

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS INDIVIDUAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM FONTE INTERMITENTE (SIGFIs) INSTALADOS NA AMAZÔNIA

Valdemar Norberto Sens Neto – valdemar_sens@hotmail.com

Aline Kirsten Vidal de Oliveira

Lucas Rafael do Nascimento

Ricardo Rütther

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Resumo. A energia elétrica é uma ferramenta importante para o desenvolvimento social de um país, sendo que no Brasil uma parcela da população ainda vive na periferia dessa inclusão energética. No âmbito do processo de democratização do acesso à energia elétrica no Brasil, foi criado em fevereiro de 2022 o Programa Mais Luz para Amazônia (MLA). Este programa possui como intuito a instalação de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI ou Microsistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI, disponibilizando desta forma a instalação limite de um número de lâmpadas e tomadas dentro das unidades consumidoras (UC) que possuam acesso remoto ou isolado e estejam abrangidas dentro da Amazônia Legal. Tais tecnologias realizam a geração de energia elétrica através da energia solar e armazenamento através da utilização de baterias.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia, SIGFI, Sistema Isolado.

1. INTRODUÇÃO

À medida que o mundo enfrenta desafios crescentes relacionados ao esgotamento dos combustíveis fósseis, às mudanças climáticas e à degradação ambiental, a transição para fontes de energia mais limpas tornou-se imperativa (Turner e Brown, 2018). Entre as alternativas renováveis, a energia solar destaca-se não apenas por sua abundância, mas também pela rápida evolução da tecnologia (Davis e Fernandez, 2020).

Os sistemas fotovoltaicos, que convertem diretamente a luz do sol em eletricidade, têm testemunhado uma queda acentuada nos custos, graças à pesquisa e desenvolvimento contínuos. De fato, a energia solar, outrora vista como uma opção cara e inacessível, agora rivaliza, e em muitos casos supera, os custos das fontes de energia tradicionais (Global Solar Council, 2021).

A capacidade da energia solar de ser modular e escalável, variando de pequenas instalações em telhados a vastas fazendas solares, significa que ela tem um potencial verdadeiramente transformador (Kim e Lee, 2019). Países de todo o mundo, de nações industrializadas a regiões em desenvolvimento, estão reconhecendo e capitalizando sobre essa oportunidade (Watson *et al.*, 2020).

Porém, nem todas as residências possuem fácil acesso à rede elétrica convencional conectados à rede da concessionária de energia elétrica, por esta maneira surgem os sistemas off grid, que não necessitam de conexão com o grid da concessionária e podem operar normalmente alimentando cargas das residências. Casos de sistemas off grid surgem especialmente, mas se limitando a locais isolados como na Amazônia Legal. Neste contexto, os Sistemas de Geração Fotovoltaica Isolada (SGFI) surgem como uma solução, proporcionando autonomia energética a essas residências.

Porém, como qualquer solução, a energia solar também possui seus desafios. A intermitência é uma preocupação, já que a produção de energia depende das condições climáticas e da hora do dia. Além disso, questões relacionadas ao armazenamento de energia e à integração eficiente nas redes elétricas são áreas ativas de pesquisa e desenvolvimento (Watson *et al.*, 2020).

Para tais problemas, a utilização de baterias se faz necessário para que a reserva de energia elétrica seja possível e a residência não fique sem energia elétrica quando, por exemplo, tivermos períodos longos de chuvas nas regiões. Esta é uma problemática solucionável com a inserção de baterias para realizar o armazenamento energética para a residência, no entanto a carga da residência deverá ser menor ou igual a capacidade da bateria realizar a alimentação do sistema, caso isso não ocorra o sistema entrará em colapso e entrará em stand-by até realização de manutenção corretiva.

