

BENEFÍCIOS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

Marcus Renzo

marcus.renzo.soares@gmail.com

Wallysson Klaus

wallyssonklaus1@gmail.com

Júlio Antônio

julioeng123@gmail.com

Thiago Duque

thiagoduques@gmail.com

Carlos Frederico Dias Diniz

carlosfd@poli.br



O avanço da tecnologia, paralelo aos esforços para reduzir os danos causados ao meio ambiente ao gerar energia elétrica, traz, para o campo da geração energética, a luz do sol que é cada vez mais explorada e popularizada entre consumidores, desde os de grandes portes, como indústrias, até os mais simples, residenciais. Desse ponto de vista, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma fonte limpa e renovável. O presente artigo visa apresentar o funcionamento das células fotovoltaicas, desde a captação da luz do sol, até os níveis de rendimento exigidos por normas internacionais que caracterizam o funcionamento eficiente dos equipamentos que compõem o sistema de geração e distribuição proveniente dessa fonte. O artigo também visa abranger informações sobre os inversores de frequência e seus benefícios ambientais e econômicos, assim como será tratado sobre o surgimento de efeitos indesejáveis, na produção de energia, sendo necessário a proteção do trabalhador e dos equipamentos, tornando essencial o conhecimento de práticas e requisitos do sistema elétrico.

Palavras-chave: Inversor, Célula Fotovoltaica, Luz Solar, Geração energética

1. Introdução

Desde a revolução industrial, vários pensadores notaram que a energia se tornaria um setor independente e autônomo, e que desempenharia importante papel de regulação da nova economia (BARCA, 2011). Analisando o crescimento energético ao longo do tempo, percebe-se que duas principais mudanças são vistas no fornecimento energético da sociedade. A primeira mudança consiste na era do carvão, resultado advindo da máquina a vapor, responsável pela superação de restrições da indústria no período pré-industrial (MANTOUX, 1927; WILSON & GRUBLER, 2011). A segunda grande transição é o deslocamento da tecnologia a carvão para fins de energia elétrica e a chegada de tecnologias com base no petróleo, fase esta ainda longe de seu término (WILSON & GRUBLER, 2011).

A questão da necessidade energética é constantemente apontada como determinante para a mudança deste paradigma. Assim, fontes menos sujas tendem a ganhar espaço, mesmo não sendo viáveis economicamente em um primeiro momento. Nesta escolha, deve-se atentar para eventuais trade-offs entre fontes, como da dicotomia entre impactos locais e globais (CARSALADE, 2013). Dito isto, o estudo sobre os benefícios que o inversor, na geração distribuída de energia fotovoltaica, pode trazer como um condutor a uma nova matriz energética global limpa e eficiente, é necessário. Para o caso do Brasil, os primeiros sistemas começaram a ser instalados, fruto do novo marco regulatório para este setor (ANEEL, 2012). Com este crescimento, é notória a necessidade de estudos sobre esses equipamentos, afim de quantificar o potencial desta geração de modo a contribuir com a matriz energética brasileira.

2. A energia solar

As fontes renováveis definidas pela resolução da ANEEL, que podem ser utilizadas pelo consumidor, são: solar, eólica, biomassa e hídrica. Dentre as novas fontes de geração, a energia fotovoltaica é a que mais cresce em todo o mundo. Todos os dias, a abundante luz do sol, que chega à terra, carrega consigo uma fonte de energia limpa e praticamente inesgotável que, graças às tecnologias existentes, pode ser captada e utilizada por diversos consumidores.

