

# ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES COM DIFERENTES POTÊNCIAS NOMINAIS UTILIZANDO-SE A CURVA DE CARGA REAL DE UMA EDIFICAÇÃO RIBEIRINHA

José de Arimatéia Alves Vieira Filho – [jose.vieira.filho@itec.ufpa.br](mailto:jose.vieira.filho@itec.ufpa.br)

Afonso Lobato de Oliveira

Ana Paula Silva da Silva

Pedro Ferreira Torres

Wilson Negrão Macêdo

Universidade Federal do Pará, Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

## 4.3. Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

**Resumo.** *Existem várias formas de se conceber os sistemas fotovoltaicos isolados para o atendimento individual, os quais podem atender cargas em corrente contínua, cargas em corrente alternada e cargas mistas (corrente contínua e alternada). Em corrente alternada, a curva de eficiência em relação ao carregamento do inversor e sua potência nominal influenciam diretamente nas perdas do sistema. Embora os manuais dos fabricantes apresentem a referida curva, poucos detalham de maneira prática seus impactos, uma vez que eles operam, geralmente, com baixo carregamento nos casos reais. Diante desse cenário, este trabalho consiste na análise da eficiência energética de inversores de tensão (800, 1500, 2000 e 3000 VA), utilizando-se da curva de eficiência normalizada, em relação ao carregamento, de uma linha de inversores disponível no mercado, e de uma curva de carga real como potência de saída dos inversores para a simulação das respectivas potências de entrada. A curva de carga, com amostragem de dois segundos, foi monitorada por um ano pelo Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas em um sistema fotovoltaico isolado que atende uma família ribeirinha no município de Barcarena, Pará. Concluiu-se, a partir dos períodos de descanso do freezer, que os inversores de maior potência nominal apresentaram uma menor eficiência para uma mesma quantidade de energia demandada. Evidenciou-se também a complexidade em utilizar a redução do consumo como critério de eficiência energética, pois desligar os equipamentos significa reduzir o carregamento do inversor e notoriamente torná-lo menos eficiente.*

**Palavras-chave:** Sistema Fotovoltaico Isolado, Eficiência de Inversor, Eficiência Energética

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da energia solar fotovoltaica (FV) teve um crescimento acentuado nos últimos anos. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, a ABSOLAR (2023), em 2021 o Brasil somou 14.367 MW de potência instalada de sistemas fotovoltaicos, superando os 14.000 MW da usina de Itaipu, que ocupa o segundo lugar no ranking de maiores usinas hidroelétricas do país (WEFORUM, 2023). Em setembro de 2023, o total foi de 34.228 MW, um crescimento de aproximadamente 2,4 vezes em menos de dois anos. Embora esse crescimento tenha sido significativo, muitas comunidades afastadas dos centros urbanos não têm acesso à energia elétrica proveniente da rede.

Os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) são uma alternativa segura, simples e de qualidade para incluir essas comunidades. Os SFIs são comumente aplicados em localidades de difícil acesso através da energia proveniente da luz solar, sendo livre de combustíveis fósseis, ou seja, com um menor impacto ao meio ambiente. Em um sistema SFI, quatro componentes são básicos para seu devido funcionamento: o gerador, composto por módulos fotovoltaicos que realizam a conversão de energia solar em eletricidade; o sistema de armazenamento, normalmente composto por arranjos de baterias, conferindo estabilidade e fornecimento nos momentos de baixa ou ausência de irradiação solar; o sistema de condicionamento de potência, que aqui é dividido em dois, mas que podem ser integrados em um único equipamento, sendo eles o controlador de carga que possui um conversor CC-CC integrado e realiza o controle da carga e descarga do banco de baterias; e o inversor de tensão que fornece energia para as cargas em corrente alternada no mesmo nível de tensão e frequência das concessionárias de energia locais. Um dos principais desafios do uso do inversor é garantir uma alta eficiência de conversão CC-CA com cargas inferiores às nominais.