Enquanto desafios permanecem, os benefícios em termos de sustentabilidade, autonomia e economia são inegáveis, com isso, este trabalho tem como objetivo analisar três casos de campo com instalação finalizada e em operação de SIGFI 80 na região da Amazônia Legal. Tais SIGFI são compostos por equipamentos como inversores, baterias de lítio, controladores de carga e demais miscelâneas, onde será possível avaliar o funcionamento do sistema em residências que aderiram a carga uniforme que o SIGFI deveria operar, outro caso em que a carga da residência tenha sido alterada e ocasionando desta forma necessidade de manutenções corretivas para que o sistema retornasse à operação normal e outra residência em que a potência instalada opere dentro dos limites de potência de alimentação do SIGFI, no entanto

ocorrendo pequenos picos de consumo em alguns períodos.

1.1 Contexto

Os três projetos que iremos analisar fazem parte de um grupo de SIGFI instalados em 2022 provenientes do projeto Mais Luz para Amazônia (MLA). Os sistemas de armazenamento de energia aplicados a sistemas isolados foram desenvolvidos e avaliados de forma técnica, regulatória e econômica.

O local onde os sistemas estão instalados fazem parte da microrregião de Cruzeiro do Sul, na unidade federativa do Acre. A localização pode ser observada na Fig. 1, onde é possível identificar o local de instalação dos três SIGFI que serão estudados.

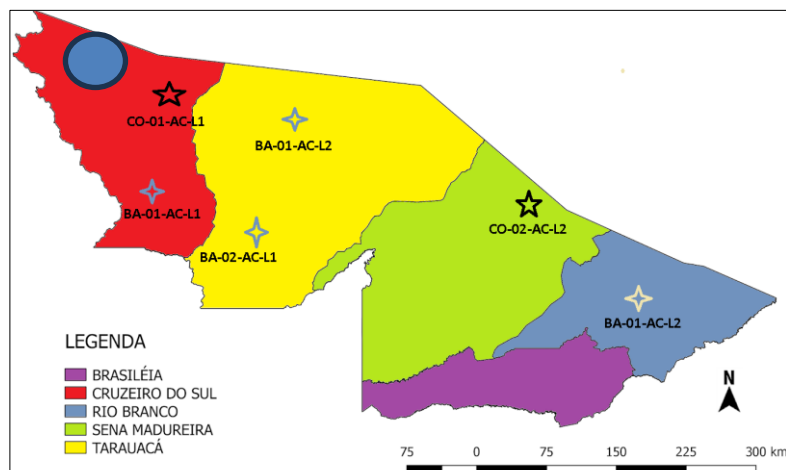


Figura 1- Microrregiões do Acre.
Fonte: Adaptado de Infoescola, 2023.

A Tab. 1 mostra as características do local de instalação dos três SIGFI instalados, que são importantes para que o dimensionamento do sistema ocorra da melhor forma possível, atingindo desta forma a eficiência e a vida útil necessárias para fornecer energia à residência onde será instalado

Tabela 1 – Características da região

Características	Acre
Temperatura (°C)	25,75
Pluviosidade média anual (mm)	2037
Irradiação média global mensal (kWh/m ² .dia)	3,88
Insolação diária média anual (h)	4
Extensão territorial (km ²)	164.123,74

Fonte: Adaptado de Labren, 2023.

2. METODOLOGIA

A potência dos SIGFIs instalados são de 80 kWh, sendo compostos pelas seguintes características conforme a Tab. 2. O sistema de armazenamento utilizado neste estudo compreende um sistema que alimenta a residência de forma com autonomia de até 36 horas, sendo que com sua potência instalada, o sistema deve operar de forma contínua sem problemas técnicos. No entanto, caso ocorra adição na carga instalada total na residência o sistema poderá enfrentar problemas em seu funcionamento, fazendo com que o sistema de segurança do SIGFI entre em operação e retorne apenas após uma manutenção corretiva devida. A autonomia de 36 horas é estabelecida para permitir que o sistema continue em operação mesmo em dias nublados, com baixa irradiação. Após essas 36 horas, caso ainda assim o sistema não seja carregado, ele se desliga e só irá entrar em operação quando a bateria possuir carga mínima para a segurança do sistema.

Tabela 2 – Descrição do Sistema.

Descrição	SIGFI 80
Consumo (Wh/dia)	2.650
Demanda máxima (W)	1.250
Tensão do sistema CC (V)	48

Capacidade útil mínima do banco de baterias (com perdas)	138 Ah (6.625 Wh)
Capacidade útil mínima do banco de baterias (sem perdas)	110 Ah (5.300 Wh)

Fonte: Adaptado de Labren, 2023.

