



DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO DO SISTEMA DE TUBARÃO – SC

Oswaldo L. S. Pereira¹

Felipe F. Gonçalves²

RESUMO

Para que a interligação do arranjo fotovoltaico com a rede elétrica convencional seja possível é indispensável a utilização dos inversores (conversores CC/CA) responsáveis por adequar as características da energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos aos padrões da rede, bem como monitorar a operação do sistema como um todo. Pelo fato da potência nominal do gerador fotovoltaico ser atingida poucas vezes ao longo de um ano, é comum subdimensionar o inversor. O fator de dimensionamento de inversores (FDI), que representa a relação entre a capacidade do inversor e a potência nominal do gerador fotovoltaico, deve ser avaliado de acordo com o local de operação do sistema, uma vez que regiões mais quentes e com índices de radiação elevados tendem a exigir uma maior utilização do inversor. O estudo de caso realizado com dados de operação do sistema instalado em Tubarão – SC comprova que o subdimensionamento do inversor não causa perdas significativas na geração de energia ao longo de um ano.

Palavras-chave: sistemas fotovoltaicos, conexão à rede, conversor CC/CA, fator de dimensionamento de inversores.

1 Ph.D. em Política Energética pela Imperial College London. Professor e Pesquisador da Universidade Salvador – UNIFACS. Coordenador do G-MUDE. E-mail: osoliano@unifacs.br

2 Engenheiro Eletricista pela Universidade Salvador – UNIFACS. Pesquisador do G-MUDE. E-mail: ffgoncalves@gmail.com

G-MUDE – Grupo de Pesquisa em Meio Ambiente, Universalização, Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis, Departamento de Engenharia e Arquitetura, Universidade Salvador – UNIFACS. Rua Ponciano de Oliveira, 126, Rio Vermelho. CEP: 41.959-275. Tel: (71) 3330-4662.



ABSTRACT

The grid-tied photovoltaic systems must use inverters (DC/AC converters) that are responsible for adjusting the characteristics of the photovoltaic modules delivered energy to the standards of the net, as well as monitoring the operation of the system as a whole. Once the photovoltaic generator maximum power is not frequently reached throughout one year, it is common to undersize the inverters capacity. The inverters sizing factor (ISF), that represents the relation between the inverter's and the photovoltaic array's maximum power, must be evaluated in accordance with the system operation area, because warm and high radiation regions tend to demand a bigger use of the inverter. The case study using real operation data of the system installed in Tubarão – SC proves that the undersize inverters do not cause significant losses in energy generation throughout one year.

Key-words: photovoltaic systems, grid-tie, DC/AC converter, fator de dimensionamento de inversores.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da radiação do Sol em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. O fato de se tratar de um recurso abundante, bem distribuído e considerado inesgotável torna a tecnologia muito atrativa do ponto de vista técnico. Os custos de geração fotovoltaica, que ainda são os mais elevados se comparados com outras tecnologias disponíveis, encontram-se em queda devido ao aperfeiçoamento e difusão da tecnologia nos últimos anos. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) vêm contribuindo significativamente para tal redução.

As aplicações da energia solar fotovoltaica ao redor do mundo ganharam expressão a partir dos sistemas isolados. Mais recentemente, movidos por incentivos governamentais e investimentos de empresas do setor, a utilização dos SFCR fez com que a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos crescesse bastante. A capacidade instalada total registrada ao final de 2006 era de cerca de 3,7GW (IEA PVPS, 2007). Mais de 80% deste valor é representado pelos sistemas conectados em comparação com os sistemas isolados.



A geração distribuída de energia por intermédio dos sistemas fotovoltaicos integrados às residências ou edificações apresenta alguns benefícios. Um exemplo é o fato de serem aliviadas as demandas energéticas de cargas com perfil de pico diurno, como sistemas de refrigeração em edificações. Existe ainda a possibilidade de se obter um “crédito de energia”, resultado de uma instalação que injete mais energia na rede do que consuma³. Do ponto de vista de eficiência energética, deve-se considerar que são reduzidas as perdas por transmissão e distribuição, uma vez que o consumo de energia acontece no próprio ponto da geração. O SFCR dispensa o uso de baterias, pois a própria rede funciona como *backup*.

Na rede elétrica convencional, a corrente apresenta-se na forma alternada (CA). Já o módulo fotovoltaico tem como saída uma corrente na forma contínua (CC). Sendo assim, para que seja possível realizar a conexão de painéis FV à rede é indispensável a utilização de um conversor CC/CA, também chamado de inversor. O inversor tem como principal finalidade transformar a forma de onda da tensão e corrente gerada pelos módulos fotovoltaicos de contínua para alternada, adequando as características de saída do gerador FV aos padrões da rede local.

Sabendo-se que os geradores fotovoltaicos dificilmente atingem a sua capacidade nominal e que inversores não devem operar em baixa carga, identifica-se a possibilidade de subdimensionar os inversores.

