

AVALIAÇÕES DE CUSTO E DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO SIGFI COM DIFERENTES PERÍODOS DE AUTONOMIA

Marta Maria de Almeida Olivieri – olivieri@cepel.br

Leonardo dos Santos Reis Vieira – lsrv@cepel.br

Marco Antonio Galdino – marcoag@cepel.br

Márcia da Rocha Ramos – marciar@cepel.br

Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DME - Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar

Resumo. Em função da queda do preço dos módulos fotovoltaicos observada nos últimos anos, o Ministério de Minas e Energia (MME) solicitou ao Cepel uma avaliação técnica e econômica de sistemas do tipo SIGFI (Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente) com maior potência de módulos fotovoltaicos e menor tempo de autonomia em relação aos sistemas SIGFI 45 (com autonomia de 48 horas). Os sistemas SIGFI 45, estabelecidos por resolução da Aneel, são adotados como padrão de atendimento às cargas domiciliares para as famílias localizadas em regiões remotas dos Sistemas Isolados com o uso da fonte de energia solar, no âmbito do Programa Luz para Todos (LpT). Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de avaliações de desempenho e custo dos sistemas não convencionais com menor autonomia em comparação com os sistemas convencionais com autonomia de 48 horas. Os sistemas avaliados foram dimensionados conforme metodologia apresentada pelo LpT para cargas de 45 e 60 kWh/mês, considerando 24 e 48 horas de autonomia. Simulações computacionais indicaram que, nas condições econômicas atuais, a opção por um sistema SIGFI que disponibilize cerca de 60 kWh/mês e com apenas um dia de autonomia apresenta desempenho energético superior e custo inferior ao sistema SIGFI 45 convencional, com 2 dias de autonomia.

Palavras-chave: SIGFI, Programa Luz para Todos, autonomia de bateria

1. INTRODUÇÃO

O programa Luz para Todos (LpT) estabeleceu o sistema SIGFI 45 como padrão de atendimento às cargas domiciliares para as famílias localizadas em regiões remotas dos Sistemas Isolados com o uso da fonte de energia solar. Ao longo dos últimos anos, o custo dos módulos fotovoltaicos vem caindo em maior taxa do que os custos das baterias. Portanto, a princípio, com investimentos semelhantes ao sistema SIGFI 45, seria possível oferecer uma configuração alternativa de sistema SIGFI (Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente), com uma maior quantidade de módulos fotovoltaicos, reduzindo-se, em contrapartida, a quantidade de baterias. Em função disso, o MME solicitou ao Cepel a avaliação técnica e econômica destes sistemas alternativos, em comparação ao sistema SIGFI 45 padronizado. Pretende-se estudar a pertinência de alterar a Resolução Normativa Aneel 493 (Aneel, 2012) que estabelece, atualmente, o critério de autonomia mínima de 2 dias para o dimensionamento dos sistemas do tipo SIGFI.

Este trabalho tem como objetivo apresentar resultados da avaliação de desempenho e custo de sistemas SIGFI dimensionados para cargas totais de 45 kWh/mês e 60 kWh/mês e autonomia do banco de baterias de 24 e 48 horas. Os resultados são comparados aos de sistemas SIGFI 45 (com autonomia de 48 horas), adotados como padrão de atendimento às cargas domiciliares para as famílias localizadas em regiões remotas dos Sistemas Isolados com o uso da fonte de energia solar, no âmbito do Programa Luz para Todos.

2. METODOLOGIA

A avaliação técnica e econômica foi realizada utilizando-se o programa computacional Homer Pro, versão 3.9.2. O programa Homer Pro permite a simulação do desempenho em base horária e estima os custos de geração de energia elétrica dos sistemas. Os principais resultados das simulações são a produção de energia anual (em base horária), o fator de capacidade, os dias e horários em que ocorrem os desligamentos ao longo do ano e os custos de geração de energia. Com base nestas simulações é possível calcular o número total de horas de desligamento (DIC¹) a cada mês e no

¹ Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): Intervalo de tempo que, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica. No caso de violação do DIC, a distribuidora deve calcular a compensação ao consumidor de acordo com o disposto no PRODIST.

período anual de avaliação, cujos valores máximos admitidos são estabelecidos na Resolução Normativa da Aneel N° 493/2012. Opções avançadas de simulação do Homer Pro incluem parametrização, análises de sensibilidade e análises estatísticas.

Em resumo, neste trabalho, foi adotado o seguinte procedimento:

- a) escolha da localidade de referência;
- b) definição da irradiação horária anual;
- c) definição da carga horária diária para o sistema;
- d) dimensionamento dos sistemas SIGFI;
- e) definição dos custos dos equipamentos com base em informações atualizadas de mercado;
- f) simulações do desempenho utilizando o programa Homer Pro;
- g) cálculo do DIC mensal e anual com base nos resultados das simulações;
- h) estimativas do custo de geração de energia (custo parcial) utilizando o programa Homer Pro e preços de equipamentos consultados na internet ou de fornecedores nacionais.

Em todas as simulações foram consideradas as seguintes premissas:

- Carga total do sistema: constituída da carga de um refrigerador adicionada a cargas de outros equipamentos, estas últimas com maior intensidade no período noturno.
- Custos de instalação: foi considerado somente o custo de investimento dos equipamentos principais. Os custos de mão de obra e transporte para a instalação não foram considerados (valor nulo), pois foi julgado, para efeito de comparação dos sistemas, que o custo de instalação seria aproximadamente o mesmo para todos eles.
- Custos de operação e manutenção: foi considerado somente o custo de reposição dos equipamentos principais ao final de sua vida útil, igual ao custo de aquisição do equipamento novo. Os custos de mão-de-obra e transporte não foram considerados (valor nulo), pois foi julgado, para efeito de comparação dos sistemas, que seriam os mesmos ou muito próximos para todos os sistemas.
- Taxa de desconto: 6%.
- Inflação: 0%.
- Vida útil do sistema para contabilização do custo da energia gerada: 20 anos.
- Parâmetros técnicos dos principais equipamentos: conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros dos equipamentos do SIGFI.