2.1 SIGFI E SEUS COMPONENTES

As subseções a seguir descrevem os componentes inseridos no sistema SIGFI.

Bateria de Lítio – INTELBRAS 24V 100Ah 24S100. As baterias de lítio são componentes cruciais para Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI), sendo que as baterias de lítio armazenam uma grande quantidade de energia em um espaço pequeno, tornando-as adequadas para instalações em pequena escala (Tarascon *et al.*, 2001).

Comparadas a outros tipos, como as baterias de chumbo-ácido, estas baterias podem suportar muitos ciclos de carga e descarga, prolongando a vida útil do sistema de armazenamento. Possuem também uma integração com Sistemas de Gerenciamento de Baterias (BMS) que monitoram e gerenciam o desempenho do equipamento, garantindo sua operação segura e eficiente.

As baterias de lítio podem ser carregadas rapidamente, otimizando o aproveitamento da energia gerada. Com o avanço tecnológico e sua produção em massa, os custos das baterias de lítio têm mostrado tendência de redução, tornando-as cada vez mais acessíveis para projetos de SIGFI. (Nykvist *et al.*, 2015).

Controlador de carga – INTELBRAS ECM 6048. O controlador de carga é uma peça fundamental em um SIGFI, especialmente em sistemas solares fotovoltaicos. Sua função principal é gerenciar a energia que flui entre os painéis fotovoltaicos (ou outras fontes intermitentes) e o banco de baterias, garantindo um carregamento seguro e eficiente.

Tal equipamento garante que as baterias não sejam carregadas excessivamente, impede que ocorram descargas abaixo de um limite seguro, preservando a vida útil da bateria, e mantém a tensão da bateria dentro de limites seguros, evitando danificar ou reduzir sua vida útil (Dunlop, 2010).

Em sistemas SIGFI, dada a natureza intermitente da geração, o controlador de carga é fundamental para equilibrar a entrada e o armazenamento de energia. A capacidade do controlador de se adaptar às variações na geração e demanda ajuda a prolongar a vida útil das baterias e garante energia disponível durante períodos sem geração (Luque e Hegedus, 2011).

Inversor – INTELBRAS ISV 1501. O inversor é o componente que converte a energia gerada por painéis fotovoltaicos ou armazenada nas baterias em corrente alternada (CA) para uso em aplicações comuns (Carrasco *et al.*, 2006).

Alguns inversores avançados, especialmente os que utilizam tecnologia MPPT, ajudam a extrair o máximo de energia dos painéis solares

Em um SIGFI, o inversor não só facilita o uso da energia gerada, mas também serve como um ponto de interação e controle entre o sistema de geração e os consumidores finais. Sua capacidade de converter e gerenciar energia de forma eficiente é vital para a operação eficaz do sistema.

Módulo Fotovoltaico – INTELBRAS EMSH 555. Um módulo fotovoltaico, frequentemente denominado de painel solar, é um composto de células solares que converte a luz do sol em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Para um sistema fotovoltaico SIGFI, os módulos são combinados com inversores, controladores de carga e baterias.

2.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMAS SIGFI

A configuração do SIGFI é composta pelos equipamentos mencionados na sessão 2.1 em conjunto com as características informadas na Tab. 2. A Fig. 2 e Fig. 3 abaixo mostram as imagens das configurações mecânicas e elétricas do SIGFI 80, respectivamente.