Quando não se leva em consideração as características do local onde o sistema será instalado e das condições de operação dos equipamentos, o subdimensionamento excessivo pode impedir o aproveitamento ótimo do gerador fotovoltaico. Sistemas dimensionados para operar em Friburgo, na Alemanha (48°N) podem apresentar perdas se submetidos às condições de Florianópolis, Brasil (27°S), por exemplo. As perdas podem ser ainda maiores se esse mesmo sistema for instalado em alguma cidade mais quente e com maior índice de radiação.

Uma forma de avaliar se o dimensionamento do inversor tem ou não grande impacto sobre a quantidade de energia gerada é a análise dos dados de um sistema instalado, registrados durante um ano de operação. Através do estudo de caso foi observado como o subdimensionamento dos inversores pode interferir na geração de energia, identificando-se o efeito de corte de potência do inversor como uma das consequências diretas dessa prática.

³ Para que isso seja possível é necessária uma regulação específica. Na Alemanha e Espanha, por exemplo, essa atividade já está regulamentada. No Brasil ainda não há definição legal para as trocas de excedente de energia entre consumidor que tenha um SFCR e a concessionária.



2. OBJETIVOS

O trabalho desenvolvido teve como objetivo estudar o dimensionamento de inversores através de dados práticos de um sistema em operação na cidade de Tubarão (SC), instalado pelo LABSOLAR (UFSC).

O sistema apresenta duas configurações distintas de carregamento de inversores. A principal meta foi observar as perdas de energia no subsistema que utiliza o inversor subdimensionado, em comparação com o subsistema que utiliza um inversor de capacidade maior que o gerador fotovoltaico. Através disso, foi possível verificar a viabilidade do subdimensionamento.

Com os resultados obtidos avaliou-se ainda a necessidade de investimentos em inversores de capacidade maior do que os convencionalmente utilizados em regiões menos ensolaradas, para sistemas instalados em áreas com elevados índices de radiação solar e temperatura. Foi feito um comparativo de operação do sistema em Salvador (BA) e Florianópolis (SC) com relação ao dimensionamento do inversor.

3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são sistemas de geração descentralizada de energia que utilizam o Sol como fonte primária de energia. Diferentemente das grandes usinas geradoras, que geram quantidades expressivas de energia em um local normalmente distante dos centros consumidores, os sistemas de geração descentralizada fornecem energia próximo ao local de consumo.

A geração distribuída pode proporcionar a minimização das quedas de tensão e perdas nas linhas de distribuição, já que a geração e o consumo são, em termos práticos, realizadas no mesmo ponto. Para o caso da energia solar fotovoltaica, instalações com perfil diurno (sistemas de refrigeração, por exemplo) podem ter as sobrecargas evitadas, visto que o horário de ponta da demanda corresponde ao horário de geração máxima do sistema fotovoltaico.

Num SFCR, no caso da demanda ser maior do que a capacidade do arranjo fotovoltaico a carga passa a consumir energia da rede convencional. Quando a demanda das cargas é menor do que a potência disponibilizada pelo arranjo, o sistema pode injetar energia excedente na rede. Essa lógica funciona perfeitamente com a maioria dos medidores comercialmente

disponíveis, que podem girar em nos dois sentidos (Rüther, 2004). Porém, normalmente são utilizados dois equipamentos distintos, já que as tarifas são diferentes para a “compra” e “venda” de energia. O balanço de energia vai depender basicamente das dimensões do sistema FV instalado, do perfil de consumo da instalação e das condições locais.

3.1. Principais Componentes de um SFCR

A Figura 1 exibe uma configuração típica de um SFCR residencial.

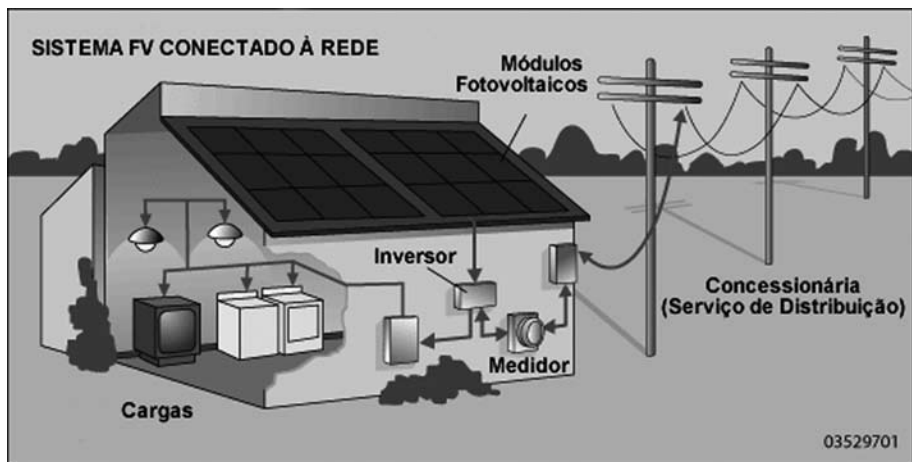


Figura 1: Sistema FV residencial conectado à rede elétrica
(Fonte: EERE – adaptada)

Os principais componentes de um SFCR são:

Módulos Fotovoltaicos (arranjo fotovoltaico): agrupados, correspondem à unidade de geração de energia, que converte a energia incidente do Sol diretamente em eletricidade.

