



Por Leonardo Vieira, Márcia Ramos, Marco Galdino e Marta Maria Olivieri\*



# **CAPÍTULO V**

## **AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE**

### **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS TIPO**

#### **SIGFI ALIMENTANDO REFRIGERADORES**



A Resolução Normativa Aneel 83/2004, posteriormente substituída pela RN 493/2012 [1], estabeleceu as especificações para o atendimento a consumidores por meio de sistemas fotovoltaicos individuais, denominados SIGFI (Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente). Desde a primeira RN, vem se acumulando no país experiência considerável na utilização dos SIGFIs em vários projetos de eletrificação rural, principalmente, no âmbito do Programa Brasileiro de Universalização de Acesso à Energia (LpT – Programa Luz para Todos).

Em 2012, a Eletrobras solicitou ao Cepel a análise do desempenho de sistemas SIGFI para alimentação de refrigeradores em conjunto com outras cargas. Foi instalado um sistema SIGFI 30 (30 kWh/mês) na área de testes externos do Cepel, buscando simular as condições encontradas em campo. Foram realizados ensaios entre abr/12 e dez/14, compreendendo diferentes padrões de utilização dos refrigeradores. O objetivo principal desses ensaios foi avaliar a capacidade dos sistemas SIGFI 30 de atender a uma carga correspondente a 13 kWh/mês (carga mínima prevista na RN Aneel), somada à carga de um refrigerador c.a. de baixo consumo. Os ensaios revelaram que os sistemas projetados para capacidade de 30 kWh/mês não são adequados para utilização com refrigeradores c.a. nas condições de temperatura e irradiação encontradas na região Norte.

O Ministério de Minas e Energia (MME), considerando o relatório do Cepel Nº 3117/2014 [2], definiu que os Programas de Obras previstos no Programa LpT (recentemente prorrogado pelo Decreto Lei 7520, até 2020 [3]) deverão contemplar, para unidades consumidoras de uso individual residencial, a disponibilidade mensal garantida de 45 kWh/unidade [4].

A grande maioria dos sistemas SIGFI utilizados em eletrificação rural é de sistemas fotovoltaicos, cujos componentes principais são: conjunto de módulos fotovoltaicos, inversor fotovoltaico, banco de baterias e controlador de carga e descarga da bateria. Sugestões de dimensionamento para o Programa LpT podem ser consultados em Programa Luz para Todos: Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos [4].

Ao longo dos últimos anos, o custo dos módulos fotovoltaicos vem caindo em maior taxa do que os custos das baterias. Em função disso, o MME solicitou ao Cepel a avaliação técnica e econômica de sistemas alternativos ao SIGFI 45, em que a configuração alternativa apresentaria uma maior potência do conjunto de módulos fotovoltaicos e uma menor potência do banco de baterias.

Um resumo dos resultados da avaliação de desempenho e custo de sistemas SIGFI dimensionados para cargas totais 60 kWh/mês e autonomia do banco de baterias de 24h (sistema alternativo) e de 48h é apresentado. Os resultados são comparados aos de sistemas SIGFI 45, com autonomia de 48 horas [5].

## Metodologia

A avaliação foi realizada utilizando-se o programa computacional Homer Pro, versão 3.9.2., que permite a simulação do desempenho em base horária e estima os custos de geração de energia elétrica dos sistemas. É estimado o número total de horas de desligamento (DIC<sup>1</sup>) a cada mês e no período anual, cujos valores máximos admitidos são estabelecidos na Resolução Normativa da Aneel Nº 493/2012.

As seguintes premissas foram consideradas:

- 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: custo de investimento dos equipamentos principais;

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.

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 <sup>2</sup>
	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

<sup>2</sup> 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 destilada do eletrólito ao longo do período de operação da bateria.

- Custos de operação e manutenção: 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 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;
- 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.

## Resultados

### 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/m<sup>2</sup>.dia. Entretanto, resolveu-se considerar uma irradiação média mais conservadora de 4 kWh/m<sup>2</sup>.dia, mantendo-se, porém, o perfil horário de irradiação da localidade de Manaus.

### 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 [2], 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, e ainda disponível no mercado. 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 kWh/mês<sup>3</sup>. Nas simulações, a carga de outros equipamentos foi calculada subtraindo-se o valor médio correspondente à carga do refrigerador (37,7 kWh/mês) do valor total de carga considerado (45, 50, 60, 70 e 80 kWh/mês).

### Dimensionamento dos sistemas SIGFI

O dimensionamento dos sistemas SIGFI 45 e 60, com dois dias de autonomia (aqui denominados SIGFI 45-2d e SIGFI 60-2d), conforme padronizado na RN Aneel 493, foi realizado conforme as "Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos" [4] e o "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos Cresesb, Cepel" [7]. Para o sistema alternativo aqui chamado SIGFI 60-1d, o gerador fotovoltaico é aquele dimensionado para o SIGFI 60 convencional, mas a capacidade de bateria é calculada para um dia de autonomia (e não para dois dias, como estabelece a RN Aneel 493). A Tabela 2 mostra o dimensionamento dos três sistemas considerados.

