

Efeito de capacidade e de compensação na utilização de energia fotovoltaica e de energia eólica

Gilnei Carvalho Ocácia¹

João Carlos Vernetti dos Santos²

Resumo

Este artigo trata da análise dos efeitos de compensação e de capacidade, na utilização de energia fotovoltaica e de energia eólica, para injeção na rede elétrica principal. O estudo foi desenvolvido sobre a área de concessão da Companhia Estadual de Energia Elétrica, no Estado do Rio Grande do Sul, sendo considerados os potenciais de energia eólica e de energia solar direta para a implantação de usinas distribuídas em toda a área de interesse. Como o efeito de capacidade e, por consequência, o de compensação são dependentes do tempo, o uso destas fontes renováveis somente pode substituir geração convencional de reserva. Seu efeito será mais pronunciado quanto maior for o número de usinas e sua descentralização. No entanto, a capacidade instalada não deve ser superior a 5% do nível de curto-circuito da rede onde a energia será injetada.

Palavras-chave: Efeito de compensação. Efeito de capacidade. Sistemas fotovoltaicos. Energia eólica.

Abstract

This article presents an analysis of the capacity and compensation effect of photovoltaic and wind power systems in grid-connected operation mode. The study was developed on the area of concession of the State Company of Electric Energy, in the State of the Rio Grande do Sul, by considering the potentials of wind energy and solar energy for the implantation of distributed power systems on all the concession area. As the capacity effect and, consequently the compensation effect, is time dependent, the use of renewable energy sources can substitute only the reserve power capacity of conventional sources. Its effect is directly proportional to the plant number and its decentralization level. However, the installed capacity would not have to be bigger than 5% of the short circuit level of the grid where the energy will be injected.

Keywords: Compensation effect. Capacity effect. Photovoltaic power. Wind power systems.

¹ Engenheiro Mecânico. Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Engenharia, Ambiente e Materiais – PPGEAM da ULBRA, Canoas. E-mail: gilneiocacia@terra.com

² Engenheiro Mecânico. Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Engenharia, Ambiente e Materiais – PPGEAM da ULBRA, Canoas. E-mail: vernetti@cpovo.net

1 Introdução

O trabalho aqui relatado foi desenvolvido tendo como objetivo geral a análise dos efeitos de capacidade e de compensação sobre o sistema elétrico convencional, oriundos da instalação de usinas distribuídas – fotovoltaicas e eólicas - no Estado do Rio Grande do Sul, particularmente, na área de concessão da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE).

A capacidade e a qualidade das redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica, com a inserção de fontes renováveis de energia, apresentam-se como questões que têm sido analisadas cada vez com mais intensidade, à medida que estas fontes energéticas se consolidam com a expansão de seus mercados (SCHULZ; MOUTAWAKKIL; HANITSCH, 2002). Isso acontece, particularmente, com a utilização de sistemas fotovoltaicos e eólicos, devido a sua variabilidade no tempo e à impossibilidade de formação de estoque do energético primário. Como as fontes renováveis apresentam peculiaridades que tornam seu uso de forma complementar mais interessante, técnica e economicamente, quer seja pela disponibilidade no tempo, quer seja pela distribuição espacial dos potenciais, considerada a área de concessão da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), há indicadores técnicos de que a combinação de energia solar direta e de energia eólica pode proporcionar um aporte significativo de energia na rede interligada, condicionada por preços e condições de operação.

Assim, neste trabalho, busca-se avaliar os efeitos de capacidade e de compensação produzido pelo uso de fontes locais, renováveis, para produção de energia elétrica em sistemas distribuídos de geração.

Para estimativa dos potenciais energéticos, foram utilizados dados secundários obtidos dos trabalhos de Machado e Santos (2003), referente à energia solar, e de Ocácia (1998), para energia eólica. Por meio de um simulador de geração de energia, foram realizadas as análises de produção energética em diversas localidades distribuídas geograficamente sobre a área de interesse.