Inversor (Conversor CC-CA): utilizado para converter a corrente contínua gerada pelo arranjo em corrente alternada, devendo atender aos padrões da rede elétrica local.

Rede Elétrica: é a rede de distribuição da concessionária local, que fornece energia para as instalações consumidoras.

Medidores: têm a função de medir a quantidade de energia da rede consumida pela instalação elétrica e a quantidade de energia injetada na rede pelo SFCR. Pode ser adotada tanto uma configuração com dois medidores

unidirecionais ou a configuração com um medidor bidirecional, que registra tanto o quanto é consumido da rede quando a energia injetada pelo arranjo FV (*net metering*).

Cargas: são os equipamentos da instalação elétrica que utilizam a energia elétrica.

3.2. Exemplo de SFCR Instalado na UFSC

Os sistemas instalados em edificações aproveitam a estrutura construída para fixação do arranjo fotovoltaico ou a utilizam os módulos substituindo algumas partes da edificação.

O SFCR da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foi o primeiro sistema solar fotovoltaico integrado a uma edificação urbana e interligado à rede elétrica pública do Brasil (Rüther, 2004). A Figura 2 exibe uma vista da instalação.



Figura 2: Sistema de 2kWp instalado na UFSC
(Fotografado em dezembro de 2005).

O sistema tem potência nominal de 2kWp. Os 68 módulos utilizados são separados em quatro subsistemas de aproximadamente 500Wp cada, conectados aos quatro inversores de alto rendimento de 600W cada. A injeção de corrente na rede elétrica baseia-se na operação PWM (Pulse Width Modulation) controlada por microprocessadores e rastreamento do ponto



de máxima potência dos módulos fotovoltaicos, que desconecta o sistema à noite por meio de relés para evitar perdas em *stand-by* (Rüther, 2004).

4. INVERSORES (CONVERSORES CC/CA)

Os inversores têm a finalidade de transformar uma corrente contínua em corrente alternada, mudando a sua forma de onda. São utilizados, por exemplo, quando se quer alimentar uma carga CA através de uma fonte CC. Como módulos fotovoltaicos geram tensão sob a forma de corrente contínua, para utilizar equipamentos como TV's, rádios, motores ou qualquer outro tipo de carga que opere em corrente alternada, deve-se utilizar um conversor CC/CA. Em um SFCR o inversor serve para adequar as características da energia gerada pelos módulos às características da rede elétrica convencional.

Os inversores utilizados em SFCR têm como principais funções:

- Rastreamento do Ponto de Máximo de Potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking) – Através do controle da corrente e tensão, esse sistema é capaz de fazer ajustes para manter os módulos FV operando perto do seu ponto de maior potência, que varia de acordo com a radiação solar incidente.
- Converter a corrente CC gerada pelo painel fotovoltaico em CA: Como a corrente gerada através do efeito fotovoltaico apresenta-se na forma contínua, o inversor deve criar uma forma de onda alternada. O nível de semelhança com a forma de onda senoidal deve ser alto (pouca distorção).
- Desconexão e isolamento: O inversor deve desconectar o arranjo fotovoltaico da rede caso os níveis de corrente, tensão e frequência não estejam dentro da faixa aceitável dos padrões da rede elétrica ou também do lado CC. O inversor deve ainda isolar o gerador FV da rede quando a mesma não estiver energizada, seja por falhas ou operações de manutenção, evitando possíveis acidentes com operadores.
- Relatório de Status – Os inversores podem apresentar um painel de informação (*display*) com parâmetros de entrada e armazenamento das informações em *data-logger* ou envio para um computador

(aplicação remota por *link* de dados ou transmissão por satélite). Podem ser registrados, por exemplo, grandezas elétricas como a tensão CC e CA, corrente CC e CA, potência CA, energia CA diária, energia CA acumulada entregue à rede, frequência, e os parâmetros meteorológicos e térmicos, como irradiância no plano dos geradores e a temperatura de operação dos módulos.

5. DIMENSIONAMENTO DE INVERSORES

5.1. Conceitos Básicos

Raramente um gerador fotovoltaico entrega a sua potência nominal máxima. Em alguns dias o céu pode se apresentar nebuloso, fazendo com que a irradiância seja inferior a 1000W/m². Além disso, a temperatura das células pode se encontrar mais alta do que os 25°C. Dessa forma, como as condições de operação dificilmente assemelham-se às condições STC (Condições de Teste Padrão⁴), a potência fornecida pelo gerador é geralmente inferior à sua capacidade nominal.

O dimensionamento do sistema deve ser feito de modo tal que o inversor não seja nem pouco utilizado nem sobrecarregado. O subdimensionamento foi identificado no início dos anos 90 como uma possibilidade de redução dos custos do kWh gerado (Macêdo, 2006). Utilizando um inversor menor para o mesmo gerador fotovoltaico sem impactar na quantidade de energia e na qualidade do sistema, a energia gerada tende a ser mais barata.

5.2. Avaliação do FDI

O FDI (Fator de Dimensionamento de Inversores) representa a relação entre a potência nominal do inversor e a potência nominal máxima do gerador fotovoltaico. Um FDI de 0,7 indica que a capacidade do inversor é 70% da potência máxima do arranjo fotovoltaico.