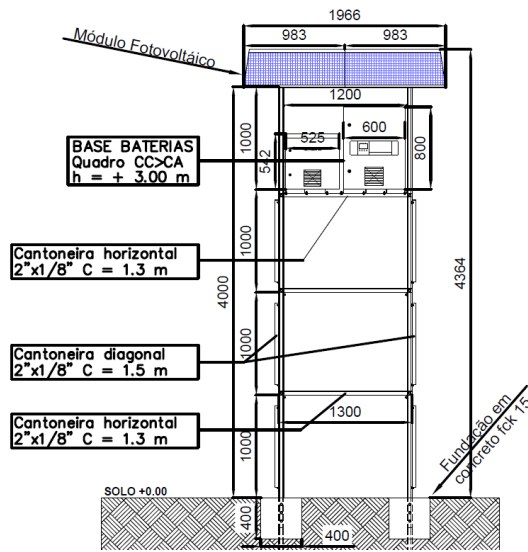


Figura 2 – Desenho mecânico do SIGFI 80

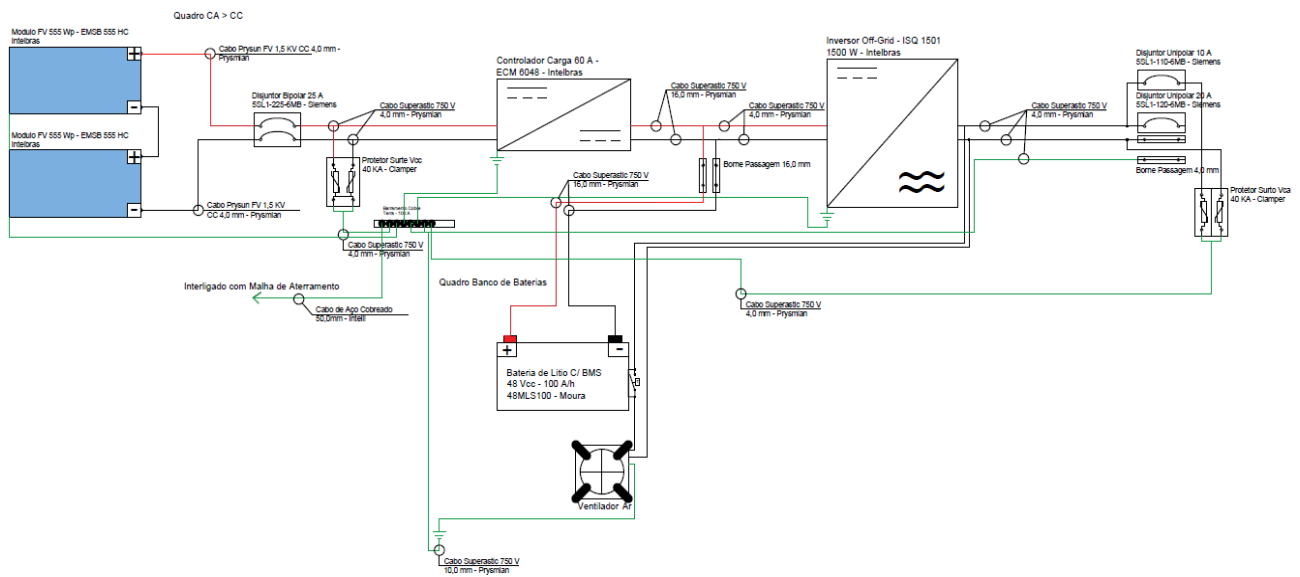


Figura 3 – Diagrama unifilar do SIGFI 80

2.3 Método de análise

As análises de campo realizadas nos sistemas SIGFIs levaram em consideração uma amostragem de 30 dias de operação dos sistemas com dados extraídos do controlador de carga e das baterias, através do BMS. Os dados são armazenados e extraídos quando são realizadas manutenções preventivas ou corretivas nos SIGFIs. Essas manutenções acontecem quando são identificadas chamados de ocorrências para manutenções corretivas acionados pelo proprietário da residência. Nesse momento, são extraídos os dados dos SIGFIs justamente para analisar o que pode ter ocorrido para que o sistema parasse seu funcionamento. É neste momento que é possível identificar a causa do problema de funcionamento, causa esta que pode ser desde possíveis problemas nos equipamentos; sobrecarga no sistema que configuraria uma má utilização por parte do usuário, entre outros.

Os atuais sistemas foram instalados a uma limitação de até 5 metros da residência, sem influência de sombras e de fácil acesso para realização de manutenções.

