

SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO MODALIDADE DE ATENDIMENTO PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL NO CONTEXTO DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA

Antonia Sônia Alves Cardoso Diniz – asacd@cemig.com.br

Edson Dias França - edias@cemig.com.br

Denio Alves Cassini - dac@cemig.com.br

Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG –

Av. Barbacena, 1200 – 17ºA1 – 30161-970

Lauro V. B. Machado Neto – lvilhena@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMINAS

Resumo. *O atendimento à demanda por energia elétrica pela via convencional a comunidades rurais, dispersas, cuja população apresenta um baixo potencial de consumo (em sua maioria até 30 kWh/mês), exige valores elevados de investimento, operação e manutenção, tornando mais viável economicamente realizar o atendimento via tecnologias complementares à rede elétrica. Estes consumidores, devido ao tipo das cargas utilizadas (basicamente iluminação e TV) e hábitos culturais consomem energia, principalmente, no horário de ponta do sistema elétrico, podendo ainda, forçar a necessidade de reforço no sistema de subtransmissão.*

Diante dessa realidade, torna-se necessária a busca por tecnologias de geração descentralizada para atendimento ao mercado potencial, que esteja localizado dentro de áreas distantes, isoladas ou de difícil acesso à rede elétrica de distribuição. Esta necessidade foi reforçada pela inclusão da geração descentralizada como modalidade de atendimento dentro do Programa Luz para Todos/MME.

A CEMIG deu um passo importante na utilização da geração descentralizada ao integrar sistemas fotovoltaicos como tecnologia complementar à rede elétrica convencional, viabilizando o cumprimento da meta de universalização do atendimento, na sua área de concessão. No entanto, é necessário que a inserção desta tecnologia venha acompanhada de critérios sólidos de escolha da modalidade de atendimento, de garantia assegurada do desempenho dos sistemas através de definição de ensaios e compatibilidade dos equipamentos, bem como da disponibilidade energética exigida pela Res. ANEEL 083/2004. Para garantir a sustentabilidade desta tecnologia fotovoltaica, os sistemas devem ser inseridos em todas as rotinas operacionais assegurando a satisfação dos consumidores.

Palavras-chave: *Sistemas fotovoltaicos, eletrificação rural, universalização do atendimento, geração descentralizada.*

1. INTRODUÇÃO

Há vários anos a CEMIG vem investigando o uso da energia solar no Estado de Minas Gerais, tendo acumulado experiência e conhecimento no desempenho técnico dos equipamentos, bem como na adaptabilidade e aplicabilidade desta tecnologia, considerando-se as condições climáticas e os parâmetros sócio-econômicos do Estado, em várias aplicações, tais como em telecomunicações, proteção catódica e pré-eletrificação rural.

Desde 1990, a CEMIG vem avaliando a viabilidade técnica e econômica da eletrificação rural de consumidores remotos de baixo potencial de consumo de eletricidade, utilizando a energia solar como fonte energética. O principal objetivo era obter conhecimento sobre opções tecnológicas complementares à rede elétrica convencional para eletrificação rural. Para alcançar este objetivo, foram implantadas diversas instalações experimentais e de demonstração utilizando diversas fontes alternativas, incluindo a tecnologia fotovoltaica. Essas instalações decorreram de convênios e aporte de recursos de diversas entidades nacionais e internacionais, tais como Centro de Pesquisas em Energia Elétrica - CEPEL, National Renewable Energy Laboratory - NREL, GTZ, Banco Alemão KfW, Ministério de Minas e Energia através do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios - PRODEEM, municípios, dentre tantos outros.

Entre 1990-1999 foram implantados vários projetos da demonstração da tecnologia fotovoltaica, dentre eles, três merecem destaque especial:

- *Programa de Assistência ao Desenvolvimento Rural no Brasil*, CEPEL/ELETROBRÁS, em parceria com o National Renewable Energy Laboratory – NREL, ref.CM/CE 010/2001, 2001);
- *Uso Racional de Energia na Agricultura*, oriundo de cooperação técnica entre CEMIG e GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.);
- *Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios*;

A partir dos resultados positivos oriundos destes programas, a CEMIG criou o “Programa LUZ SOLAR - Pré-efetivação Rural Utilizando Sistemas Fotovoltaicos”, em 1999, que foi fundamental para utilização da geração descentralizada, conforme descrito por Diniz et.al. (2003, 2004).

Na fase 1 do Programa LUZ SOLAR foram beneficiadas 550 domicílios e 200 escolas rurais, em parceria com o MME através do PRODEEM. Este programa contou com recursos oriundos da CEMIG, Prefeituras Municipais, Secretaria de Estado da Educação, Secretaria de Minas e Energia e do Ministério de Minas e Energia, através do Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios – PRODEEM e o Banco alemão KfW.

Através deste programa, foi montado o Núcleo de Treinamento de Energia Solar Fotovoltaico da CEMIG, na EFAP, em 1998, que tem possibilitado o treinamento de técnicos da empresa, empreiteiros e outras concessionárias na tecnologia fotovoltaica, possibilitando a operacionalização da O&M de sistemas fotovoltaicos dentro das rotinas da CEMIG – Distribuidora.

Baseada no domínio tecnológico da energia solar fotovoltaica, pelo corpo técnico da CEMIG, e na implantação da infra-estrutura de operacionalização, a empresa decidiu escolher sistemas fotovoltaicos como a tecnologia complementar à rede elétrica para o cumprimento da meta de universalização, dentro do Programa Luz para Todos (Manual Executivo, 2004).

O Programa Luz para Todos da CEMIG, tem por objetivo efetivar o atendimento de aproximadamente a 200.000 unidades consumidoras, no período de 2004 a 2009. O mercado alvo foi identificado em dois segmentos: Pequeno Produtor Rural – PPR e Produtor Rural Típico – PRT, com 72% e 28%, respectivamente, da meta global estabelecida, fazendo com que a área de concessão da CEMIG alcance a Taxa de Atendimento Rural de 100%, até dez/2010.

Este programa contempla o atendimento de novas ligações por meio de redes de distribuição, sistemas fotovoltaicos individuais ou sistemas de geração descentralizada com redes isoladas, sendo que a alternativa será escolhida de acordo com os custos de atendimento. Os sistemas fotovoltaicos estão sendo utilizados para atendimento a domicílios e centros comunitários rurais, tais como escolas, postos de saúde, casas de máquina e etc. Até março/2008, 1700 residências e 300 escolas rurais localizadas nas regiões norte e leste do Estado de Minas Gerais foram beneficiadas com sistemas fotovoltaicos dentro do Programa Luz para Todos.