TABELA 2 - DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS SIGFI 45-2D, SIGFI 60-1D E SIGFI 60-2D

DENOMINAÇÃO DO SIGFI	POTÊNCIA DE PICO DO PAINEL FOTOVOLTAICO (W <sub>p</sub> )	CAPACIDADE DA BATERIA (kWh)	BATERIA 24V (Ah@C100)	POTÊNCIA MÍNIMA DO INVERSOR (W) 24VCC/127 ou 220VCA	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

<sup>3</sup> O consumo deste refrigerador, obtido em ensaios normalizados (porta fechada) no Cepel, foi de 23,1 kWh/mês [6]. Estes ensaios normalizados são utilizados para determinar o consumo de placa do refrigerador, que não necessariamente reflete o consumo do refrigerador em condições reais de operação.

TABELA 3 – PREÇOS DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DOS SISTEMAS SIGFI.

SIGFI	PAINEL FV [Wp]	PREÇO DO PAINEL FV (R\$)	CAPACIDADE BATERIA (kWh)	PREÇO TOTAL DO BANCO (R\$)	POT. INVERSOR 24VCC/127 ou 220VCA [W]	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

### Custos dos equipamentos

A Tabela 3 mostra os preços dos principais componentes, obtidos em agosto de 2017 de fornecedores nacionais, em consulta pela internet, ou formalmente em contato com fornecedores.

### Simulações do desempenho dos sistemas

Foram realizadas simulações para diferentes valores de carga total, considerando-se uma vida útil das baterias de 7 anos [5]. O desempenho de cada um destes sistemas é apresentado na Figura 1. 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 1 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 1a corresponde às horas totais de desligamento ao longo do ano, e a Figura 1b corresponde ao valor máximo mensal de horas de desligamento observado no ano.

A Figura 1 mostra que todos os sistemas atendem aos 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 aos requisitos da Aneel para o DIC anual para cargas próximas a 60 kWh/mês e o SIGFI 60-2d atende aos requisitos da Aneel para cargas próximas a 70 kWh/mês.

Simulações adicionais mostraram que, se for considerada a média anual de irradiação real da cidade de Manaus de 4,63 kWh/m<sup>2</sup>.dia, a simulação do sistema SIGFI 60-1d apresenta DIC anual inferior a 648h para a carga de 60 kWh/mês.

### Avaliação de custos

Foi utilizado como parâmetro comparativo o custo anualizado da energia útil produzida pelo SIGFI, calculado como a relação entre o custo total anual (R\$/ano) pelo total anual de energia entregue à carga (kWh/ano) pelo sistema. 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.

A Figura 2 apresenta curvas do custo de energia (parcial) em função do período de troca das baterias para os três sistemas: SIGFI 45 com

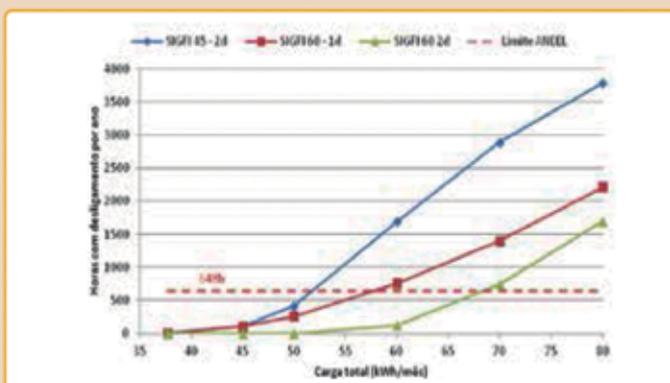


Figura 1a – Horas totais de desligamento ao longo do ano.

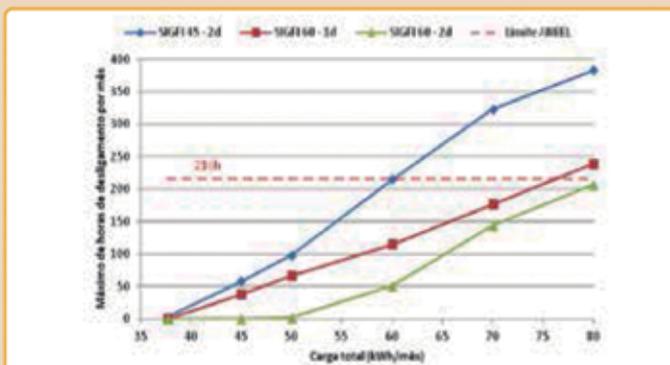


Figura 1b – Valor máximo mensal de horas de desligamento no ano.

dois dias de autonomia da bateria (SIGFI 45-2d), SIGFI 60 com 1 e 2 dias de autonomia (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.