EQUIPAMENTO	PARÂMETRO	VALOR
painel fotovoltaico	vida útil	20 anos
	inclinação do painel	10°
bateria Chumbo-ácido	tipo (recomendado pelo Programa LpT)	OPzS ²
	vida útil	de 5 a 15 anos; caso base: 7 anos
	estado inicial de carga	80%
	mínimo estado de carga	40%
	eficiência	86%
conjunto inversor / controlador	eficiência do inversor	85%
	eficiência do controlador	95%
	vida útil	10 anos

3. RESULTADOS

3.1 Irradiação Solar

Para a simulação, foi escolhido o perfil horário de irradiação solar da cidade de Manaus-AM. Julgou-se que este perfil se aproxima das condições em que normalmente estes tipos de sistemas são instalados em regiões remotas dos Sistemas Isolados. Os dados deste perfil estão disponíveis no Programa Homer, que utiliza informações da Nasa, coletados entre 1983 e 2005. A irradiação global média diária no plano horizontal para Manaus é de 4,63 kWh/m².dia. Entretanto, para este estudo, resolveu-se considerar uma irradiação mais conservadora de 4 kWh/m².dia para a irradiação média diária global no plano horizontal, mantendo-se, porém, o perfil horário de irradiação da localidade de Manaus. O sistema dimensionado conforme o Manual do LpT considera que a irradiação média diária global no pior

² A Bateria OPzS é uma bateria Chumbo-ácido ventilada com eletrólito líquido, cuja designação é da norma DIN para bateria estacionária com placas positivas tubulares (em alemão *Panzer platten* que significa placas reforçadas). Este tipo de bateria requer reposição de água.

mês do ano é de $4 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$. Nas simulações realizadas, o valor de $4 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$ foi estabelecido como uma média diária anual e, portanto, são observados valores mensais médios menores do que $4 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$. Desta forma, as simulações são realizadas, a princípio, em condições mais desfavoráveis do que aquelas consideradas no seu dimensionamento.

Na Figura 1 são apresentadas, para cada mês, as irradiações médias diárias global no plano horizontal (GHI) e no plano inclinado de 10° . Em ambos os casos a média anual é de $4 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$. Apesar do ângulo de inclinação ótimo da maioria das cidades da região Norte ser menor que 10° , esta inclinação é uma prática já adotada nas instalações dos painéis fotovoltaicos por facilitar a limpeza dos mesmos por ação da chuva. Neste estudo, efetuaram-se algumas simulações variando-se a inclinação do painel fotovoltaico. Verificou-se que o painel inclinado a 10° orientado para o Norte permite um melhor aproveitamento energético de irradiação ao longo do período de um ano, se comparado com o painel horizontal. Conforme observado anteriormente a irradiação média diária para o pior mês é inferior a $4 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$, tanto para o plano horizontal como para o plano inclinado. Verificou-se ainda que, mantendo-se o perfil de irradiação para o plano inclinado (curva vermelha da Figura 1), se a irradiação média para o pior mês fosse de $4 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$, o valor médio anual correspondente seria de $4,49 \text{ kWh/m}^2\text{.dia}$.

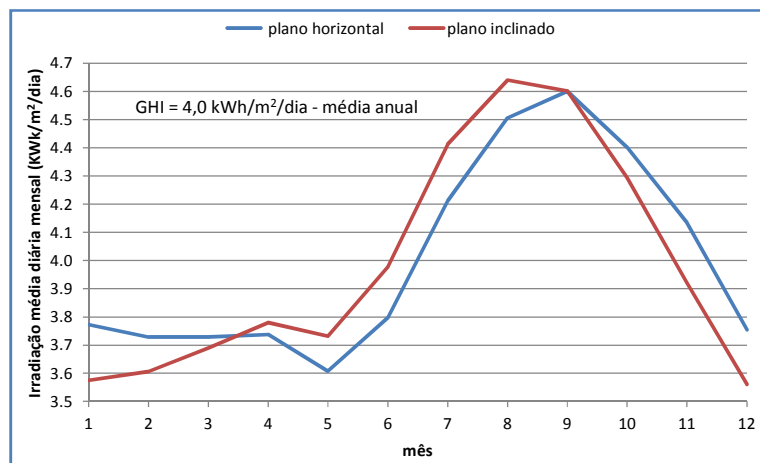


Figura 1 – Irradiação média diária mensal utilizada nas simulações.