Para que a geração descentralizada isolada, utilizando fontes alternativas de energia, seja utilizada dentro este Programa, as diretrizes da Resolução Normativa ANEEL nº 83, (2004) deverão ser seguidas.

Sistema fotovoltaico dentro dessa resolução é classificado como SIGFI (sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente) definido no Artigo no Art. 3º, item II. O SIGFI é definido como sistema de geração elétrica, que utiliza somente fonte de energia intermitente, implantado por uma concessionária ou permissionária de distribuição em uma única unidade consumidora.

De acordo com essa resolução, a disponibilidade mensal garantida mínima dos SIGFI é de 13 kWh/mês. O sistema fotovoltaico será definido após a identificação da potência de pico (Wp) do gerador fotovoltaico, mínima, necessária para atender às exigências da ANEEL. Quanto maior a insolação, melhor serão as condições de geração de eletricidade, portanto, as regiões localizadas dentro das latitudes 23,45° e -23,45° (regiões intertropicais) têm maior disponibilidade de insolação. Logo, torna-se necessário o conhecimento desta variável, para as regiões que serão atendidas pelo sistema fotovoltaico, para verificar se a energia disponibilizada pelo sistema atende às exigências da ANEEL, para as diferentes classes de atendimento.

Outra exigência da ANEEL, é que o fornecimento de energia seja em corrente alternada, 60 Hz, respeitando os níveis de tensão da área onde o mesmo for instalado. Essa resolução estabelece, também, que os procedimentos a serem adotados para o faturamento, operacionalizações da O&M, acompanhamento dos indicadores de nível de interrupção, dentre outras exigências, sejam atendidas.

Este trabalho descreve as metodologias desenvolvidas e os procedimentos estabelecidos para a inserção de sistemas fotovoltaicos como uma opção tecnológica, técnica e economicamente viável, de atendimento dentro do Programa Luz para Todos. Aborda a definição dos critérios para a seleção da tecnologia de atendimento a comunidade rural, o dimensionamento determinístico e estocástico dos sistemas, até os ensaios desenvolvidos para garantir que os padrões escolhidos atendam as condições estabelecidas pela ANEEL.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado seguindo as etapas descritas abaixo:

- (i) Desenvolvimento de metodologia para definição dos critérios técnicos e econômicos a serem utilizados para a inserção da tecnologia fotovoltaica dentro do Programa Luz para Todos, utilizando dados de radiação solar, localização do projeto e características do público alvo;

- (ii) Desenvolvimento do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados utilizando o método estocástico, a partir de modelamento físico/matemáticos de componentes de sistemas fotovoltaicos: geradores fotovoltaicos, baterias e controladores de carga; Validação e testes dos modelos físico/matemáticos e da metodologia de dimensionamento desenvolvida;
- (iii) Definição dos padrões de sistemas fotovoltaicos por aplicação, a partir de sistemas típicos dos programas de demonstração, exigências regulatórias, ambientais e segurança dos consumidores;
- (iv) Desenvolvimento de ensaios de equipamentos fotovoltaicos, adaptados às condições nacionais, ensaio de compatibilidade dos equipamentos e de disponibilidade energética;
- (v) Monitoração dos sistemas fotovoltaicos instalados e implantação da tecnologia fotovoltaica dentro dos processos operacionais de uma concessionária distribuidora de energia elétrica, garantindo a sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos;

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Escolha da Utilização de Sistemas Fotovoltaicos para Universalização do Atendimento em Domicílios Rurais

Os critérios para a escolha de sistemas fotovoltaicos como modalidade de atendimento a domicílios rurais dentro do Programa Luz para Todos estão baseados na disponibilidade mensal garantida, definida na Res. 083/2004, localização do domicílio, no custo de atendimento por projeto de eletrificação, com rede elétrica, por consumidor e na caracterização do público alvo.

Disponibilidade Energética Mensal Garantida.

O Estado de Minas Gerais possui 853 municípios, dos quais apenas 77 possuem estações meteorológicas operando regularmente. Para obtenção dos dados climatológicos foram utilizados como ponto de partida as Normais Climatológicas do Ministério da Agricultura (Brasil, 1992). Para o tratamento da base de dados solarimétricos para os 774 municípios, da área de concessão da CEMIG, o Estado foi dividido quatro macro regiões de acordo com as diretrizes adotadas para o Programa Luz para Todos, que pode ser vista na Figura 1.

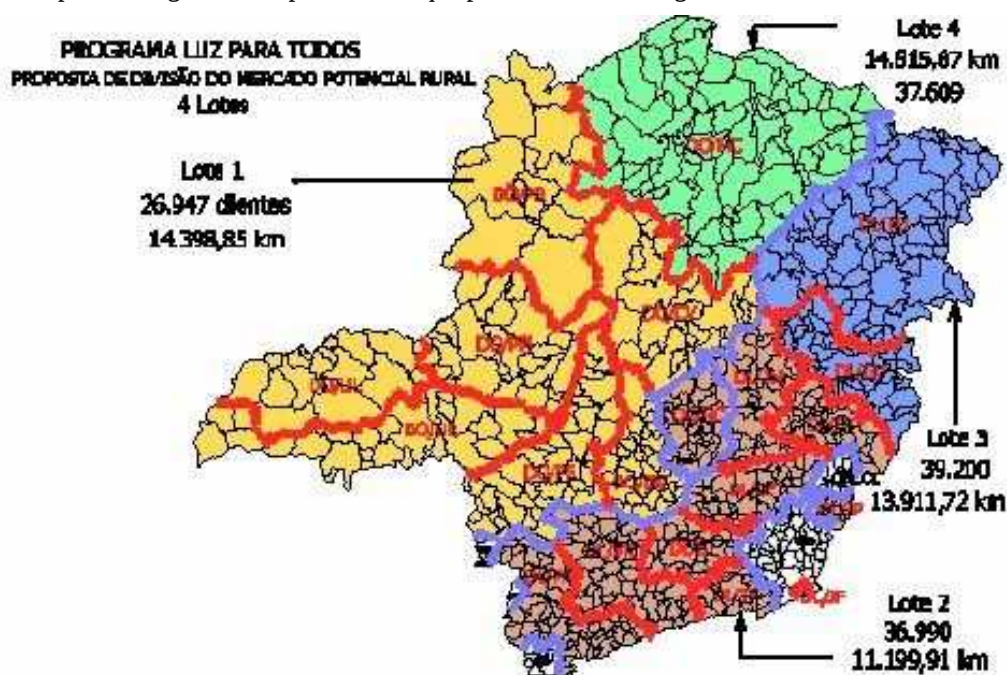


Figura 1 – Divisão do estado de Minas Gerais em ÁREAS

A macro região 2 (lote 2) é constituída, em sua grande maioria, por municípios localizados próximos à Grande BH, não sendo considerado neste trabalho. Os consumidores localizados nessa macro região serão beneficiados, em sua maioria, pelas redes elétricas de distribuição. Logo, o estudo desse lote não foi envolvido neste trabalho. Conseqüentemente dos 774 municípios de concessão da CEMIG, apenas 400 foram analisados. Destes municípios, 200 estão na macro região 1 (lote 1), 123 na macro região 3 (lote 3) e 77 na macro região 4 (lote 4).