O termo fotovoltaico significa a transformação da radiação solar diretamente em corrente elétrica por meio das células fotovoltaicas. Também chamadas de células solares, elas são fabricadas a partir de um material semicondutor como o silício, que é o material mais

utilizado e componente principal das “placas solares” utilizadas nesses sistemas, chamadas de módulos fotovoltaicos. O primeiro módulo fotovoltaico feito com silício data de 1955, produzido pela Bell Laboratories com objetivo de investigar seu potencial para o setor de telecomunicações. Durante os vinte anos seguintes, aplicações espaciais foram predominantes (GREEN, 2005). No período 1970-75 apenas duas empresas vendiam módulos, já em 1978 o grupo havia aumentado para vinte empresas. Em 1983, dúzias de empresas faziam parte do mercado (NEMET, 2006). Com altos índices de irradiação solar presentes em todo o seu território, o Brasil é um país onde essas tecnologias apresentam alto desempenho e, conseqüentemente, elevado retorno para os consumidores. Por ora, a capacidade instalada no país não apresenta grande relevância para a matriz nacional. Enquanto que, a Alemanha e Espanha, países com menos recursos solares, apresentam 32.411 MWp e 16.361 MWp em capacidade instalada, respectivamente (EPIA, 2013). No Brasil, onde o recurso solar é bastante favorável, tem cerca de 7,5 MWp em capacidade com energia solar (BEN, 2013).

A energia solar que chega à Terra em um ano é muito maior que o consumo energético humano no mesmo período, porém, somente com o uso de equipamentos específicos é possível captá-la e utilizá-la. Em 12 minutos, a quantidade de radiação solar que atinge a Terra corresponde a demanda energética final global para o período de um ano (RÜTHER, 2004), embora esta energia tenha ainda que passar por centros de processamento onde parte será perdida. Em cálculos da década de 70, recursos energéticos estocados seriam capazes de produzir apenas duas semanas de radiação solar incidente sobre o globo (GEORGESCU-ROEGEN, 1975).

Por outro lado, embora o enorme potencial da fonte seja evidente, sua densidade energética é baixa, dificultando seu uso. A intermitência, típica de fontes renováveis, é outro relevante desafio a sua inserção em larga escala e, assim, aspectos tecnológicos serão determinantes para o sucesso da fonte. A transição energética pode enfrentar ainda escassez de recursos como alumínio, cobre, níquel e prata (LLOYD & FOREST, 2010), ou materiais ainda mais importantes como lítio, platina e paládio (GARCÍA-OLIVARES et al., 2012), configurando-se assim mais um entrave à sua inserção.

O aproveitamento da energia solar pode ser feito por meio de tecnologias distintas e que a convertem em dois tipos de energia diferentes, que são:

- Tecnologia de Aquecimento Solar = geração de calor

- Tecnologia Solar Fotovoltaica = geração de energia elétrica

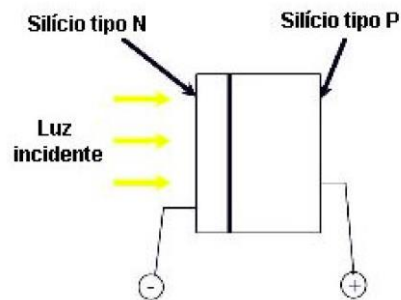
Essas tecnologias são, hoje, as mais utilizadas no Brasil e se espalham a cada ano entre as casas, fazendas, empresas e até mesmo indústrias.

2.1. Funcionamento da energia solar fotovoltaica

Segundo a ANEEL (2005), o efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar. Dentre os materiais mais adequados para essa conversão (células solares ou fotovoltaicas), tem-se como destaque o silício. Como o cristal de silício puro não possui elétrons livres, ele se apresenta como um mal condutor elétrico. Logo, a célula fotovoltaica é composta por duas porções de silício, dopadas com elementos opostos, como mostra a Figura 1. De um lado, faz-se a dopagem do silício com fósforo, obtendo-se um material com elétrons livres (tipo N), formando uma camada negativa. De outro, a dopagem é feita com o boro, resultando em um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons (tipo P), formando, neste caso, a camada positiva (NASCIMENTO, 2004). Cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P.

