

ANALISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS ATRAVÉS DE ÍNDICES DE MÉRITO

¹Luis Horacio Vera e ²Arno Krenzinger

¹Universidad Nacional del Nordeste. Grupo en Energías Renovables de la Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura, Avenida Libertad 5460 Corrientes – Dpto. Ingeniería Electromecánica, Av. Las Heras 727, Resistencia-Chaco
lh_vera@yahoo.com.ar

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica. Sarmento Leite 428, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO: Para determinar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos autônomos (SFA) pode-se realizar uma simulação e analisar o fluxo energético em cada etapa de conversão ou utilizar diferentes parâmetros que permitam, de formas simples, avaliar seu funcionamento. Neste sentido, a norma IEC 61724 define os principais parâmetros, ou índices de mérito, que permitem a comparação de diferentes sistemas fotovoltaicos. Neste trabalho examinam-se os índices que a norma propõe e avalia-se se são adequados para conhecer o desempenho de SFA. Esta verificação é realizada a través de simulações efetuadas sobre diferentes configurações de SFA. Os resultados obtidos têm mostrado que os índices da norma não são suficientes para o análise adequado dos SFA. Fato pelo que se propõe o uso de um novo índice que considera o efeito que o sistema de acumulação produz. Desta forma, a metodologia que se apresentada resulta útil para determinar o desempenho real e confiabilidade de um SFA quando é analisado utilizando os índices de mérito.

Palavras chave: Energia Solar, Sistemas Fotovoltaicos Autônomos, Índices de Mérito.

INTRODUÇÃO

Países com economias emergentes y com uma parcela significativa da população morando em zonas rurais isoladas e ainda sem acesso à energia elétrica e serviços sociais básicos, encontraram na tecnologia solar fotovoltaica uma possível resposta para estas deficiências.

No processo de eletrificação utilizando sistemas fotovoltaicos autônomos (SFA) existem três fatores principais que incidem no seu correto funcionamento ao longo do tempo: uma adequada qualidade dos componentes, um bom dimensionamento das instalações e, quando acontecer uma falha, que uma correta e rápida manutenção seja efetuada. Se estes fatores não forem considerados, em caso de falha, a instalação deixa de cumprir sua função, provocando a insatisfação dos usuários com a consequente desconfiança nesta tecnologia. Problemas técnicos ainda estão presentes nas instalações (Copetti e Macagnan 2007; Jossen 2004, Bello et al 2008, 2009, 2010) mostrando que além de melhorar a qualidade individual de cada componente, deve ser considerado seu comportamento dentro das condições reais de operação durante o tempo de vida estimado.

Para determinar o correto funcionamento, e assim ter um sistema confiável, é importante analisar a experiência existente nesta área e contar com uma metodologia que permita comparar o funcionamento de diferentes sistemas instalados. No entanto, a avaliação e registro de falhas não são comuns. Quando se tem esta informação, em geral, não se especificam os modos de falha, nem sua evolução temporal. Esta deficiência de dados, acompanhada pela falta de estudos sistemáticos sobre o desempenho em longo prazo dos sistemas, tem impulsionado uma multiplicação de estudos devido ao incremento no número de instalações (PERMER, 2008; Luz para Todos, 2007).

Analisar o desempenho de SFA tem levado à criação de diferentes metodologias de dimensionamento e simulação, para prever o comportamento destes sistemas, e assim poder garantir sua confiabilidade com o mínimo investimento, mas, desde o ponto de vista técnico, muitas vezes é necessários contar com parâmetros de simples interpretação que permitam conhecer o desempenho do sistema analisado. Portanto, é importante desenvolver um procedimento que permita conhecer o desempenho de SFA para uma determinada configuração, considerando uma metodologia complementar entre valores simulados e índices técnicos, que permitam analisar sua confiabilidade e os principais problemas presentes nas instalações.

Uma forma de realizar isto é através de parâmetros padronizados que identifiquem o desempenho dos sistemas. Estes parâmetros devem permitir a detecção de problemas operacionais, facilitando a comparação de sistemas de diferentes desenhos, tecnologia e localização geográfica. Desta forma, se dimensionam sistemas com uma maior confiabilidade e qualidade do sistema. Estes métodos padronizados de classificação dos sistemas também ajudam a enquadrar os sistemas dentro de uma expectativa apropriada, aumentando a credibilidade na tecnologia.

Os parâmetros padronizados se baseiam principalmente relacionando os fluxos energéticos e têm sido utilizados pelo programa de IEE PVPS (2000), estão definidos na norma IEC 61724 (1998). Estes parâmetros, também denominados índices de desempenho energéticos ou índices de mérito, consideram os diferentes tipos de perdas que podem acontecer nos SFA.

Estas perdas se devem a diferentes fatores e variam segundo cada sistema. Os principais fatores que ocasionam que a energia que o sistema entrega seja menor que a nominal são apresentados na Tabela 1. Nesta tabela, Analisa-se especificamente as perdas de geração, no balanço das mesmas não são ponderadas as perdas no sistema de acumulação e considera-se que o sistema sempre esta polarizado no ponto de geração ótimo.

