

Geração Distribuída: Sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão

Distributed Generation: Cogeneration photovoltaic system connected to the low voltage network

Leandro Pereira dos Santos¹

Roberto Hilário Pereira júnior²

Vanessa Cristina Lopes Santos³

RESUMO:

Este trabalho versa sobre aplicação de sistema fotovoltaico integrado ao entorno construído e conectado à rede de baixa tensão como alternativa para a Geração Distribuída. Geração Distribuída é a produção de energia elétrica realizada junto ou próxima ao consumidor. A crescente demanda por energia elétrica é objeto de estudo de diversos institutos de pesquisa. Fontes de geração conectadas diretamente na rede de distribuição ou no consumidor são alternativas para: descentralização do sistema de geração e conseqüentemente a redução de novos investimentos em construção de novas usinas, linhas de transmissão e redes de distribuição. O presente trabalho trata também sobre estudo de caso de todo o processo envolvido na instalação deste sistema fotovoltaico quando conectado à rede de baixa tensão para operação em regime de *Net Metering*. No regime de *Net Metering*, o arranjo fotovoltaico atua como fonte complementar do sistema elétrico ao qual está conectado; pois mediante geração própria diminui a necessidade da potência requerida da rede pela unidade consumidora ou, em caso de geração superior ao consumo, injeta potência na rede. Esta injeção de potência na rede se dá por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local e posteriormente a unidade consumidora é compensada com um crédito a ser consumido em um prazo de trinta e seis meses. O estudo de caso engloba a avaliação do potencial energético, estimativa de produção, estudo de viabilidade econômica, compra de materiais, instalação, trâmites e conexão do sistema à rede.

Palavras Chave: Geração Distribuída, *Net Metering*, Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT:

This paper aims to the application of photovoltaic system integrated into the built environment and connected to the low voltage network, as an alternative to Distributed Generation. Distributed Generation is the production of electricity carried along or near the consumer. The growing demand for electricity is studied by several research institutes. Generation sources connected directly to the distribution network or to the consumer are alternatives for: decentralization of the energy generation and consequently the reduction of new investments in building new power plants, transmission lines and distribution networks.

¹ Graduando em Engenharia Elétrica. UNIBH, 2013, MG. Email: leandrop@cemig.com.br

² Graduando em Engenharia Elétrica. UNIBH, 2013, MG. Email: roberto.hilario@vale.com

³ Mestre em Engenharia de Elétrica. UFMG, 2004. Professora do Centro Universitário de Belo Horizonte UNI-BH. Belo Horizonte, MG. Email: vsantos2@prof.unibh.br

This work also talks about the case study of the process involved in installing this photovoltaic system when connected to the low voltage network for operation under the Net Metering. In the regime of Net Metering, the Photovoltaic array acts as an additional electricity source in the system where it is connected. Due to its own generation of energy, the need of power from network by the consumers decreases, or in case of more generation of energy than consume, it delivers energy to the network. This injection of power in the network is through free loan to the local distributor and the consumer unit is subsequently offset by a credit to be consumed within a period of thirty-six months. The case study includes the assessment of the energy potential, estimated production, economic feasibility study, purchase of materials, installation procedures and system connection to the network.

KEYWORDS: Distributed Generation, Net Metering, Photovoltaic System.

1. INTRODUÇÃO

A energia possibilitou todo o desenvolvimento da sociedade ao estágio em que ela se encontra. No entanto, a relação de dependência sociedade-energia, traz grandes preocupações quanto ao futuro da humanidade. A expansão acentuada do consumo de energia, embora possa refletir o aquecimento econômico e a melhoria de qualidade de vida, tem aspectos negativos. Estes aspectos são: a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia, o impacto ao meio ambiente produzido por esta atividade e os elevados investimentos exigidos na pesquisa de novas fontes e construção de novas usinas.

O Sol é a maior fonte de energia que abastece a Terra. A energia proveniente do Sol aquece a Terra de forma desigual. Diariamente incide sobre a Terra mais energia vinda do Sol do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta em todo um ano.

No Brasil, cerca de oitenta e um por cento da oferta total de energia elétrica é proveniente de grandes centrais hidrelétricas distantes dos grandes centros de consumo. O restante desta oferta é obtido, em grande parte, através de combustíveis fósseis. Como solução alternativa à produção centralizada pode-se citar a Geração Distribuída (GD) de eletricidade, que é definida por produção de energia elétrica realizada junto ou próxima ao consumidor. As alternativas energéticas de GD devem considerar questões como distribuição geográfica da produção, confiabilidade e flexibilidade de operação, disponibilidade de preços de combustíveis, prazos de instalação e construção, condições de financiamento, licenciamento ambiental, etc.

Atualmente há grande interesse no uso de fontes de energia “limpas”, ou seja, que não emitam CO₂ e gases poluentes.

Uma alternativa energética, tanto para descentralização do sistema de geração quanto no que concerne à questão ambiental, é o Sistema Fotovoltaico (SF) conectado à rede de baixa tensão; sistema este no qual o arranjo fotovoltaico atua como fonte complementar do sistema elétrico ao qual está conectado. O gerador fotovoltaico é composto por módulos onde se encontram as células fotovoltaicas que produzem energia elétrica na forma de corrente contínua quando sobre elas incide a luz solar. Em função de sua baixa densidade energética, adapta-se melhor à Geração Distribuída do que à centralizada. O SF pode ser utilizado para geração de energia elétrica em comunidades remotas: alimentação de sensores, postes de luz, semáforos, sistemas de bombeamento de água e ocasionalmente pode até ser utilizado como fonte complementar conectada à rede elétrica, em regime de cogeração, para fim de compensação nos valores pagos à fornecedora de energia elétrica.

Baseado no exposto, o presente trabalho pretende desenvolver um estudo técnico e detalhado de um sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ENERGIA SOLAR

O sol, cujas radiações definem o meio ambiente no qual nós, como uma espécie, evoluímos e nos adaptamos, é fonte predominante de ondas eletromagnéticas. Sendo a estrela mais próxima da Terra, constitui a principal fonte de energia do planeta. Sua fonte de energia está associada à fusão termonuclear de átomos de hidrogênio para hélio. Neste processo são emitidos *fótons* altamente energéticos, de forma que a transferência de energia da parte mais interna até a superfície é realizada basicamente por meio de radiação eletromagnética (LIOU, 1980).

A eletricidade solar, tradicionalmente chamada energia fotovoltaica é uma fonte limpa de energia que tem potencial para contribuir com o desenvolvimento ambientalmente sustentável (LORA; HADDAD, 2006).

2.1.1 RADIAÇÃO SOLAR

O processo mais importante pela transferência de energia na atmosfera ocorre através da radiação eletromagnética. Um raio luminoso é uma onda progressiva de campos elétricos e magnéticos (uma onda eletromagnética). Apesar da variabilidade do espectro eletromagnético em relação às suas propriedades e fontes, as radiações mantêm características em comum podendo ser descritas como resultado da combinação de um campo elétrico e de um campo magnético que se propagam no vácuo à velocidade da luz (HALLIDAY; RESNICK, 2009).

Em 1900, o cientista alemão Max Planck desenvolveu uma teoria que resultou na equação de corpo negro, com a criação da constante que recebe seu nome [$h=6,63 \times 10^{-34}$ J.s] e a ideia de *quanta* de energia (PAULA, 2004).

O mesmo autor afirma que em 1905, Albert Einstein fez uma suposição a partir da teoria de Planck, sobre a natureza da luz e sua interação com a matéria, de que sob certas circunstâncias ela se comporta como se sua energia estivesse concentrada de forma discreta em pacotes, os *fótons*, e não de forma contínua. Einstein definiu que a energia [E_f] de cada *fóton* era igual ao produto da constante de Planck [h] e de sua frequência de oscilação (ν).

$$E_f = h \cdot \nu = (h \cdot c) / \lambda$$

2.1.2 DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Devido à grande distância entre o Sol e a Terra, diz-se que a radiação solar é colimada, ocupando um campo de visão limitada, denominado “disco solar aparente”. A quantidade de radiação solar depende da posição do disco solar no céu, isto é, depende de variáveis associadas à órbita da Terra ao redor do Sol. Para se conhecer tal posição, utiliza-se o sistema de coordenadas terrestres, denominado Sistema Geográfico. O referido sistema tem como coordenadas a latitude (φ) e a longitude (λ) que são utilizadas para localizar pontos na superfície terrestre, conforme ilustrado na figura 1.