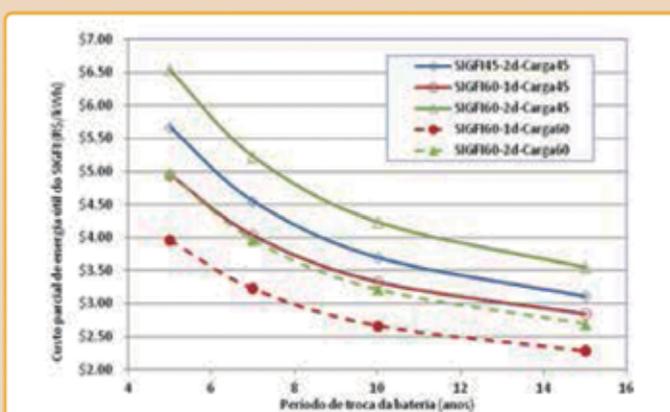


Figura 2 – Curvas dos custos (parciais) de energia em função do período de troca da bateria OPzS para os sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d.



Verifica-se 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.

Devido à possível variação do preço das baterias, decidiu-se avaliar o seu impacto no custo de energia dos SIGFIs. Assim, a Figura 3 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 uma queda de preço para a aquisição de lotes de centenas de elementos de baterias (economia de escala).

Comparando-se as curvas de mesmo preço relativo de bateria, o SIGFI 60-1d sempre apresenta os menores custos de energia, independentemente de o 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 se considerando que os dois têm a mesma quantidade de módulos, o sistema com dois dias de autonomia apresenta desempenho energético superior.

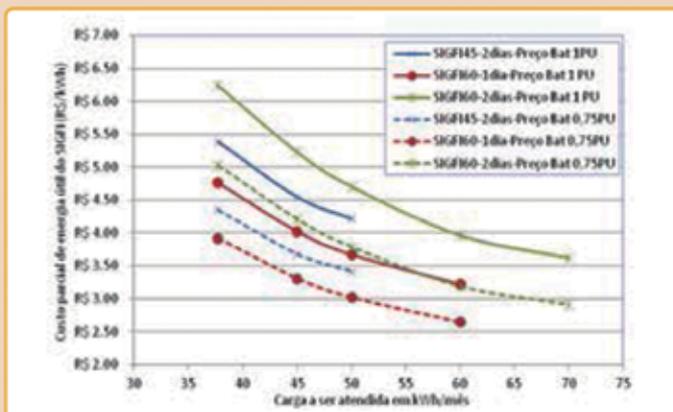


Figura 3 – Curvas dos custos (parciais) de energia em função da carga a ser atendida, para os sistemas SIGFI 45-2d, SIGFI 60-1d e SIGFI 60-2d, considerando duas situações de preço da bateria OPzS: preço cheio (1 PU) e 0,75 PU.

Quando se avalia apenas o custo de investimento inicial (Tabela 3, seção 3.4), observa-se que o SIGFI 60-1d também apresenta o menor valor em relação aos demais. A Tabela 3 apresenta um valor total de cerca de R\$ 16.000 para os principais equipamentos do SIGFI 45-1d, em que 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, em que a bateria representa menos de 60% do total e o painel FV, 17%.

O preço do banco de baterias tem elevado 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, sendo mais indicado para regiões remotas onde o custo de transporte é muito significativo no orçamento de manutenção.

## Conclusões

As simulações mostram que, do ponto de vista energético, o sistema SIGFI 60-1d é superior ao sistema SIGFI 45-2d para as mesmas condições de carga. Com relação ao custo total de investimento dos equipamentos principais, os sistemas SIGFI 45-2d e SIGFI 60-1d apresentam valores similares e, 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 considerada uma redução significativa do preço do banco de baterias. No entanto, a viabilidade dos sistemas SIGFI 60-1d deverá ser ainda comprovada em ensaios de longa duração, previstos para serem realizados no Cepel, nas mesmas condições já realizadas com os sistemas SIGFI 45-2d.

## Referências

- [1] 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>.
- [2] Cepel, 2014b. Relatório Técnico 3117/2014, Ensaios com sistemas SIGFI 20 e 30.
- [3] Decreto Lei 7520 (2011), alterado pelo decreto 9357 de 2018, [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/decreto/d7520.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/decreto/d7520.htm).
- [4] 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, Edição Revisada Julho/2017. Consultado no mês de junho de 2018 em [https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/especificacoes\\_tecnicas.pdf](https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/especificacoes_tecnicas.pdf).
- [5] Olivieri, M. et al., 2017. Avaliações de custo e desempenho de sistemas fotovoltaicos tipo SIGFI com diferentes períodos de autonomia, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.
- [6] Cepel, 2016. Relatório de Ensaio DLF-9949/2016, Avaliação de desempenho de refrigerador.
- [7] 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](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf).

\*Márcia Ramos é engenheira eletrônica, M. Sc. PUC-RJ e pesquisadora do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME) do Cepel;  
Marta Olivieri é engenheira eletrônica, M. Sc. COPPE-UFRJ e pesquisadora do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME) do Cepel;  
Marco Antônio Galdino é engenheiro eletrônico, M. Sc. COPPE-UFRJ e pesquisador do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME) do Cepel;  
Leonardo Vieira é engenheiro mecânico, D. Sc. COPPE-UFRJ e pesquisador do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME) do Cepel.