Fatores	Valores típicos	Intervalo
Potencia nominal especificada pelo fabricante	1.00	0.85 – 1.05
Degradação inicial	0.98	0.90 – 0.99
Perdas nos fios DC	0.98	0.97 – 0.99
Perdas nos diodos e conexões	0.995	0.99 – 0.997
Perdas por dispersão nas características elétricas	0.98	0.97 – 0.985
Perdas de conversão	0.96	0.93 – 0.96
Perdas nos fios AC	0.99	0.98 – 0.993
Poeira	0.95	0.75 – 0.98
Sombras	1.00	0.0 – 1.00
Perdas em condições standard (ABNT NBR12136, 1991)	0.804	0.62 – 0.92
Temperatura (45°C)		0.91
Perdas em condições de operação		0.731

Tabela 1. Fatores que diminuem a capacidade nominal de geração em SFA com tecnologia cristalina (Marion, 2005).

Analisando os valores da Tabela 1 observa-se que o principal fator que afeta na capacidade nominal de um dispositivo FV deve-se ao efeito de temperatura. Isto se evidencia em sistemas que não apresentam alguma anomalia nos elementos que o conformam o que os efeitos de sombreamento não são importantes.

No caso de ter um sistema que onde os fatores de diminuição apresentados sejam igual à unidade, o valor do fator de temperatura sempre produz uma diminuição na capacidade de geração que como mínimo pode ser da ordem do 10 %, fato que permite delimitar desde um primeiro momento o valor máximo de eficiência de captura do arreglo FV. Em condições de operação um valor típico de diminuição de é da ordem de 27% da potencia nominal do gerador. Avaliando as perdas totais em um SFA, considerando a eficiência das baterias, o fator de perdas de operação atinge um valor próximo de 0,65.

ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

Uma forma de avaliar o desempenho energético dos sistemas fotovoltaicos, como foi explicado anteriormente, é através dos chamados índices de mérito. Estes índices foram utilizados pelo programa de avaliação energética da Comunidade Econômica Européia em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (Dias, 2006), e sua utilização pode ser estendida para a análise de sistemas fotovoltaicos autônomos, realizando algumas considerações sobre sua definição (Montenegro et al, 2008; Mayer e Heidenreich, 2003).

Parâmetros de Desempenho Energético ou Índices de Mérito

Os índices de mérito determinam-se através de uma serie de relações energéticas que permitem a comparação do desempenho de sistemas fotovoltaicos de diferentes configurações, intervalos de tempo e condições de operação. Entre estes índices podem-se destacar os seguintes:

A *Eficiência Global do Sistema* (η_s) representa a fração de energia solar convertida em energia elétrica entregue ao consumidor (Eq. 1). Este índice geralmente é apresentado e forma percentual.

$$\eta_s = \frac{E_{Cons}}{E_{ger}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{Cons}(t) dt}{A_{ger} \int_{\Gamma} G(t) dt} \quad (1)$$

onde, E_{Cons} é a energia elétrica entregue ao consumidor ou usuário, em kWh; E_{ger} representa a energia solar disponível no gerador para a conversão, em kWh; P_{Cons} é a potência elétrica entregue ao consumidor ou usuário, em kW; G representa a irradiância no plano do gerador, em kW/m²; Γ representa o período de operação do sistema, e A_{ger} representa a área do gerador, em m².

O *Fator de Capacidade* (CF) representa a capacidade de gerar energia elétrica em função da energia nominal instalada, considerando que o sistema opera durante as 24 horas do dia (Eq. (2)). Este índice geralmente é apresentado em forma percentual e é um parâmetro muito utilizado para comparar a capacidade de geração de diferentes tipos de fontes de energia.

$$CF = \frac{E_{Cons}}{E_{STD}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{Cons}(t) dt}{\int_{\Gamma} P_{STD} dt} \quad (2)$$

onde, P_{STD} representa a potência real instalada em [kW_p], E_{STD} representa a energia real na condição padrão, expressa em kW_p.h.

Em um sistema fotovoltaico a potência nominal do gerador P_{nom} , dada em kW_p, é determinada na condição padrão de medida e a potência real instalada P_{STD} deriva desta última.

A *Produtividade* (Y , kWh/kW_p.d) pode ser determinada tanto para o gerador quanto para o sistema. Esta representa a quantidade de energia elétrica gerada por cada kW_p instalado. Pode ser expressa em h/d, e representa o número de horas no qual o sistema opera na condição padrão no período considerado.

A *Produtividade do Gerador* (Y_A , h/d) é determinada pela Eq. (3) e representa uma relação entre o valor médio da energia diária produzida pelo gerador e a potência P_{STD}

$$Y_A = \frac{1}{P_{STD}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} P_{util}(t) dt \right] \quad (3)$$

onde P_{util} representa a potência que é entregue à bateria ou consumida pelo usuário, sem considerar a energia disponível que não foi utilizada nos momentos que o sistema de gerenciamento de carga da bateria limita este processo, sua integral representa a energia entregue à bateria E_{util} , em kWh

A *Produtividade do Sistema* (Y_F , h/d) é determinada pela Eq. (4) e representa uma relação entre o valor médio da energia elétrica diária entregue à rede e a potência P_{STD} . Esta produtividade representa a energia diária que é subministrada ao usuário normalizado pela potência nominal do arreglo fotovoltaico.

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \left[\frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} P_{Cons}(t) dt \right] \quad (4)$$

O *Desempenho Global do Sistema* (PR) é determinado pela relação entre a energia líquida gerada pelo sistema, em um determinado período de tempo, e a energia realmente disponível no mesmo período de tempo. A Eq. (5) determina PR por meio da razão entre a produtividade do sistema Y_F e a produtividade de referência Y_R .