2 Geração de energia

2.1 Energia fotovoltaica

O potencial de energia solar nas regionais Metropolitana e Norte e, em parte da Regional Sul, da CEEE, está compreendido entre 4.700 e 4.900 W/m².dia. Na área da regional Sul, que está situada na região geográfica da Campanha, do Rio Grande do Sul, a faixa de radiação sofre uma leve alteração, ficando entre 4.900 e 5.100 W/m².dia. Consideradas as incertezas de medição e as características estocásticas da radiação solar, pode-se utilizar 4.900 W/m².dia como valor de referência para a energia média diária incidente sobre a área de concessão da CEEE, sendo a geração fotovoltaica simulada a partir de modelos de geradores fotovoltaicos implementados previamente em um aplicativo dedicado, denominado PV-CODE (SANTOS, 1998).

A configuração selecionada pressupõe a instalação dos painéis fotovoltaicos em estrutura fixa com inclinação de 30 graus, com a face iluminada voltada para o Norte. Esta inclinação atende ao requisito de maximizar a produção de energia ao longo do ano (OCÁCIA; SANTOS, 2002). Haveria a possibilidade de incluir um mecanismo de seguimento do movimento aparente do sol, o que aumentaria ainda mais a produção de energia. No entanto, essa opção anula uma das principais vantagens de geradores fotovoltaicos, que é a ausência de partes móveis.

O modelo fotovoltaico é utilizado para simular a produção de energia elétrica em diferentes localidades, tendo como dados de entrada uma série de dados de radiação solar incidente em um plano inclinado (30 graus orientado para o Norte), as quais, por sua vez, são também produzidas com auxílio do software PV-CODE. As séries simuladas de dados de energia elétrica com um gerador fotovoltaico de 1 kWp são normalizadas em relação à potência nominal do próprio gerador e, após, são ajustadas para qualquer potência de usina através da multiplicação dos dados pela nova potência. Todas as perdas que

ocorrem em um sistema real são agregadas em um único fator de perdas. É importante salientar que, enquanto a precisão do modelo fotovoltaico é fundamental na simulação, na prática, o inversor é a peça chave em sistemas conectados à rede. Este último deve atender inúmeras exigências técnicas (por exemplo, a norma alemã DIN VDEW 0838), entre as quais, requer uma tensão de saída livre de harmônicos, eficiência elevada, sobretudo sob regime de carga parcial, capacidade de sincronização com a rede e baixas perdas em vazio.

2.2. Energia eólica

A partir da análise dos dados sobre potencial eólico no Rio Grande do Sul, conforme tratado por Ocácia (1998), foi identificado que os locais mais adequados para exploração de energia eólica para injeção na rede elétrica do sistema interligado situam-se no litoral do Estado, desde o município de Osório, no litoral norte, ao município de Chuí, no extremo sul. Nessa região, os ventos são bastante homogêneos apresentando como características principais velocidades da ordem de $7,5 \text{ m.s}^{-1}$, para altura de 50 m em relação ao solo firme (não sobre dunas). Considerada a variabilidade de 10% sobre a média de longo prazo, os valores médios da velocidade do vento estão na faixa de $6,8$ a $8,2 \text{ m.s}^{-1}$ (figura 2).

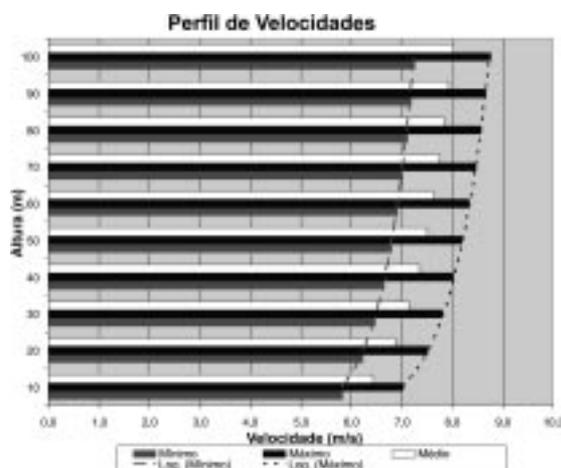


Figura 2 – Perfil de velocidade do vento na Planície Costeira do RS – Fonte: OCÁCIA, 1998