Essas camadas, então, são colocadas juntas dentro de cada célula, com a parte negativa em cima e a parte positiva em baixo, sendo a área de união entre elas chamada de Junção-PN. A transformação da luz do sol em energia elétrica começa quando os fótons, que são partículas elementares da luz, atingem a célula e energizam os elétrons, em excesso, da camada N, que começam a migrar através da área de junção para ocupar os buracos, em excesso, da camada P. Esse processo, entretanto, não ocorre indefinidamente, pois cria-se um campo elétrico nessa área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo. Uma fina grade, portanto, é utilizada para ligar externamente essas duas camadas, por onde esses elétrons fluem em ambas direções, criando a corrente elétrica que será utilizada. A intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente.

Figura 1 - Dopagem da Célula Solar



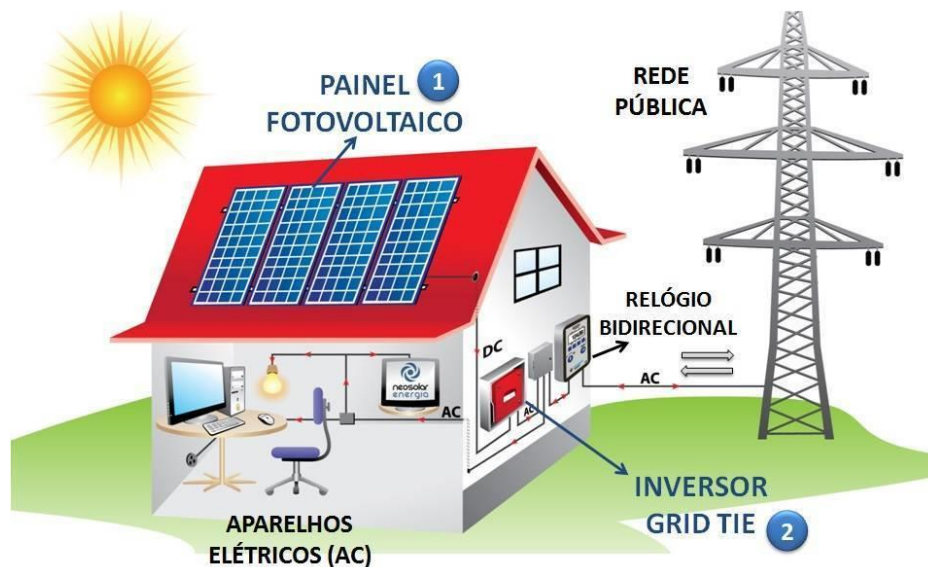
Fonte: NASCIMENTO (2004)

3. Benefícios do inversor de frequência na geração fotovoltaica

A indústria de eletricidade valoriza o sistema quanto à energia elétrica produzida e aos eventuais benefícios que esta pode proporcionar, enquanto governos e sociedade estão interessados em valorizar os benefícios ambientais, a promoção do desenvolvimento econômico (por exemplo, pela criação de empregos) e a contribuição para se ter auto-suficiência energética. Para que a interligação do arranjo fotovoltaico com a rede elétrica convencional seja possível, é indispensável a utilização dos inversores, que são equipamentos 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.

A Figura 2 apresenta um esquema da configuração mais simples de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Nela podem-se observar os dois equipamentos básicos do sistema: gerador fotovoltaico e o inversor CC/CA, que se encarrega de transformar em CA a eletricidade CC produzida pelo gerador fotovoltaico.

Figura 2: Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico



Fonte: NEOSOLAR (2018)

Os inversores para a interconexão da instalação à rede devem incorporar circuitos e dispositivos de controle muito precisos para garantir a qualidade da energia entregue e desconectar a instalação fotovoltaica da rede em caso de falhas, evitando, assim, a possibilidade de que a equipe de manutenção da concessionária possa sofrer uma descarga elétrica.

