



COMO DIMENSIONAR UM GERADOR FOTOVOLTAICO COM BATERIAS

Eng. Carlos Alberto Alvarenga

1. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS

1.1 IMPORTÂNCIA DE UM BOM DIMENSIONAMENTO

Os sistemas fotovoltaicos trabalham com uma fonte limitada de energia, que é a energia solar incidente sobre os módulos. Essa fonte também é variável, pois sofre a influência de fatores meteorológicos de difícil previsão. Por outro lado, a energia elétrica é solicitada ao sistema de acordo com as necessidades de seus usuários. O dimensionamento do sistema deve procurar realizar uma compatibilização dessas duas condições dentro de determinados níveis de confiabilidade e custos.

Para atender a todas as necessidades de energia dos usuários com total garantia, haveria a necessidade de se projetar um sistema para as mais severas condições meteorológicas e para as situações de maior uso da eletricidade. Muitas vezes, esse procedimento leva a sistemas com custos inaceitáveis para o usuário.

O dimensionamento criterioso deve levar em conta os dados meteorológicos existentes para a região, os aparelhos que serão ligados, o tempo de uso dos mesmos, o volume de recursos que se pretende investir na instalação e o grau de confiabilidade que se quer no fornecimento de energia. Na dosagem desses fatores pode-se chegar a um dimensionamento criterioso, que viabilize o sistema e que deixe o usuário satisfeito.

Os critérios e recomendações deste capítulo são simplificados e válidos para pequenos sistemas isolados. Os envolvidos em projetos de sistemas, principalmente aqueles de maior porte, devem procurar ter acesso a procedimentos mais elaborados e rotinas computacionais que simulam diversas condições e levam a dimensionamentos mais criteriosos. De qualquer maneira, é fundamental que o usuário esteja bem informado sobre as limitações do sistema.

Sucessivas simulações podem ser necessárias variando-se os parâmetros de projetos até se chegar a uma configuração, uma confiabilidade e um custo aceitáveis.

1.2 PARÂMETROS BÁSICOS PARA DIMENSIONAMENTO

Três estudos são básicos para o dimensionamento: definir as características e a quantidade de energia que deve ser disponibilizada para os aparelhos consumidores, estimar a quantidade de energia elétrica gerada a partir da radiação solar, e definir os níveis de autonomia e confiabilidade que se deseja para o sistema em casos de períodos excepcionalmente prolongados de baixa insolação. Os dois primeiros levam ao dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e o terceiro permite dimensionar o banco de baterias. A seguir são feitas algumas considerações para se definir esses parâmetros.

1.3 CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

No capítulo sobre o potencial de energia solar (Parte I) são feitas considerações sobre a característica do recurso solar e sobre a forma de obtenção dos dados solarimétricos. O objetivo básico é obter uma tabela com níveis médios de radiação solar, para cada mês do ano. Esses dados podem ser obtidos em mapas solarimétricos brasileiros e regionais, como os apresentados

na Internet como, por exemplo, no endereço www.cresesb.cepel.br.

Esses dados estão normalmente disponíveis em valores da quantidade média de energia solar que incide durante um dia em uma área de 1 metro quadrado situada em um plano horizontal na superfície da Terra. Esses valores são usualmente especificados em unidades de energia ($\text{kWh/m}^2/\text{dia}$). Um valor típico para o Norte de Minas Gerais é $5 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ com variações específicas para cada mês do ano.

Outra forma de apresentar o mesmo dado, também bastante utilizada, é transformá-lo em número médio diário de horas em que o Sol brilharia em sua potência máxima convencional, que é de 1 kW/m^2 . Portanto, no Norte de Minas, teríamos uma média de 5 horas de Sol pleno, o que equivale a $5 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$.

Na Tabela 1.1 mostram-se, a título de exemplo, dados solarimétricos disponíveis para a região de Três Marias, em Minas Gerais.

	kWh/m ² /dia	Horas de sol pleno/dia
Janeiro	4,7	4,7
Fevereiro	5,8	5,8
Março	5,5	5,5
Abril	5,0	5,0
Maio	4,3	4,3
Junho	4,4	4,4
Julho	4,4	4,4
Agosto	4,7	4,7
Setembro	5,0	5,0
Outubro	5,5	5,5
Novembro	5,6	5,6
Dezembro	5,0	5,0
Ano	5,0	5,0

TABELA 1.1: Dados solarimétricos da região de Três Marias, MG.