Um estudo realizado por Macêdo, 2006, avaliou qual FDI seria mais adequado para as diferentes localidades brasileiras. Percebeu-se que a diferença em termos de produtividade anual para FDI superior a 0,55 em um mesmo inversor é pequena, geralmente inferior a 50kWh/kWp.ano. A dife-

⁴ Standard Test Conditions (STC): Irradiância de 1000W/m², temperatura da célula de 25°C e massa de ar (Air Mass – AM) de 1,5.

rença é maior quando se compara, para um mesmo FDI, diferentes modelos de inversor, obtendo-se valores de até 100kWh/kWp.ano. Então, para o caso da produtividade anual, a escolha do equipamento pode influenciar mais do que a escolha da relação FDI propriamente dita.

Observando-se o comportamento de um único inversor, percebe-se que a produtividade cai de forma mais acentuada para valores de FDI inferiores a 0,6 em função do processo de limitação de potência. O processo de limitação, também conhecido como perdas CC no inversor, ocorre quando o gerador fotovoltaico disponibiliza uma potência maior do que a capacidade do inversor. Como consequência, a potência de saída é limitada ao valor da potência nominal do equipamento.

Independente da localização do inversor notou-se que as perdas por limitação do inversor são inferiores a 10% para FDI de 0,5 e inferiores a 3% para FDI de 0,6 (Macedo, 2006). Isso revela que o subdimensionamento é de fato uma prática interessante para os SFCR.

Na Figura 3 percebe-se o aumento das perdas totais para valores muito baixos de FDI e para valores mais elevados, o que condiz com a curva de eficiência de operação dos inversores. As menores perdas totais estão associadas à faixa de carregamento na qual o inversor é tipicamente mais eficiente.

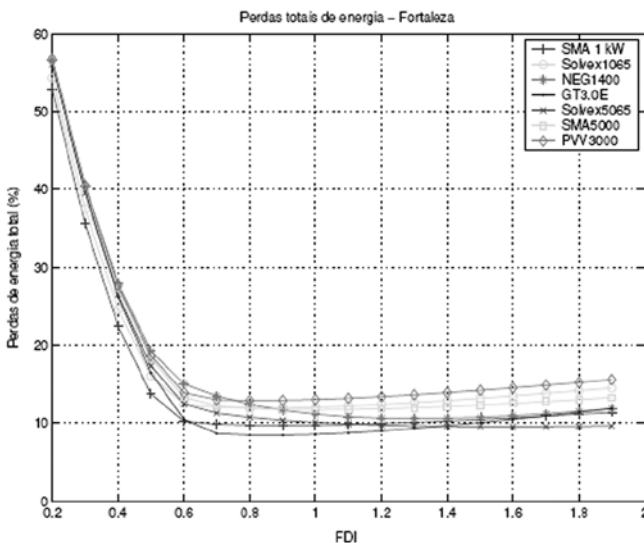


Figura 3: Perdas totais de energia em função do FDI para Fortaleza (Macedo, 2006).

6. ESTUDO DE CASO

Uma forma de avaliar se os inversores subdimensionados têm ou não grande impacto sobre a energia gerada pelo sistema é a análise dos dados práticos de um sistema instalado.

A principal idéia do estudo de caso foi traçar os gráficos de potência disponibilizada e energia gerada por cada um dos subsistemas do SFCR instalado em Tubarão (SC), com o objetivo de verificar a influência da utilização de inversores de potência inferior a potência máxima do gerador fotovoltaico. O estudo de caso foi realizado com base nos dados de operação do SFCR de 1,4kWp instalado em Tubarão, registrados pelo LABSOLAR durante o ano de 2004.

6.1. Especificações do Sistema

No sistema de Tubarão (SC) foram instalados 11 painéis de 128Wp da UNI-SOLAR, tipo amorfo com substrato flexível, ligados em paralelo, somando 1.408Wp de potência.



Figura 4: Vista superior do sistema de 1,4kWp instalado em Tubarão (LABSOLAR).

O sistema é composto por dois inversores Würth de 650W (Figura 5), um deles conectado a 5 módulos e o outro a 6 módulos. É essa configuração que permite a realização das análises de curva quando a potência máxima de entrada no inversor é atingida.

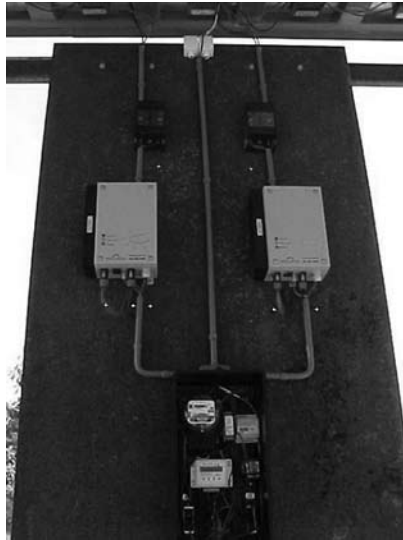


Figura 5: Inversores Würth de 650W. A divisão do gerador fotovoltaico em dois subsistemas permite o estudo de dimensionamento do inversor (LABSOLAR).