A etapa inicial para o cálculo da disponibilidade energética mensal garantida pelos SIGFI, e conseqüentemente o tamanho do gerador fotovoltaico a ser utilizado, foi a identificação da radiação solar por municípios. O Estado de Minas Gerais apresenta apenas 79 estações meteorológicas, do INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, distribuídas por todo o estado.

Os dados de radiação solar dos municípios, medidos nas estações meteorológicas, foram obtidos do Atlas Solarimétrico do Brasil, (2002). Esse Atlas contém uma base de dados com mais de 500 estações, localizadas no Brasil

e nas regiões limítrofes dos países vizinhos. São informações sobre radiação solar global diária, médias mensais, ou insolação diária, médias mensais.

Devido ao grande número de municípios sem informações sobre a radiação solar incidente, foi necessária a busca por um método que estimasse a radiação solar dos municípios que não são dotados de estações meteorológicas.

O recurso utilizado para determinar a radiação solar nos municípios sem medição, foi a utilização de um software, denominado SURFER, que faz cálculos e representação gráfica de diversas variáveis geográficas, como latitude, longitude, temperatura, radiação solar, nebulosidade, etc. O método da Krigagem, foi utilizado por este software para estimar os valores desconhecidos e para situações não estacionárias (Landim et. al., 2002).

A Geoestatística se preocupa com o comportamento das chamadas variáveis regionalizadas, definindo a estacionariedade como sendo um fenômeno homogêneo dentro do espaço no qual se pretende fazer estimativa. Por intermédio da Krigagem, fornece uma estimativa do ponto ou do bloco e, juntamente com ela, uma medida de acuracidade dessa estimativa.

Utilizando este método, foi levantado um valor de radiação solar para cada um dos 400 municípios do estado de Minas Gerais. O mapa gerado pelo programa com as horas de insolação pode ser visto na Figura 2. Neste mapa pode-se observar o comportamento da insolação no estado de Minas Gerais. Através da análise do gráfico, pode-se verificar que as regiões do triângulo e norte de Minas são as regiões que apresentam um maior número de horas de insolação, logo, espera-se que para essas regiões possa ser utilizado um gerador de menor potência, em comparação a outros municípios, para se ter uma mesma quantidade de energia gerada.

Dentro do Programa Luz para Todos da CEMIG, foi definido que o principal tipo de sistema fotovoltaico a ser utilizado para eletrificação de domicílios rurais, seria o SIGFI13. Este tipo de sistema possui disponibilidade mensal garantida de 13kWh/mês. A identificação da potência do gerador fotovoltaico foi feita a partir da obtenção da radiação solar média anual, calculada para cada município da área de concessão da CEMIG. A Figura 3 apresenta o mapeamento da radiação solar incluindo, também, a identificação da potência mínima do gerador fotovoltaico do sistema SIGFI13, para cada município. No mapeamento da Figura 3, pode ser observado que, dependendo da radiação solar, o estado pode ser beneficiado por gerador fotovoltaico do sistema SIGFI13 com três potências diferentes 130Wp, 140Wp e 150Wp.