De modo análogo ao que acontece com sistemas fotovoltaicos, a geração de energia através de sistemas eólicos apresenta uma disponibilidade aleatória, não sendo, portanto, uma fonte firme de energia. Assim, sistemas eólicos não apresentam, quando utilizados como uma grande geradora em um único local, efeito de capacidade.

Desse modo, os sistemas eólicos devem ser implantados junto a redes “fortes”, que tenham capacidade de suprir a demanda, independentemente da existência ou não de vento, pois, caso contrário, ou deve existir contingenciamento de cargas, ou o sistema perderá qualidade.

Os intervalos gerais (WINROCK, 2004), a seguir, podem ser usados para avaliar se um projeto de energia eólica proposto está localizado em um ponto forte ou fraco na rede em relação às dimensões do projeto eólico:

- uma rede forte terá um nível de curto circuito maior do que 20 a 25 vezes o tamanho do projeto de energia eólica;
- uma rede fraca terá um nível de curto circuito menor do que 8 a 10 vezes o nível de curto circuito do projeto de energia eólica.

Às vezes, é necessário construir ou melhorar uma linha de transmissão para reforçar a rede para aceitar energia de um novo projeto de energia eólica. Essas melhorias podem ser muito caras e podem ser necessárias se as melhores localizações para o desenvolvimento de energia eólica em uma região estiverem em locais com redes fracas.

3 Modelo

Para modelagem da geração distribuída, foi utilizado um software desenvolvido sobre o Delphi 6.0, versão Enterprise, da Borland Software Corporation, a partir do software PV-CODE. As curvas de desempenho de sistemas de geração, com as diferentes fontes energéticas, são empregadas sob a forma de equações que proporcionam a análise preditiva das condições de operação do sistema de geração referente a cada forma da energia primária e sua localização regional.

As simulações da geração são realizadas, considerando as fontes regenerativas de energia isoladamente e em conjunto, para vários locais na área de concessão da CEEE, considerado o potencial local para cada fonte.

3.1 Efeito de compensação

O efeito de compensação é definido como a redução da faixa de flutuações oriundas da geração distribuída para diferentes resoluções temporais, a qual resulta da distribuição espacial de usinas fotovoltaicas e eólicas sobre uma grande extensão territorial em diversas localidades. A faixa de flutuação da geração de eletricidade fotovoltaica é de fundamental importância para a avaliação desta opção de geração de energia. A integração de geradores distribuídos na estrutura existente de geração de energia requer que as flutuações sejam compensadas pelo parque gerador convencional. Assim, a redução das flutuações da geração fotovoltaica e eólica, através da distribuição espacial destas usinas sobre uma grande extensão territorial, é da maior importância, pois conduz a uma minimização da demanda de regulação por parte das usinas do parque gerador convencional.

Para a estimativa do efeito de compensação, as seguintes ponderações são feitas: a geração por fontes renováveis, em cada localidade, apresenta componentes determinísticas alteradas por flutuações estocásticas. Ademais, a correlação da geração entre diferentes localidades decresce com o aumento da distância entre elas, de modo que é provável que exista um efeito de compensação pronunciado através da distribuição espacial de usinas sobre uma grande área.

As seguintes definições são usadas para estabelecer uma expressão analítica para o efeito de compensação:

A equação 1 representa a média mensal de valores horários de energia elétrica gerada.

$$\overline{P_{i,j}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{i,j,n} \quad (1)$$

Onde,

i é o mês do ano (1 a 12);

j é a hora do dia (1 a 24);

N é o número de dias do mês ($28 \leq N \leq 31$);

n é um contador de dias (1 a N).