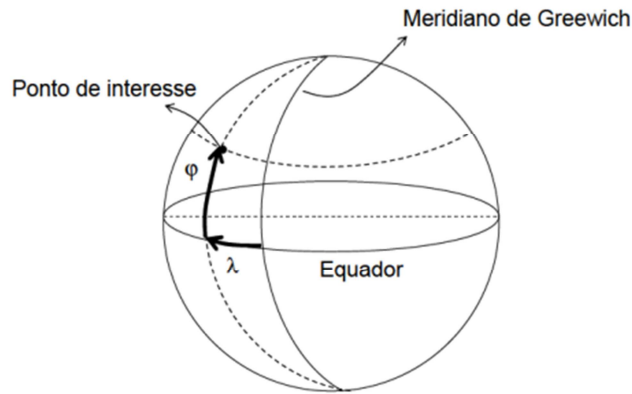


Figura 1 – Sistema Geográfico.

Fonte: BISCARO, 2007. p. 14.

A latitude é computada a partir do equador até o paralelo de interesse e varia de -90° a $+90^\circ$, sendo positivo no hemisfério norte. A longitude é computada a partir do Meridiano de Greenwich até o meridiano de interesse e varia de -180° a $+180^\circ$, sendo negativo a oeste de Greenwich (BISCARO, 2007).

O mesmo autor também afirma que além do ciclo diurno, a quantidade de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre varia de acordo com a época do ano, devido a órbita elíptica da Terra ao redor do Sol, conforme visto na figura 2.

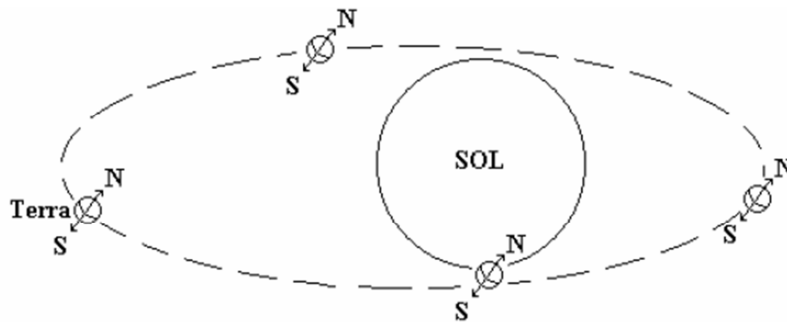


Figura 2 – Representação do movimento da Terra em torno do Sol.

Fonte: BISCARO, 2007. p. 10.

O autor também afirma que a declinação solar (δ) é o ângulo formado entre a linha imaginária que une o centro do planeta Terra (na linha do Equador) ao centro do Sol. A inclinação do eixo de rotação da Terra com relação à normal ao plano da eclíptica influi na quantidade de radiação solar incidente. A figura 3 demonstra que esta inclinação varia de $23^\circ 27'$ a $-23^\circ 27'$ e, quando atinge valores máximos recebe o nome de solstício.

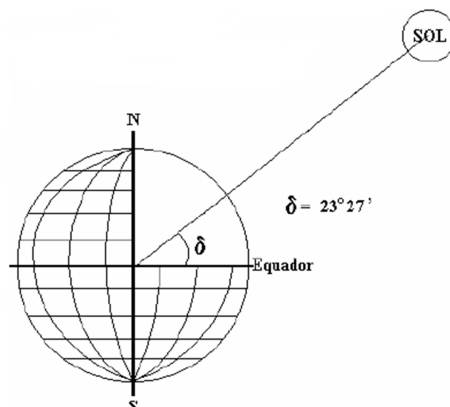


Figura 3 – Declinação solar.

Fonte: BISCARO, 2007. p. 11.

A radiação solar que se propaga através da atmosfera sofre atenuação na interação com os constituintes atmosféricos e também pelo processo de espalhamento ao interagir com moléculas de oxigênio e nitrogênio. Entre os constituintes atmosféricos atenuadores, é importante citar o ozônio, o vapor d'água e as partículas de aerossóis absorvedoras (BARROS, 2011).

Segundo o mesmo autor, as relações geométricas, que estão evidenciadas na figura 4, entre os raios solares e superfície terrestre são descritas através de vários ângulos:

- Ângulo de Incidência (γ): ângulo formado entre os raios do sol e a normal de superfície de captação.
- Ângulo Azimutal da Superfície (a_w): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul.
- Ângulo Azimutal da Superfície (a_s): ângulo entre a projeção do raio solar no plano horizontal e a direção Norte-Sul.
- Altura Solar (α): ângulo compreendido entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre um plano horizontal.
- Inclinação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal.
- Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular (ω): deslocamento angular Leste-Oeste do Sol, a partir do meridiano local, e devido à movimentação da Terra.
- Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios solares e a vertical.

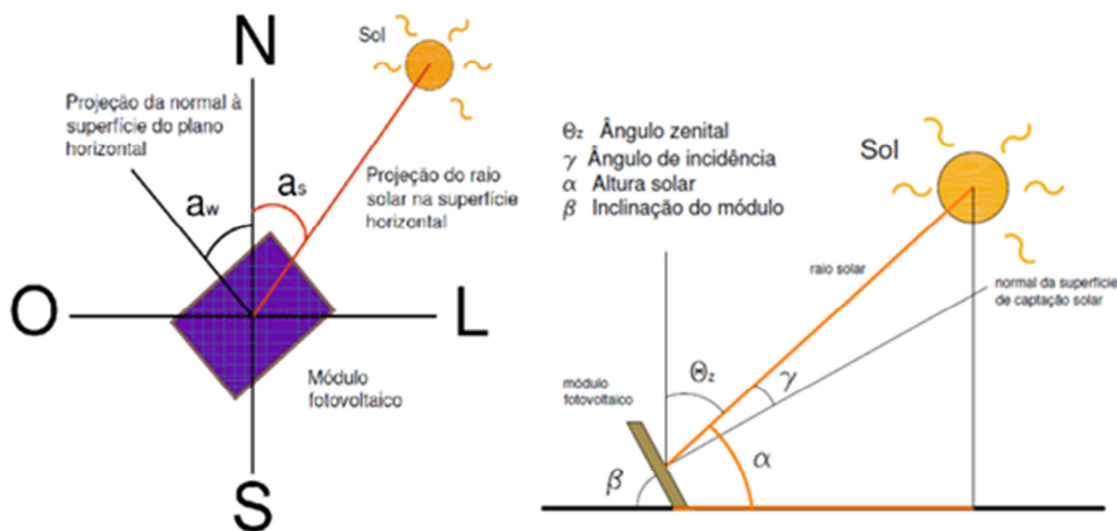


Figura 4 – Ângulos entre raios solares e superfície terrestre.

Fonte: BARROS, 2011. p. 7.

Observa-se na figura 5 que grande parte do território brasileiro está localizado relativamente próximo da linha do Equador, de forma que não se observa grandes variações na duração solar do dia.