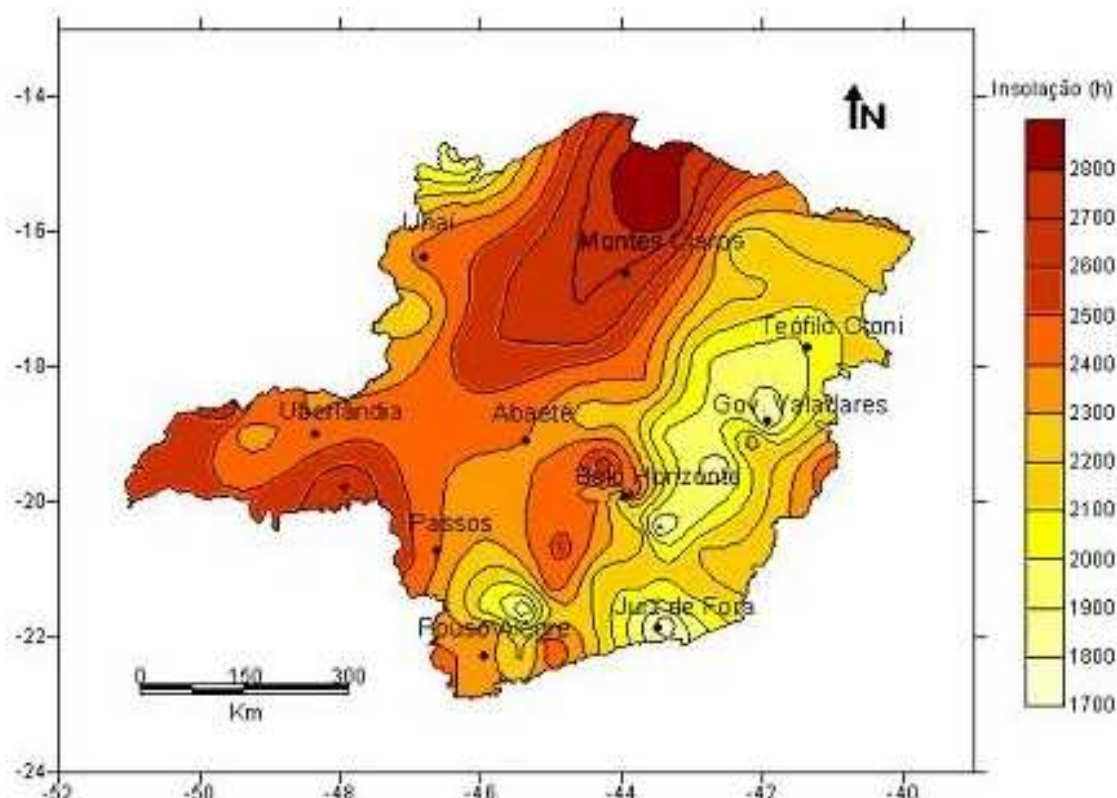


Figura 2 – Insolação solar de Minas Gerais, fonte: Cresesb, 2004

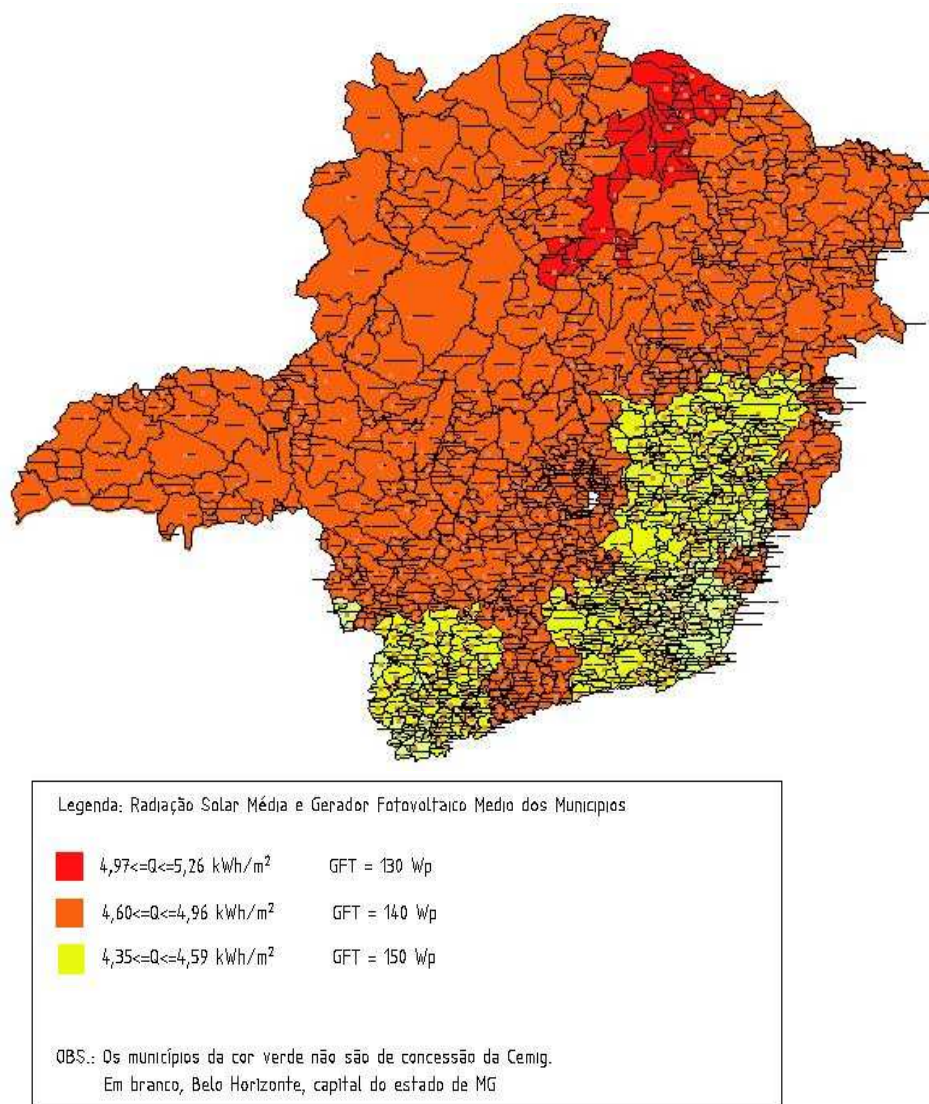


Figura 3 – Mapeamento da radiação solar e gerador fotovoltaico SIGFI13 por município em Minas Gerais

A área vermelha do mapa representa a região de maior radiação solar do estado ($4,97 < Q < 5,26 \text{ kWh/m}^2$), portanto, os domicílios localizados na mesma, poderão ser eletrificados com sistemas cujo gerador fotovoltaico apresenta a menor potência (130Wp). A maior parte do estado, área colorida em laranja, possui radiação solar na faixa de $4,96 < Q < 4,60 \text{ kWh/m}^2$, com a potência mínima do gerador fotovoltaico em torno de 140Wp. A área de menor radiação solar, colorida em amarelo, deverá utilizar o gerador fotovoltaico de potência máxima de 150Wp. Essa área abrange um reduzido número de municípios da macro região 3 (lote 3 no mapa da Figura 1).

Na operacionalização do programa, Luz para Todos da CEMIG, foi definido que o sistema SIGFI13 terá gerador de 150Wp. Esta definição foi feita com base na sustentabilidade do Programa, visando facilitar a O&M, controle de estoque, equipe de manutenção dentre outros parâmetros.

Localização das comunidades rurais.

Outro parâmetro considerado na definição dos critérios foi a localização das comunidades. Elas devem estar situadas em áreas remotas, isoladas e distantes do sistema elétrico, incluindo localização em ilhas, área de proteção ambiental ou áreas de difícil acesso à rede elétrica.

As comunidades localizadas em ilhas poderão ser eletrificadas com rede convencional, sistemas híbridos com mini-redes ou sistemas fotovoltaicos (SFT), dependendo de avaliação técnica e econômica.

Caso as comunidades estejam localizadas em área de proteção ambiental, poderão ser eletrificadas utilizando sistemas fotovoltaicos, rede protegida ou rede isolada, dependendo de avaliação técnica e econômica. Os domicílios localizados em áreas de proteção ambiental serão eletrificados utilizando sistemas fotovoltaicos. A decisão quanto ao tipo do sistema dependerá das características do público alvo.

Custo de atendimento por projeto.

O parâmetro custo médio do projeto por consumidor (C_{REDE}) é obtido a partir da média aritmética do custo do projeto de eletrificação das comunidades com a rede elétrica e o número total de consumidores. O C_{REDE} engloba, principalmente, dados de distância da rede elétrica e dispersão dos potenciais consumidores dentro de um aglomerado, bem como a existência de outras comunidades próximas, que contribuirão para a redução do custo de eletrificação da mesma.