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (5)$$

onde, $Y_R = \frac{H(\gamma, \beta^*)}{G_{ce}}$ é a produtividade de referência, em (h/d) e G_{ce} é a irradiância de 1 kW/m². Desta forma, Y_R representa o

parâmetro também conhecido com horas de sol nominal ou horas de sol pleno.

$H(\gamma, \beta^*)$ expressa a irradiação média diária no plano do gerador em kWh/m².dia, para o desvio azimutal local γ e inclinação em relação ao plano horizontal β^* (Eq. (6))

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} G(t) dt \quad (6)$$

O desempenho global é utilizado para caracterizar a operação de diferentes sistemas fotovoltaicos, principalmente em sistema fotovoltaicos conectados à rede, e representa a energia que realmente é utilizada no sistema em relação à energia do sistema em condições padrão.

As *perdas de captura* (L_C , h/d) e *perdas do sistema* (L_S , h/d) são utilizadas em análise comparativa de sistemas fotovoltaicos, e são determinadas através das Eqs. (7) e (8).

$$L_C = Y_R - Y_A \quad (7)$$

$$L_S = Y_A - Y_F \quad (8)$$

As perdas do sistema são produzidas pela conversão de energia no inversor e pelas perdas do sistema de acumulação. As perdas de captura devem-se as perdas no arreglo fotovoltaico.

No momento de comparar os SF principalmente são utilizados os seguintes indicadores: Y_F , Y_R , PR . Entre estes índices encontram-se as perdas de captura L_C e de sistema L_S , as quais têm uma forte relação com as perdas de energia na entrada e saída das baterias.

Devido à quantidade de índices existentes, em geral, o PR e o Y_F são os mais utilizados no momento de comparar o desempenho de diferentes sistemas, e são os valores que muitas vezes se encontram em relatórios que apresentam o desempenho de SF. Para análises específicas são utilizados os índices mais representativos para cada estudo.

No IEA-PVPS (Report IEA-PVPS T2-01, 2000) sistemas fotovoltaicos autônomos, híbridos e conectados à rede foram avaliados nos termos do desempenho e da confiabilidade. A Figura 1 mostra a distribuição dos *PR* para 27 sistemas híbridos e autônomos. O *PR* anual varia de 0,2 a 0,6 para aplicações domésticas isoladas dependendo se têm um sistema de *back-up*, e 0,05 a 0,25 para os sistemas que são super dimensionados para razões de confiabilidade (denominados sistemas profissionais).

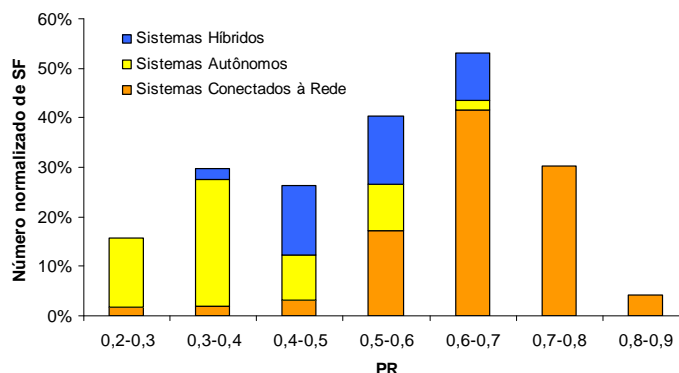


Figura 1. Índices de desempenho para diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos analisados pelo programa IEA-PVPS (2000).

O IEA-PVPS também analisou os dados anuais de 260 sistemas fotovoltaicos e determinou a faixa de *PR* para os diferentes tipos de sistemas, obtendo os seguintes resultados:

- Sistemas conectados à rede PR = 0,6 – 0,8
- Sistemas Híbridos PR = 0,3 – 0,6
- Sistemas fotovoltaicos autônomos PR = 0,1 – 0,6

Os baixos valores de *PR* que apresentam os SFA muitas vezes devem-se ao fato de que por ser o único sistema de geração, estes são superdimensionados para evitar as possíveis falhas que poderão acontecer em sistemas com um dimensionamento mais conservador. Dimensionamentos “exatos” muitas vezes não consideram efeitos como: perda de capacidade das baterias, menor valor de radiação anual que os valores tomados como referência, perdas de energia no sistema de geração, gerenciamento errado da carga e descarga da bateria, etc., que são prováveis causas que levariam à falha do sistema antes do previsto. Para os sistemas híbridos, em geral, possuem valores de *PR* mais elevadas que sistemas FV autônomos sem apoio. O *PR* de sistemas fotovoltaicos conectados à rede é superior.

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SFA

No momento de avaliar a instalação de um sistema fotovoltaico autônomo, os principais requisitos que estes sistemas devem satisfazer são: ser técnica e economicamente viáveis e assegurar o fornecimento contínuo de energia, ou seja, devem ser confiáveis. Para atingir estas metas é necessária uma apropriada determinação do comportamento deste tipo de sistemas.

Para SFA o valor de *PR* tem uma forte dependência com a demanda de energia, efeito que não afeta o desempenho dos SFCR. Um SFA que não opera de forma apropriada pode mostrar um *PR* baixo, mas o recíproco não é certo, ou seja, um SFA que apresenta um elevado *PR* não indica que o sistema trabalhe em forma apropriada (Mayer, 2001).

Exame realizado por Mayer (1999) sobre a norma IEC 61724 e as diretrizes européias para calcular os índices de mérito expõe que nas normas IEC existe a intenção de utilizar a mesma definição de índices de avaliação do desempenho de sistema para todas as fontes de energias. No entanto, para os sistemas autônomos deve considerar-se uma modificação sobre o cálculo da energia útil devido ao efeito de acumulação da bateria.