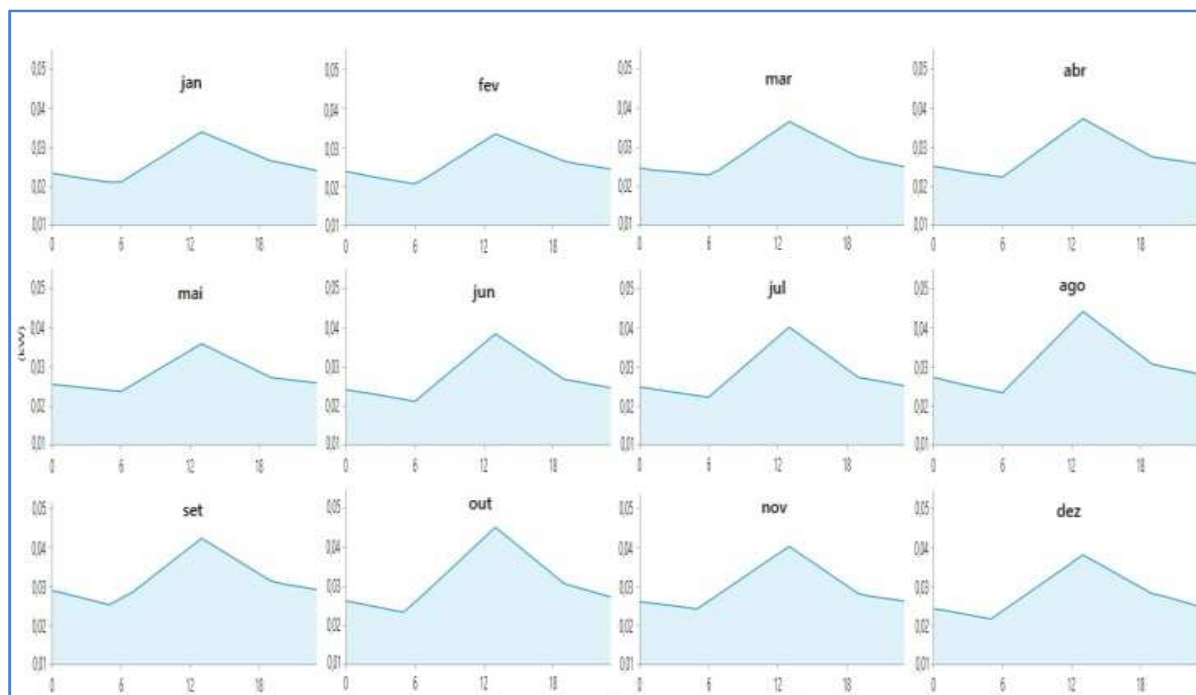
3.2 Perfil de carga diário

O perfil diário de carga total para o SIGFI foi constituído somando-se o perfil de carga de um refrigerador ao perfil estimado de cargas de outros equipamentos com maior intensidade no período noturno. A carga do refrigerador foi determinada com base em curvas experimentais obtidas pelo Cepel em sistemas SIGFI, nos anos de 2012 a 2014 (Cepel, 2014b), operando com o refrigerador modelo Consul RC28. Como este refrigerador não é mais fornecido no mercado, os seus valores foram extrapolados para o refrigerador modelo Electrolux RDE33 (236 litros), atualmente em teste no Cepel. Considerando o efeito da variação da temperatura ambiente de Manaus ao longo do ano, estimou-se o consumo médio do refrigerador RDE33, com carga térmica e aberturas de porta ao longo do dia, em $37,7 \text{ kWh/mês}$. O perfil diário do consumo do refrigerador (média diária mensal), com carga, em cada mês é mostrado na Figura 2a. O consumo do refrigerador próximo das 13h é maior devido a ser o horário em que a temperatura ambiente é mais alta.

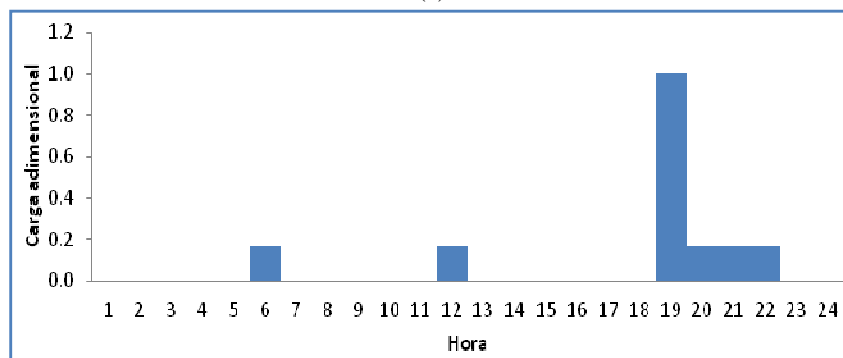
O consumo deste refrigerador, obtido em ensaios normalizados (porta fechada) no Cepel, foi de $23,1 \text{ kWh/mês}$ (Cepel, 2016). Estes ensaios normalizados são utilizados para determinar o consumo de placa do refrigerador.

A carga adicional, ou seja, além do refrigerador, utilizada nas simulações correspondeu aos valores indicados na Tabela 2 e foi calculada subtraindo-se o valor médio correspondente à carga do refrigerador ($37,7 \text{ kWh/mês}$) do valor total de carga considerado.

Nas simulações, as quantidades de energia disponíveis para outros equipamentos, correspondentes a última linha da Tabela 2, possuem o perfil diário mostrado na Figura 2b, considerado o mesmo para todos os dias do ano. O perfil de cargas escolhido possui uma maior concentração de cargas à noite. Em particular, de forma proposital, a carga noturna encontra-se mais concentrada em um único horário, uma situação considerada mais crítica para os sistemas fotovoltaicos.



(a)



(b)

Figura 2 – a) Perfil médio de carga do refrigerador ao longo do dia para cada mês do ano (eixo da ordenada varia de 0,01 a 0,05 kW e da abscissa de 0 a 24h do dia típico) e b) Perfil adimensional diário de carga de equipamentos, exceto refrigerador.

Tabela 2 – Cargas mensais utilizadas nas simulações.