O parâmetro custo do sistema fotovoltaico, C_{SFT} , é definido pelo custo dos equipamentos, material de instalação e instalação do sistema. Um sistema fotovoltaico é composto pelo gerador e demais componentes necessários para o fornecimento de energia elétrica à unidade consumidora, tais como, sistema de controle (controladores e inversores), armazenamento (banco de baterias) e proteção (disjuntores, fusíveis e etc.).

O custo do sistema fotovoltaico (C_{SFT}) é composto pelo custo dos equipamentos principais, kit instalação e material de instalação. Cada tipo de sistema tem a composição baseada nestes três conjuntos. Esse custo foi obtido a partir de um levantamento de custos realizado entre vários fornecedores, e pelo custo dos materiais e miscelâneas, obtidos a partir de dados internos da Cemig. Para os materiais não inseridos no estoque da CEMIG foram realizadas consultas a fornecedores dos mesmos.

O critério de comparação entre o C_{REDE} e o C_{SFT} foi obtido através da análise de uma série histórica de dados de vários anos de realização de programas de eletrificação rural da CEMIG. A metodologia utilizada para definir correlação entre o custo de atendimento e a distância dos consumidores à rede existente foi baseada em estudo feito pelo Banco Mundial (1997), para buscar alternativas de desenvolvimento de sistemas de energia renováveis na eletrificação rural no Brasil, notadamente envolvendo áreas a Bahia, o Ceará e Minas Gerais.

A base de dados utilizada constou de uma amostra de 6207 obras de eletrificação rural concluídas durante os anos de 2004/2005 dentro do programa Luz para Todos. Dentro dessa amostra foram selecionados 402 projetos, cujas comunidades possuíam de 15 a 25 consumidores beneficiados. Esse critério de número de consumidores por projeto originou-se de uma pesquisa sócio econômica realizada no programa Luz Solar que identificou uma média de 20 moradias no entorno de uma escola rural (CM/CE 011, 2001).

As características das obras são muito diversas, visto que o número de consumidores/obra varia significativamente de um projeto para outro. Por exemplo, foi encontrado na amostra 1 projeto com 400 consumidores/obra e 2976 projetos com apenas 1 consumidor/obra de eletrificação.

No entanto, foi observado que a projeção do custo da extensão de rede por consumidor - 792 metros a um custo estimado de R\$5.589,29, e a projeção total envolvendo 32.417km com custo médio R\$5.112,82, permanecem aproximadamente as mesmas quando reduzimos a amostra para as 452 obras do estudo.

A função apresentada na Figura 4 apresenta a reta que define o preço de construção da rede rural em função da projeção de rede necessária para atingir todos os consumidores (15 a 25) envolvidos no projeto, onde: Y é o preço resultante em reais por consumidor e X é a projeção de rede em quilômetros.

A projeção de rede foi usada ao invés da extensão de rede primária para compensar a existência de rede secundária nos projetos da amostra, e para compensar o fato de que a extensão de rede secundária pode, em alguns casos, ser mais cara que a primária.

Na Figura 4 pode ser observado que, a dispersão das obras e a posição destas em relação à reta obtida apresentam uma correlação 74,6%.

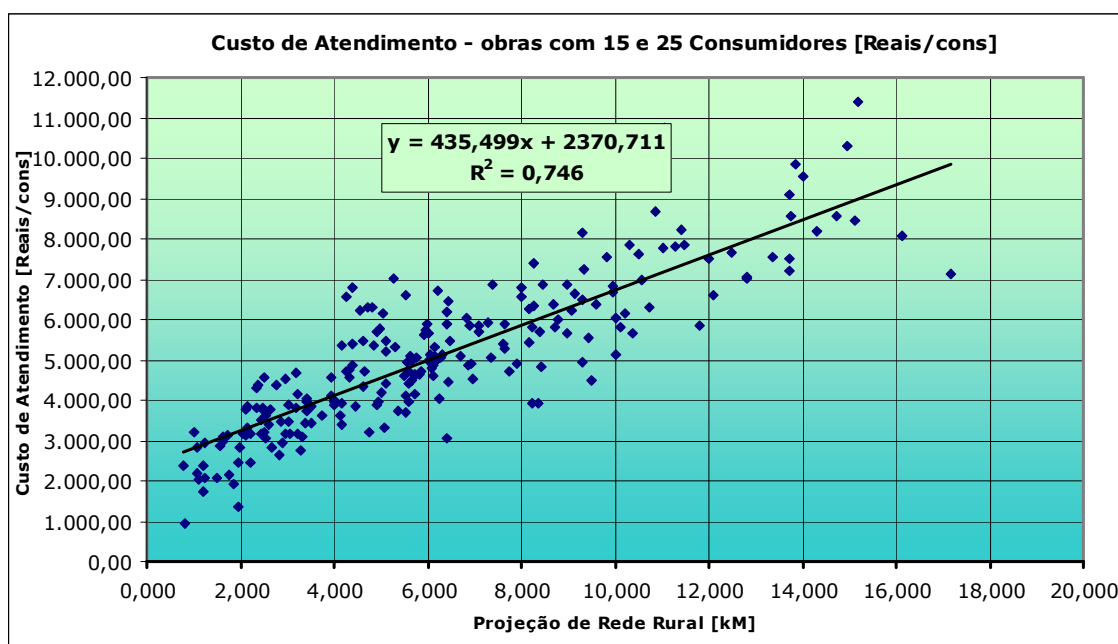


Figura 4 – Custo de atendimento – Obras com 15 a 25 consumidores por comunidade (R\$/cons).

A função preço determina, a partir de quantos quilômetros de projeção de rede, o preço do sistema fotovoltaico se equipara ao da rede elétrica. Essa análise levou à conclusão que quando o custo de eletrificação da comunidade ou consumidor isolado com a rede elétrica for, no mínimo, o dobro do custo utilizando sistemas fotovoltaicos ($C_{REDE} \geq 2C_{SFT}$) a tecnologia fotovoltaica começa a ser competitiva com a rede.

Para uma segunda amostra, dentro de uma mesma massa de dados (6207 obras) do Programa Luz para Todos, foi obtido uma equação uma próxima [$y = 483,856x + 2375,097$, com uma correlação de 76,4%]. Esse dado confirma a confiabilidade da primeira amostra utilizada. Ressalta-se que essa análise comparativa só poderá ser feita, após, o levantamento do custo real de eletrificação da comunidade com a rede elétrica. Para que seja levantado o C_{REDE} deverá ser feito o projeto da rede para a comunidade, incluindo o levantamento topográfico.