Na escolha de um inversor solar, deve-se levar em consideração duas características muito importantes: a confiabilidade e a eficiência. A eficiência do inversor é medida em %, indicando o quão eficiente este inversor é em converter a energia solar de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), para ser usada de forma comercial e/ou residência, por exemplo. A eficiência de um inversor solar para sistemas conectados à rede varia, sendo 94% a eficiência mínima aceitável. Já a confiabilidade se baseia na ideia de que quanto mais confiável, menor é o seu risco de ter algum problema com o inversor solar. Se tiver que escolher entre uma das duas características, é aconselhado optar pelo inversor que seja mais confiável, pois, é preferível perder um pouco da energia gerada (1%, 2% ou 3%) ao ter problemas com o inversor (pouco provável, mas pode acontecer com inversores de baixa qualidade).

Nesse caso específico de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o papel do inversor é de fundamental importância, pois, além de realizar a transformação da corrente contínua em

alternada, é responsável tanto pela qualidade da energia entregue pelo sistema à rede quanto pela garantia de segurança dos sistemas e pessoas envolvidas.

4. Qualidade de energia

A interconexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica pode produzir distorção harmônica na tensão da linha, incremento da carga reativa do alimentador e variações de tensão. Para evitar estes efeitos indesejáveis, a energia injetada à rede deve cumprir com padrões de qualidade bem definidos.

4.1. A distorção harmônica

A distorção de corrente harmônica possui algumas consequências negativas para os equipamentos de transmissão e distribuição, bem como para os usuários da rede. O inversor do sistema fotovoltaico pode introduzir harmônicas na rede que, ao circularem pelas impedâncias do sistema, produzem quedas de tensão harmônicas e, portanto, distorção no ponto de acoplamento. A magnitude da distorção de tensão depende da impedância do sistema às frequências em questão e da magnitude das correntes harmônicas (AGREDANO et al., 1997).

A norma IEEE 519 especifica a respeito do conteúdo de harmônicas presente na corrente que o sistema fotovoltaico injeta à rede o seguinte:

- A distorção harmônica total da corrente será menor do que 5% à máxima potência;
- A distorção de cada harmônica ímpar não poderá superar os seguintes valores dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Distorção de harmônica permitida na corrente injetada à rede

Harmônica	Distorção
3-9	< 4%
11-15	< 2%
17-21	< 1,5%

23-33	< 0,6%
33 em diante	< 0,3%

Fonte: CIEMAT (1998)

A distorção das harmônicas pares não superará a quarta parte dos valores que lhes correspondem, segundo a tabela anterior.

4.2. Fator de potência

A instalação de geradores fotovoltaicos em sistemas domiciliares pode incrementar a demanda de potência reativa do domicílio. Este fato é importante para a concessionária, desde que ela não cobre por consumo de potência reativa a seus usuários residenciais. A norma IEEE 929 estabelece um fator de potência superior a 0,85 para situações em que o sistema fotovoltaico opere a mais do 2% da sua capacidade (CIEMAT, 1998). No entanto, é comum o uso de inversores que operam com fator de potência unitário.

4.3. Proteção e segurança

Sob determinadas circunstâncias, alguns inversores poderiam injetar sinais assimétricos ou níveis significativos de corrente contínua à rede em que estão conectados. A presença de corrente contínua na rede de distribuição de corrente alternada é uma situação bem pouco provável, uma vez que a maioria das cargas de corrente alternada e o transformador de distribuição oferecem um curto-circuito virtual à corrente contínua (CIEMAT, 1998).

As margens de variação de tensão e frequência que dão início à desconexão de inversores comerciais oscilam entre 80% e 106% da tensão nominal e entre uma defasagem de $\pm 0,5$ Hz de frequência. Em caso de se produzir uma falha na rede, o circuito de detecção inicia a desconexão instantaneamente ao detectar a diminuição da tensão. Atualmente, aceita-se que a desconexão do inversor dentro dos 20 primeiros ciclos depois da falha como condição suficiente.

Deve-se prevenir o funcionamento em ilha (islanding), situação na qual a instalação fotovoltaica mantém o fornecimento a uma zona da rede de distribuição e às cargas conectadas depois de ter se perdido o enlace com a rede principal. A condição de operação em ilha 32 representa um risco para a equipe de manutenção da concessionária, pois eles podem entrar em contato com linhas de distribuição energizadas quando se supõe o contrário.