Carga total (kWh/mês)	37,7	45	50	60	70	80
Carga do refrigerador (kWh/mês)	37,7					
Carga (outros equipamentos) (kWh/mês)	0	7,3	12,3	22,3	32,3	42,3

3.3 Dimensionamento dos sistemas SIGFI

Para o dimensionamento dos sistemas SIGFI 45 e 60, com dois dias de autonomia (aqui denominados SIGFI 45-2d e SIGFI 60-2d), foram considerados os valores indicados na publicação “Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos” (MME, 2015). Para o sistema aqui chamado SIGFI 60-1d, o gerador fotovoltaico é aquele dimensionado para o SIGFI 60 convencional, mas a capacidade de bateria é calculada para 1 dia de autonomia (e não para 2 dias como estabelece a RN Aneel 493). Para dimensionamento dos controladores de carga da bateria foi utilizada a metodologia do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (Pinho e Galdino, 2014) e o dimensionamento dos inversores seguiu a determinação da RN Aneel 493/2012. Desta forma, o dimensionamento dos três sistemas considerados neste estudo é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensionamento dos sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d.

DENOMINAÇÃO DO SIGFI	POTÊNCIA DE PICO DO PAINEL FOTOVOLTAICO (W_p)	CAPACIDADE DA BATERIA (kWh)	BATERIA 24V (Ah@C100)	POTÊNCIA MÍNIMA DO INVERSOR (W) $24V_{CC}/127$ ou $220V_{CA}$	CORRENTE MÍNIMA DO CONTROLADOR (A)
45-2d	780	7,5	315	700	40
60-1d	1.040	5	208	1.000	45
60-2d	1.040	10	415	1.000	45

3.4 Custos dos equipamentos

No caso dos módulos fotovoltaicos foi feito um levantamento compreendendo vários modelos de Silício cristalino, de diferentes fabricantes e o valor escolhido foi o menor obtido em uma cotação junto a um fornecedor nacional. A cotação do módulo de 260 ou 265 W_p foi de R\$ 640, para compras acima de 600 módulos, resultando num custo de aproximadamente R\$ 2,4/ W_p .

Para a bateria Chumbo-ácido, foram solicitadas cotações junto a alguns fornecedores nacionais, mas foi recebida somente uma resposta. De posse dos preços de cotações de bancos de baterias com 12 elementos OPzS de 2 V (ver exemplo na Figura 3) e capacidades de 150 Ah, 200 Ah, 250 Ah, 300 Ah e 350 Ah, decidiu-se por considerar uma curva de ajuste linear para representar os preços das baterias em função de sua capacidade, conforme apresentado na Figura 4.



Figura 3 – Foto de um banco de 12V formado por de 6 baterias de 2V do tipo OPzS

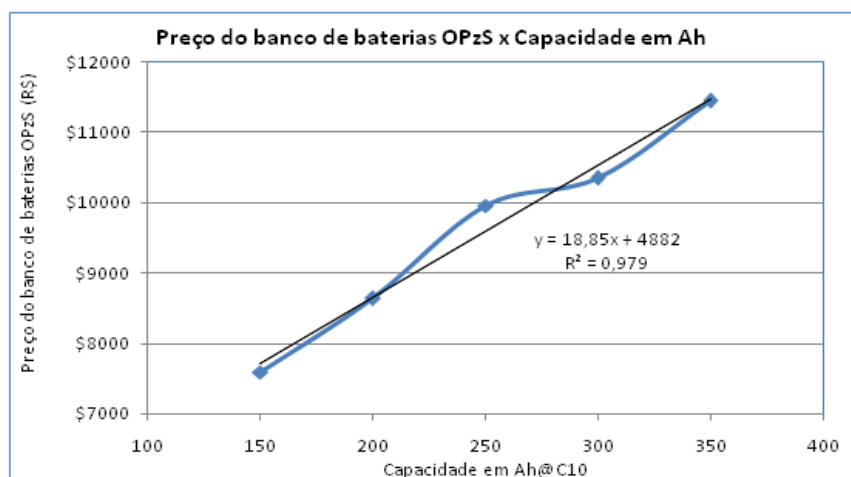


Figura 4 – Preços dos bancos de bateria OPzS em função da capacidade Ah@C10: valores cotados (linha azul) e curva de ajuste (linha cinza)

Para o inversor foram obtidos preços tanto na internet quanto diretamente com os fornecedores. Foi obtido o preço de R\$ 1.300 para o inversor de 1.000 W na internet e o preço de R\$ 2.700 pelo fornecedor de inversor de fabricante nacional de mesma potência. Ressalta-se que não houve cotação para o inversor de 700 W, pois não foi encontrado inversor nacional de onda senoidal nesta potência. Quanto ao controlador foram considerados apenas preços consultados na internet. Foram encontrados controladores do tipo MPPT e PWM. Para mostrar a variação de preços, cita-se, como exemplo, o controlador PWM de 40 A de um fabricante X a R\$ 396 e o do fabricante Y a R\$ 1.150. Todos os preços referem-se a agosto de 2017.

Nota-se que o custo do conjunto conversor – inversor + controlador – já é superior ao custo do gerador solar, sendo que a vida útil estimada deste último, de pelo menos 20 anos, é duas vezes maior do que a dos componentes eletrônicos. A Tabela 4 apresenta um resumo dos preços obtidos para os componentes dos sistemas.

Tabela 4 – Preços dos componentes principais dos sistemas SIGFI.