Para realizar uma análise mais adequada Mayer (2003) propõe a introdução de parâmetros adicionais para a avaliação de sistemas autônomos e sistemas híbridos. Estes parâmetros são denominados fator de utilização (*UF*), expresso pela Eq. (9), e fator de acoplamento ou *matching factor* (*MF*), este último é apenas utilizado em sistemas híbridos, que não serão analisados neste trabalho.

$$UF = \frac{E_{util}}{E_{Total}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{util}(t) dt}{\int_{\Gamma} P_{Total}(t) dt} \quad (9)$$

onde P_{Total} representa a potência que o arranjo fotovoltaico tem capacidade de fornecer sem considerar a energia não aproveitada pelo sistema devido aos cortes do controlador de carga (com ou sem seguidor de ponto de máxima potência), E_{Total} representa a energia potencial que o arranjo fotovoltaico tem capacidade de fornecer, E_{util} representa a energia entregue à

bateria ou consumida pelo usuário, em kWh e P_{util} representa a potência que é entregue à bateria ou consumida pelo usuário, sem considerar a energia disponível que não foi utilizada nos momentos que o sistema de gerenciamento de carga da bateria limita este processo.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO

A metodologia de análise do desempenho energético realizada neste trabalho teve como ponto fundamental realizar uma avaliação dos resultados obtidos de um ano de simulação de diferentes perfis de demanda, para uma mesma instalação FV e, verificar o comportamento dos índices de desempenho para diferentes configurações do sistema (modificando a capacidade de geração e acumulação). Desta forma, podem ser comparados os índices com os resultados do comportamento geral para cada perfil de demanda, configuração e determinar como eles variam.

Através de uma simulação é possível estimar o desempenho do sistema sob diversas condições de funcionamento, variando parâmetros que em tempo real poderiam corresponder a anos de operação. Os métodos de simulação numérica oferecem a possibilidade de melhorar o sistema incorporando modelos mais completos permitindo assim analisar aspectos adicionais, como por exemplo: a inclusão de novos elementos no sistema; informação sobre o funcionamento futuro da instalação, confiabilidade do sistema e o cálculo dos índices de desempenho a través dos dados de fluxo energético.

As simulações acompanhadas do cálculo dos Índices de Mérito tem por objetivo verificar se os mesmos permitem caracterizar adequadamente um SFA, de maneira de poder corroborar se o dimensionamento foi adequadamente realizado.

Em esta primeira etapa será realizado uma análise teórico para apresentar os valores que se determinam através de modelos numéricos. Na evolução do estudo será aplicado o método a instalações reais, localizadas em diferentes lugares de latino America, com os dados necessários para o cálculo dos índices e se verificara o comportamento experimental e teórico.

Cálculos dos Parâmetros de Desempenho Energético

Para analisar o efeito de diferentes perfis de carga em SFA escolheram-se dois tipos de distribuições de consumos diários de 10 kWh/dia. Os perfis escolhidos são de consumo noturno e diurno (Figura 2).

O valor de 10 kWh dia não considera o efeito da eficiência do inversor, fato que revela que a carga real demandada é maior. Este aumento na demanda estará diretamente associado ao ponto de trabalho do inversor. Considerando a eficiência do inversor, a demanda energética diária é de aproximadamente 11 kWh/dia, produzindo um consumo anual de energia de aproximadamente 4000 kWh. A capacidade de geração considerada na simulação foi de 2,43 kWp para uma acumulação de 2,4 kA.

Todas as simulações foram realizadas com um inversor de 3 kW, baterias de 100 Ah de capacidade com um EC inicial igual a 100% e módulos fotovoltaicos de 54 Wp orientados para o norte geográfico e inclinados 10° em relação da horizontal. A instalação simulada estará localizada em latitude 2° Sul e longitude 56° Oeste porque encontra-se implantada neste lugar uma das instalações experimentais a serem analisadas.

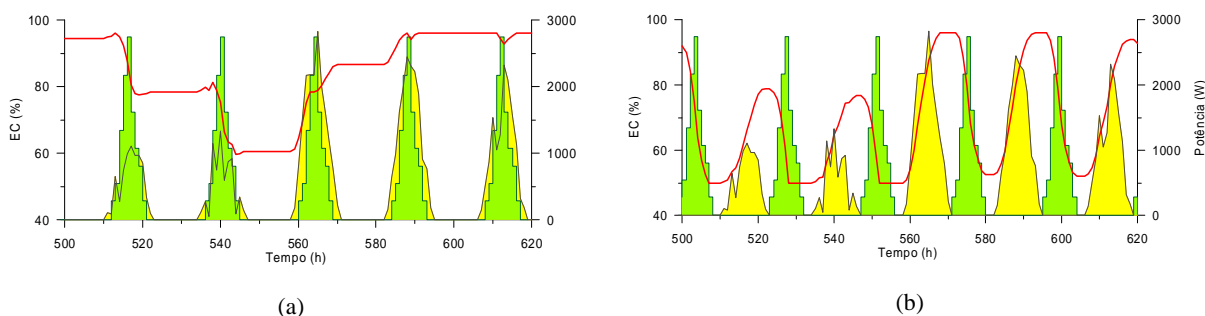


Figura 2. Variação do estado de carga da bateria (EC) para um SFA sob demanda de energia a) diurna e b) noturna, EC (vermelho), geração (amarelo) e ao consumo (verde) diurno e noturno.