1.3.1 Definição das cargas

O objetivo maior dessa etapa é definir o consumo médio diário de energia elétrica, ou seja, definir a curva de carga, tanto em termos diários quanto sazonais. Com esses dados é possível visualizar as características previstas para o consumo de eletricidade, adequando-se o sistema para que o consumo e a produção sejam compatíveis ao longo do dia e ao longo do ano.

Essa determinação é muito complexa, pois depende de hábitos e ações dos usuários difíceis de determinar e altamente variáveis ao longo do tempo. Como determinar, por exemplo, quantas horas por dia certa lâmpada ficará ligada ou quantas horas por dia a família ligará o televisor? As premissas adotadas para o cálculo devem ser previamente ajustadas com o usuário para que o mesmo não fique decepcionado com o desempenho do sistema, após sua instalação.

O produto final desta etapa é uma planilha com definição dos equipamentos que serão ligados, suas potências elétricas, tensões (corrente alternada ou contínua) e o tempo diário em que ficarão ligados. Com esses dados pode-se calcular o consumo diário de cada aparelho. Este consumo pode ser apresentado em Watt-hora ou em Ampère-hora. O levantamento de cargas de uma escola rural é exemplificado na Tabela 1.2.

Aparelho	Nº	Tensão (V)	Potência (W)	Corrente contínua A	Operação Horas/dia	Consumo Wh/dia	Consumo 12V Ah/dia
Lâmpada 40W	6	12cc	240	20,0	3	720	60
Lâmpada 20W	6	12cc	120	10,0	3	360	30
Televisor	1	120ca	60	5,0	3	180	15
Videocassete	1	120ca	20	1,67	1	20	1,67
Antena parabólica	1	120ca	20	1,67	3	60	5
Refrigerador	1	12cc	76	6,33	6	456	38
Total	16		536	44,67		1796	149,67
Perdas no inversor-20%						52	4,33
Total com perdas						1.848	154

Tabela 1.2: Levantamento de cargas para uma escola rural.

No exemplo da Tabela 1.2 foram usadas cargas em corrente contínua e em corrente alternada, sendo, portanto, necessária a instalação de um inversor, que apresenta perdas elétricas e constitui uma carga para o sistema. Essas perdas podem ser significativas e devem ser somadas ao total. Um valor típico é 20% das cargas de corrente alternada. O consumo médio diário com o inversor foi de 1.848 Wh/dia ou 154 Ah/dia na tensão de 12 Vcc.

Este é um consumo médio, mas o projetista deve levar em conta também as variações sazonais. Por exemplo, no inverno, as lâmpadas podem ficar mais tempo ligadas, mas, em compensação, o refrigerador ficará um menor tempo com o motor ligado.

O projetista deve informar ao usuário sobre a necessidade de se usar aparelhos energeticamente mais eficientes, principalmente aqueles que mais pesam no total. Destacam-se, neste caso, o uso de lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos e refrigeradores especiais com isolamento térmico mais espesso (no mínimo 50 mm de poliuretano expandido) e tampa horizontal. Deve ser evitado o uso de lâmpadas incandescentes, reatores convencionais para lâmpadas fluorescentes, refrigeradores comuns e outros aparelhos de alto consumo de eletricidade.

Devem também ser analisadas alternativas para a satisfação das necessidades do usuário fora da tecnologia fotovoltaica. Para a refrigeração de alimentos, sugere-se avaliar o refrigerador de corrente contínua ou a gás. Para aquecimento de água para banho, deve-se considerar a instalação de um sistema de aquecimento solar ou a gás. Para aquecimento de alimentos, sugerimos o uso de fornos convencionais a gás ou a lenha, considerando o consumo elevado desta aplicação. Para a ventilação de interiores não é recomendado o uso da energia solar fotovoltaica, considerando os consumos elevados dos ventiladores. Em construções novas, deve-se avaliar a viabilidade de uso de soluções de arquitetura passiva, tais como aproveitamento dos ventos, isolamento térmico, sombreamento, áreas de ventilação, etc.

