” na avaliação da complementariedade ao longo do Estado, com a utilização de: dados de disponibilidade fotovoltaica obtidos de um maior número de estações climatológicas, e dados de disponibilidade hidrelétrica obtidos de vazões regionalizadas conjugadas com rotinas computacionais para extração de informações topográficas a partir de modelos numéricos de terreno.

Essa segunda etapa deveria resultar em uma avaliação do potencial do Estado para geração de energia a partir de aproveitamentos híbridos hidrelétricos fotovoltaicos, além de permitir a sistematização de uma metodologia para prospecção desse tipo de potencial, aplicável a outras regiões.

APÊNDICE – Elaboração do índice de complementariedade entre as amplitudes

As equações desenvolvidas para o índice de complementariedade e seus subíndices são razoavelmente simples, para descrever comportamentos também simples, com exceção do índice de complementariedade entre as amplitudes.

Esse índice é definido para incluir na avaliação a diferença entre as disponibilidades máxima e mínima das fontes de energia. No caso de uma das fontes não apresentar diferença de disponibilidade ao longo do período considerado, é impossível considerá-la para fins de complementariedade. Se as duas fontes apresentarem uma mesma proporção entre disponibilidades máxima e mínima, podem ser consideradas como complementares. Mas se apresen-

tarem uma diferença muito grande, não se mostrarão complementares de um modo ideal.

A diferença δ_s é sempre maior que um, e pode ser considerada constante em uma área de dimensões razoáveis. Essa diferença depende da radiação solar, e apresentará variações maiores conforme se mostre mais longa na direção norte sul que na direção leste oeste. No caso de δ_h ser igual a δ_s , tem-se a complementariedade perfeita entre as amplitudes e o índice deve ser igual à unidade. A diferença δ_h apresenta valor mínimo igual a um. Nesse caso, o índice deve ser igual a zero e δ_h pode assumir valores teoricamente bastante grandes, o que faz com que o índice afaste-se do valor máximo, tendendo a zero conforme δ_h tenda a infinito.

Esse comportamento do índice, em função de δ_h , para um determinado valor de δ_s , aparece ilustrado na Figura 2. No desenvolvimento do índice i_a , descrito a seguir e na figura, considera-se $\delta_s = 2$. É interessante que a curva mostre-se suave e contínua, que apresente inclinação zero quando as proporções forem iguais e que se mostre a mais simétrica possível em torno de um eixo vertical traçado em δ_h igual a δ_s . É interessante também que seja possível construir uma expressão matemática que permita o cálculo rápido do índice.

Não há uma expressão matemática óbvia para a função mostrada nessa figura. O desenvolvimento de uma equação para o índice i_a pode ser iniciado com a curva de Agnesi, descrita pela primeira das equações apresentadas a seguir, para y em função de x . A função é simétrica em torno de λ , e tem altura máxima igual ao dobro de a . Essa curva pode ser adaptada para que seu valor máximo seja igual a 1, coincidindo com a abscissa δ_s , resultando na equação seguinte, denominada como y_1 , com variável independente δ_h .

A função y_2 pode ser utilizada na composição da função desejada para i_a , correspondendo ao trecho a partir de δ_h igual a δ_s até o infinito. Resta então desenvolver uma função que se encaixe em y_1 entre 1 e δ_s . Antes disso, uma pequena modificação em y_1 , conforme apresentada, suaviza as inclinações próximo aos valores máximos e em função de δ_s . Essa suavização facilita o “encaixe” com a outra função:

$$y = \frac{8a^3}{(x-\lambda)^2 + 4a^2} \quad (a = 1, \lambda = 0)$$

$$(a = 1/2, \lambda = \delta_s = 2) \quad y_1 = \frac{1}{1 + (\delta_h - \delta_s)^2}$$

$$y_1 = \frac{(1 - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2 + (\delta_h - \delta_s)^2}$$

Na medida em que podem ser definidas três condições de contorno, parece adequado que a outra função, y_2 , seja uma função quadrática. Sendo assim, a equação a seguir fornece uma função com três constantes a serem determinadas. As constantes assumem os valores apresentados, como consequência das condições enumeradas:

$$y = ax^2 + bx + c$$

$$\begin{aligned} i_a(\delta_h = 1) &= 0 & a &= -\frac{1}{(1 - \delta_s)^2} \\ \frac{\partial i_a}{\partial \delta_h}(\delta_h = \delta_s) &= 0 & b &= 0 \\ i_a(\delta_h = \delta_s) &= 1 & c &= 1 \end{aligned}$$