Todos os componentes utilizados na simulação foram modelados segundo dados do próprio fabricante e a metodologia de simulação utilizada é a proposta por Vera (2009) onde se considera a variação do estado de carga do sistema de acumulação para determinar o ponto de polarização de arreglo fotovoltaico (não se implementou o sistema de seguimento de ponto de máxima potência). Para o caso particular do controlador de carga utilizou-se na descarga uma tensão de corte correspondente a um valor de estado de descarga da bateria de 50%, e para o corte por sobrecarga o valor adotado foi de 96%.

RESULTADOS

A Figura 3 a) mostra as produtividades mensais de referência (Y_R) e do gerador (Y_A). A produtividade do sistema (Y_F) não é apresentada porque ao ser a demanda igual para cada um dos perfis o valor de Y_F também será igual, e tem um valor 2,25 h/dia. Este fato deve-se a que em sistemas onde não há falhas, a energia que é demandada é totalmente suprida já seja pelo sistema de geração o pelo sistema de acumulação. O subscrito n nas legendas faz referencia a valores calculados com perfis noturnos e o subscrito d a perfis diurnos.

Verifica-se na Figura 3 a) que a produtividade do gerador apresenta pequenas diferenças entre os valores calculados com diferentes perfis. Analisando os valores de produtividade do gerador para consumo noturno observa-se um valor maior de Y_F . Isto ocorre porque quando existe um descasamento entre demanda e geração de energia (como quando se consome energia de noite) a bateria passa a ser o elemento que vincula a passagem de energia e está passagem encontra-se afetada pela eficiência da bateria. Nesta circunstancia é necessário fornecer mais energia que a que realmente é demandada. Por outro lado, quando existe um casamento (energético e temporal) entre a energia demandada e gerada, a bateria faz o papel de dispositivo de polarização para o sistema de geração, sem que sua eficiência afete a passagem de energia. Por esta razão, um sistema com demanda noturna utiliza mais energia que um sistema com demanda diurna e, em consequência, a produtividade do arranjo fotovoltaico passa a ser maior.

O exposto anteriormente serve também para explicar porque a eficiência do arranjo η_{fv} para demanda noturna é maior, como mostra a Figura 3 b).

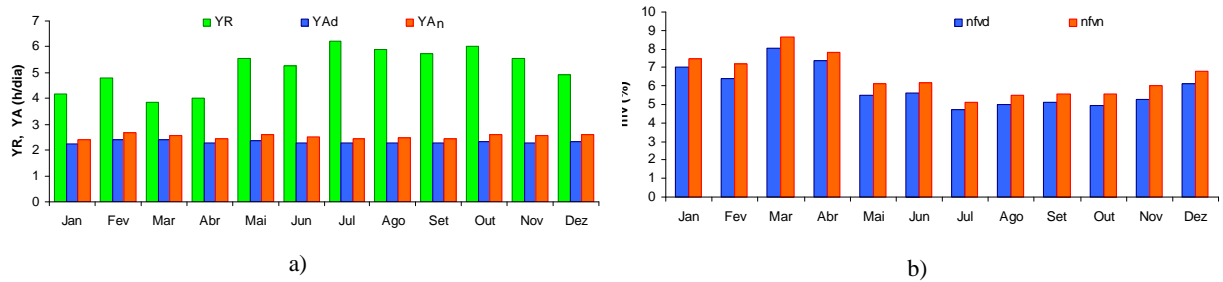


Figura 3. a) Produtividade de referência e do gerador para perfil de demanda noturno e diurno b) Eficiência mensal do arranjo fotovoltaico para perfil de demanda noturno e diurno.

O valor da eficiência global η_s e o desempenho global (PR) para ambos os casos apresenta a mesma tendência devido a que a energia gerada e demandada são iguais. A eficiência global média do sistema tem um valor de 5,8% enquanto a eficiência do arranjo para consumo diurno é de 6% e para consumo noturno de 6,5%.

Na Figura 4 a), é apresentado o desempenho global mensal para cada categoria de perfil e observa-se que o PR tem um valor maior que de noite e tem um valor médio anual da ordem de 45%. As perdas de sistema e de captura são apresentadas na Figura 4 b). Estas perdas ilustram em cada dia quantas horas a energia é desperdiçada. Nesta Figura observa-se que as perdas de captura são expressivas e apresentam uma pequena diferença entre os diferentes tipos de perfis analisados, enquanto as perdas de sistema apresentam uma menor magnitude e estão associados às diferenças entre a energia que entra e sai da bateria. Neste último caso verifica-se que as perdas noturnas são maiores devido que o sistema de acumulação nunca trabalha como elemento de passagem direta de energia desde gerador à carga. Na simulação realizada como se utiliza o mesmo inversor e o mesmo perfil de demanda as perdas associadas à conversão são as mesmas para ambos os perfis.