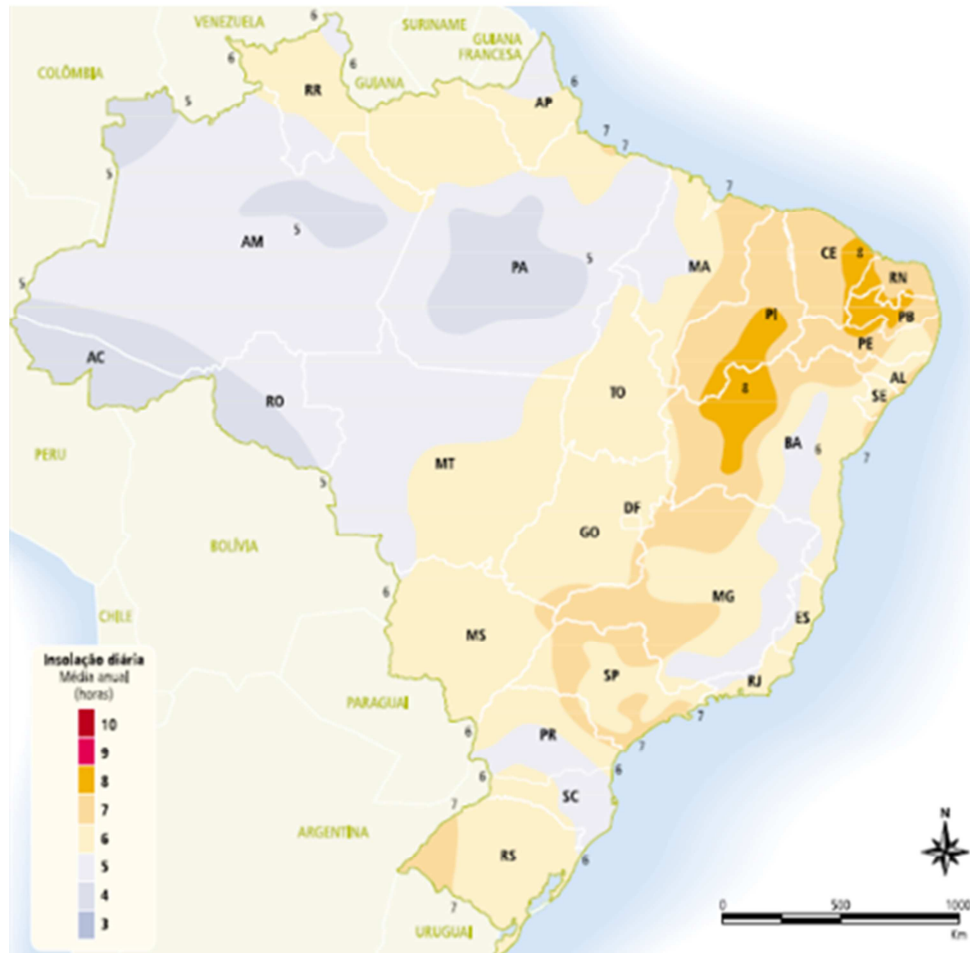


Figura 5 – Radiação solar no Brasil..

Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2013. p. 35.

A luz solar que atinge a superfície terrestre é composta por uma parte direta e outra parte difusa. A radiação direta vem segundo a direção do Sol, produzindo sombras bem definidas em qualquer objeto. A radiação difusa corresponde à parte da radiação que sofreu, durante seu percurso, diversos processos de difusão e reflexão por moléculas suspensas na atmosfera (BARROS, 2011).

2.1.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

O Efeito Fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (BRITO; VALLÊRA, 2006).

Os mesmos autores afirmam que em 1877, dois inventores norte americanos W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz. Este dispositivo tinha eficiência de aproximadamente 0,5 por cento. A história da energia fotovoltaica teve de esperar os grandes desenvolvimentos científicos da primeira metade do século XX, nomeadamente a explicação do efeito fotovoltaico por Albert Einstein em 1905, o advento da mecânica quântica e, em particular, a teoria de bandas, física dos semicondutores e as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transístor de silício.

Os autores também afirmam que a história da primeira célula solar começou em março de 1953 quando Calvin Fuller, um químico da Bell Laboratories (Bells Labs), em Murray Hill, New Jersey, nos EUA, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas (um processo chamado “dopagem”). Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena

concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas positivas (e por isso é chamado silício do “tipo p”). Seguindo as instruções de Fuller, o físico Gerald Person, seu colega nos Bell Labs, mergulhou esta barra de silício dopado num banho quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de elétrons livres, portadores com carga negativa (e por isso chamado silício do “tipo n”). Na região onde o silício “tipo n” fica em contato com o silício “tipo p”, a “junção p-n”, surge um campo elétrico permanente. Pearson verificou que produzia uma corrente elétrica quando a amostra era exposta à luz. Pearson tinha acabado de fazer a primeira célula solar de silício. Posteriores pesquisas levaram a primeira patente de célula solar, conforme figura 6.

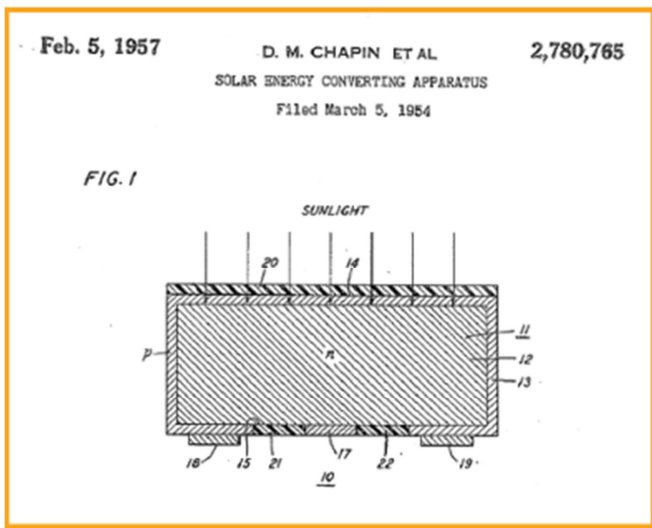


Figura 6 – Patente da primeira célula solar registrada em 1954.

Fonte: BRITO; VALLÊRA, 2006. p. 12.

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de uma banda de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente “vazia”, a banda de condução (BARROS, 2011).

Segundo o autor, hoje o semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos formam uma rede cristalina, pois possuem quatro elétrons de ligação que se ligam aos vizinhos. Quando adicionado com átomo de fósforo (dopante n), que é átomo com cinco elétrons de ligação, haverá um elétron em excesso e então fica “sobrando” e sua ligação com o átomo de origem, se torna fraca. Com pouca energia térmica este elétron se torna livre, indo para banda de condução, conforme se vê na figura 7. Quando o semicondutor é dopado com boro (dopante p), que é um átomo com três elétrons de ligação, haverá falta de um elétron para satisfazer as ligações como os átomos de silício. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição fazendo com que o buraco se desloque.

Barros também afirma que se a partir de um silício puro, forem introduzidos em uma metade, átomos de boro e em outra, átomos de fósforo, será formada a chamada junção pn onde os elétrons livres passam a preencher as lacunas. Estas cargas aprisionadas formam um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons de n para p até que nenhum elétron remanescente consiga mais passar para o lado p. Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas dão origem a uma diferença de potencial a qual se chama de Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do silício forem conectadas a um fio, haverá circulação de corrente.

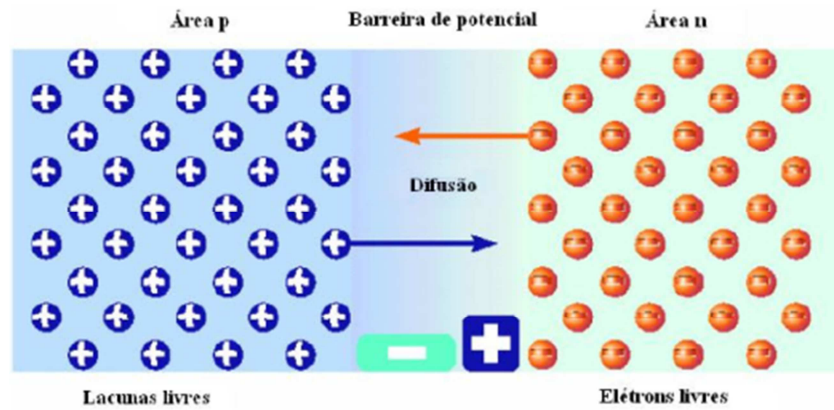


Figura 7 – Barreira de potencial numa região de transição pn.

Fonte: BARROS, 2011. p. 9.

2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

O Sol fornece energia na forma de radiação e calor. O Sistema Fotovoltaico, através de um gerador, converte radiação em energia elétrica (BARROS, 2011).

O gerador é composto basicamente por um conjunto de módulos fotovoltaicos e respectivos suportes, que podem ser instalados sobre telhados, terraços ou em locais não sombreados, e por um conversor eletrônico (inversor). A energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente contínua (CC) é convertida em corrente alternada (CA) através do inversor e injetada diretamente na rede elétrica de baixa tensão do consumidor. Para que as células fotovoltaicas possam ser utilizadas em sistemas fotovoltaicos, onde são necessários pelo menos dezenas de watts, torna-se necessário associá-las. Podem ser agrupadas em série e/ou em paralelo, dependendo da característica elétrica requerida (RÜTHER, 2006).

O mesmo autor afirma que as vantagens de se utilizar estes geradores são a alta confiabilidade e a fácil portabilidade. Os módulos permitem montagens simples e são adaptáveis a várias necessidades energéticas, o custo de operação e manutenção é reduzido e há evidente ganho ecológico quanto ao seu uso. Sistemas fotovoltaicos, para operarem conectados à rede, são compostos por módulos, inversores, dispositivos de proteção, sistema de fixação e suporte dos módulos e cabos.