SIGFI	PAI-NEL FV (W _P)	PREÇO DO PAINEL FV (R\$)	CAPACIDADE DA BATERIA (kWh)	BATERIA Ah @C100	MODELO DA BATERIA (12 elementos de 2 V, ligados em série: 24 V)	PREÇO TOTAL BANCO BATERIA (R\$)	INVERSOR (W) 24 V _{CC} /127 ou 220 V _{CA}	PREÇO INVERSOR (R\$)	CONTROLADOR MPPT (A)	PREÇO CONTROLADOR (R\$)
45-2d	780	1.920	7,5	315	OPzS 300Ah @C10	10.538	700	-x-	40	988
60-1d	1.040	2.560	5	208	OPzS 200Ah @C10	8.653	1.000	1.300 e 2.700	45	1.329
60-2d	1.040	2.560	10	415	OPzS 400Ah @C10	12.424	1.000	1.300 e 2.700	45	1.329

Considerando a variação de preços de inversores e controladores para a mesma potência e a inexistência de inversor nacional de 700 W de onda senoidal, decidiu-se por considerar um valor único de R\$ 3.000 para o conjunto inversor-controlador, para todos os sistemas avaliados nas simulações.

3.5 Simulações do desempenho dos sistemas

Com base nos parâmetros técnicos e custos apresentados para os sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d, foram realizadas simulações com o programa Homer Pro, para os diferentes valores de carga total indicados na Tabela 2. Nessas simulações, considerou-se uma vida útil das baterias de 7 anos. O desempenho de cada um destes sistemas é apresentado na Tabela 5, que mostra a produção anual de energia dos painéis fotovoltaicos e, em base anual, o percentual de carga não atendida e o percentual de excedente de energia (parcela da produção de painel fotovoltaico que não foi utilizada nem armazenada nas baterias).

Tabela 5 – Produção anual de energia dos painéis fotovoltaicos para cada sistema, percentual de carga não atendida e percentual de excedente de energia em base anual.

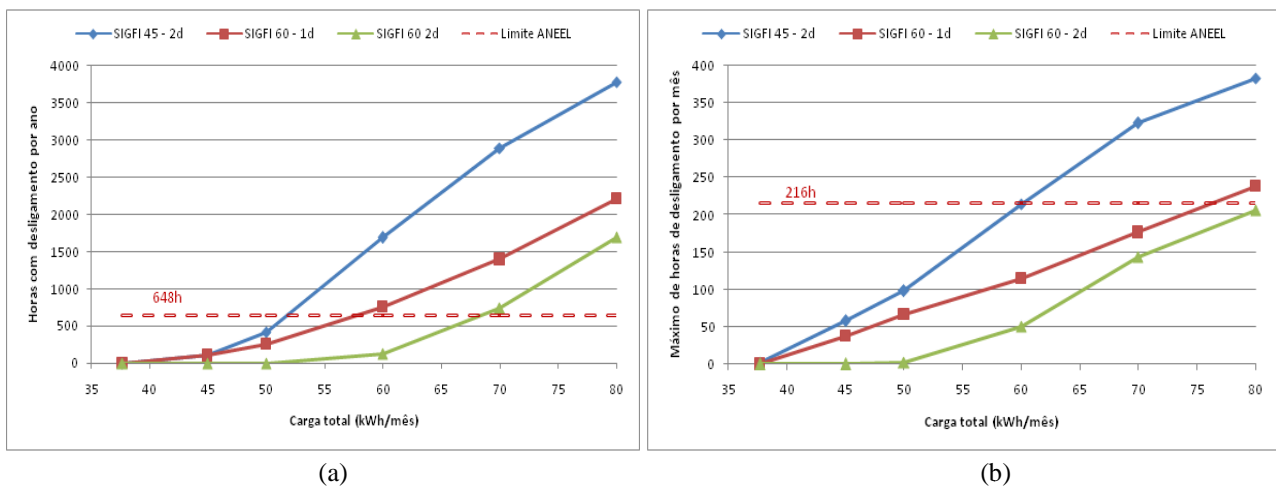
CARGA (kWh/mês)	37,7	45	50	60	70	80
SISTEMA SIGFI 45-2d						
Produção de Energia (kWh/ano)	794					
Carga não atendida (%/ano)	0,0	0,9	3,9	15,7	27,4	36,4
Excedente de produção (%/ano)	26,2	12,0	5,0	0,3	0,0	0,0
SISTEMA SIGFI 60-1d						
Produção de Energia (kWh/ano)	1059					
Carga não atendida (%/ano)	0,0	0,9	2,3	7,2	13,2	20,8
Excedente de produção (%/ano)	44,8	34,1	27,6	17,1	9,5	5,4
SISTEMA SIGFI 60-2d						
Produção de Energia (kWh/ano)	1059					
Carga não atendida (%/ano)	0,0	0,0	0,0	1,1	7,2	16,5
Excedente de produção (%/ano)	44,8	33,4	25,7	11,3	3,0	0,3

Observa-se que ambos os sistemas SIGFI 60 (com 1 e 2 dias de autonomia) apresentaram percentuais de energia não atendida ao longo do ano, para cargas totais acima de 50 kWh/mês, bem menores do que o SIGFI 45-2d. Para cargas totais inferiores a este valor, os sistemas SIGFI 45-2d e SIGFI 60-1d apresentaram o mesmo percentual e o sistema SIGFI 60-2d atendeu integralmente à carga.

A Tabela 5 mostra que o excedente de energia anual para o sistema SIGFI 45-1d é menor do que para os sistemas SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d. Neste caso, é interessante observar que, para cargas totais acima de 50 kWh/mês, o excedente de energia para o sistema SIGFI 60-1d é maior do que para o sistema SIGFI 60-2d. Este fato sugere que, do ponto de vista de aproveitamento energético da irradiação solar, a adoção de um número maior de baterias, como no sistema SIGFI 60-2d, é mais adequada.

Para os sistemas SIGFI, a Resolução Aneel 493 estabelece os seguintes parâmetros de atendimento: DIC mensal máximo de 216 horas e DIC anual máximo de 648 horas. A Figura 5 mostra os resultados do número de horas de desligamento ao longo do ano para cada um dos sistemas simulados e os compara com os valores máximos admitidos pela Aneel. A Figura 5a corresponde às horas totais de desligamento ao longo do ano, e a Figura 5b corresponde ao valor máximo mensal de horas de desligamento observado no ano.