Como cada painel tem potência nominal de 128Wp, o arranjo ligado ao inversor WR01 teria capacidade nominal de 640Wp enquanto o arranjo do inversor WR02 teria capacidade nominal de 768Wp, superando o limite máximo nominal do inversor. Dessa forma, a depender principalmente da radiação solar incidente, é possível observar o fenômeno de limitação da potência máxima de saída.

Tabela 6.1: Divisão do gerador fotovoltaico em dois subsistemas

Inversor	Quant.	Pot. Nom. (Wp)	Capac. (Wp)	Inversor (W)	FDI
WR01	5	128	640	650	1,02
WR02	6	128	768	650	0,85
TOTAL	11	-	1.408	-	-

6.2. Tratamento dos Dados

Tendo em mãos os dados de operação do sistema, foram traçados gráficos que permitiram a visualização do comportamento do sistema quando submetidos a diferentes condições.

As ilustrações seguintes mostram as curvas obtidas em um dia normal de operação. Na Figura 6 estão representadas as curvas de potência de

saída nos inversores WR01 e WR02 (forma de sino) e as curvas de temperatura de operação dos inversores. A Figura 7 exibe as curvas da energia gerada ao longo do dia 16/05/04, registradas pelos dois inversores, e também a energia total gerada, representada pela soma das duas curvas menores.

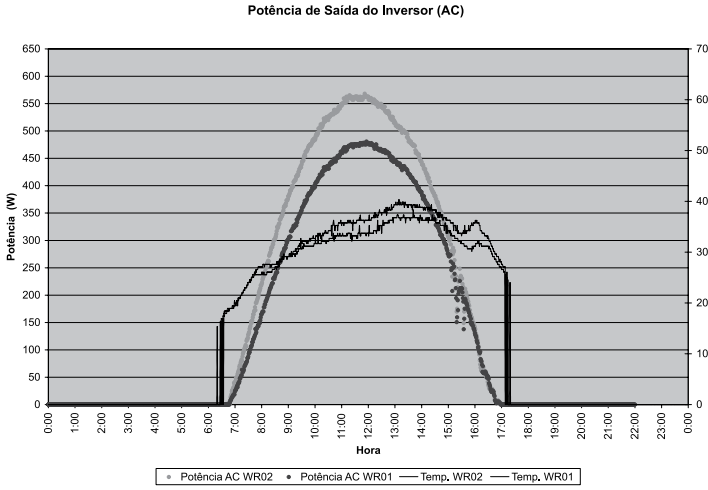


Figura 6: Curva de potência e temperatura de operação, registradas durante o 16/05/04 pelos inversores WR01 e WR02.

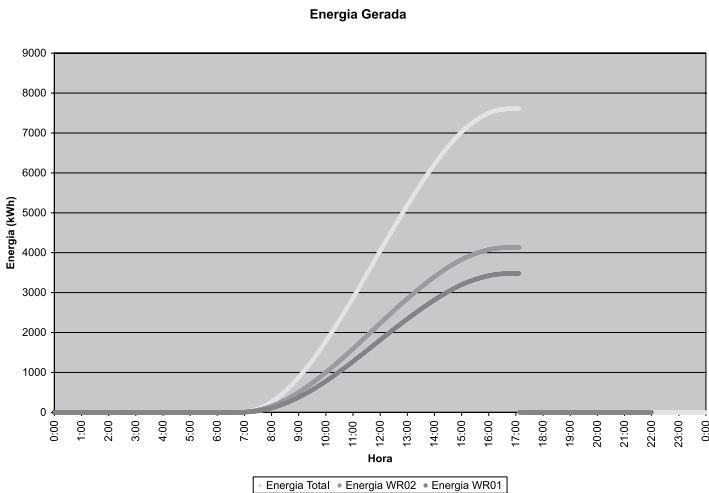


Figura 7: Curvas da energia gerada (Wh) no dia 16/05/04 (WR01, WR02 e Energia Total).

6.3. O Efeito do Corte

No dia 13/02/04 observou-se de forma clara o fenômeno da limitação da potência máxima de saída do inversor causada pelo fato do arranjo fotovoltaico estar disponibilizando, naquele período, mais do que o inversor seria capaz de converter. Na Figura 8 percebe-se claramente que a curva de potência do subsistema conectado ao inversor WR02 apresentou o topo “achatado”, e não em forma de sino como esperado.