1.3.2 Definição da autonomia do sistema sem insolação

Outro parâmetro importante que deve ser estabelecido é o tempo de autonomia que se quer para o sistema sem a presença da insolação, ou seja, por quanto tempo os usuários vão poder utilizar normalmente a iluminação e os aparelhos elétricos, sem que haja insolação suficiente para carregar as baterias.

O valor a ser adotado depende muito do clima da região e da disposição dos moradores de economizar energia em períodos prolongados de chuva e nebulosidade ou mesmo ficar sem ela esporadicamente. Em regiões de clima mais estável costuma-se trabalhar com autonomia do sistema para 3 dias para os sistemas residenciais, aumentando-a para regiões mais instáveis. No caso de sistemas que exigem uma maior confiabilidade como os sistemas para telecomunicações costuma-se trabalhar com autonomia do sistema para 4 ou 5 dias.

1.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

1.4.1 Dimensionamento do banco de baterias

O processo de dimensionamento do banco de baterias deve ser realizado inicialmente e depois sucessivamente aperfeiçoado, em função dos demais dimensionamentos e ajustado em função dos custos, disponibilidade de mercado etc.

Inicialmente, deve-se definir o tipo de bateria que será usado. Essa definição é complexa tendo em vista a pequena disponibilidade de baterias específicas para sistemas fotovoltaicos existentes no mercado nacional. Baterias especificamente projetadas para sistemas fotovoltaicos são, usualmente, mais caras, mas duram um tempo maior, o que pode ser importante para locais isolados e com pouca infraestrutura para a troca das mesmas. Deve-se definir também se a bateria será selada ou aberta.

Escolhida a bateria a ser usada, deve-se definir a profundidade de descarga com que se vai trabalhar. Existe um ciclo de carga e descarga que acontece diariamente, ou seja, a energia gerada durante o dia é armazenada na bateria e é fornecida pela mesma principalmente no horário noturno, descarregando. O outro tipo de descarga acontece, esporadicamente, durante períodos prolongados de nebulosidade, quando a bateria atinge níveis de descarga mais elevados.

Quanto mais profundos são os ciclos de descarga-carga, menor a vida útil da bateria. Ou seja, se reduzirmos a capacidade das baterias, gastaremos menos no início, mas as baterias durarão menos e os gastos de reposição serão maiores. O ponto ótimo depende de análises criteriosas do projetista, levando-se em conta as curvas de vida útil em função da profundidade da descarga fornecida pelo fabricante e de todas as demais circunstâncias. Um valor usado para essa profundidade de descarga para ciclos diários com baterias de chumbo-ácido é de 10% a 20%. Para ciclos esporádicos, podem ser utilizados ciclos mais profundos, da ordem de 60%.

A capacidade do banco de baterias em Ah pode ser calculada usando uma das duas expressões abaixo (considerar a que resulta na maior capacidade):

$$\text{Capacidade (Ah)} = \frac{\text{Consumo total (Wh/dia)} \times \text{Autonomia (dias)}}{\text{Tensão do banco de baterias (V)} \times \text{Profundidade da descarga no final da autonomia (pu)}}$$

$$\text{Capacidade (Ah)} = \frac{\text{Consumo total (Wh/dia)}}{\text{Tensão do banco de baterias (V)} \times \text{Profundidade descarga no final de cada noite (pu/dia)}}$$

Consumo total (Wh/dia): Retirar da tabela do levantamento de consumo de eletricidade (Tabela 1.2).

Autonomia (dias): Prever um período sem insolação de 3 a 5 dias de acordo com o clima local e a confiabilidade desejada. Normalmente em residências trabalha-se com 3 dias, em sistemas de telecomunicação com 5 dias.

Tensão da bateria: 12 V (em sistemas muito grandes recomenda-se o uso de 24 ou 48 V).

Profundidade da descarga no final da autonomia (pu) - 0,6 (descargas mais profundas significam vida útil menor para a bateria e menos profundas um investimento inicial maior). Quando usar baterias automotivas em vez de estacionárias (recomendadas) considerar 0,5.

Profundidade da descarga no final de cada noite (pu/dia) – No máximo 0,20. Valores menores aumentam a vida útil da bateria: 0,15 (vida útil da bateria 5 anos) a 0,20 (vida útil da bateria 4 anos). Com baterias automotivas usar valores menores.