De forma geral, considerando a existência de um mecanismo internacionalmente conhecido como *Net Metering*:

- (i) O sistema injeta energia na rede no intervalo de geração (dia), gerando um “crédito energético”.
- (ii) Esse “crédito” seria utilizado nos meses seguintes como compensação pecuniária na conta.
- (iii) O objetivo final é que o “débito energético” seja próximo de zero.

Em qualquer instalação fotovoltaica o módulo solar fotovoltaico é a célula básica do sistema gerador. A corrente CC do gerador solar é definida pela conexão em paralelo de painéis individuais ou de *strings* (conjunto de módulos conectados em série). A potência total é dada pela soma da potência nominal de cada módulo (RÜTHER, 2006).

É necessária uma análise dos requisitos técnicos estabelecidos pela concessionária para instalação deste tipo de sistema e uma autorização da mesma. Normalmente, o armazenamento de energia nos sistemas fotovoltaicos autônomos é assegurado por baterias, mas recentemente, com a resolução 482 da ANEEL, é possível injetar este excedente de energia diretamente na rede pública em regime de compensação, conforme se vê na figura 8. O seu dimensionamento é essencial para o bom funcionamento do sistema. O armazenamento ou compensação de energia representa 13 a 15% do investimento inicial, considerando uma duração de vida de 20 anos (RÜTHER, 2006).

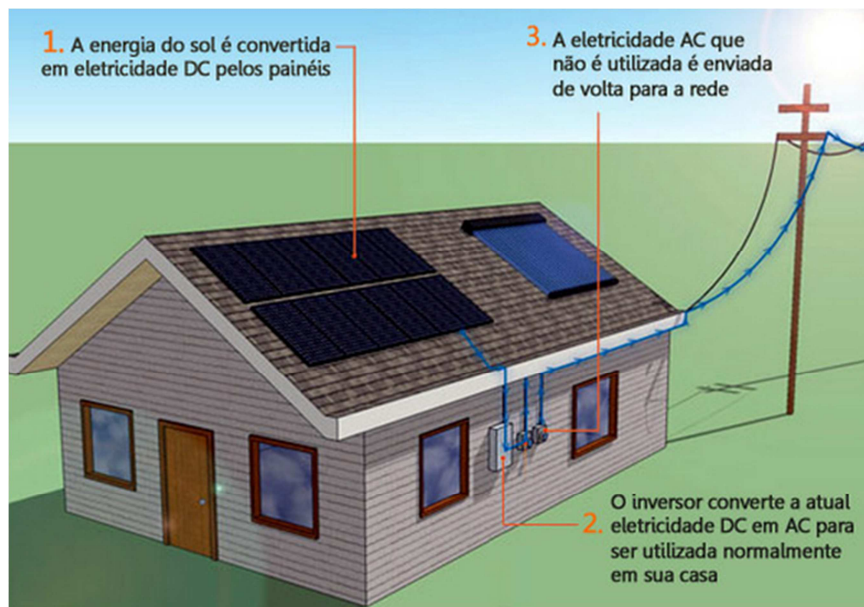


Figura 8 – Sistema Fotovoltaico conectado à rede.

Fonte: Energia Pura, 2013.

3. METODOLOGIA

O estudo se caracteriza como uma pesquisa experimental, que segundo Egg (2008 apud Marconi e Lakatos, 1978:28, p.157), é “procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis em qualquer campo do conhecimento”.

Os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa iniciam-se com a preparação do referencial teórico sobre os assuntos pertinentes ao tema, ou seja, material de estudo sobre Geração Distribuída de energia, Energia Solar, Legislação vigente sobre Sistema de Compensação de energia elétrica e Sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão.

Os objetivos conforme afirma Marconi/Lakatos (2008) “torna explícito o problema”, portanto, a definição do objetivo inicia-se com pesquisa e levantamento das diferentes tecnologias GD voltadas para sistemas fotovoltaicos; análise sistêmica e técnica dos potenciais, custos, vantagens e desvantagens de um sistema de cogeração fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão e estudo de caso desse projeto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE DADOS HISTÓRICOS

As células fotovoltaicas tiveram pouca aplicação prática nos anos iniciais de sua descoberta. Na primeira aplicação, em 1955 para alimentação de uma rede telefônica local na cidade de Americus no estado da Geórgia (EUA), ficou evidente que a utilização somente seria economicamente competitiva em aplicações muito especiais. A principal razão era o fato de que a potência elétrica produzida era mais cara que a produzida por usinas convencionais.

A grande mudança se deu a partir da necessidade de aumento da durabilidade de baterias utilizadas em satélites e conseqüentemente a aumentar a vida útil dos mesmos. Em 1958 células fotovoltaicas foram presas na fuselagem do satélite *Vanguard I* para recarregamento de bateria química prevista no projeto original, a bateria química falhou, mas o pequeno painel de 100 cm² manteve o transmissor do satélite em funcionamento por oito anos.

O alto custo envolvido na fabricação e a baixa eficiência dos módulos mostraram-se como entraves para a pouca aplicação nos anos iniciais à sua descoberta. A redução dos preços em virtude da grande mudança para circuitos integrados na década de 1960 levou à disponibilidade de semicondutores a preços relativamente baixos.

A crise petrolífera, em 1973, levou a um súbito investimento em programas para reduzir o custo de produção das células solares. Algumas tecnologias financiadas por estes programas levou a utilização de novos materiais, dado os resultados cita-se em particular o silício multicristalino.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais de irrigação e comunicação, ou conectados à rede elétrica para compensação em regime de empréstimo à concessionária.

As facilidades como modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa fazem com sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos de rede elétrica. Neste sistema de operação autônoma o sistema fotovoltaico é conhecido com *Sistema Fotovoltaico Off Grid*.

O sistema fotovoltaico, quando conectado diretamente à rede elétrica, é conhecido como *Sistema Fotovoltaico On Grid*.

4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (ON GRID)

O Sistema Fotovoltaico On Grid não utiliza armazenamento de energia, toda geração é entregue diretamente na rede que age como uma carga absorvendo a energia elétrica gerada. São caracterizados por estarem integrados à rede elétrica que abastece a população e diferentemente dos sistemas isolados que atendem a um propósito específico e local, estes sistemas são capazes de abastecer a rede elétrica com energia. Representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão conectados, pois tem uma grande vantagem com relação aos sistemas isolados: não utilizam baterias e controladores de carga. Isso os torna cerca de 30% mais eficientes e também garante que toda a energia seja utilizada, ou localmente ou em outro ponto da rede.

Quando aplicados às edificações, estes sistemas também são chamados de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo. Se o proprietário do sistema produzir mais energia do que consome, a energia produzida fará com que o medidor “gire para trás”. Quando produzir menos do que consome, o medidor deverá “girar mais devagar”. O medidor deve ser bidirecional, ou seja, apropriado para medir o fluxo de energia nos dois sentidos.

O sistema On-Grid não deve operar em caso de falta de energia na rede ao qual está conectado. Em caso de manutenção, a rede não pode estar energizada. O sistema fotovoltaico On Grid não deve operar isoladamente.

No presente estudo, a Geração Distribuída citada é constituída pelos módulos montados diretamente nas edificações ou em outros locais, tais como coberturas de estacionamentos, áreas livres, etc. Essas edificações serão alimentadas pela energia elétrica produzida por esses módulos, através de um inversor CC/CA, concomitantemente com a rede elétrica de distribuição em baixa tensão na qual estão interligadas.

Os sistemas solares fotovoltaicos interligados ao sistema de distribuição oferecem uma série de vantagens para o sistema elétrico. Dentre elas, pode-se destacar:

- A energia é produzida junto à carga, assim as perdas nas redes de transmissão são minimizadas;
- A produção de energia elétrica ocupa um espaço já utilizado, uma vez que está integrada à edificação;
- Investimentos em linhas de transmissão e distribuição são reduzidos;
- Existe a coincidência no consumo, principalmente em se tratando de prédios comerciais onde a maior utilização acontece no horário de maior produção de energia pelos módulos;
- Edificações solares fotovoltaicos têm a capacidade de oferecer suporte kVAr a pontos críticos da rede de

distribuição (melhoria da qualidade de energia);

- O sistema possui modularidade, ou seja, pode ser ampliado conforme haja carga da edificação se houver espaço para isso;
- A montagem do sistema pode substituir materiais de revestimento e de cobertura;
- É uma fonte de energia inesgotável, que está disponível praticamente em todos os locais, e produz energia limpa, silenciosa e renovável, sem emitir gases causadores do efeito estufa.