O valor mensal mínimo horário de energia elétrica gerada é representado pela equação 2.

$$P_{i,j,\min} = \text{MIN} \{P_{i,j,n}\} \quad , \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

O valor mensal máximo horário de energia elétrica gerada é representado pela equação 3.

$$P_{i,j,\max} = \text{MAX} \{P_{i,j,n}\} \quad , \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

O valor horário normalizado de energia elétrica gerada é representado pela equação 4.

$$P_{i,j,n} = \frac{P_{i,j,n}}{P_{i,j}} \quad (4)$$

As grandezas acima definidas podem ser determinadas tanto para a geração de energia em cada localidade isoladamente, como também para o somatório da geração de energia de diversas usinas distribuídas. A alteração destas grandezas por meio da construção progressiva de usinas mostra a possibilidade de redução da faixa de flutuação da geração através da distribuição espacial das usinas. Em virtude do modo como foi definida a normalização dos valores horários de energia elétrica gerada, o desvio padrão pode, também, ser estimado para meses e anos.

O efeito de compensação (α) (equação 5) é, então, definido por Steinberger-Willms (1993) como o desvio padrão do somatório da geração distribuída (usinas interligadas), referido ao valor médio dos desvios padrões da geração distribuída em cada uma das localidades, ou seja,

$$\alpha = \frac{\sigma_i}{\frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \sigma_i} \quad (5)$$

Onde,

s refere-se ao somatório da geração distribuída;

k refere-se a cada usina individual;

Z é o número total de usinas analisadas.

Para uma única usina, por definição, o efeito de compensação é igual a 1.

3.2 Efeito de capacidade

Segundo Ocácia e Santos (2002), um sistema de suprimento de energia tem o seu nível de utilização expresso através de parâmetros conforme os definidos a seguir.

1. *Fator de carga (FC)*: expressa a relação entre potência média consumida e a demanda máxima observada em um período de tempo, sendo utilizado para caracterizar consumidores de energia. O fator de carga pode ser definido para diferentes resoluções temporais. Em uma base anual, pode ser expresso como

$$FC = \frac{C \text{ anual}}{8760 \cdot (D \text{ max})} \quad (6)$$

2. *Fator de capacidade*: similar ao fator de carga, é utilizado para sistemas de geração de energia, expressando a relação entre a potência média fornecida e a capacidade máxima de geração de energia. Em sistemas isolados, os fatores de capacidade e de carga são idênticos, diferentemente de sistemas interligados.

3. *Margem de reserva*: é um indicador da folga que um sistema de determinada potência instalada possui em relação à demanda máxima observada. É expresso percentualmente como

$$Mr = \frac{P_i - D \text{ max}}{P_i} \cdot 100\% \quad (7)$$

4. *Disponibilidade*: indica a fração do tempo total que se espera poder contar com o sistema, em função de paradas programadas e previstas para manutenção e ajustes.

5. *Confiabilidade*: indica a fração do tempo esperado para utilizar um dado sistema de geração, que pode ser efetivamente

utilizado em função do tempo gasto em paradas não programadas.

A operação de usinas fotovoltaicas e eólicas diferencia-se claramente da operação de usinas convencionais. A indisponibilidade das centrais convencionais é desprezível por utilizar energéticos estocáveis (combustíveis fósseis e nuclear) ou, dentro de certos limites, pode ser prevista e planejada (energia hidráulica).

A disponibilidade de uma central fotovoltaica depende diretamente da oferta de energia solar, bem como das variações periódicas dos ciclos noite/dia e inverno/verão e também de grandes variações estocásticas. Devido a estas fortes flutuações, a interligação de sistemas fotovoltaicos no sistema de suprimento energético existente não é trivial.

A disponibilidade de uma central eólica depende diretamente da existência de vento, bem como das variações periódicas dos ciclos ao longo do dia e das estações do ano, notadamente, primavera (velocidades médias máximas) e outono (velocidades médias mínimas) e também de grandes variações estocásticas. Devido a essas fortes flutuações, a interligação de sistemas eólicos no sistema de suprimento energético existente pode acarretar alguns problemas.