A Figura 5 mostra que todos os sistemas atendem os requisitos do DIC anual para cargas de até 50 kWh/mês, com menor número de horas de desligamento para os SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d em relação ao SIGFI 45-2d. O SIGFI 60-1d atende os requisitos da Aneel para o DIC anual para cargas próximas a 60 kWh/mês e o SIGFI 60-2d atende os requisitos da Aneel para cargas próximas a 70 kWh/mês. Todos os sistemas atendem os requisitos do DIC mensal para cargas de até 60 kWh/mês, com menor número de horas de desligamento para os SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d em relação ao SIGFI 45-2d.



Ressalta-se que se for considerada a média anual de irradiação real da cidade de Manaus de 4,63 kWh/m².dia, a simulação do sistema SIGFI 60-1d apresenta o DIC anual inferior a 648h para a carga de 60 kWh/mês.

3.6 Avaliação de custos

Foram realizadas várias simulações no programa computacional Homer Pro para comparação dos custos de energia entre os três sistemas. Foi utilizado como parâmetro comparativo o custo anualizado da energia útil produzida pelo SIGFI. O custo médio de energia anualizado calculado pelo programa Homer Pro (R\$/kWh) é a relação entre o custo total anual (R\$/ano) pelo total anual de energia entregue à carga (kWh/ano) pelo sistema. Para calcular o custo total foram fornecidos ao Homer Pro os preços de investimento e reposição dos equipamentos principais: módulos, baterias, inversor e controlador e respectivos períodos de vida útil. Observa-se que os valores de custo de energia são parciais, pois não englobam todos os custos para instalação e manutenção dos sistemas, como, por exemplo, material elétrico, mão-de-obra, transporte, etc. Considera-se que estes custos são similares entre os sistemas avaliados e, por isso, sua supressão não influencia os resultados comparativamente. Assim, o valor real do custo de energia será superior ao indicado nas simulações e dependerá em muito da localidade de instalações do sistema e da logística envolvida para sua instalação e manutenção.

Na prática, o tempo de vida útil da bateria depende do número de ciclos e da profundidade de descarga, da manutenção com reposição adequada do eletrólito da bateria, da qualidade da bateria, da temperatura de operação etc. No Brasil não existem muitos fabricantes de bateria do tipo OPzS. Conforme já mencionado, foi obtida cotação de

apenas um fabricante. Em seu catálogo de baterias é declarado que o tempo de vida útil em regime de flutuação é de 12 anos, ou seja, como em sistemas fotovoltaicos o regime é de ciclagem diária, a vida útil da bateria será menor que 12 anos para os modelos desse fabricante. Nas simulações, admitiu-se uma profundidade máxima de descarga de 60%.

Da experiência de sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil com bateria OPzS tem-se poucos registros. Em reuniões realizadas com técnicos da Cemig e da Celpa foram obtidas algumas informações. A Cemig informou que algumas baterias OPzS, de sistemas instalados nos primórdios do Prodeem, apresentaram vida útil superior a 10 anos. Já em sistemas de minirredes fotovoltaicas do LpT, segundo informação da Celpa, as baterias do tipo OPzS estavam operacionais mesmo após 5 anos de instalação, com praticamente nenhuma manutenção. Devido à incerteza com relação à vida útil das baterias, decidiu-se avaliar o impacto da vida útil da bateria no custo de energia dos SIGFIs. Assim, foram realizadas simulações variando-se o período de troca da bateria em 5, 7, 10 e 15 anos, para duas condições de carga, de 45 e 60 kWh/mês.

A Figura 6 apresenta curvas do custo de energia (parcial) para os três sistemas: SIGFI 45 com 2 dias de autonomia (SIGFI 45-2d), SIGFI 60 com 1 e 2 dias de autonomia da bateria (respectivamente, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d). Não foi apresentada a curva do SIGFI 45-2d para a carga de 60 kWh/mês, pois o mesmo, como visto anteriormente, não é capaz de atender satisfatoriamente a esta carga.

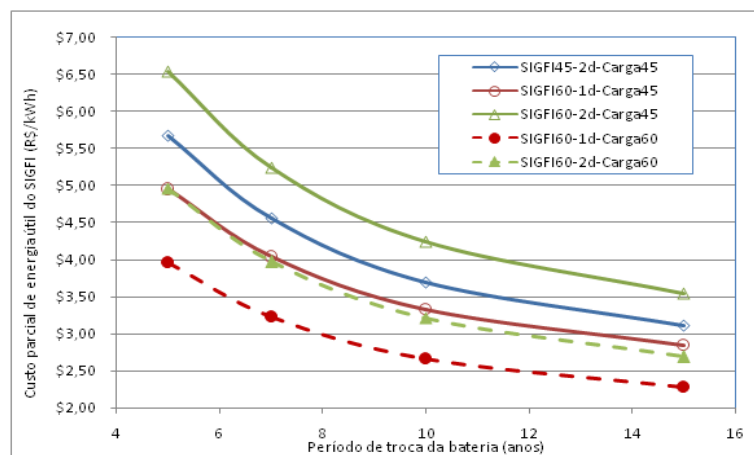


Figura 6 – Curvas dos custos (parciais) de energia em função do período de troca da bateria OPzS, para os sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d.

Verifica-se diretamente pela Figura 6 que, independentemente do período de troca da bateria, os custos de energia são sempre mais favoráveis para o SIGFI 60-1d, sendo que a diferença entre os custos de energia dos sistemas é maior, quando o intervalo de troca de baterias é menor.