O sistema fotovoltaico é conectado em inversores e estes fazem a interface com a rede elétrica conforme exposto na figura 9.

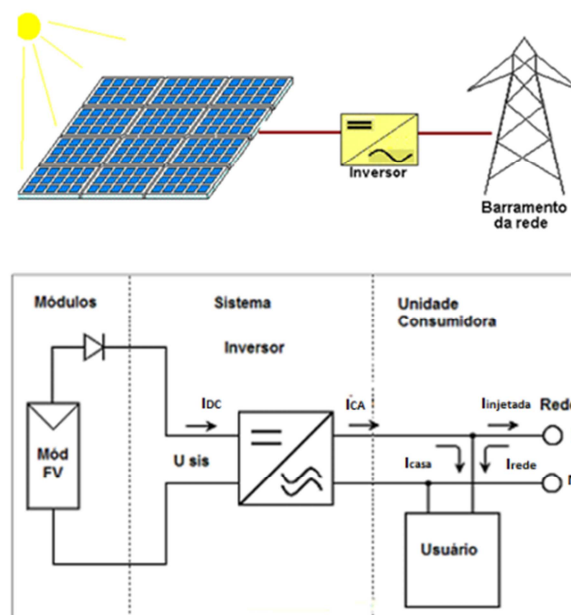


Figura 9 – Sistema Fotovoltaico On Grid.

Fonte: CRESESB, 1999.

4.3 ACESSO AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Em abril de 2012, por meio da resolução ANEEL 482, o governo regulamentou que as distribuidoras de energia elétrica deveriam adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso da minigeração e microgeração distribuída. Antes disso, o pleno aproveitamento do potencial de energia solar apresentava vários obstáculos de natureza regulatória.

O sistema de compensação descrito nessa resolução é o sistema no qual a energia injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ). Para fins desta compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora, será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de trinta e seis meses.

O consumo de energia elétrica ativa a ser faturado é a diferença entre a energia consumida e a injetada. Sendo assim, o excedente de energia produzido pelo sistema fotovoltaico pode alimentar outros consumidores da rede da concessionária. Tal sistema é muito comum em países onde os produtores dessa energia alternativa vendem a concessionária local o excedente de produção (durante o dia, por exemplo) e compram de volta quando o consumo aumenta (por exemplo, à noite).

12
Segundo HANSEN, o setor residencial brasileiro é responsável por vinte e quatro por cento de toda energia elétrica consumida do país. Geradores fotovoltaicos integrados ao envoltório de edificações e operando conectados à rede de baixa tensão apresentam-se como opção para utilização em sistema de compensação.

A utilização de gerador fotovoltaico neste sistema de compensação é conhecida internacionalmente como *Net Metering*, que é uma forma de incentivo ao consumo de energia solar fotovoltaica por meio de injeção à rede do excesso de eletricidade gerada pelo consumidor, usualmente através de créditos em quilowatt/hora. É necessária a existência de um medidor que seja capaz de registrar o consumo e geração da instalação (consumo líquido bidirecional).

Os sistemas geradores fotovoltaicos são facilmente adaptáveis aos mais diversos locais de instalação. O custo de instalação do sistema gerador fotovoltaico vai se pagando ao longo dos anos. A forma de conexão à rede pode ser vista na figura 10.

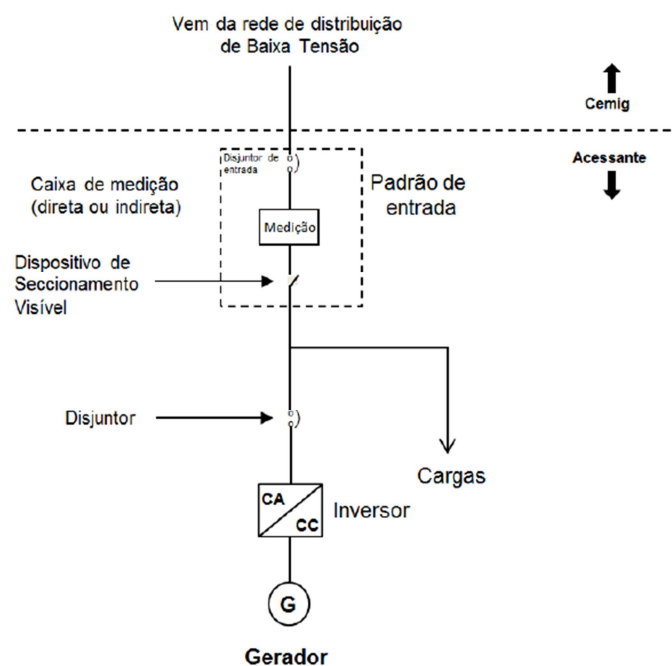


Figura 10 – Forma de conexão do gerador fotovoltaico com a rede.

Fonte: ND 5.30 CEMIG, 2012, p. 3-2.

O sistema gerador fotovoltaico é composto basicamente de módulos fotovoltaicos, que convertem a luz solar em energia elétrica em corrente contínua, inversores fotovoltaicos, responsáveis por fazer a interligação com a rede da concessionária, e materiais de instalação.

Devido ao baixo valor de tensão de circuito aberto de cada célula fotovoltaica, na ordem de 0,5-0,6 Volts para células de silício cristalino, é necessário o agrupamento em módulos de maneira a atingir a potência desejada. Os módulos podem ser ligados em série e/ou em paralelo dependendo dos níveis de corrente e tensão que se pretende atingir (ABINEE, 2012).

A tensão e correntes resultantes das ligações dos módulos precisam ser definidas observando-se a faixa de operação dos inversores. A potência dos módulos é especificada pela potência de pico expressa em unidades de watt-pico (ABINEE, 2012).

Uma atenção especial deve ser dada às células a serem reunidas, devido suas características elétricas. Uma incompatibilidade das características pode acarretar em módulos “ruins” uma vez que as células de maior corrente e tensão acabam dissipando o excesso de potência nas células com desempenho inferior. Como consequência tem-se uma redução da eficiência global do módulo fotovoltaico (ABINEE, 2012).

A potência real do módulo é descrita pela curva característica I x V que é obtida através da aquisição de valores de tensão e corrente para diversas condições de carga. Essa curva está associada às condições em que foi obtida, tais como intensidade de radiação solar e temperatura de operação. Dentre os diversos pontos que formam essas curvas, existe um denominado ponto de potência máxima (MPP). Nesse ponto, determinam-se dois parâmetros: a tensão no ponto de potência máxima (V_{MPP}) e a corrente no ponto de potência máxima (I_{MPP}) conforme ilustrado na figura 11.

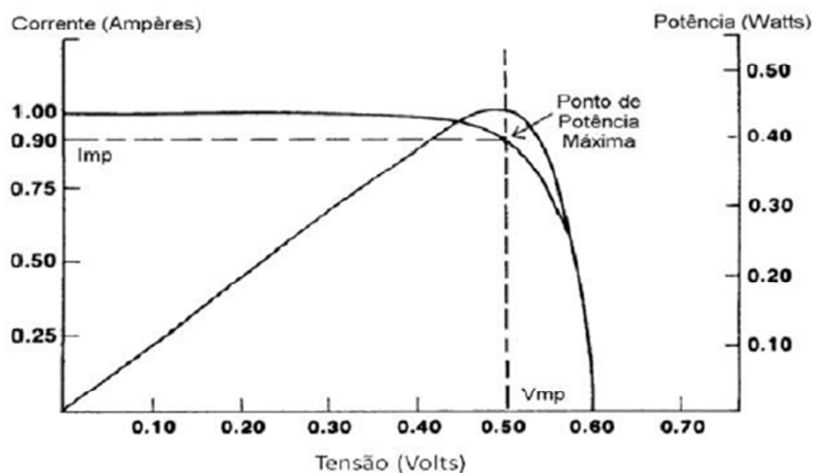


Figura 11 – Forma de conexão do gerador fotovoltaico com a rede.

Fonte: ND 5.30 CEMIG, 2012, p. 3-2.

A eficiência do módulo fotovoltaico é definida pela relação entre a potência gerada pelo módulo e a irradiação incidente sobre este ou também pela relação entre toda energia diária produzida e a energia diária incidente na superfície do módulo (CRESESB, 1999).