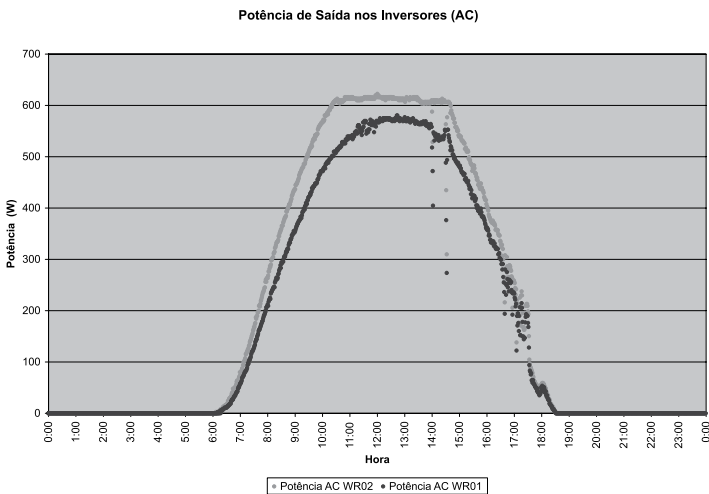


Figura 8: Curvas de potência AC na saída dos inversores WR01 e WR02. O fenômeno do corte pelo inversor pode ser claramente observado no WR02.

A potência de saída não consegue ser totalmente convertida pelo inversor, uma vez que foi atingida a sua capacidade operacional máxima. Ao invés de continuar crescendo com o aumento da intensidade de radiação solar incidente no arranjo fotovoltaico, a curva de potência de saída sofre um corte, indicando que o limite do inversor foi alcançado.

No dia 31/01/04 o mesmo fenômeno de corte foi observado.

6.4. Cálculo da Energia Perdida

Através da extrapolação de dados foi possível obter a curva de potência que seria formada caso o inversor WR02 tivesse maior capacidade. A extrapolação dos dados foi feita utilizando-se os dados de potência registrados pelo inversor WR01 como referência.

Foi realizado um incremento proporcional de 128Wp na potência registrada pelo inversor WR01. Dessa forma, gerou-se uma curva de potência da saída do inversor como se o mesmo estivesse sendo alimentado por 6 painéis, o que corresponde à configuração encontrada no inversor WR02, porém sem a observação do corte da potência máxima, já que a curva de potência do subsistema 1 não sofre influência da capacidade do inversor de 650W.

Para cada minuto registrado no inversor foram estabelecidas novas medidas, chamadas de potência corrigida. Essa potência, que tem como base os dados registrados no inversor WR01, deve ser interpretada como a potência corrigida no inversor WR02, ou seja, a curva do sistema WR02 sem o corte de potência máxima.

Tabela 6.2: Parte dos dados de Potência Corrigida Calculados

Hora	Potência WR01	Potência Corrigida	Potência WR02
12:00	567,03	680,436	622,46
12:01	569,63	683,556	616,19
12:02	566,71	680,052	616,19
12:03	569,63	683,556	619,33
12:04	566,71	680,052	616,19
12:05	569,45	683,34	616,19
12:06	575,10	690,12	616,19
12:07	572,16	686,592	616,19
12:08	572,16	686,592	616,19
12:09	572,16	686,592	616,19
12:10	569,45	683,34	616,19

Sendo,

$$\text{Potência Corrigida} = 128 \times \left(\frac{\text{Potência WR01}}{640} \right) + \text{Potência WR01}$$

A Potência Corrigida foi obtida através da soma da Potência registrada no inversor WR01 com o acréscimo proporcional da potência de um painel fotovoltaico de 128Wp. Enquanto a potência de saída no WR01 é proporcional aos 640Wp de potência nominal do arranjo fotovoltaico (5 painéis de 128Wp), a Potência Corrigida seria proporcional aos 6 painéis de 128Wp (768Wp) equivalente ao subsistema conectado ao WR02.

$$\frac{\text{PotênciaWR01}}{640} = \frac{\text{Potência Corrigida}}{128 + 640}$$

$$\text{Potência Corrigida} = \frac{\text{Potência WR01}}{640} \times (128 + 640)$$

$$\text{Potência Corrigida} = 128 \times \frac{\text{Potência WR01}}{640} + \text{PotênciaWR01}$$

O resultado da extrapolação para o dia 13/02 pode ser visto na Figura 9. Como tanto os resultados do dia 13/02 e do dia 31/01 foram bem próximos do esperado, eles foram utilizados para efeito de análise geral.