Caracterização do Público Alvo.

O público alvo do Programa Luz para Todos é composto por consumidores rurais, classificados como Pequeno Produtor Rural (PPR) e Produtor Rural Típico (PRT), assentamentos, escolas, chácaras, igrejas, postos de saúde, centros comunitários e etc.

Os consumidores são classificados conforme Resolução ANEEL nº 456 (2001), que estabelece que a concessionária classificará a unidade consumidora baseada nas atividades nela exercidas.

A menor tarifa é aplicável à unidade consumidora residencial, caracterizada como “Residencial Baixa Renda” de acordo com os critérios estabelecidos em regulamentação específica.

Essa classificação também é aplicável à unidade consumidora rural com fins residencial sob responsabilidade do trabalhador rural, que desenvolve agricultura de subsistência.

Para identificação do público alvo a ser beneficiado com sistemas fotovoltaicos, no Programa Luz para Todos, foi utilizado o estudo de monitoria e avaliação sócio econômica realizado durante a monitoração do Programa Luz Solar (CM/CE 011, 2001).

Os trabalhadores rurais, identificados neste estudo, desenvolvem a exploração da terra obedecendo aos padrões de uso predominante em uma agricultura de subsistência. Esses cultivos são realizados com baixo nível tecnológico, mão-de-obra familiar e com dificuldades de troca da pouca produção excedente, sendo a produção voltada, basicamente, para consumo próprio da família (caráter alimentar).

As culturas mais exploradas são o feijão, milho e quiabo (culturas anuais), mandioca (culturas não anuais), banana (fruta) e hortaliças. Alguns produtores beneficiam parte de sua produção agrícola, com destaque para a produção de farinha de mandioca (52% dos produtores), polvilho/goma. (23% dos produtores) e em menor escala rapadura, fubá e fumo.

Os dados da pesquisa mostraram uma média de 5 moradores por domicílio e uma predominância de jovens na faixa de idade mais produtiva. No entanto, 39% da população pesquisada não frequentam a escola.

Para estimativa da renda do produtor considerou-se como referência a renda familiar total mensal, que inclui rendimentos obtidos com salário, pensão, aluguel, aposentadoria, doação e renda da terra de todos os membros da família que vive na propriedade. A pesquisa indicou que cerca de 30% dos produtores apresentam renda familiar até $\frac{1}{2}$ salário mínimo por mês, 25% renda entre $\frac{1}{2}$ a 1 salário mínimo e 29% renda entre 1 a 2 salários mínimos. Assim, cerca de 85% dos produtores possuem renda familiar até 2 salários mínimos por mês. Nota-se, através da observação direta, uma pequena remuneração proveniente da assalariamento da mão-de-obra.

Os bens possuídos pelos pequenos produtores foram divididos em duas categorias: bens domésticos e bens de uso múltiplo. Do total da população pesquisada cerca de 87% não possuíam nenhum tipo de bem. Os dados mostram uma quantidade de 586 bens de qualquer tipo possuídos pelos produtores. Assim, em termos médios tem-se 0,7 bem de qualquer tipo por propriedade, ressaltando que, uma propriedade pode possuir mais de um bem e uma outra propriedade nenhum bem. O eletrodoméstico mais difundido é o rádio toca fita a pilha, possuído por 43% dos produtores.

Assim sendo, o público alvo a ser beneficiado com o sistema fotovoltaico deverá ser classificado como: residencial de baixa renda, com agricultura de subsistência, e renda familiar até 2 (dois) salários mínimos, por mês, no máximo. A unidade consumidora é classificada como Residencial de Baixa Renda na Resolução ANEEL nº 456.

3.2 Otimização do Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos

A avaliação do mérito do dimensionamento dos sistemas fotovoltaico foi desenvolvida dentro do P&D 017 – CEMIG/ANEEL – “Avaliação Tecnológica da Energia Solar Fotovoltaica”, conforme descrito por Cabral et.al.(2004) . A análise do mérito de um sistema fotovoltaico autônomo deve ser julgada em termos de confiabilidade com que fornece energia elétrica à carga. Para a quantificação deste mérito, foi utilizado o conceito de Probabilidade da Perda de Carga, LLP -Loss of Load Probability. Essa metodologia otimiza o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, sendo definida como a relação entre o déficit e a demanda de energia, considerados ambos na carga e durante todo o tempo de funcionamento da instalação. No desenvolvimento da metodologia foram feitos estudos com relação ao sistema de armazenamento de energia (baterias), incluindo sua modelagem e simulação, análise de módulos fotovoltaicos e estudos referentes ao dimensionamento estocástico (em andamento). A análise dos módulos fotovoltaicos foi imprescindível para verificar, mediante seu fornecimento de energia, o comportamento da bateria. Pode-se verificar que os resultados encontrados na análise do sistema de armazenamento de energia são contundentes para se dar início ao estudo de

controladores de carga e sua prototipagem. O estudo de dimensionamento estocástico mostrou que o sistema fotovoltaico pode ser otimizado considerando-se as probabilidades de ocorrência dos eventos (radiação solar, fornecimento de energia à carga, etc), comparado ao dimensionamento determinístico. Este procedimento possibilitou uma análise mais apurada do projeto, garantindo que os sistemas fotovoltaicos, utilizados no Programa Luz para Todos da Cemig, atendam às exigências da Res. ANEEL 083/2004.

3.3 Definição dos Padrões

Os modelos dos sistemas fotovoltaicos residenciais adotados no programa Luz para Todos, foram definidos a partir da pesquisa e desenvolvimento de diversos padrões de sistemas, realizados através do P&D017. Para definição destes padrões foram considerados aspectos técnicos, ambientais, segurança e regulatórios, visando facilitar a operacionalização da O&M, conforme descrito por Diniz et.al. (2008).

Os sistemas fotovoltaicos definidos com padrões para eletrificação de domicílios rurais são de dois tipos. O sistema **TIPO 1**, classificado como SIGFI13, possui disponibilidade mensal garantida de 13KWh/mês, com gerador fotovoltaico de 150 Wp, Figura 5. O sistema **TIPO 2** possui o gerador fotovoltaico com potência de 300 Wp, não sendo calculado a disponibilidade mensal garantida por município para o mesmo.