Visando prevenir este cenário, a norma IEEE P929 recomenda o uso de um inversor com proteção contra funcionamento em ilha, que deverá cumprir a tarefa de desconectar sua saída da rede em 10 ciclos, ou menos, se esta cair, assim como deverá estar na presença de uma carga típica na qual existe pelos menos uma diferença de 50% entre a potência real consumida pela carga e a gerada pelo inversor. O fator de potência da carga é inferior a 0,95

Se a diferença entre a potência real consumida pela carga e a gerada pelo inversor é inferior a 50% e o fator de potência é superior a 0,95, a desconexão deverá produzir-se em um tempo não maior que 2 segundos.

5. Considerações finais

O artigo analisou os benefícios que os inversores de frequência podem trazer na geração distribuída de energia solar fotovoltaica. A cada dia que se passa, os combustíveis fósseis estão se esgotando mais rapidamente. Décadas atrás, não se falava em energia limpa ou geração distribuída, hoje esta não é apenas um assunto acadêmico, é uma necessidade. Pesquisas apontaram que o consumo excessivo de combustíveis fósseis podem fazer com que a temperatura da terra aumente em até 9,5°C nos próximos 250 a 300 anos.

Portanto, aplicações de inversores já são diversas, neste artigo foi mostrado o quão importante são para novas formas de geração de energia elétrica. Muitas outras aplicações, na área e geração distribuída, poderão ser desenvolvidas nos próximos anos.

REFERÊNCIAS

AGREDANO, J.; ARTEAGA, O.; HUACUZ, J. **Los generadores fotovoltaicos y la red eléctrica**. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Boletín IIE, março-abril 1997.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**/Agência Nacional de Energia Elétrica. 2 ed. Brasília, 2005. ISBN: 85-87491-09-1.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**. Resolução normativa no 482, de 17 de abril de 2012. abr. 2012.

BARCA, S. **Energy, property, and the industrial revolution narrative**. Ecological Economics, v.70, n. 7, p. 1309–1315, maio. 2011.

BEN. Balanço Energético Nacional - ano base 2012. Rio de Janeiro: **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, Ministério de Minas e Energia (MME), 2013.

CARSALADE, A. M. **Interações entre Mudanças Climáticas Globais e Poluição Atmosférica Local: Implicações para a Expansão do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação de Mestrado - Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2013.

CIEMAT-Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Informe Preliminar sobre Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica (EFCR), **Proyecto de Investigación sobre Límites y Competitividad de la Penetración de la Energía Solar Fotovoltaica en la Red**, novembro 1998, 40p.

EPIA. **Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017**. Brussels - Belgium: European Photovoltaic Industry Association, 2013.

GARCÍA-OLIVARES, A. et al. **A global renewable mix with proven technologies and common materials**. Energy Policy, v. 41, p. 561–574, fev. 2012.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **Energy and Economic Myths**. Southern Economic Journal, v. 41, n. 3, p. 347–381, 1975.

GREEN, M. A. **Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 13, n. 5, p. 447–455, 2005.

LLOYD, B.; FOREST, A. S. **The transition to renewables: Can PV provide an answer to the peak oil and climate change challenges?** Energy Policy, v. 38, n. 11, p. 7378–7394, nov. 2010.

MANTOUX, P. **A revolução Industrial no século XVIII** – estudo sobre os primórdios da grande indústria moderna na Inglaterra. 2. a ed. [s.l.] Hucitec, 1927.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, Brasil, 2004. p. 14-17.

NEMET, G. F. **Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics**. Energy Policy, v. 34, n. 17, p. 3218–3232, nov. 2006.

NEOSOLAR. **Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e seus Componentes**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>> Acesso em: 02 maio. 2018.

RÜTHER, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos - **O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.

WILSON, C.; GRUBLER, A. **Lessons from the history of technological change for clean energy scenarios and policies**. Natural Resources Forum, v. 35, n. 3, p. 165–184, 2011.