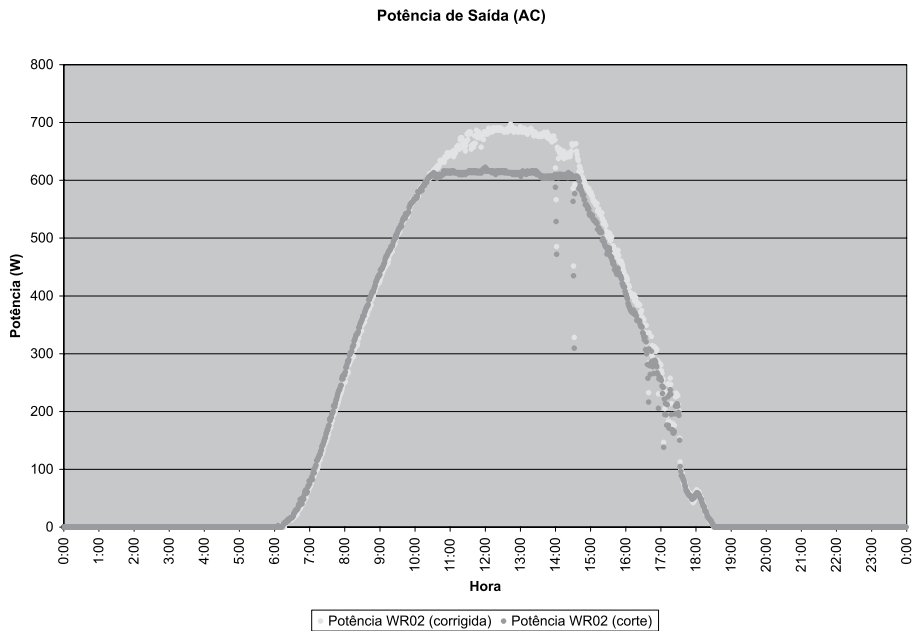


Figura 9: Curva de potência de saída do inversor WR02 com o corte da potência máxima (dados reais) e sem o corte (extrapolação de dados) para o dia 13/02/04.

6.5. Análise das Perdas por Limitação do Inversor

Com relação à perda total de energia, percebe-se que o subdimensionamento dos inversores não é um fator de grande influência, já que o sistema apresenta um FDI cerca de 0,85.

Para se ter uma idéia de quanta energia deixou de ser gerada, comparou-se a soma das duas quantidades de energia que deixaram de ser geradas (dias 31/01 e 13/02) com a energia total gerada em 2004.

Tabela 6.3: Energia gerada em 2004 pelo Sistema de Tubarão – SC

Energia Gerada (kWh) pelo Sistema de Tubarão – SC	
Janeiro	163
Fevereiro	189
Março	202
Abril	133
Mai	103
Junho	100
Julho	95
Agosto	147
Setembro	133
Outubro	215
Novembro	153
Dezembro	187
TOTAL	1.820

Fonte: LABSOLAR

Tabela 6.4: Análise comparativa das perdas de energia gerada pela limitação do inversor

	Energia Total Corrigida (kWh)	Energia Total Real (kWh)	Perdas (kWh)	Energia Total 2004 (kWh)	Perdas (%)
31/01/04	11,03	10,714	0,316	1.820	0,02%
13/02/04	9,177	8,831	0,346		0,02%
Total	20,207	19,545	0,662		0,04%

Através da tabela, pode-se visualizar que apenas aproximadamente 0,04% do total de energia gerado em um ano (cerca de 0,662kWh) deixaram de ser gerados pelo SFCR instalado em Tubarão em função da limitação do inversor.

6.6. Comparativo Entre Localidades

Um outro objetivo do estudo de caso seria verificar a influência das condições locais de radiação e temperatura sobre a eficiência do SFCR, levando em conta as perdas por limitação do inversor. Para isso, considerou-se a hipótese do mesmo sistema utilizado em Tubarão (SC) ser instalado em Salvador (BA).

Utilizando o programa Sundata (CRESESB/CEPEL), foi possível encontrar algumas informações sobre a radiação solar nas cidades de Florianópolis (SC)⁵ e Salvador (BA). Essas informações foram utilizadas para confirmar as diferenças do índice de radiação solar incidente entre as duas localidades. Como esperado, na cidade de Salvador as condições para aplicações da tecnologia solar fotovoltaica são mais apropriadas.

Sabendo-se que para sistemas com o $FDI \geq 0,6$ as perdas por limitação do inversor tendem a zero, independente da localidade analisada, e sabendo ainda que o FDI do sistema estudado é de cerca de 0,85, conclui-se que o mesmo sistema instalado em Salvador também teria perdas por limitação do inversor tendendo a zero.

7. RESULTADOS

Através do estudo de caso foi possível observar que apenas em dois dias de operação, no ano de 2004, o SFCR instalado em Tubarão – SC apresentou o efeito do corte. A energia que deixou de ser gerada em função desse limite operacional representou apenas cerca de 0,662kWh, equivalente a aproximadamente 0,04% da energia total gerada. Dessa forma, para o sistema instalado sob aquelas condições de radiação solar e temperatura, a aquisição de um inversor maior não se justifica. Ao contrário, provavelmente um inversor ainda menor poderia se adequar perfeitamente ao sistema, fornecendo praticamente a mesma quantidade de energia.

Com isso, foi possível verificar que a prática do subdimensionamento dos inversores com relação ao gerador fotovoltaico para um SFCR não só pode, como de fato deve ser feita, visando o aproveitamento máximo do sistema. O fator de dimensionamento (FDI), que representa a relação entre a capacidade do inversor e a potência nominal do arranjo fotovoltaico, não tem

⁵ Como não existiam informações de radiação para a cidade de Tubarão no banco de dados do SUNDATA, foram utilizados os dados de Florianópolis para a avaliação da influência da localidade.



um valor fixo para cada localidade brasileira, mas sim uma margem flexível. Para geradores com FDI acima de 0,6 pode-se dizer que a produtividade não é afetada de maneira significativa.