No caso específico do exemplo da Tabela 1.2, o consumo previsto é de 1.848 Wh/dia, em sua maior parte, no período noturno. Para uma profundidade diária de descarga de 15%, seria necessário um banco de baterias de 1.027 Ah. Para uma autonomia de 3 dias e ciclo de descarga esporádico de 60%, seria necessário um banco de 770 Ah. Neste caso a capacidade mínima do banco de baterias deve ser de 1.027 Ah.

1.4.2 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

O gerador fotovoltaico trabalha com uma fonte limitada de energia, que é a energia solar incidente sobre os módulos e também variável com fatores meteorológicos de difícil previsão. Por outro lado a energia elétrica é solicitada ao gerador de acordo com as necessidades do consumidor. O dimensionamento do sistema procura compatibilizar essas duas condições dentro de determinados níveis de confiabilidade e custos, pois para o sistema atender todas as necessidades de energia do consumidor com total garantia durante todo o ano, haveria necessidade de se projetar um sistema para as mais severas condições meteorológicas e para as situações de maior uso da eletricidade, o que poderia levar a custos inaceitáveis.

O dimensionamento criterioso deve levar em conta, além dos níveis de radiação solar da região, os aparelhos que serão ligados e o tempo de uso dos mesmos e o grau de confiabilidade que se quer no fornecimento de energia além das normas legais vigentes. Na dosagem desses fatores se pode chegar a um dimensionamento criterioso, que viabilize o sistema do ponto de vista financeiro e legal e que deixe o consumidor satisfeito.

O dimensionamento do gerador fotovoltaico está vinculado, basicamente, a dois parâmetros: os níveis de energia solar incidente e o consumo de eletricidade previsto. Quanto mais ensolarado é o local, menor área de captação de energia será necessária. Quanto maior o consumo de energia, maior área de captação será necessária.

Assim como no processo de dimensionamento das baterias, trata-se de um processo iterativo, com uma primeira tentativa e sucessivas etapas de aperfeiçoamento. Deve-se iniciar por escolher o tipo de módulo que será empregado. Para isso, são importantes as observações do Capítulo 9. Normalmente, são mais utilizados os módulos com células de silício monocristalino ou policristalino, mas também são utilizados os de filmes finos. Esta escolha deve levar em conta custos, eficiência, qualidade de fabricação, garantia, vida útil esperada, níveis de degradação do desempenho com o envelhecimento etc.

O próximo passo é determinar a quantidade de energia que cada módulo vai produzir quando instalado na inclinação escolhida para cada mês e, principalmente, para o mês mais crítico do ano. Este cálculo é complexo e, normalmente, realizado com a ajuda de rotinas computacionais. Os fornecedores geralmente disponibilizam dados práticos para a região, que podem ser utilizados nos cálculos. É preciso levar em conta, além da inclinação, a redução de desempenho devido à poeira e à degradação.

Para o dimensionamento prático e inicial do gerador fotovoltaico é válida a seguinte expressão:

$\text{Potência mínima do gerador (Wp)} = \frac{\text{Consumo total (Wh/dia)}}{\text{Horas equivalentes de sol pleno (h/dia)} \times F_{pp} \times F_{ps}}$

Potência mínima do gerador (Wp): Potência mínima total do conjunto de módulos necessária para produzir a energia solicitada pela carga.

Consumo Total (Wh/dia): Retirar da tabela do levantamento de consumo de eletricidade.

Horas equivalentes de Sol pleno (horas/dia): Depende da latitude e nível de nebulosidade do local. Considerar o nível médio do mês mais crítico no plano escolhido para instalar os módulos. O módulo deve ter uma inclinação que privilegie o pior mês. Considerar entre 3,5 e 5 horas/dia de Sol pleno para o pior mês de acordo com a localização escolhida. Esse dado poderá ser pesquisado através do site www.cresesb.cepel.br. Para o sul do Brasil considera-se entre 3,5 e 4. Para o Nordeste entre 4 e 5.

F_{pp} - Fator de perda de potência: Pode ser estimado dividindo-se a tensão da bateria pela tensão de máxima potência do módulo a ser utilizado. Esta perda se deve ao fato da tensão da bateria (12 V) ser inferior à tensão de máxima potência do módulo a ser utilizado ($V_{mp} = \pm 17,4$ V para os módulos Kyocera 87 Wp-12 V). Um valor prático $12 \text{ V} / 17,4 \text{ V} = 0,69$. Estas perdas podem ser reduzidas através do uso de um controlador de carga com seguidor de máxima potência (MPPT).