A eficiência n_1 do módulo pode ser obtida pela equação:

$$n = \frac{I_m \times V_m}{I_s \times A} \times 100\%$$

I_m : Corrente máxima de pico em ampères.

V_m : Tensão máxima de pico em volts.

I_s : Irradiância solar em W/m^2 .

A : Área útil do módulo em m^2 .

Os módulos fotovoltaicos são sensíveis à temperatura, que causa uma influência negativa em sua eficiência. Isso ocorre por que os valores de tensão diminuem consideravelmente com o aumento da temperatura enquanto os níveis de corrente sofrem discreta elevação, dessa forma o aumento da intensidade da luz incidente no módulo aumenta a temperatura das células, diminuindo sua eficiência (ABINEE, 2012).

Inversores são dispositivos elétricos ou eletromecânicos com a finalidade de converter corrente contínua CC em corrente alternada CA. Entretanto, em um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) este equipamento pode ser considerado o cérebro, pois além da conversão de corrente contínua em alternada, esse equipamento conhecido como *Grid-Tie*, possui também diversas funções que possibilitam a conexão entre a rede elétrica e o gerador (PINTO NETO, 2012).

Os inversores podem ser comutados pela rede ou autocomutados e quanto à topologia; podem ser do tipo central, série, multisérie ou módulo com inversor integrado. Na topologia multisérie, um único inversor possui um seguidor do ponto de máxima potência para cada sequência de módulos conforme mostra a figura 12 (PINTO NETO, 2012).

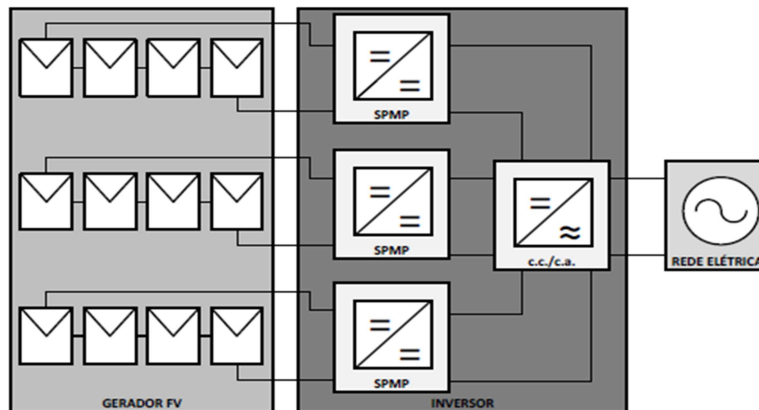


Figura 12 – Topologia tipo Multisérie.

Fonte: PINTO NETO, 2012, p. 41.

4.4 ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

O estudo de eficiência solar, viabilidade técnica, estrutural e econômica se faz necessário quando se projeta um sistema fotovoltaico no entorno construído para operação em regime de *Net Metering*. Este estudo tem como principal objetivo analisar o projeto de adequação, em particular as etapas de: análise de eficiência, estimativa de produção, projeto elétrico, compra dos materiais, instalação, solicitação e ligação pela concessionária de energia elétrica.

O presente estudo objetiva o acompanhamento de projeto, instalação e conexão de unidade consumidora residencial à rede elétrica de baixa tensão. A unidade consumidora em estudo é trifásica, quatro fios, situada no Bairro Nossa Senhora do Carmo em Sete Lagoas/MG nas coordenadas: latitude -19.438171 e longitude -44.254003. A unidade consumidora trata-se da residência do Senhor Giusepe Sarti Rangel e a concessionária do referido estado é a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG. A unidade consumidora está ligada ao sistema elétrico da Cemig em baixa tensão, conectada ao circuito do transformador trifásico, de número controle CEMIG 9024 e potência de 75 kVA. A rede conectada às buchas secundárias do transformador é constituída de três cabos 1/0 AWG para as fases e cabo 2 AWG para neutro, e conforme exposto na figura 13, o ponto de conexão da unidade consumidora à rede está cinco vãos após o poste do transformador, a referida conexão é em rede multiplex três fases unipolares de 35mm² e neutro de 70mm².

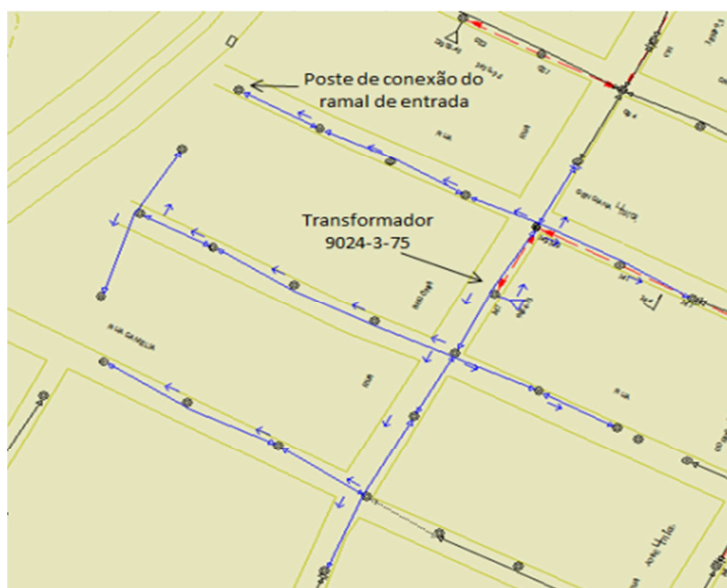


Figura 13 – Croqui circuito do transformador 9024-3-75.

Fonte: CEMIG, 2013.

É necessário fazer uma avaliação do potencial energético solar, que constitui buscar a quantidade de radiação solar global incidente sobre o painel fotovoltaico de forma que se possa calcular a energia gerada.

Os primeiros dados a coletar para o dimensionamento do sistema fotovoltaico são os de incidência solar que podem ser obtidos através do mapa solarimétrico da região na qual se pretende instalar os módulos fotovoltaicos.

Minas Gerais é quarta unidade da federação em extensão territorial, apresentando 586.528 km², o que corresponde a 7% do território do País. O Estado está localizado entre os paralelos 14°02'35" e 22°54'00" de latitude sul e os meridianos 39°51'32" e 51°02'35" a oeste de Greenwich. Minas Gerais possui o território inteiramente formado por planaltos com destaque para o planalto atlântico, que abrange mais da metade do Estado, com a predominância dos "mares de morros" e altitude média de setecentos metros. O Estado apresenta também áreas de planaltos e as depressões formadas pelos vales dos rios São Francisco, Jequitinhonha, Doce e Paraíba do Sul (CEMIG, 2012).

As regiões desérticas do mundo são as mais bem dotadas de recurso solar. A radiação solar global diária média anual em Minas Gerais varia de 4,5 a 6,5 kW/m². As cartas de radiação solar global diária mostram que em Minas Gerais esta grandeza varia entre 3,0 e 7,5 kWh/m².dia, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, em que as estações solarimétricas registram uma intensidade de radiação na faixa de 3,0 a 4,0 kWh/m².dia. No trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, observa-se que as estações solarimétricas registram intensidades de radiação muito altas, atingindo um valor máximo de 7,5 kWh/m².dia (CEMIG, 2012).

Os menores índices de nebulosidades (maiores índices de radiação solar) se concentram nas regiões Leste e Zona da Mata, onde a circulação marítima deixa o tempo parcialmente nublado em quase todos os dias do ano. Os mapas sazonais de insolação estão consistentemente correlacionados com a precipitação. No inverno (junho a agosto), quando o índice de precipitação é menor do ano, o número de horas de brilho solar atinge os valores máximos entre oito horas e meia a nove horas e meia em uma vasta região da metade oriental do estado e, de forma inversa, para o período de novembro a janeiro ocorre um máximo anual de precipitação e, portanto um mínimo de horas de brilho solar, entre cinco a seis horas por dia (CEMIG, 2012).