No entanto, como mencionado, anteriormente, a interligação de diversas usinas distribuídas sobre uma extensão territorial pode proporcionar, dependendo do mês e do dia, uma contribuição mínima de geração de energia. Desse modo, a disponibilidade de usinas fotovoltaicas não é nula, no caso de conexão com a rede em horários entre o nascer e o pôr-do-sol, principalmente em torno do meio-dia. Por essa razão, pode ser definido um percentual da potência instalada de usinas fotovoltaicas distribuídas, dependente do tempo, o qual poderia contribuir para a segurança de suprimento (STEINBERGER-WILLMS, 1993). Para a energia eólica, a janela de geração é maior, pois não está limitada a duração do dia, entretanto o período da madrugada é o que apresenta os valores mínimos.

Essas considerações contemplam o sistema como um todo, onde as unidades de geração estão distribuídas, mas, além disso, devem ser observadas as condições das redes locais que funcionam como subsistemas que devem suportar as flutuações das geradoras, sem deixar de atender a todas as cargas contratadas dentro dos padrões de qualidade de suprimento.

A segurança de suprimento pode ser definida como a capacidade de um sistema de suprimento de energia de atender à demanda em determinados instantes de tempo. Como o armazenamento de energia elétrica em grandes quantidades não é até hoje economicamente viável, ela deve ser gerada no instante em que é requerida pela carga consumidora. Como as unidades convencionais também podem sofrer paradas devido a eventos não previstos, é necessário manter disponível uma capacidade de reserva (margem de reserva). A segurança do suprimento cresce com a disponibilidade de cada usina isoladamente, com a quantidade destas e com a respectiva potência, resultando assim no dimensionamento da capacidade de reserva. Como esta última também provoca custos (geralmente mais elevados), o seu dimensionamento consiste em um compromisso entre a segurança de suprimento desejada e os custos de geração aceitáveis. Comumente, a segurança de suprimento de um sistema é avaliada através de um indicador de probabilidade de não atendimento da carga, o qual é denominado probabilidade de perda de carga (cuja abreviatura é LOLP, da expressão inglesa “loss of load probability”). Esse indicador fornece a probabilidade com a qual a carga não pode ser atendida plenamente, devido a uma capacidade de geração insuficiente. Usualmente, a LOLP é expressa em horas por semana ou por ano. A disponibilidade de um sistema regenerativo pode ser visualizada a partir da probabilidade de ocorrências da geração de energia em determinado período de tempo.

O efeito de capacidade de uma usina fotovoltaica ou de qualquer sistema de geração regenerativo consiste na capacidade destes sistemas de substituir parcelas da potência disponível de sistemas de geração elétrica baseados

em usinas convencionais. A contribuição de potência para sistemas convencionais a partir de sistemas regenerativos depende de diversos fatores, entre os quais, citam-se:

- condições meteorológicas;
- características de potência e da tecnologia dos conversores de energia;
- potência instalada de sistemas regenerativos;
- número de locais onde as usinas estão instaladas e o grau de independência da oferta de energia primária;
- características das curvas de carga;
- capacidade e estrutura do sistema de geração convencional;
- nível de confiabilidade requerido, entre outros.

4 Resultados

Considerados os dois efeitos, de capacidade e de compensação, com base em estudos estatísticos e de simulações a partir de uma base de dados de radiação solar disponível para o Rio Grande do Sul e do de potencial eólico da Planície, os resultados obtidos com a realização do presente trabalho permitem que sejam extraídos os seguintes resultados e conclusões:

- a geração de energia elétrica, via eólica ou fotovoltaica, de uma única usina concentrada, é maior que aquela de muitas usinas distribuídas sobre uma determinada área territorial, cuja soma das potências seja igual a da usina concentrada;
- as flutuações características da energia gerada por usinas fotovoltaicas podem ser reduzidas se muitas usinas fotovoltaicas forem instaladas de forma distribuída sobre uma grande extensão territorial. Esse efeito de compensação resulta em menor demanda por regulação da geração convencional, quando comparada com a integração de uma única usina fotovoltaica de mesmo porte ao sistema elétrico;
- preliminarmente, pode-se afirmar que o efeito de capacidade de usinas eólicas distribuídas interligadas ao sistema elétrico convencional, no Estado do Rio Grande do Sul, possibilita a substituição de potência convencional de RESERVA da ordem de 50% a 60% da capacidade total instalada em usinas eólicas;

- preliminarmente, pode-se afirmar que o efeito de capacidade de usinas fotovoltaicas distribuídas interligadas ao sistema elétrico convencional, no Estado do Rio Grande do Sul, possibilita a substituição de potência convencional de RESERVA da ordem de 20% a 30% da capacidade total instalada em usinas fotovoltaicas, se um número superior a 25 usinas distribuídas for instalado;

- os efeitos de compensação e de capacidade são tanto mais pronunciados quanto maior for o número de usinas distribuídas instaladas;

- um parque gerador fotovoltaico ou eólico, sem sistema de armazenamento de energia não é capaz de proporcionar um efeito de capacidade independente do tempo, pois o período de disponibilidade de geração de energia, para o primeiro, está limitado ao intervalo de tempo entre o nascer e o pôr-do-sol, e, para o eólico, há que se considerar os períodos de calmaria que são estocásticos.

- a energia produzida através de uma fonte estocástica somente pode ser injetada em uma rede “forte”, isto é, uma rede cujo nível de curto circuito seja superior a 20 vezes a capacidade do sistema a ser implantado.

5 Conclusões

Quanto ao efeito de capacidade, conclui-se que energia eólica e energia fotovoltaica não podem substituir potência firme instalada, mas apenas potência convencional de reserva, parcialmente, como uma fração da potência das próprias instalações de usinas eólicas e fotovoltaicas. Quanto ao efeito de compensação, este será tão mais pronunciado quanto maior for o número de usinas distribuídas na área considerada, lembrando que estes sistemas não devem exceder a 5% do nível de curto circuito da rede onde a energia será injetada.

Referências

MACHADO, F. A.; SANTOS, J. C. V. **Desenvolvimento de mapas de energia solar para**

o RS como ferramenta de projeto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Goiânia, 2003.

OCÁCIA, G. C. **Utilização da energia eólica na Planície Costeira do Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 1998.

OCÁCIA, G. C. e SANTOS, J. C. V. **Sistemas Fotovoltaicos e Sistemas Híbridos para Eletrificação Residencial Rural.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL – AGRENER 2002, 4, 2002, Campinas. Anais do 4o Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER 2002. Campinas: Unicamp, 2002.

SANTOS, J. C. V. et al. **Concept and Design of PV Systems (PV CODE):** a dedicated computer program for teaching and research purposes. In: International Symposium on Renewable Energy Education (ISREE), 6, New Delhi. Proceedings of the Sixth International Symposium on Renewable Energy Education (ISREE). New Dehli, Novembro de 1998. p. 267-278. ISBN 81-85419-58-2.

SCHULZ, D., MOUTAWAKKIL, K. & HANITSCH, R. **Power quality investigations of grid connected PV-plants.** In: World Renewable Energy Congress – WREC, 2002, 7, Colônia. Anais do VII WREC (World Renewable Energy Congress). Colônia, 2002.

STEINBERGER-WILLMS, R. **Untersuchung der Fluktuationen der Leistungsabgabe von räumlich ausgedehnten Wind-und Solarenergie-Konvertersystemen in Hinblick auf deren Einbindung in elektrische Versorgungsnetze.** Doktorarbeit. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg, 1993.

WINROCK. **Kit para desenvolvimento de projetos de energia eólica.** Salvador: USAID/WINROCK BRASIL, 2004.