Poucos estudos apresentam o desempenho do inversor em situações reais, embora seja comum a referência às curvas de eficiência dos fabricantes. Neste trabalho são apresentadas informações consistentes que quantificam o impacto da curva de carga sobre a eficiência do inversor. Ressalta-se ainda que estes inversores precisam atender surtos de partida de alguns equipamentos e, por esse motivo, muitas vezes precisam ser sobredimensionados com relação à demanda da edificação.

Neste artigo, são analisadas as perdas de energia no processo de conversão CC-CA para diferentes níveis de potência de saída do inversor, utilizando-se de uma curva de carga real como potência de saída para a simulação das

respectivas potências de entrada através da curva de eficiência normalizada de uma família de inversores existentes no mercado (800, 1500, 2000 e 3000 VA). A curva de carga foi monitorada durante um ano pelo Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) em um sistema fotovoltaico isolado que atende uma família ribeirinha no município de Barcarena, Pará (Vieira Filho, 2021).

## 2. METODOLOGIA

Para as análises que seguem é suficiente considerar na topologia a existência de um estágio CC-CA realizado por um inversor de tensão centralizado. Assim, a topologia da Fig. 1 representa a base para as simulações.

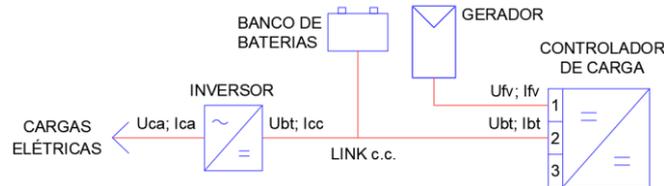


Figura 1 – Inversor conectado ao banco de baterias.

Na saída do inversor utiliza-se a curva de carga de um banco de dados com 241 dias válidos, de um ano de monitoramento, com amostragem de dois segundos, de um SFI instalado na Ilha das Onças, no município de Barcarena/PA. A Fig. 2 ilustra uma dessas curvas de cargas monitoradas. A curva corresponde ao atendimento de iluminação, tomada USB, televisão, máquina de aço e refrigeração, sendo esta responsável pela maior parte do consumo diário.

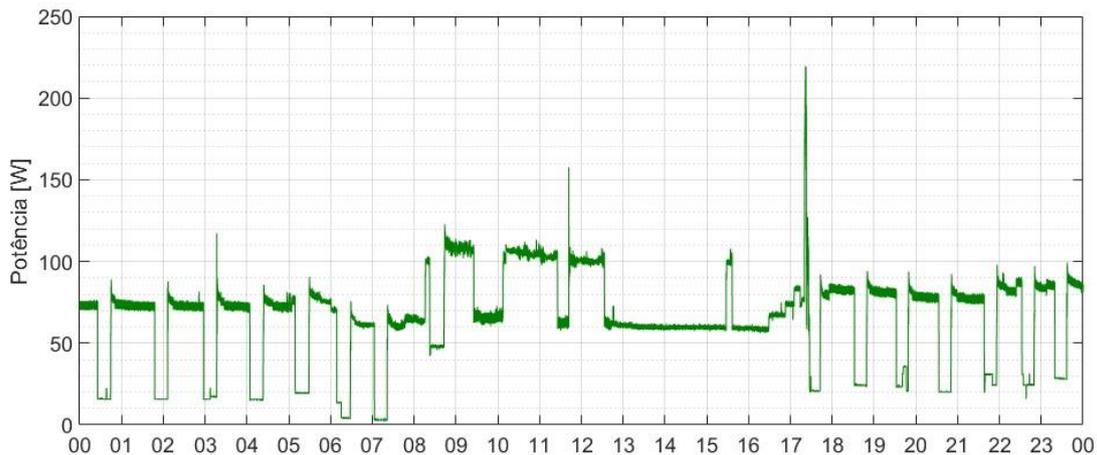


Figura 2 – Perfil de potência da carga no dia 30/04/2020, com amostragem de dois segundos.