Os sistemas utilizados nas escolas rurais possuem geradores fotovoltaicos na faixa de 400 Wp a 2500Wp, dependendo da área e tipo de necessidades das escolas. A Resolução Normativa ANEEL nº 83, de 20/09/2004, estabelece no Artigo no Art. 3º, item II, que os sistemas deverão ser enquadrados em uma das classes de atendimento, classificadas como SIGFI13, SIGFI30, SIGFI45, SIGFI60, SIGFI80, com a disponibilidade mensal garantida de 30 kWh/mês, 45 kWh/mês, 60 kWh/mês e 80 kWh/mês, respectivamente. Na maioria das escolas, as cargas usuais são lâmpadas, TV&vídeo, antena parabólica e som. Em algumas escolas, denominadas nucleadas, os sistemas foram dimensionados para alimentar computadores. Os sistemas fotovoltaicos dimensionados nestas escolas possuem disponibilidade energética superiores aos SIGFI80.



Figura 5 – Características Sistemas Residenciais e DUB do SIGFI 13

3.4 Definição dos Ensaios de Equipamentos Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos

As metodologias, procedimentos, ensaios e testes necessários foram desenvolvidos pelo P&D 017 – CEMIG/ANEEL – “Avaliação Tecnológica da Energia Solar Fotovoltaica” (Machado-Neto et. al., 2004).

O desenvolvimento dos ensaios foi iniciado com a caracterização de módulos fotovoltaicos, a partir de procedimentos de teste outdoor, levando em consideração o ambiente brasileiro. Modelos novos de desempenho foram estabelecidos, tendo como base os testes outdoor que utilizaram um simulador de carga eletrônico e rastreador solar. Uma plataforma de desenvolvimento de aplicação específica, baseada em processador digital de sinais, permitiu uma maior agilidade nos testes outdoor e, por conseguinte, uma melhor confiabilidade dos dados obtidos com os testes. A partir da base de dados obtida, e de modelos de desempenho foram desenvolvidas ferramentas numéricas para o projeto e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Além dos procedimentos para ensaios de módulos fotovoltaicos outdoor, também, foram desenvolvidos testes para controladores de carga, inversores e baterias, que estão garantindo o aprimoramento da qualidade dos equipamentos. Adicionalmente foram desenvolvidos ensaios de compatibilidade e disponibilidade energética para os sistemas SIGFI13, instalados nos domicílios rurais.

3.5 Decisão da modalidade de atendimento

Para a escolha da opção tecnológica de atendimento mais apropriada, o projetista segue um fluxograma de decisão onde são analisados os critérios acima estabelecidos pela área de Engenharia de Ativos da Distribuição da Cemig e descritos na norma ND 2.11 (2005).

Em resumo, para que a modalidade de atendimento a comunidade seja a eletrificação com sistemas fotovoltaicos:

a) Localização do domicílio – consumidor isolado ou pertencente a agrupamento, e/ou próximo à outra comunidade a ser universalizada. Caso essa unidade consumidora esteja localizada em ilhas ou áreas de proteção ambiental, deverá ser utilizado sistema fotovoltaico para a eletrificação das mesmas, independentemente da classificação dos consumidores, variando neste caso o tipo de sistema fotovoltaico a ser utilizado.

b) Custo de atendimento por projeto de eletrificação, ($CREDE \geq 2CSFT$), seja satisfeito, e que a comunidade seja composta por consumidores rurais classificados com Residencial de Baixa Renda em sua maioria.

Após seguir todos os critérios, o projetista deverá observar os seguintes itens:

- Identificar do município, localizar a potencia mínima do gerador do sistema fotovoltaico SIGFI13 na Figura 4 – “Mapeamento da radiação solar e potência do gerador fotovoltaico SIGFI13 por município do estado de Minas Gerais”;
- Para as unidades consumidoras rurais classificadas como residencial de baixa renda deverá ser utilizado o sistema fotovoltaico TIPO 1, SIGFI13;
- Se a unidade consumidora estiver localizada em ilhas ou áreas de proteção ambiental ou uma pequena fazenda ou chácaras utilizar o sistema fotovoltaico residencial TIPO 2 – 300Wp;

Para as edificações classificadas pela ANEEL como poder público, tais como, escolas, igrejas, postos de saúde e centros comunitários, deverá ser feita uma análise da carga para identificação do tipo de sistema fotovoltaico adequado.

3.6 Implantação dos Sistemas Fotovoltaicos dentro do Programa Luz para Todos

Dentro do Programa Luz para Todos, os sistemas fotovoltaicos foram instalados em escolas e residências rurais dentro da área de concessão da Cemig, localizadas nas regiões norte e leste do estado. A geração descentralizada, utilizando sistemas fotovoltaicos dentro do Programa Luz para Todos, foi dividida em duas partes:

- Eletrificação de Escolas Rurais implementado pelo *Programa Luz no Saber*, através de convênio entre a Secretaria de Estado da Educação – SEE, Secretaria Extraordinária para o Desenvolvimento dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri e Norte de Minas - SEDVAN e CEMIG, que visa eletrificar 100%;
- Eletrificação dos domicílios rurais localizados em comunidades rurais isoladas, visando à universalização do atendimento para a população rural que não atendam os critérios de eletrificação via rede convencional.

O Programa Luz no Saber foi criado para dar continuidade à eletrificação das escolas rurais iniciada em 1999 dentro do Programa Luz Solar/PRODEEM. Para a consecução do mesmo, foi celebrado convênio entre a Secretaria de Estado da Educação – SEE, Secretaria Extraordinária para o Desenvolvimento dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri e Norte de Minas - SEDVAN e CEMIG, visando atingir a eletrificação de 100% das escolas rurais do Estado.

Quando a eletrificação de escolas rurais foi iniciada em 1999, dentro do Programa Luz Solar, havia 3000 escolas localizadas em áreas rurais sem eletricidade. Após a implementação do mesmo e eletrificação via rede convencional no período 1999 a 2002, restaram 1125 escolas sem o benefício da eletricidade (CM/CE 010, 2001).

Esse programa eletrificou 1125 escolas no período 2004 – 2005, sendo que 309 escolas municipais rurais, localizadas nas regiões norte e leste do Estado, foram beneficiadas com sistemas fotovoltaicos.

Na primeira etapa do programa, o critério de escolha da modalidade de atendimento foi basicamente à distância da rede elétrica à escola. Caso a escola estivesse distante mais de 10 km da rede elétrica mais próxima, a mesma seria eletrificada utilizando a tecnologia fotovoltaica. A partir de 2004, essa distância foi definida a partir da análise da série histórica dos custos dos projetos de eletrificação da CEMIG Diniz, A.S.A.C., 2008).