3. RESULTADOS

Os dados adquiridos foram tratados e em seguida analisados para verificar seu correto funcionamento e desempenho. Através dessas análises, foi possível verificar algumas diferenças entre cargas utilizadas nas três residências analisadas. Os resultados são mostrados na Fig. 4, Fig. 5 e Fig. 6 a seguir.

Com os gráficos abaixo é possível identificar a curva de carga dos três sistemas mencionados. O SIGFI 1, que apresentou uma sobrecarga no sistema, o SIGFI 2, que apresentou um consumo energética dentro dos limites estipulados em projeto, e o SIGFI 3, que apresentou consumo energético abaixo do que o sistema estaria preparado para suprir. Todos os dados analisados são por um período de 30 dias, sendo possível identificar que a linha verde apresenta a média de consumo do SIGFI em W/h determinada em projeto, a linha em azul o consumo do controlador de carga e a linha em laranja a geração máxima por dia do sistema.

Realizando as análises dos três sistemas, é possível identificar que no SIGFI 1 as informações disponibilizadas pelo controlador de carga indicam que o consumo energético extrapolou o dimensionado pelo sistema SIGFI em diversos dias, com picos de consumo que chegaram a 3.6 kWh/dia, uma sobrecarga de +35% que o sistema fora dimensionado. Neste caso, conforme observado na Fig. 4, é possível identificar que o sistema extrapolou em vários dias o limite de energia disponível de acordo com o dimensionamento do SIGFI. Analisando os dados do controlador de carga, fica evidente que o sistema suportou a carga elevada pois no mesmo período ele operou diretamente usufruindo da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos. Outro fator que auxiliou o sistema a não entrar em modo de segurança pode ser sido a redução de carga em alguns dias ao longo do mês de agosto, ficando abaixo da linha verde, que seria o limite de consumo. No entanto, a redução de consumo em alguns dias não foi suficiente para que o sistema continuasse a operar sem problemas, sendo que no início de setembro sistema entrou em modo de segurança e paralisou seu funcionamento. Desta forma, o cliente acionou a equipe de manutenção corretiva para que fosse realizada uma visita técnica no local para averiguar o ocorrido.

Após a equipe chegar no local, foi averiguado que a residência possuía mais cargas do que o sistema estava projetado para operar. As cargas observadas incluíam uma geladeira; um freezer; uma máquina de lavar roupa e um ferro de passar roupas.