Sendo assim, é possível afirmar ainda que dois sistemas idênticos, um instalado em Salvador e outro em Florianópolis, ambos com inversores com capacidade maior ou igual a 60% da potência do gerador fotovoltaico ($FDI \geq 0,6$), não teriam grandes diferenças com relação às perdas totais de energia em função do FDI. As diferenças encontradas na produtividade anual, representada em kWh/kWp.ano, seriam decorrentes das características meteorológicas de cada localidade e por isso, em Salvador o sistema tenderia a gerar mais energia.

Uma outra questão que deve ser levada em consideração é que a quantidade de módulos fotovoltaicos deve ser economicamente compatível com a potência do inversor disponível no mercado. Como foi visto que o SFCR pode operar de forma eficiente em uma faixa relativamente grande de FDI, deve-se utilizar a melhor relação inversor-gerador para que o sistema tenha o maior benefício possível.

8. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido teve seus objetivos alcançados com sucesso. Com a realização desse estudo foi possível entender como o subdimensionamento de inversores pode contribuir para um melhor funcionamento dos SFCR.

Através do estudo de caso do sistema instalado em Tubarão (SC) foi possível visualizar que o investimento em um inversor de capacidade maior do que 85% da potência nominal do gerador fotovoltaica não seria justificado, uma vez que não seriam obtidos ganhos reais de energia gerada. Pelo contrário, os SFCR operam satisfatoriamente utilizando inversores dimensionados com capacidade igual ou maior que 60% da potência do gerador fotovoltaico e poderiam ser conectados até oito módulos de 128Wp ao inversor de 650W.

Com a realização desse trabalho foi possível concluir ainda que não haveria uma diferença muito grande relativa às perdas totais de geração de energia em função do FDI, considerando dois sistemas idênticos instalados em localidades diferentes, uma com maiores índices de radiação solar e tem-



peraturas médias mais elevadas, desde que ele fosse maior ou igual a 0,6.

Por se tratar de um assunto ainda pouco discutido no Brasil, novas pesquisas relacionadas ao dimensionamento podem contribuir ainda mais para o aperfeiçoamento dos SFCR, visando minimizar os custos de geração fotovoltaica, o que tem grande relevância quando se trata de um sistema caro.

Um novo estudo, tendo como base a comparação de dados registrados pela estação meteorológica da UNIFACS/COELBA e do LABSOLAR, encontra-se em andamento para comprovar os estudos teóricos aqui expostos.

REFERÊNCIAS

ANEEL. *Resolução 083 de 29 de abril de 2004*. Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por intermédio de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI. Brasília, 2004.

_____. *Resolução 223 de 29 de abril de 2003*. Estabelece as condições gerais para elaboração dos Planos de Universalização de Energia Elétrica, bem como fixa as responsabilidades das concessionárias e permissionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica. Brasília, 2003.

CRESESB. *Cento de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Coletânea de Artigos: Solar e Eólica*. Volume 2. CRESESB/CEPEL. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, 1999.

Burger, B.; Rüther, R. *Inverter sizing of grid-connected photovoltaic system in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature*. Elsevier. Solar Energy, 2005.

DUFFIE, John A., BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. 2ª Edição. Estados Unidos – Nova Iorque, 1991.

EERE. *U.S. Department of Energy Efficiency and Renewable Energy*. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov>>. Acesso em março de 2006.

ELETROBRÁS/PROCEL. *Energia Solar: Fundamentos e Aplicações*. Apostila do Curso Disseminação de Informações em Eficiência Energética. SENAI Dendezeiros. Salvador, 2004.

GALDINO, M. A. *The implantation of a grid-connected PV system at CEPEL*. RIO3 – World Climate & Energy Event. Rio de Janeiro, 2003.

IEA PVPS. *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme*. Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org>>. Acesso em 13 de agosto de 2007.

MACÊDO, Wilson N. *Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Tese de Doutorado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MAYCOCK, Paul. *PV Review – World Solar PV Market Continues Explosive Growth*. Elsevier – Solar PV. Warrenton, 2005.

MUNRO, Donna. *Inside Inverters – How they work, and what is on the market*. Renewable Energy World. 2006.

OLIVEIRA, S. H. F. *Geração distribuída de eletricidade: Inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

OROSCO, David R. Z. *Avaliação econômica da geração de energia elétrica fotovoltaica conectada à rede em mercados elétricos desregulados*. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2000.

POMILIO, J. A. *Eletrônica de Potência*. Capítulo 6. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas (FEEC/UNICAMP). São Paulo, 2006.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. *Renewables 2005: Global Status Report*. Washington, 2005.

RÜTHER, R. *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligação à rede elétrica pública do Brasil*. LABSOLAR, Florianópolis, 2004. 114p.



RÜTHER, R. *Demonstrating the superior performance of thin-film amorphous silicon for building-integrated photovoltaic systems in warm climates*. ISES, 1999 Solar World Congress – International Solar Energy Society. Jerusalem, 1999.

RÜTHER, R.; DACOREGIO, M. M. *Performance assessment of a 2kWp grid-connected, building-integrated, amorphous silicon photovoltaic installations in Brazil*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 8, 2000.

SWERA. *Solar and Wind Energy Resource Assessment*. Disponível em: <<http://swera.unep.net>>. Acesso em 15 de março de 2006.

TIBA, Chigueru; *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres*. Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia – UFPE. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.