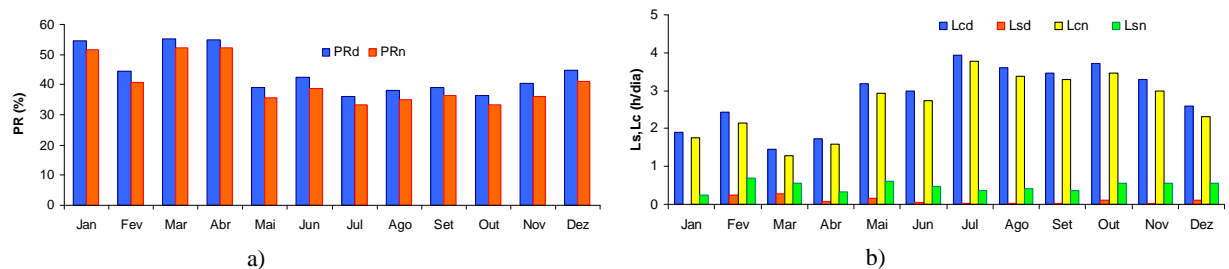


Figura 5. a) Desempenho global mensal para um perfil de demanda noturno e diurno. b) Perdas do sistema e de captura em função do perfil de demanda de energia

Nas figuras anteriormente apresentados, observa-se que os índices apresentados não têm a capacidade de caracterizar adequadamente sistemas fotovoltaicos autônomos, devido a que os resultados ficam ligados com as características e desempenho do sistema de acumulação.

Um índice que relaciona a energia circulante que entra e sai da bateria pode ser calculado através da relação de Y_F/Y_A e permite determinar o sistema que aproveita melhor a energia que sai do sistema de geração. Observa-se que a maior relação é obtida quando o sistema é submetido a um perfil de demanda diurno, atingindo um valor médio anual de 98%, enquanto para o mesmo sistema submetido a uma demanda noturna o valor desta relação apresentou um valor anual médio de 89%. Analisando este valor em conjunto com a confiabilidade pode-se determinar o sistema com a configuração mais adequada. Para sistemas com igual confiabilidade (como neste estudo) pero com diferentes valores de Y_F/Y_A , o sistema que apresente um maior valor desta última relação será o mais adequado.

Análise de Diferentes Configurações

Até o momento analisou-se o comportamento de um SFA utilizando os índices de mérito e determinou-se as principais características de definem seu desempenho. Pode se estabelecer que os índices calculados permitam comparar ambos os

sistemas com configurações diferentes, mas não oferecem informação alguma sobre sua confiabilidade. Esta primeira análise é correta quando não existem falhas no sistema (incapacidade de satisfazer a demanda).

Para avaliar como o principal parâmetro de desempenho de estes sistemas evolui, na Figura 6 apresentam-se três gráficos de barras com o valor de PR calculado para diferentes configurações de SFA com igual demanda de energia.

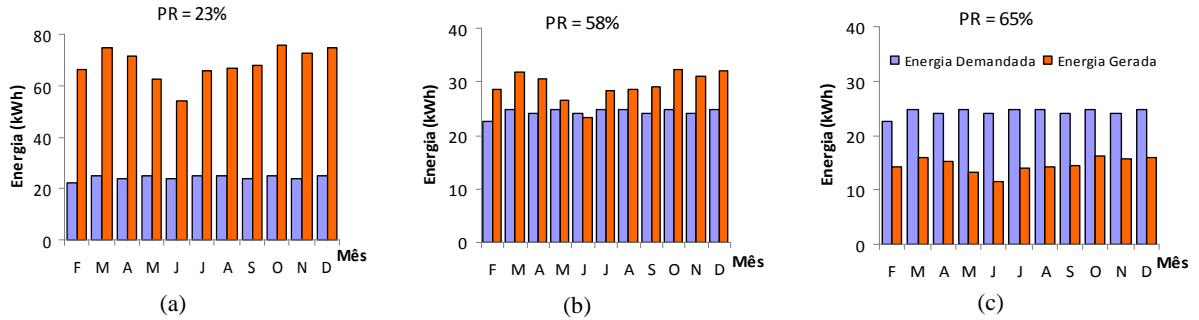


Figura 6. Valor de desempenho global para diferentes SFA. (a) Capacidade de geração superdimensionada, (b) Capacidade de geração bem dimensionada, (c) Capacidade de geração subdimensionada.

Na Figura 6 (a) apresenta-se a energia demandada e fornecida através de uma determinada configuração de SFA, neste caso a capacidade de geração esta superdimensionada, fato que se verifica confrontando a magnitude da energia mensal gerada e demandada. Esta configuração faz que o PR do sistema seja baixo e atinja um valor de 23%. Modificando a relação entre geração e demanda chega-se à Figura 6 (b), onde se confere que a relação entre a energia de geração e a demandada tem valores próximos e se tem um valor de PR mais elevado que para a primeira configuração. Uma análise do sistema utilizando apenas o valor de PR permitiria concluir que o segundo sistema teria uma melhor configuração. Analisando a Figura 6 (c) confere-se que, para um sistema no qual a energia mensal gerada é menor que a energia demandada, PR alcança um valor mais elevado (65%). Utilizando apenas o parâmetro PR para analisar a qualidade do sistema induziria a concluir que este último SFA, no qual existiriam falhas, é o que apresenta a melhor configuração. Neste caso o valor desta relação pode superar o valor de 100%, o que indica a necessidade de examinar se algum outro índice pode prever esta situação

Desta forma, uma análise de sistemas autônomos nos termos da PR mostra que o este índice não reflete as condições apropriadas de operação, como no caso de SFCR. Da análise realizada, confirma-se que o valor de PR não é um parâmetro adequado para avaliar a condição real de operação de SFA.