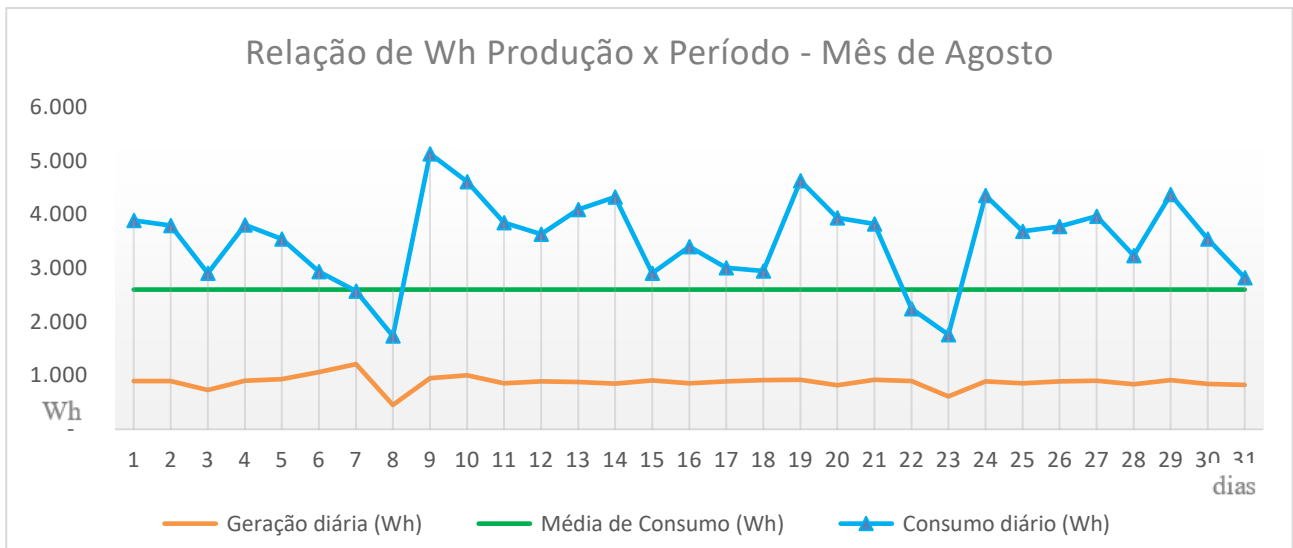


Figura 4 – Dados técnicos do SIGFI 1.

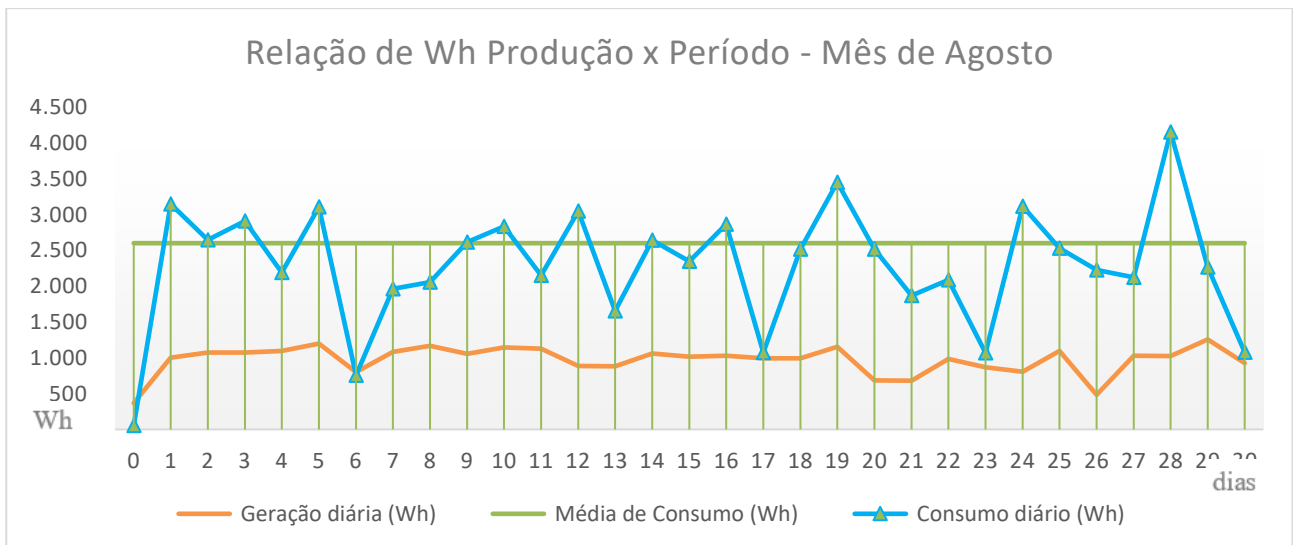


Figura 5 – Dados técnicos do SIGFI 2.