Como o custo de energia é inversamente proporcional à quantidade de energia útil, quanto maior a carga atendida, menor é o custo de energia para o mesmo tamanho de sistema. Isto pode ser percebido comparando-se, por exemplo, as curvas na cor vermelha da Fig. 5: a curva de linha cheia, que corresponde ao sistema SIGFI 60-1d para atendimento de uma carga de 45 kWh/mês, apresenta os custos de energia superiores ao da curva vermelha tracejada, para o mesmo sistema atendendo a carga de 60 kWh/mês. O mesmo pode ser verificado para as curvas na cor verde, correspondentes ao SIGFI 60-2d.

Para a comparação dos custos de energia entre os sistemas, decidiu-se pelo período de 7 anos de vida útil, como caso base. Esse valor tem como referência algumas literaturas (Olivieri, 2010; Esteves, 2012) e se baseia, também, nas poucas informações conhecidas dos casos reais no Brasil, relatadas em parágrafo anterior.

Sabe-se que a aquisição de um maior número de elementos de baterias pode influenciar o preço final do produto, conforme informação do próprio fornecedor. Devido à possível variação do preço das baterias, decidiu-se avaliar o seu impacto no custo de energia dos SIGFIs. Assim, a Figura 7 apresenta curvas do custo de energia (parcial) em função da carga a ser atendida para os três tipos de sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d, para dois preços do banco de baterias. As curvas de cada sistema são traçadas até a carga que o sistema pode atender, sem ultrapassar o limite de DIC anual. As curvas de traço contínuo consideram o valor de cotação (1 PU), para compra de poucos elementos, enquanto as curvas tracejadas consideram uma diminuição de 25% do valor cotado (0,75 PU), levando-se em conta a aquisição de lotes de centenas de elementos de baterias.

Comparando-se as curvas de mesmo preço relativo de bateria, o SIGFI 60-1d sempre apresenta os menores custos de energia, independentemente do preço da bateria ser de 0,75 ou 1 PU. Observa-se, entretanto, que quando se compara

o sistema SIGFI 60-1d com o preço cheio da bateria (1 PU) e o SIGFI 60-2d com preço inferior da bateria (0,75 PU), os custos são muito próximos, especialmente para a carga de 60 kWh/mês. O sistema SIGFI 60-2d tem o dobro de capacidade de bateria em relação ao SIGFI 60-1d. Assim, no caso de se conseguir uma boa diminuição do preço da bateria ao se comprar o dobro de elementos, vale a pena fazer uma análise financeira do custo de energia entre os dois sistemas, já que o sistema com 2 dias de autonomia apresenta desempenho energético superior.

A Tabela 6 apresenta os custos de investimento inicial para cada um dos sistemas, considerando apenas os valores dos componentes principais. Quando se avalia apenas o custo de investimento inicial, observa-se que o SIGFI 60-1d também apresenta o menor valor em relação aos demais. A Tabela 6 apresenta um valor total de cerca de R\$ 16.000 para os principais equipamentos do SIGFI 45-1d, onde a bateria OPzS representa 65% do total, enquanto o painel fotovoltaico representa apenas 12%. Já o SIGFI 60-1d apresenta um valor total um pouco superior a R\$ 15.000, onde a bateria representa menos de 60% do total e o painel FV, 17%.

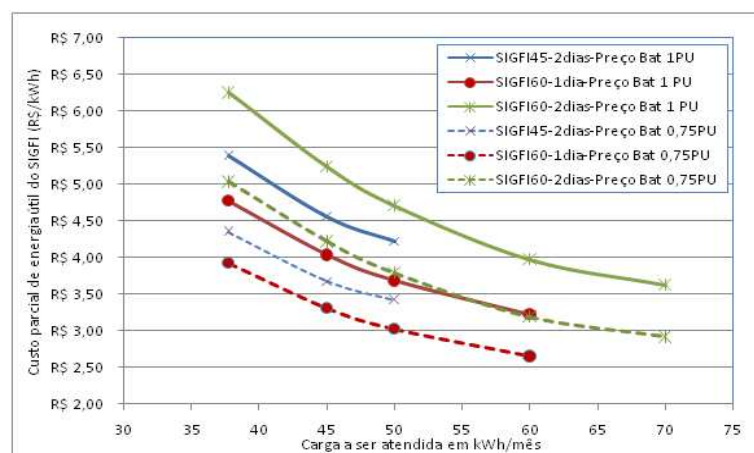


Figura 7 – Curvas dos custos (parciais) de energia em função da carga a ser atendida, para os sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d, considerando duas situações de preço da bateria OPzS: preço cheio (1 PU) e 0,75 PU.

Tabela 6 – Preços dos principais equipamentos dos sistemas SIGFIs considerados

SIGFI	PAINEL FV (W _p)	PREÇO DO PAINEL FV (R\$)	CAPACIDADE BATERIA (kWh)	PREÇO TOTAL DO BANCO (R\$)	POTENCIA INVERSOR (W) 24V _{CC} / 127 ou 220V _{CA}	PREÇO DO INVERSOR (R\$)	CONTROLADOR MPPT (A)	PREÇO DO CONTROLADOR (R\$)	VALOR TOTAL DOS EQUIP. PRINCIPAIS (R\$)
45-2d	780	\$1.920	7,5	\$10.538	1.000	\$2.700	40	\$988	\$16.146
60-1d	1.040	\$2.560	5	\$8.653			45	\$1.329	\$15.242
60-2d	1.040	\$2.560	10	\$12.424			45	\$1.329	\$19.013

Em relação ao inversor, foi recebida cotação para um inversor de 600 W, de R\$ 1.380,00. Considerando que o fabricante fornecesse um inversor de 700 W pelo mesmo preço do de 600 W, o valor total do SIGFI 45-2d seria menor que R\$ 15.000 e, portanto, também menor que o valor do SIGFI 60-1d. O que se verifica, então, é que em relação ao investimento inicial, os dois sistemas apresentam custos similares. Na avaliação realizada não foram computadas algumas diferenças que podem existir nos custos referentes à estrutura de suporte do painel FV e do banco de baterias e aos dispositivos de proteção, cujos valores podem oscilar um pouco para cada um dos sistemas.