Combinação de Índices para Determinação do desempenho de SFA

Para considerar a aparição de falhas no sistema deve ser utilizado um segundo fator de análise. Este novo fator origina-se de uma relação entre dois índices, um primeiro índice denominado fator de utilização (UF), definido por Mayer (2003), e outro que considera a energia aproveitada pelo sistema de acumulação e a energia recebida pelo sistema de geração. Este segundo índice denomina-se fator de demanda (FD) e considera a energia demanda e a energia que não foi suprida (Eq. (10)).

$$FD = \frac{E_{util}}{E_{deman}} = \frac{\int_{\Gamma} P_{util}(t) dt}{\int_{\Gamma} P_{deman}(t) dt} \quad (10)$$

onde P_{deman} representa a potência demandada pelo usuário considerando a potência que o sistema não foi capaz de fornecer (P_{cons} mais potencia não suministrada) e E_{deman} representa a energia demandada pelo usuário considerando a energia que o sistema não foi capaz de fornecer.

Relacionando estes dois índices obtém-se um modificador do Fator de utilização (MUF) que permite relacionar a energia que foi fornecida com a demandada que não foi consumida (Eq. (11)).

$$MUF = UF.FD \quad (11)$$

Um sistema com um PR e MUF elevado representa um sistema com uma boa configuração, que aproveitará adequadamente o potencial instalado de geração fotovoltaica e que não apresentará falhas. Desta forma, combinando estes dois fatores através de um gráfico onde são apresentados os valores destes fatores para diversas simulações de sistemas com diferentes configurações (Figura 7), pode-se determinar rapidamente se o sistema apresenta problemas técnicos ou problemas de desenho. É importante destacar que no ponto máximo de uma curva $MUF-PR$ o sistema possui falhas, ou seja, a confiabilidade não é 100%. Da Figura 7 pode-se destacar que, com a combinação destes índices, obtém-se uma curva que apresenta um limite de PR para qual o sistema ainda possui elevada confiabilidade, após este limite o sistema apresenta uma configuração inadequada.

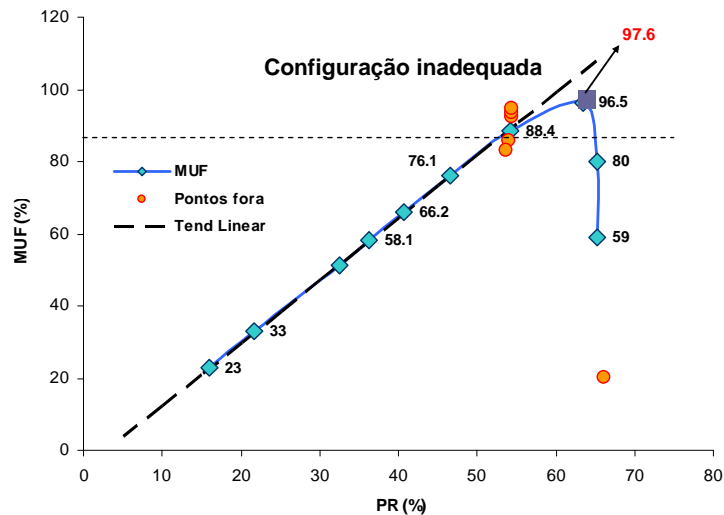


Figura 7. Comportamento do fator *MUF* em relação com o valor de *PR* calculado para um SFA com diferentes a configurações.

Para obter a Figura 7 foi realizada uma sucessão de simulações de um SFA com diferentes relações de capacidade de geração e acumulação. A tendência linear que mostra a figura até aproximadamente um *MUF* de 85 correspondem a sistemas com diferentes configurações onde a demanda de energia foi totalmente satisfeita, após este valor de *MUF* a curva perde a tendência linear e as simulações apresentam as primeiras falhas no sistema. A configuração que atingiu o valor máximo do *MUF* resultou em 214 horas de falta de fornecimento energia, o que assegura que, para um ano de simulação, o usuário terá energia elétrica o 97,5 % das vezes que a demande. A quantidade de horas de falhas que o sistema apresenta na região onde o *MUF* é máximo é menor que as 648 horas de tempo máximo de “Duração de Interrupções por Unidade Consumidora” (DIC) definida na Resolução Normativa N° 83/2004 da ANNEL. Dentro desta DIC considera-se também o tempo transcorrido entre a notificação da falha técnica (não apenas por atuação do controlador de carga) e a volta a um correto funcionamento do sistema. Os pontos que ficam fora da tendência linear correspondem a configurações que apresentam falhas ou sistemas donde não há falhas, mas a capacidade de geração é maior que do necessário.

Considerando que as falhas que um programa de simulação determina devem-se à falta de energia por atuação do controlador de carga, é necessário que a simulação calcule uma quantidade menor de horas de falha que as estipuladas na Resolução Normativa para considerar o tempo transcorrido até solucionar possíveis problemas técnicos de outra natureza. Sistemas com elevada confiabilidade são obtidos para valores de *MUF* menores que 85% e valores de *PR* abaixo de 50 %.

Simulando sistemas com diferentes configurações e diferentes perfis de demanda corroboram-se pequenas variações na inclinação da curva dentro da região de comportamento linear, fato que também determinou Mayer (2003) em sistemas reais. O resto da curva tem um comportamento similar. Quando uma determinada configuração de SFA estiver fora da região ótima, existiram perdas na captação da energia, perdas na transmissão de energia ou existiram falhas recorrentes no sistema. Da análise das sucessivas simulações realizadas pode concluir-se que o valor de *PR* para SFA ótimos encontra-se em um valor entre 50 y 60 %, enquanto o novo parâmetro proposto atinge um valor próximo de 80%

CONCLUSÕES

Um dos pontos fundamentais na determinação da qualidade técnica de sistemas fotovoltaicos autônomos é determinar seu desempenho e sua confiabilidade. Razão pela qual foram realizadas simulações de uma determinada configuração de SFA ao longo de um ano. Neste sistema se definiu um perfil de consumo noturno e diurno para uma mesma configuração com uma confiabilidade de 100%. Após a simulação, foram calculados os índices de mérito definidos pela norma IEC 61724 com o intuito de verificar se os índices determinados são suficientes para avaliar corretamente o SFA.