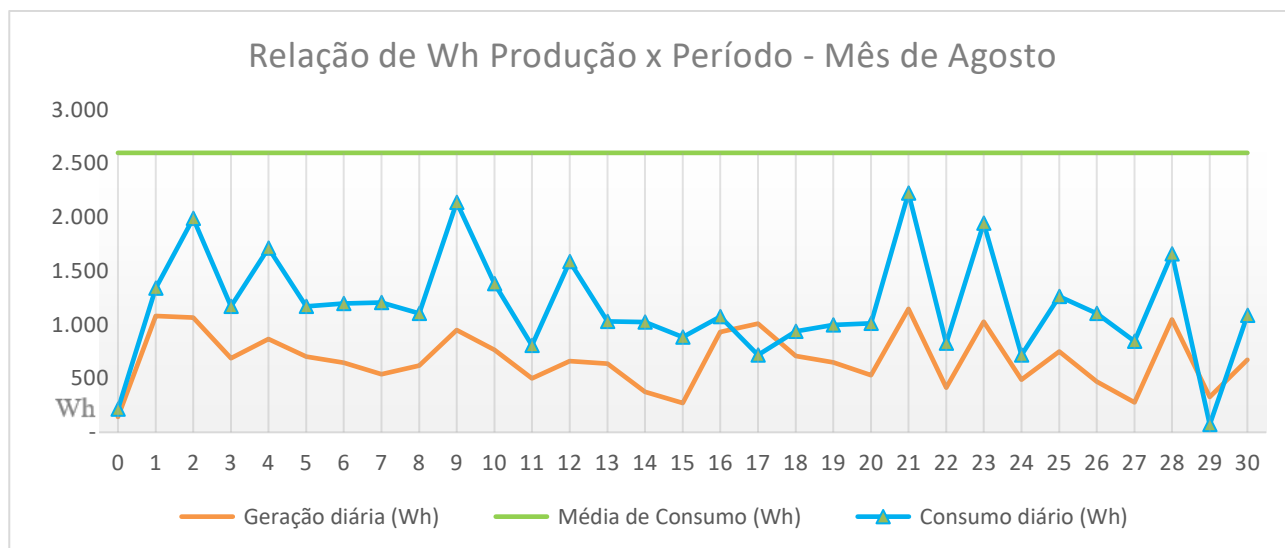


Figura 6 – Dados técnicos do SIGFI 3.

No SIGFI 2, as informações foram colhidas na manutenção preventiva e disponibilizadas pelo controlador de carga, que no momento da coleta não indicou que o consumo energético extrapolou em nenhum momento o limite dimensionado para o sistema. Neste caso, conforme observado na Fig. 5, o sistema indicou que operou dentro dos limites de funcionamento, não emitindo alertas de sobrecargas ou erro de funcionamento do sistema por outros motivos além da sobrecarga possível. É possível identificar picos energéticos ao longo do mês, no entanto ainda assim dentro dos limites de funcionamento do sistema. Para este SIGFI 2, o funcionamento do sistema ficou dentro dos limites de funcionalidades e não apresentou problemas, mesmo o controlador de carga informando que em alguns dias aconteceram picos energéticos além do permitido. Estes picos estes que chegaram a 20% do limite estipulado pelo SIGFI, no entanto tais picos não mantiveram uma continuidade que pudesse acionar a segurança do sistema.

No SIGFI 3, as informações também foram colhidas na manutenção preventiva e disponibilizadas pelo controlador de carga, que no momento da coleta não indicou que o consumo energético extrapolou em algum momento o dimensionado para o sistema. Neste caso, conforme observado na Fig. 6, o sistema indicou que ficou dentro dos limites de funcionamento e não apresentou em nenhum momento picos energéticos como no SIGFI 1 e 2, mencionados acima. Para o caso do SIGFI 3, o sistema alimentou uma configuração de carga da residência que possuía uma demanda energética abaixo do que o sistema está preparado para alimentar. Um fator até aqui positivo para que fosse possível manter o pleno funcionamento do sistema, sem necessidade de manutenções corretivas.

4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Com a análise realizada, pode-se perceber o comportamento real dos três sistemas SIGFI instalados em campo, cada um alimentando uma quantidade de carga energética diferente para cada residência.

No SIGFI 1 é possível identificar que a instalação de cargas em demasia ocasionaram chamados de manutenções corretivas que apresentam um custo elevado para o programa, podendo chegar a R\$ 1.950,00 por chamado. O valor pode ser ainda maior caso haja a necessidade da substituição de equipamentos. Outro fator importante para casos em que a carga instalada extrapole o limite do sistema é o impacto no tempo de vida dos equipamentos do SIGFI. Os equipamentos podem sofrer graves perdas de vida útil ao longo dos anos, ocasionando assim possíveis trocas como baterias e inversores, gerando um custo elevado ao operador.