O ciclo de liga/desliga do compressor apresentou regularidade de 20 minutos para o estado desligado, mas o estado ligado apresentou variações de 34 a 63 minutos na primeira metade do dia. Considerando o primeiro ciclo completo da Fig. 2, o *freezer* opera em conjunto com 15,8 W de lâmpadas ligadas, e subtraindo esse valor de todos pontos do gráfico é possível encontrar a sua demanda. O pico da partida do compressor foi de 69 W, seguida por uma queda brusca de 6 W, e em 5 minutos uma queda gradativa de 3 W, para então praticamente estabilizar em 57 W. Os valores de potência mais elevados, como o que ocorre pouco antes das 18 horas, corresponde ao uso da máquina de aço, que em termos de consumo de energia tem uma contribuição muito pequena em função do tempo em que permanece ligada para o beneficiamento do produto.

A inserção de um inversor centralizado para o condicionamento da potência traz consigo um conjunto de perdas que devem ser contabilizadas, em geral, pela eficiência de conversão. Para isso, foram consideradas as curvas para uma linha de inversores disponível no mercado. Ao proceder com a normalização das curvas de cada um deles com relação às suas respectivas potências nominais, as curvas tornam-se praticamente idênticas. Assim, para efeitos práticos, a curva normalizada será considerada para toda a linha de inversores (800, 1.500, 2.000 e 3.000 VA), conforme a Fig. 3. Esse inversor foi selecionado por ser um dos poucos inversores do mercado que trazem informações detalhadas sobre o equipamento.

Para a obtenção da potência CC na entrada dos inversores, aplica-se a curva de eficiência (Fig. 3) a todos os dias válidos, incluindo o da Fig. 2, para os inversores de 800 a 3.000 VA. Calcula-se então o consumo de energia incluindo as

perdas no inversor, bem como as eficiências médias diárias de conversão de cada equipamento de acordo com a sua potência nominal.

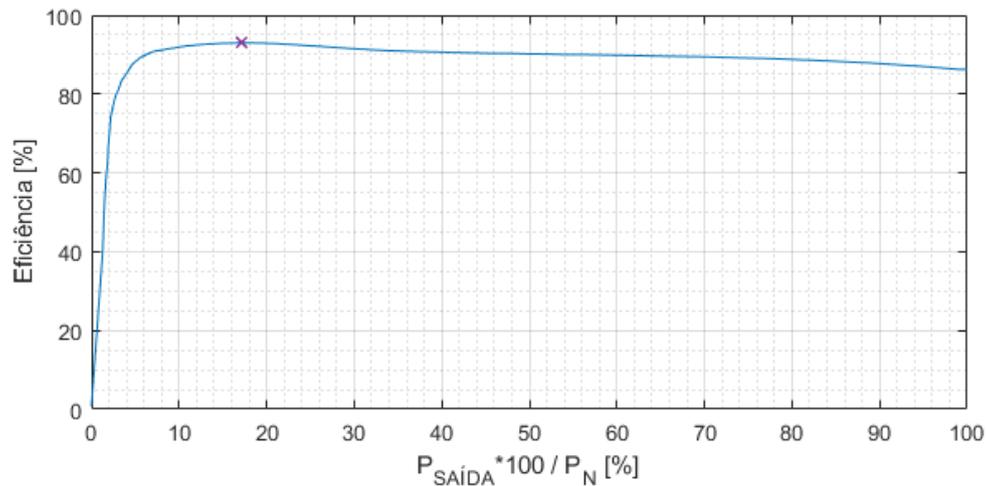


Figura 3 – Curva de eficiência normalizada dos inversores utilizados: Eficiência máxima de 93 % com 17% de carga. Fonte: Adaptado de Atersa Grupo Elecnor (2017).

A eficiência máxima dos inversores é de 93 % (Fig. 3) e ocorre em torno de 17 % de carregamento (ATERSA GRUPO ELECNOR, 2017). À plena carga, aquela reduz para 86 % e as perdas mais expressivas ocorrem abaixo do “joelho” da curva. Assim, para o inversor de 1500 VA por exemplo, carregado em 44,6 % (carga estimada do SFI em c.a. 668,04 VA, ou seja, 44,6 % da potência do inversor) a eficiência é de 91 %.