Uma análise de sistemas autônomos nos termos da *PR* mostra que o este índice não reflete as condições apropriadas de operação, como no caso de SFCR. Ponderar o desempenho de SFA utilizando apenas o valor de *PR* não é suficiente, desde o ponto de vista técnico, para avaliar a condição real de operação. Por esta razão se propõe a combinação do *PR* com um índice (*MUF*) que considera as situações de não suministro de energia e permite determinar o limite máximo que pode apresentar o valor de *PR* para configurações de SFA com elevada confiabilidade. Este novo modificador deriva do emprego do fator de utilização definido por Mayer e outro fator definido neste artigo. Da análise das sucessivas simulações realizadas pode-se concluir que o valor de *PR* ótimo encontra-se em um valor entre 50 y 60 %, enquanto o novo parâmetro proposto, mantendo a melhor configuração, atinge um valor próximo de 80%

Desta forma, uma análise que considere os valores de *PR*, *MUF* permite-levar em conta todos os possíveis problemas que o sistema possa experimentar e assim determinar a melhor configuração técnica.

O artigo apresenta um primeiro estudo que permite a análise de SFA utilizando os índices de mérito; em trabalhos futuros será aplicada a metodologia proposta para comparar os parâmetros de desempenho energético de sistemas experimentais com os resultados de simulações destes sistemas

REFERENCIAS

- Bello C., VERA L., Busso. A., 2009. Proyecto de Electrificación Rural a través de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos en la Provincia de Corrientes. XXXII Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), Río Cuarto, Argentina.
- Dias, J., 2006. Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede. Estudo Experimental para a Otimização do Fator de Dimensionamento. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. IEC
- Bello C., Busso A., Vera L., Cadena C., 2010. Factores Que Afectan El Funcionamiento De Instalaciones Fotovoltaicas Autonomas En Regiones Del Noreste Argentino. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, PP. 4-93, 4-100. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Copetti, J.; Maccagnan, M., 2007. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, CE.
- IEC, "Photovoltaic System Performance Monitoring—Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis, IEC Standard 61724," Geneva, Switzerland, 1998.
- Jossen, A., Garcke, J., Sauer, D. 2004. Operation conditions of batteries in PV applications. Solar Energy, 76, 6, 759-769.
- LUZ PARA TODOS, 2007. Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos. Ministério de Minas e Energia - Eletrobrás, Brasília.
- Marion, B.; Adelstein, J.; Boyle, K.; Hayden, H.; Hammond, B.; Fletcher, T.; Canada, B.; Narang, D.; Kimber, A.; Mitchell, L.; Rich, G.; Townsend, T.; 2005. Performance parameters for grid-connected PV systems. Photovoltaic Specialists Conference, Thirty-first IEEE pp: 1601 - 1606
- Mayer, D., 1999. Analyse des Performances des Systèmes Photovoltaïques: Recommandation sur le Dimensionnement. IEA - International Energy Agency, PVPS Task2.
- Mayer, D., Camez C., 2001. Analyse des Performances des Systèmes Photovoltaïques: Recommandation sur le Dimensionnement. IEA - International Energy Agency, PVPS Task2.
- Mayer, D., Heidenreich, M., 2003. Performance Analysis of Stand Alone PV Systems from A Rational Use Of Energy Point Of View. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan. Copetti
- Montenegro, A.; Monteiro, C.; Borges, E.; Klaus, W.; Schwab, T.; Urbanetz Jr.; Nascimento, L.; Ruther, R., 2008. Análise de dados de monitoramento de sistemas fotovoltaicos domiciliares instalados no Acre. Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar ABENS & III Conferencia Latinoamericana da International Solar Energy Society. Florianopolis, v.1. P.1-12.
- ABNT, 1991. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12136/MB3477 Módulos fotovoltaicos - Determinação de características fotoelétricas, Rio de Janeiro.
- PERMER, 2008 Proyecto De Energías Renovables En Mercados Rurales Secretaría de Energía de la Nación, Argentina
- Report IEA PVPS T2-01, 2000. Analysis of photovoltaic systems. Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH), Emmerthal, Germany.
- Vera, L. H. (2009). Análise do impacto do comportamento de baterias em sistemas fotovoltaicos autônomos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

ABSTRACT

The performance of stand alone photovoltaic systems (SAPS) it may be determinate analyzing the energy flow obtained in simulations or could use technical parameters to asses its operation. The standard IEC 61724 defines the main performance parameters that allow the evaluation of different PV systems. In the present paper have been realised an analysis of this parameters and was evaluated if this parameters represent the performance operation of SAPS. The evaluation is carried out through simulations for different configurations of SAPS. The results have shown that the parameters of standard are not enough to realize an adequate analysis of SAPS and it's proposed the use of a new index that considers the reliability and the effect that the accumulation system produces in of SAPS.

Keywords: solar energy, stand-alone photovoltaic systems, performance index.