O sistema SIGFI 2 apresentou um funcionamento dentro do esperado ainda assim para uma residência que apresentou uma carga além do permitido. Neste caso podemos observar pequenos intervalos de tempo ao longo do mês em que a carga ultrapassou o limite que o SIGFI fora dimensionado. Ainda assim, por tratar-se de pequenos intervalos de tempo, o sistema retornou ao funcionamento sem problemas. Mesmo o sistema não apresentando problemas, a bateria não aumentou suas quantidades de ciclos e o inversor operou normalmente. O resultado demonstra a resiliência do sistema proposto.

O SIGFI 3 é possível identificar uma carga dentro dos limites exigidos de funcionamento do sistema e operando dentro dos padrões. A carga não é aumentada e se mantém nos limites é possível manter a quantidade de manutenções preventivas programadas sem a necessidade de manutenções corretivas. Casos como esse contribuem com o orçamento e viabilidade financeira do projeto. Dentro destes limitantes de carga, os equipamentos terão uma maior probabilidade de possuir uma vida útil dentro dos padrões informados nos manuais e certificações dos fabricantes. Em tal SIGFI é possível identificar que o sistema que contribui para a democratização da energia elétrica em áreas remotas é funcional e caso se mantenha as características nas quais o SIGFI fora dimensionado, o sistema irá operar sem maiores problemas.

Como pode ser observado, o fator humano é algo que influencia de forma direta o funcionamento do SIGFI, sendo assim a conscientização através de informativos e treinamentos deve ser algo exigido no momento da entrega dos equipamentos em funcionamento ao cliente e o mesmo treinamento deve ser ministrado nas visitas preventivas e corretivas.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos colegas do laboratório Fotovoltaica-UFSC pelas discussões frutíferas sobre os temas abordados nesse artigo. Agradecem também as empresas parceiras na disponibilidade das informações e reuniões enriquecedoras para que esta pesquisa de campo fosse possível.

REFERÊNCIAS

- Carrasco, J. M., Serrano, L. G., Galván, E., Portillo, R., Ramírez, D. M., e Zafra, A. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4), 1002-1016.
- Dunlop, J. (2010). *Photovoltaic systems*. American Technical Publishers, Inc.
- Davis, J., e Fernandez, L. (2020). Solar Tech: The Rapid Evolution of Photovoltaic Cells. *GreenTech Reviews*, 7(3), 56-70.
- Global Solar Council. (2021). *The Global Solar Energy Landscape*. Solar Energy Report Series.
- Infoescola. Info escola navegando e aprendendo, Geografia do Acre, 2023. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/geografia/geografia-do-acre/>>
- Kim, H., e Lee, S. (2019). Modularity in Solar Installations: A Comparative Study. *Renewable Energy Sources Journal*, 14(4), 230-245.
- Labren. Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia, 2023. Disponível em: <<http://labren.ccst.inpe.br/index.html>>.
- Luque, A., e Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley e Sons.
- Martin, L. (2015). *Sun Gods and Solar Energy: A Global History*. Ancient Cultures Publishing.
- Nykvist, B., e Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, 5(4), 329-332.
- Tarascon, J. M., e Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359-367.
- Turner, A., e Brown, C. (2018). Fossil Fuels to Renewables: The Global Energy Transition. *Energy Policy Journal*, 12(1), 10-25.
- Watson, R., Patel, N., e Smith, J. (2020). Solar Energy Adoption: A Global Perspective. *International Energy Research Journal*, 16(2), 110-127.

ANALYZING THE PERFORMANCE OF A SINGLE POWER GENERATION SYSTEM INSTALLED BY AMAZON WITH INTERMITTENT SOURCES (SIGFI)

Abstract. *Electric energy is an important tool for the social development of a country, and in Brazil a portion of the population still lives on the periphery of this energy inclusion. As part of the process of democratizing access to electricity in Brazil, the Mais Luz para Amazônia Program (MLA) was created in February 2022. This program aims to install Individual Electrical Energy Generation Systems with Intermittent Sources – SIGFI or Isolated Electrical Energy Generation and Distribution Microsystems – MIGDI, thus providing the limit installation of a number of lamps and sockets within consumer units. (UC) that have remote or isolated access and are covered within the Legal Amazon. Such technologies generate electrical energy through solar energy and storage through the use of batteries.*

Key words: *Energy Storage, SIGFI, Isolated System.*