### 3. RESULTADOS

Para compreensão das perdas que envolvem a adição do inversor, seguem as estimativas da potência na entrada do inversor com base nos dados reais do SFI. Percebe-se pela Figura 4 (que corresponde a Fig. 2 corrigida para o lado c.c. e restringida às 12 horas do dia para facilitar a visualização) que nos períodos de descanso do freezer, onde seriam esperadas reduções consideráveis na demanda, têm-se valores cada vez mais próximos da sua operação em regime permanente (RP) com o aumento da potência nominal do inversor utilizado na análise. No pior caso de sobredimensionamento (inversor de 3000 VA), a potência durante o descanso do freezer passa de apenas 3 W na saída do inversor para 78 W na entrada, aproximando-se do valor da potência demandada pela carga com o freezer operando em RP (88 W). Isso mostra a importância de se especificar o inversor que opere com um fator de carga de pelo menos 20%. Os ribeirinhos possuem a falsa impressão que quanto maior a potência do inversor melhor fica o sistema, o que não é verídico. Nota-se que se a curva de carga fosse atendida diretamente em c.c. (sem inversor,  $P_{LD}$  em verde), o sistema poderia se tornar bem mais eficiente.

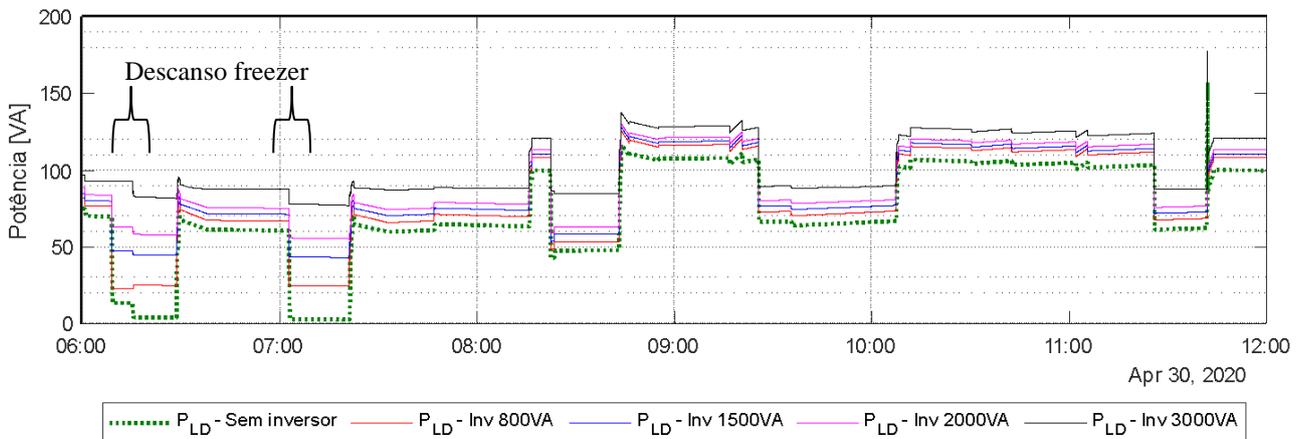


Figura 4 - Perfis de potência de carga ( $P_{LD}$ ) com filtro de ruídos no dia 30/04/2020 entre 6-12h. Eficiências médias diárias de 88, 80, 75 e 66% para os inversores de 800, 1500, 2000 e 3000 VA.

Aplicando-se a mesma metodologia para todos os dias válidos, ressaltando que em todas as análises são consideradas as 24 horas de operação, pode-se perceber na Figura 5 a relação entre a eficiência dos inversores e o consumo diário nas suas respectivas saídas. A eficiência máxima diária obtida foi de 92,3 % com 2,4 kWh na saída do inversor de 800 VA. No entanto, em um dia de consumo de 0,4 kWh a eficiência decresce drasticamente para 56,8 %.