Para a instalação dos sistemas fotovoltaicos no Programa Luz no Saber, foi realizado treinamento em projetos de sistemas fotovoltaicos, destinado aos empregados das regionais da CEMIG, e um treinamento em instalação de sistemas fotovoltaicos, destinado aos empregados das empreiteiras contratadas pela CEMIG.

Os projetos foram baseados na Norma ND 2.11 - Manual de Utilização de Sistemas Fotovoltaicos para a Eletrificação Rural, (2005). Os tipos de sistemas fotovoltaicos instalados nas 309 escolas, da fase final do Programa, estão localizados em 40 municípios, das regiões norte e leste do Estado. O padrão de sistemas fotovoltaicos utilizados nas escolas rurais é similar ao utilizado nos domicílios. A utilização deste tipo de sistema possibilitará o atendimento de várias disposições desta resolução 083/2004, incluindo o ponto de entrega de energia, instalação do medidor, facilidade de leitura e manutenção do sistema fotovoltaico.

Dentro do Programa Luz para Todos em Minas Gerais, na área de concessão da Cemig, foi planejado a instalação de 7000 sistemas fotovoltaicos. No entanto devido à evolução da implementação do programa e instalação de novas tecnologias de redes de distribuição, há uma sinalização que este número de sistemas será reduzido. Até março de 2008, em torno de 2000 sistemas fotovoltaicos foram instalados em domicílios rurais localizados em comunidades rurais isoladas, visando à universalização do atendimento, dispersos nos quatro lotes que dividiram o Estado em macro-

regiões, conforme descrito no item 3.2.1. Estes sistemas estão dentro dos critérios descritos anteriormente e em consonância com a Res. 083/2004 da ANEEL.

4. CONCLUSÕES

O atendimento à demanda por energia elétrica pela via convencional a comunidades rurais, dispersas, cuja população apresenta um baixo potencial de consumo, exige investimentos elevados, tornando-se mais viável economicamente realizar o atendimento via tecnologias complementares à rede elétrica. Estes consumidores, devido ao tipo das cargas utilizadas (basicamente iluminação e TV) e hábitos culturais consomem energia, principalmente, no horário de ponta do sistema elétrico, podendo ainda, forçar a necessidade de reforço no sistema de subtransmissão.

Diante dessa realidade, torna-se necessária a busca por tecnologias de geração descentralizada para atendimento ao mercado potencial, que esteja localizado dentro de áreas distantes, isoladas ou de difícil acesso à rede elétrica de distribuição. Esta necessidade foi reforçada pela inclusão destas modalidades de atendimento dentro do Programa Luz para Todos, lançado pelo Ministério de Minas e Energia.

A CEMIG deu um passo importante na utilização da geração descentralizada, ao integrar sistemas fotovoltaicos como tecnologia complementar à rede elétrica convencional. Essa tecnologia está viabilizando o cumprimento da meta de universalização do atendimento, visto que, possibilita a eletrificação de comunidade rurais isoladas localizadas em áreas de difícil acesso à rede elétrica ou inviável economicamente.

Atualmente, a CEMIG Distribuidora possui todas as rotinas operacionais para O&M de sistemas fotovoltaicos, possibilitando que outras tecnologias de geração distribuída possam ser utilizadas, caso seja necessário para otimização dos ativos da empresa.

Referências

- Banco Mundial, 1997, Alternativas de Desenvolvimento de Sistemas de Energia Renováveis na Eletrificação Rural no Brasil.
- Cresesb/CEPEL, 2002, Atlas Solarimétrico do Brasil.
- Cabral, C. V. T., Machado Neto, Lauro V. B., Diniz, Antonia Sônia A. C., Oliveira-Filho, Delly, 2004, Model and Simulation of Photovoltaic Modules, VIII World Renewable Energy Congress, 2004, Denver. Proceedings of VIII World Renewable Energy Congress. Denver : Elsevier Ltd., 2004. v. 1. p. 1-6.
- CM/CE 010, 2001, Programa LUZ SOLAR - Pré-eletrificação Rural Utilizando Sistemas Fotovoltaicos, Relatório Técnico CEMIG.
- CM/CE 011, 2001, Caracterização do Público Alvo do Programa Luz Solar, Relatório Técnico CEMIG.
- Diniz, A.S.A.C., Câmara, C. F., Tomé, J. L., França, E. D., Borges, J. D., Resende, M. E., Ravinet, R. F., Villefort, M. H., Amorim, M., Teixeira, L. M. A. C., Carvalho, F.W., Delgado, M. B., Tasca, Sérgio, 2003, Sustainability – A Challenge for Deployment of Photovoltaics in a Utility Program, Anais da 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion , pág. 456, vol.3, Osaka, Japão.
- Diniz, A.S.A.C., Pereira, E. M .D., 2004, Sustainable Solar Energy Development Strategies in Brasil, World Renewable Energy Congress VIII, Published by Elsevier Ltd.
- Especificação Técnica CEMIG - 02.111 ED/CE 017D, 2005, CEMIG.
- LANDIM, P. M. B., STURARO, J. R., MONTEIRO, R. C., 2002, Krigagem Ordinária para Situações com Tendência Regionalizada. Rio Claro, SP.
- Cabral, C. V. T., Machado-Neto, Lauro de V. B., Diniz, Antônia Sônia ^a C., Oliveira-Filho, Delly, 2004., Reliability and Compatibility in PV Systems: Development of Testing Procedures. In: VIII World Renewable Energy Congress, Denver. Proceedings of VIII World Renewable Energy Congress. Denver : Elsevier Ltd., v. 1. p. 1-6.
- Machado-Neto, L.V.B., Cabral, C.V.T., Oliveira-Filho, D., Diniz, A.S.A.C, 2004, Performance Analysis of PV Systems, Anais do XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar, pág. 831-836, Vigo.
- Manual Executivo: Programa Luz para Todos CEMIG 2004 – 2006, 2004, Belo Horizonte, MG.
- Norma ND 2.11 - Manual de Utilização de Sistemas Fotovoltaicos para a Eletrificação Rural, 2005, Relatório Técnico CEMIG.
- Relatório Técnico Final do Projeto P&D 017 – CEMIG/ANEEL “Avaliação Tecnológica da Energia Solar Fotovoltaica”, 2008.
- Resolução ANEEL nº 456, 2000.
- Resolução ANEEL nº 083/2004, 2004.