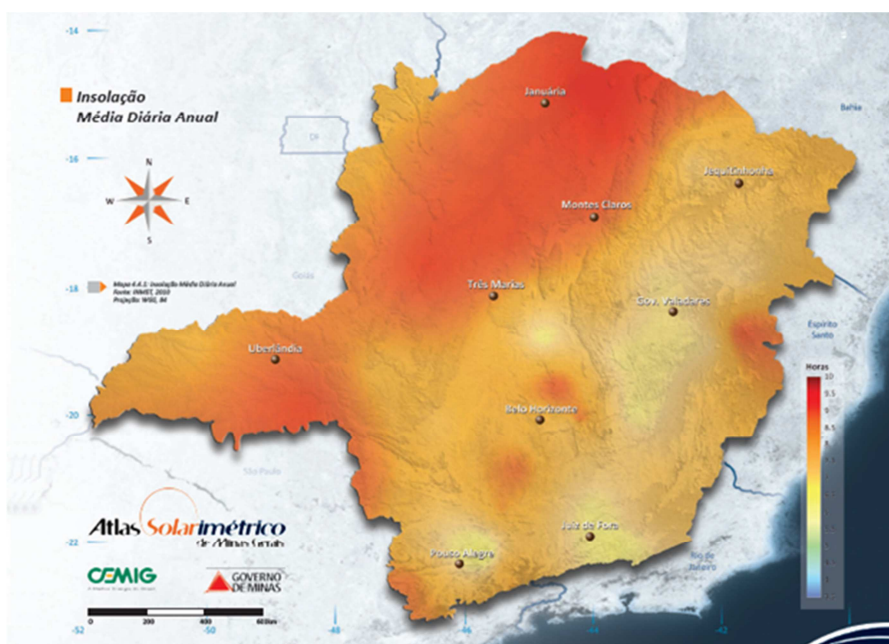


Figura 14 – Insolação Média Diária Anual.

Fonte: Mapa Solarimétrico de Minas Gerais, 2012. p. 65.

Na presente situação de estudo, a escolha do local para instalação de sistema não foi discutível, visto que os módulos seriam instalados no telhado de residência pré-estabelecida no município de Sete Lagoas.

Sete Lagoas é uma cidade situada a 70 km da capital Belo Horizonte, ou seja, na região central de Minas Gerais.

16
Conforme se observa nas figuras 14, 15 e 16, as médias diárias anuais de insolação, radiação e radiação solar direta normal são praticamente idênticas para as cidades de Belo Horizonte e Sete Lagoas.



Figura 15 – Radiação Solar Média Diária Anual.

Fonte: Mapa Solarimétrico de Minas Gerais, 2012. p. 61.

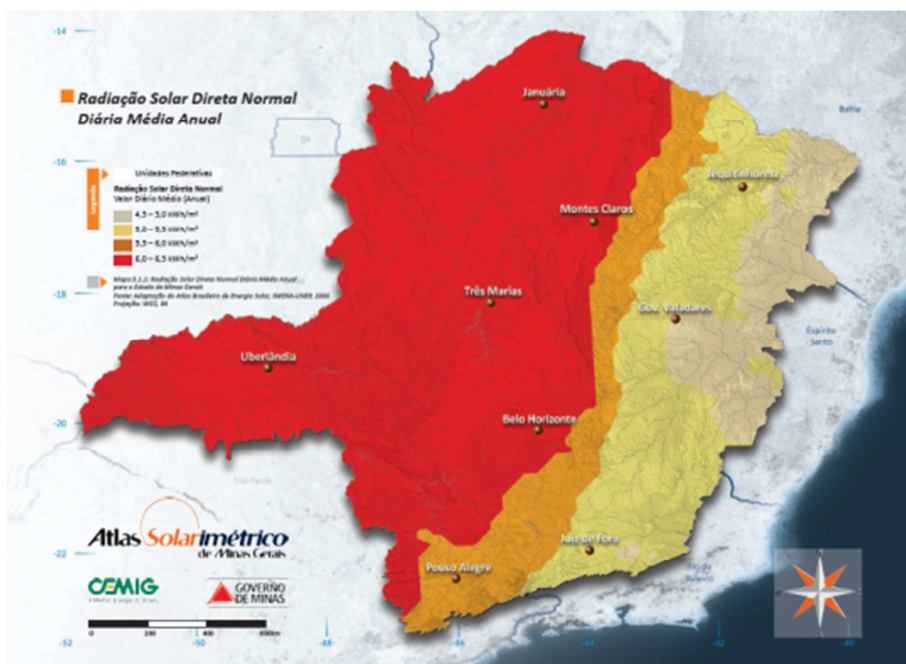


Figura 16 – Radiação Solar Direta Normal Diária Média Anual.

Fonte: Mapa Solarimétrico de Minas Gerais, 2012. p. 72.

A avaliação definitiva da eficiência no local de instalação dos módulos foi inicialmente feita mediante a análise de mapas de radiação média diária anual, (pois o valor médio do recurso solar era mais adequado), tem-se um caráter indicativo preliminar para ressaltar o potencial da região. A avaliação definitiva necessitou de medidas detalhadas do recurso no local para determinar seu valor e principalmente a sua variabilidade temporal.

Conforme observado nos mapas solarimétricos, as condições de radiação para a cidade de Sete Lagoas são bem favoráveis à instalação de geração fotovoltaica. O teste de eficiência dos módulos foi realizado através da utilização de carga de prova, wattímetro e variação dos ângulos de incidência para verificação do ponto de melhor

rendimento. A alteração do ângulo de incidência pouco contribuiu para melhora da eficiência e decidiu-se, para redução de custos, instalar os módulos acompanhando entorno construído.

A fim de diminuir perdas na incidência devido aos ângulos azimutais de superfície, foi construída estrutura de apoio para direcionar os módulos no sentido norte. O ângulo β de inclinação do módulo, deixado em definitivo foi de sete graus no sentido Sul-Norte.

Conforme se vê na figura 17, o ponto de instalação é interface de logradouro urbano com início de área rural e não há sombreamento causado por construções vizinhas.



Figura 17 – Módulos instalados.

4.5 PROJETO

Na instalação do Sistema Fotovoltaico foram utilizados 10 módulos fotovoltaicos de silício policristalino e com potência 235 Wp cada um. Os módulos foram adquiridos por R\$ 1.150,00 (um mil e cento e cinquenta reais) cada, ou seja, R\$ 4,89 por Wp, perfazendo um total de R\$ 11.500,00 (onze mil e quinhentos reais). Estes valores incluem todas as despesas: impostos, frete e taxas.

Para conversão da energia fotovoltaica de corrente CC para corrente CA, foi adquirido um inversor de 3.8 kW da ELTEK VALERE, conforme observa-se na figura 18, por R\$ 6.400,00 (seis mil e quatrocentos reais). Trata-se de um equipamento de topologia multisérie (três *strings*), com isolamento galvânica através de transformador de alta frequência, eficiência máxima de 97.3%, servidor Web integrado para comunicação avançada com software de monitoramento, proteção contra sobretensão, ilhamento, sobrecarga, sobreaquecimento e indicado para todas as tecnologias de painel (monocristalino, policristalino ou película fina). Este valor inclui todas as despesas: impostos, frete e taxas.

O inversor possui potência nominal de 3.8KW dividida em três strings, cada uma com seu respectivo seguidor do ponto de máxima potência. Neste projeto os dez módulos foram ligados na primeira *string* do inversor, havendo a possibilidade acrescentar mais seis módulos sem exceder sua potencia nominal.

Os demais gastos com estrutura de fixação, DSV, cabos, conectores e afins totalizaram R\$ 4.600,00 (quatro mil e seiscentos reais), sendo necessário salientar a economia de aproximadamente R\$ 600,00 (seiscentos reais) na compra em separado do DSV da caixa de medição CM-DSV, ambos vistos na figura 18.



Figura 18 – Inversor, DSV e caixa CM-DSV.

Cabos flexíveis, unipolares de seção nominal 6mm^2 , com isolamento simples e classe de tensão 1 kV conduzem a corrente CC proveniente dos módulos até o inversor.

Cabos flexíveis, unipolares de seção nominal 16mm^2 , com isolamento simples e classe de tensão 1 kV foram usados para: conexão do inversor com o disjuntor de proteção do trecho CA, conexão do disjuntor de proteção trecho CA ao barramento, e conforme observa-se na figura 19, também foram usados para conexão do barramento ao DSV e conexão do DSV ao padrão de entrada do cliente.