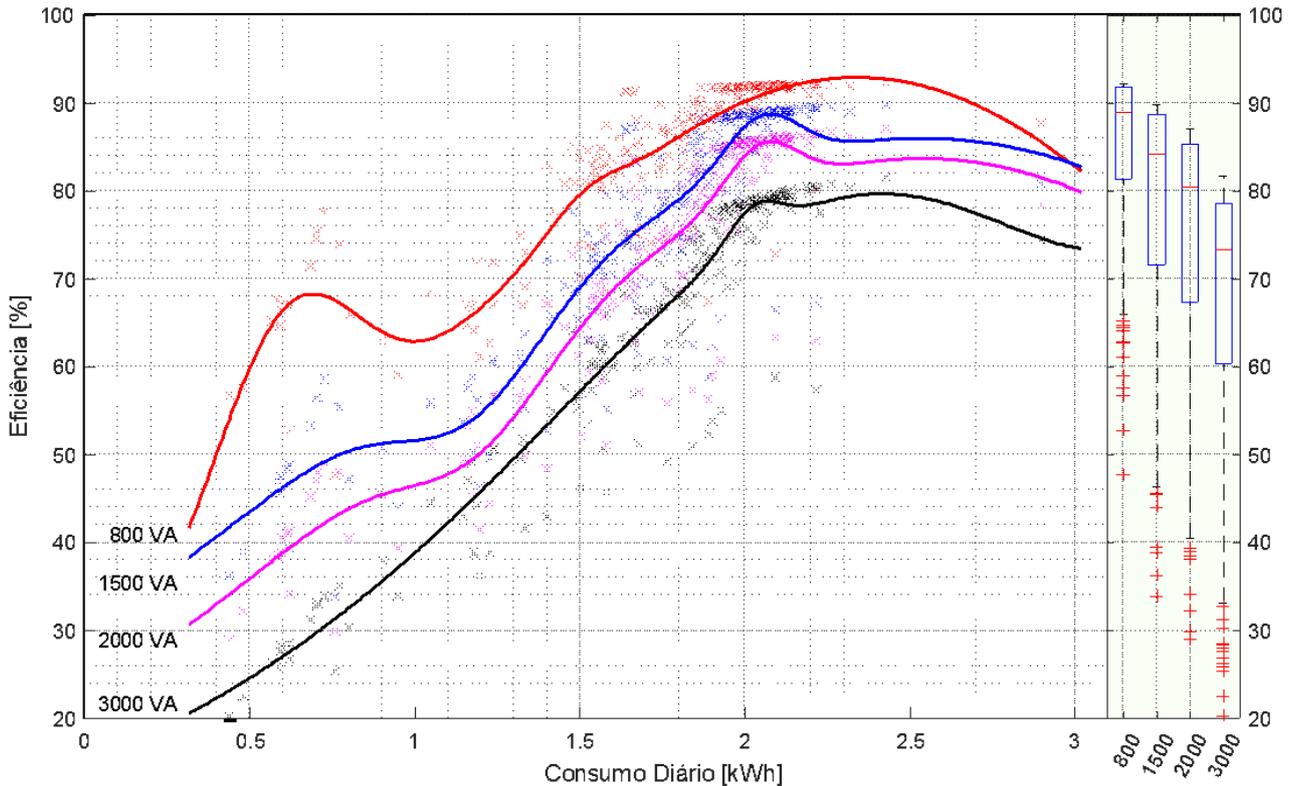


Figura 5 - Gráfico da eficiência média diária dos inversores para cada consumo nas suas respectivas saídas e *boxplot* das eficiências (Obs.: Apenas dias válidos: 241 de 355 dias de operação do SFI).

Quanto maior a potência nominal do inversor para o mesmo montante de energia na sua saída, maiores são as perdas devido ao seu autoconsumo, tornando-o menos eficiente, conforme apresentado na Fig. 5. Além disso, para níveis baixos de consumo diário a situação agrava-se. Para os mesmos 0,4 kWh, os inversores de 1500, 2000 e 3000 VA apresentaram eficiências de 36,3, 29,0 e 20,3 %, respectivamente.

Os pontos da Fig. 5 com maior concentração estão entre 1,8 kWh e 2,2 kWh, faixa de consumo diário na qual obteve-se o maior número de ocorrências (56,5%). Quanto mais à direita ou à esquerda, menor a concentração de amostras, o que torna as curvas menos representativas para generalizações, mas ainda funcionais para análises, uma vez que se tratam de dados reais e com um número de ocorrências significativo.