F_{ps} - Fator de perdas e segurança: Necessário para levar em conta a redução da geração do módulo devido à tolerância na fabricação (os módulos normalmente tem uma tolerância em relação à potência nominal de $\pm 3\%$), temperatura de trabalho (quase sempre maior que os 25°C da condição padrão de testes), poeira sobre o vidro, degradação com o tempo, presença de sombras em parte do dia, desvios na orientação e na inclinação e também devido às perdas elétricas na bateria, no controlador e na fiação, além de incertezas sobre os dados utilizados e o consumo previsto. Valor típico: 0,8.

Uma estimativa prática para projetos de pequenos sistemas em regiões ensolaradas (4h de Sol pleno no mês mais crítico) é considerar que cada Wp de módulos fotovoltaicos disponibiliza para a carga aproximadamente 2,21 Wh/dia ou 66,2 Wh/mês de energia elétrica.

1.4.3 Dimensionamento do controlador de carga

O dimensionamento do controlador de carga baseia-se, principalmente, na definição dos níveis máximos das correntes elétricas que passam por ele, tanto as provenientes do módulo fotovoltaico, quanto as que são solicitadas pela carga. A corrente elétrica máxima (de curto-circuito) que os módulos fotovoltaicos podem fornecer em condições de Sol pleno pode ser extraída das

informações técnicas fornecidas pelo fabricante. A corrente elétrica máxima demandada pelas cargas pode ser conhecida a partir do levantamento de cargas realizado. Caso o inversor esteja conectado diretamente à bateria somente as correntes solicitadas pelos equipamentos de corrente contínua passam pelo controlador de cargas. Adotar o maior valor encontrado nos dois cálculos (está incluída nas formulas um fator de 1,1 como uma folga de segurança).

O cálculo da corrente do controlador de carga, do lado das cargas, pode ser obtido através da expressão:

$$\text{Corrente do controlador de carga (A)} = \frac{\text{Potencia das cargas CC (Watts)} \times 1,1}{\text{Tensão do banco de baterias(V)}}$$

Para cálculo da corrente do controlador de carga proveniente dos módulos usar a fórmula abaixo considerando a corrente de curto circuito total do arranjo de séries de módulos utilizados. O valor da corrente de curto-circuito de um módulo pode ser obtido do catalogo técnico do mesmo. Não esquecer que nas ligações em paralelo as correntes se somam e nas ligações em serie não.

$$\text{Corrente do controlador de Carga (A)} = \text{Corrente de curto-circuito de cada módulo (A)} \times \text{número de módulos em paralelo} \times 1,1$$

Com base na corrente de curto-circuito de um módulo de 87 Wp-12 V que é 5,34 A se pode estimar que a corrente de curto circuito de um conjunto de módulos ligados em paralelo (sistema de 12 V) é de aproximadamente 0,061 A/Wp (metade em sistema de 24 V).

$$\text{Corrente do Controlador de Carga (A)} = \text{Potencia do gerador fotovoltaico escolhido (Wp)} \times 0,061 \text{ (A/Wp)} \times 1,1$$

1.4.4 Dimensionamento do inversor

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento do inversor são as tensões de entrada e saída e a potência nominal de uso contínuo e de curta duração. O inversor deve ser capaz de fornecer a tensão e a corrente elétrica demandada pelos equipamentos que funcionam em corrente alternada tanto na operação normal quanto em condições transitórias como, por exemplo, na partida de motores. Os demais parâmetros podem ser definidos com base no exposto no capítulo 9.

Para o dimensionamento do inversor, verificar a potência total das cargas de CA (Retirar da tabela do levantamento de consumo de eletricidade) e selecionar um inversor com capacidade mínima 10% acima. A tensão de entrada deve ser igual à tensão das baterias e a de saída igual à tensão das cargas de corrente alternada. Se o levantamento de cargas resultou na soma das cargas instaladas em corrente alternada é 100 W, o inversor deve ter uma capacidade mínima para operação contínua de 110 W.