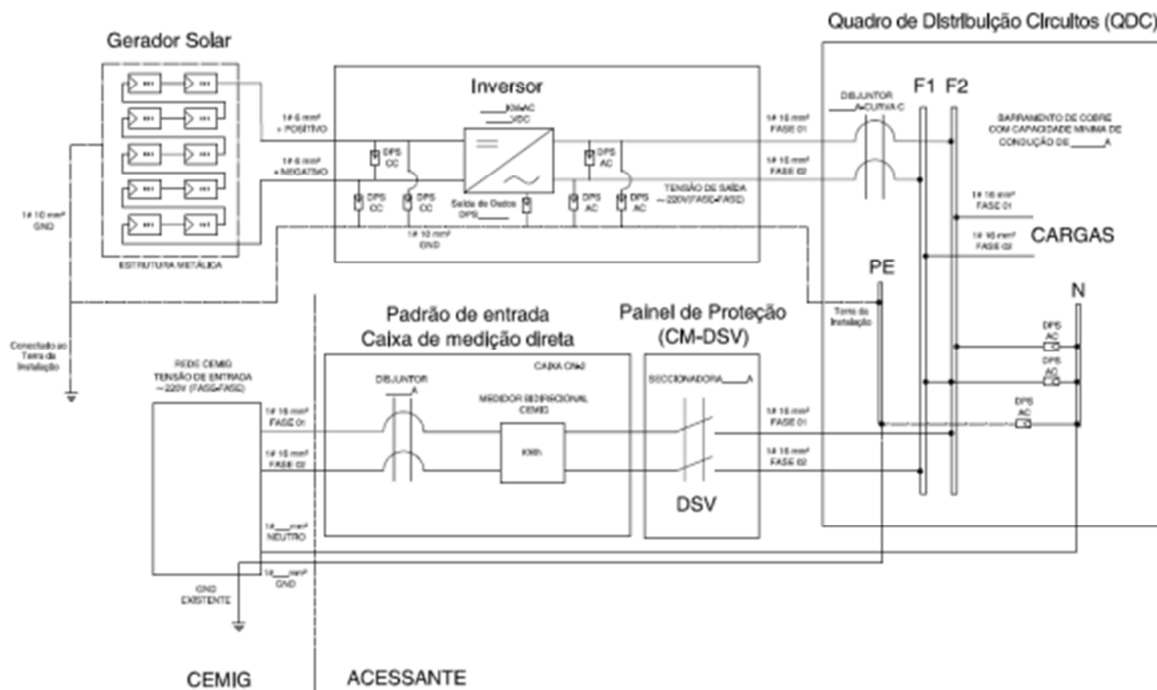


Figura 19 – Projeto Sistema Fotovoltaico.

4.6 CÁLCULO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para efeito de cálculo estimado da produção a radiação média diária anual considerada foi de $5\text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ e a insolação média diária anual (I_s) foi de $6\text{h}/\text{dia}$, conforme valores mínimos dos gráficos do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais.

O Sistema Fotovoltaico instalado consiste em dez módulos com $1,652\text{ m}^2$ cada e totalizando uma área incidente de $16,52\text{m}^2$ e potência nominal total (P_N) de $2,35\text{ kWp}$. O inversor utilizado tem eficiência (η_1) de $97,3\%$.

A produção estimada para o período de um mês (P_E) pode ser obtida através da seguinte equação:

$$PE = PN * Is * n1 = 2,35 * 6 * 0,973 * 30 = 411,6 \text{ kWh}$$

Considerou-se para efeito do estudo de viabilidade econômica o valor total gasto com material e mão-de-obra envolvida, e a informação de que o consumo é superior a toda potência gerada, visto que o proprietário possui mais outras duas residências. O custo total envolvido foi de R\$ 22.500,00 assim discriminados:

- 10 Módulos fotovoltaicos de 235 Wp por R\$ 11.500,00.
- 1 Inversor 3.8 kW por R\$ 6.400,00.
- Estrutura para fixação dos painéis e mão-de-obra por R\$ 4.000,00.
- Cabos, conectores e acessórios por R\$ 600,00.

A análise foi feita mediante o cálculo do ganho pecuniário anual (GA) em regime compensatório e tendo como base a quantidade de potência gerada mensalmente (PE) e o custo de um quilowatt/hora, sem impostos, para cliente classe residencial que é de R\$ 0,347; valor de setembro de 2013 segundo ANEEL.

$$GA = 12 * PE * 0,347 = 12 * 411,6 * 0,347 = R\$ 1.713,90$$

O Período de Retorno Simples (PRS), em anos, é calculado mediante a divisão do custo total do Sistema Fotovoltaico pelo ganho pecuniário anual.

$$PRS = (\text{investimento inicial}) / (\text{economia por ano}) = (R\$ 22.500,00) / GA = (R\$ 22.500,00) / (R\$ 1.713,90)$$

$$PRS = 13,12 \approx 13 \text{ anos e } 45 \text{ dias}$$

O Período de Retorno Simples para este projeto é de aproximadamente treze anos e 45 dias. O Sistema como um todo tem durabilidade prevista para vinte e cinco anos.

5. CONCLUSÃO

No momento em que o mundo se volta para debate sobre o esgotamento das fontes de energia, alterações climáticas causadas por emissão de gases poluentes e demais questões voltadas à sustentabilidade e ao impacto ambiental, a necessidade do estudo e da implementação de fontes alternativas de energia se torna cada vez mais premente.

Com este trabalho, conclui-se que é possível e viável, do ponto de vista técnico e econômico, a instalação de Sistema Fotovoltaico de cogeração conectado a rede de baixa tensão. Este estudo demonstrou a facilidade da instalação de Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão e ficou claro que, não existem dificuldades técnicas para consolidação dessa forma limpa de energia elétrica.

O estudo e levantamento das diferentes tecnologias de GD com sistemas fotovoltaicos disponíveis no mercado e a legislação vigente atual possibilitaram o esclarecimento sobre qual a topologia e arranjo mais adequados ao objetivo de redução em consumo residencial por geração própria.

Os dados obtidos nos testes, cálculos, análises e avaliações no que concerne ao dimensionamento, eficiência e operação do Sistema Fotovoltaico; deixam explícito os potenciais, custos, vantagens e desvantagens deste empreendimento.

O estudo de caso evidenciou que, com correto dimensionamento o Sistema Fotovoltaico implementado gera cerca de 410 kWh de energia elétrica por mês, que representará economia aproximada de R\$ 1.713,90 (um mil e setecentos e treze reais e noventa centavos) por ano, podendo variar dependendo das tarifas contratadas com a concessionária local (CEMIG) para fornecimento de energia.

6. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: ANEEL, 2013. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/index.html>. Acessado em 09/2013.

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. *Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira*. São Paulo: ABINEE, 2012. Disponível em:

<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>. Acessado em 09/2013.

BARROS, Hugo Albuquerque. *Anteprojeto de um sistema de 12KWp conectado à rede*. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

BISCARO, Guilherme Augusto. *Meteorologia Agrícola Básica*. 1ed. Cassilândia/MS: UNIGRAF, 2007.

BRITO, Miguel Centeno; VALLÉRA, António. *Meio século de história fotovoltaico*. Departamento de Física e Centro de Física da Matéria Condensada (CFMC): 2006.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: CRESESB, 1999. Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf. Acessado em 09/2013.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. *Alternativas Energéticas: uma visão Cemig*. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. *Atlas Solarimétrico de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

HANSEN, Alice Maria Dreher. Padrões de consumo de energia elétrica em diferentes tipologias de edificações residenciais, em Porto Alegre. Tese (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. *Fundamentos de física, volume 4: óptica e física moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LIU, K.N. *An Introduction to atmospheric radiation*. Oxford Univ. Academic Press, 1980.

Loja virtual Energia Pura – Sistema Solar Fotovoltaico Grid-Tie 7 kW. Disponível em: <https://www.energiapura.com/content/sistema-solar-fotovoltaico-grid-tie-7-kw>. Acesso em 16/09/13.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamill. *Geração Distribuída – Aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais*. Rio de Janeiro: Interciência. 2006 ed 1.

Manual de Distribuição - ND 5.1: *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária. Rede de Distribuição Aérea – Edificações Individuais*. Belo Horizonte: Cemig, 2009.

Manual de Distribuição - ND 5.30: *Requisitos para a conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição. Conexão em Baixa Tensão*. Belo Horizonte: Cemig, 2012.

MARCONI, Maria de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Fundamentos de Metodologia Científica*. 6. ed. – 6 reimpr. – São Paulo: Atlas 2008.

PAULA, Claudio Paiva de. *Geração Distribuída e Cogeração no Setor Elétrica: Avaliação Sistêmica de um Plano de Inserção Incentivada*. Tese (doutorado em energia) – Universidade de São Paulo, 2004.

PINTO NETO, Aimé Fleury de Carvalho. *Qualificação e Etiquetagem de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede - USP*. São Paulo: USP, 2012.

RÜTHER, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.