Com base nos valores indicados na Tabela 6 verifica-se que o preço do banco de baterias tem o maior peso no custo de investimento em relação ao conjunto de equipamentos principais dos sistemas SIGFI – cerca de 60%. Este fato ocorre especialmente quando se trata de baterias do tipo OPzS, que é o tipo recomendado pelo Programa LpT devido à sua alta durabilidade em relação às baterias Chumbo-ácido convencionais, sendo mais indicado para regiões remotas onde o custo de transporte é muito significativo no orçamento de manutenção.

4. CONCLUSÕES

Levando-se em consideração as premissas utilizadas e os resultados observados nas simulações, é possível concluir:

- i) Nas simulações efetuadas, considerando-se o perfil médio de irradiação da cidade de Manaus, porém com média anual de 4 kWh/m²/dia, os sistemas não ultrapassam o valor limite do DIC anual estabelecido pela Aneel para atendimento das cargas médias mensais nos seguintes valores aproximados:
 - SIGFI 45-2d: carga mensal média de até 53 kWh/mês;
 - SIGFI 60-1d: carga mensal média de até 58 kWh/mês;
 - SIGFI 60-2d: carga mensal média de até 70 kWh/mês.
- ii) Considerando o perfil médio e a média anual de irradiação solar reais da cidade de Manaus, o mesmo sistema SIGFI 60-1d atenderia o DIC anual para uma carga superior a 60 kWh/mês.
- iii) Considerando o mesmo consumo médio mensal do refrigerador de 37,7 kWh/mês, a disponibilidade de energia para outras cargas do sistema SIGFI 45-2d é inferior à do SIGFI 60-1d.
- iv) Do ponto de vista energético, o sistema SIGFI 60-1d é superior ao sistema SIGFI 45-2d, para as mesmas condições de carga: menor percentual de carga não atendida (menor número de desligamentos).
- v) Com relação ao custo total de investimento dos equipamentos principais, os sistemas SIGFI 45-2d e SIGFI 60-1d apresentam valores similares.
- vi) Com relação ao custo de geração, o sistema SIGFI 60-1d apresentou custo da energia gerada inferior ao do sistema SIGFI 45-2d, mesmo quando considerado uma redução significativa do preço do banco de baterias.
- vii) Para todos os sistemas avaliados, as baterias apresentam o maior peso no custo de energia do SIGFI não só devido ao seu alto valor de investimento, como também pelo fato de serem efetuadas trocas do banco durante a vida útil de 20 anos do sistema, enquanto os módulos fotovoltaicos tem a vida útil estimada igual ou superior à vida útil do SIGFI. No estudo, foram consideradas 1 a 2 trocas de baterias, exceto para o caso em que a vida útil da bateria OPzS foi de 5 anos, quando houve 3 trocas, o que seria improvável.

5. REFERÊNCIAS

- Aneel, 2012. Resolução Normativa Aneel Nº 493, de 5 de junho de 2012. Consultada nos meses de agosto e setembro de 2017 em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>
- Pinho, João T.; Galdino, Marco A., 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Cresesb, Cepel. http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.
- Cepel, 2014b. Relatório Técnico 3117/2014, Ensaio com sistemas SIGFI 20 e 30.
- Cepel, 2016. Relatório de Ensaio DLF-9949/2016, Avaliação de desempenho de refrigerador.
- Esteves, G. et alli, 2012. Análise de Sensibilidade dos Custos de Geração de Energia Elétrica em Sistemas Isolados. Eletrobras. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.
- MME, 2015. Programa Luz para Todos: Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos, Outubro de 2015. Consultado nos meses de agosto e setembro de 2017 em https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/especificacoes_tecnicas.pdf
- Olivieri, M. et alli, 2010. Comparação entre dois tipos de sistemas fotovoltaicos individuais para eletrificação rural. Eletrobras. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.

COST AND PERFORMANCE EVALUATIONS OF SOLAR HOME SYSTEMS (SHS) FOR DIFFERENT DAYS OF AUTONOMY

Abstract. Due to the price decrease of photovoltaic modules observed in recent years, the Brazilian Ministry of Mines and Energy (MME) has asked Cepel to perform a technical and an economic evaluation of SHS's, named in Brazil SIGFI systems, with more panels and shorter autonomy in comparison to the Brazilian Regulatory Agency for Electric Energy (Aneel) standard PV system named SIGFI 45 (48 hours autonomy, 45 kWh/month availability). These systems are used for solar electrification of remote homes not connected to the grid, under the "Light for All" (LpT) federal government Program. This article presents the results of performance and cost evaluations of SIGFI systems. The evaluated systems were designed according to the methodology prescribed in the LpT program for loads of 45 and 60 kWh/month, and for 24 and 48 hours of autonomy. Computer simulations have shown that, under current economic conditions, the option for a SIGFI system that provides around 60 kWh/month with only one day of autonomy presents better energy performance and minor costs in comparison to the SIGFI 45 system, with 2 days of autonomy.

Key words: SIGFI, Light for All Program, battery autonomy