A função y_2 , com variável independente δ_h , centrada no valor de δ_s , é apresentada a seguir:

$$y_2 = 1 - \frac{(\delta_h - \delta_s)^2}{(1 - \delta_s)^2}$$

A composição das funções y_1 e y_2 pode ser realizada multiplicando-se a primeira por uma função f_1 , que seja nula a partir de δ_s , e multiplicando-se a segunda por uma função f_2 , nula antes de δ_s . A função abaixo é a função desejada e pode já ser denominada como i_a :

$$i_a = y_1 f_1 + y_2 f_2$$

A função f_1 pode ser obtida a partir da função tangente hiperbólico. É necessário reduzir os valores mínimo e máximo respectivamente a 0 e 1, centrar a função em δ_s e elevar a derivada nesse ponto ao infinito. A função f_1 enunciada abaixo satisfaz esses quesitos. A derivada de f_1 , mostrada em seguida, atinge em δ_s o valor 2^7 , suficiente para os objetivos propostos:

$$f_1 = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[2^8 (\delta_h - \delta_s) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \delta_h} = 2^7 \operatorname{sech} \left[2^8 (\delta_h - \delta_s) \right]$$

A função f_2 pode ser obtida a partir da função tangente hiperbólico, multiplicada por -1, da mesma forma e seguindo os mesmos quesitos que f_1 . A função f_2 é enunciada abaixo, e a derivada de f_2 , mostrada em seguida, atinge em δ_s o valor -2^7 :

$$f_2 = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[2^8 (\delta_h - \delta_s) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \delta_h} = -2^7 \operatorname{sech} \left[2^8 (\delta_h - \delta_s) \right]$$

O resultado da composição é enunciado em (5) e ilustrado na Figura 2, que apresenta o índice i_a para vários δ_s e mostra como as funções se apresentam suaves e contínuas.

REFERÊNCIAS

- BELUCO, A. (1994). *Viabilidade de microcentrais hidrelétricas baseadas no emprego de equipamentos de mercado*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 170p.
- BELUCO, A. (2001). *Bases para uma metodologia de dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 202p.
- BELUCO, A.; SOUZA, P. K. e KRENZINGER, A. (2002). *Aproveitamentos híbridos hidrelétricos fotovoltaicos*. Artigo submetido à publicação pela Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 11p.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA - CEEE e INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH (1991). *Regionalização de vazões do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 5v.
- DAMAZIO, J. M.; COSTA, F. S. e GHIRARDI, A. O. (1997). Análise de complementariedades hidrológicas a nível continental na América do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol.2, nº2, p.143-156.
- FEPAGRO - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS, SEÇÃO DE ECOLOGIA AGRÍCOLA (1989). *Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 3v.
- FEPAGRO - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS, SEÇÃO DE ECOLOGIA AGRÍCOLA (2000). *Séries de dados utilizadas para preparação do "Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul"*. Dados não publicados, obtidos pessoalmente.
- KRUANGPRADIT, P. & TAYATI, W. (1996). *Hybrid renewable energy system development in Thailand*. *Renewable Energy*, vol.8, nº1, p.514-517.
- McVEIGH, J. C. (1977). *Energia solar*, CETOP, Lisboa, Portugal. 238p.

Time Complementarity Between Hydropower and Solar Energy**ABSTRACT**

Among the small power plants based on a single source of energy, some have achieved technical and economic competitiveness in several applications. The most important of them are systems based on small-scale hydropower, solar power, wind power and biomass power. However, these systems tend to be very expensive when designed to avoid failure. Systems based on more than one source, even at high initial costs, could result in reasonable rates of response to the consumers' needs, especially if they are based on sources that are complementary in time. This article discusses the issue of complementarity of different sources of energy, stressing the complementarity of hydropower and photovoltaic power; it proposes dimensionless mathematical indexes to evaluate different degrees of complementarity and performs a preliminary identification of the complementarity of these sources in the state of Rio Grande do Sul.

Key-words: energy complementarity; small hydropower developments; photovoltaic developments.