Considerando o inversor de 1500 VA, nota-se o aumento do intervalo interquartil (IQR) do gráfico *boxplot* com relação ao de 800 VA (Fig. 5) e que a mediana (89 %) tende ao terceiro quartil pela elevada concentração de amostras nesta região. Esta eficiência pode então ser considerada mais representativa do que o valor máximo informado pelo fabricante nos casos em que o projetista desconsidera a dinâmica do sistema durante o dimensionamento.

Assim, quanto maior a potência do inversor, maior o IQR, com quedas significativas nas eficiências: medianas de 89, 84, 80 e 73 % para os inversores de 800 a 3000 VA respectivamente. Esse comportamento já era esperado, uma vez que quanto mais sobredimensionado, mais o inversor tende a trabalhar a esquerda do “joelho” da curva de eficiência (Fig. 3). Contudo, embora esse seja um resultado esperado, pouquíssimos trabalhos dedicam-se a trazer uma informação mais consistente, quantificando o impacto da curva de carregamento no que tange à eficiência do inversor.

Entre 0,4 e 1 kWh percebe-se uma distorção na curva do inversor de 800 VA que é bastante suavizada nos outros inversores. Nesse intervalo estão 7,5 % das amostras, sendo nos dias anteriores à manutenção do *freezer*, ressaltando que em apenas dois dias o *freezer* não estava com defeito e, portanto, esses são dias caracterizados principalmente pela operação das lâmpadas e da TV. Considerando todos os dias no intervalo em questão, em 93 % do tempo a demanda esteve abaixo de 61 W. Assim, para o inversor de 800 VA a operação deu-se em boa parte do tempo em torno do “joelho” da curva de eficiência, obtendo valores médios diários razoáveis, e para o restante deu-se mais à esquerda do “joelho”.

O impacto da baixa eficiência dos inversores atinge diretamente o banco de baterias e o gerador fotovoltaico. Na Tabela 1 é considerada a eficiência de 91% correspondente à eficiência cujo o carregamento equivale à carga instalada e às medianas obtidas para cada inversor na Figura 5. Notam-se diferenças significativas nos tamanhos dos bancos de baterias e na capacidade de geração obtidos pelo método de dimensionamento tradicionalmente divulgado na literatura, resumido aqui pelas Eq. (1), (2) e (3).

Tabela 1 – Dimensionamento do SFI considerando diferentes eficiências para o inversor.

$\eta_{inv}$ [%]	91	89	84	80	73
$\eta_{cdc}$ [%]	0,90				
$\eta_g$ [%]	0,01				
$P_{instalada}$ [We]	624				
$L_{ca}$ [Wh]	2004				
$L_{cc}$ [Wh]	2447	2502	2651	2783	3050
HSPmin [kWh/m <sup>2</sup> ]	4,2				
$N_n$ [dia]	2,6				
PDmax [%]	0,8				
$C_B^*$ [Wh]	7842,3	8018,5	8495,8	8920,6	9776,0
$U_n$ [V]	24,0				
$C_B$ [Ah]	326,8	334,1	354,0	371,7	407,3
k	1,25				
$P_{ger}$ [Wp]	728,2	744,6	788,9	828,4	907,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

$$C_B^* = \frac{L \cdot N_n}{PD_{max}} \quad (1)$$

$$L = L_{ca} / (\eta_g \cdot \eta_{cdc} \cdot \eta_{inv}) \quad (2)$$

$$P_{ger} = \frac{k \cdot L}{HSP_{min} \text{ , para } k=1,25} \quad (3)$$

Onde  $\eta_{inv}$  corresponde à eficiência média diária do inversor;  $\eta_{cdc}$  à eficiência média diária de conversão cc-cc do controlador de carga obtida em avaliações experimentais (ressalta-se que esta eficiência também varia com o carregamento do controlador de carga);  $L_{ca}$  ao consumo em ca;  $L_{cc}$  ao consumo, corrigidas as perdas no inversor;  $L$  ao consumo corrigido;  $\eta_g$  à eficiência de carga e descarga do banco de baterias; HSPmin ao número de horas de sol pleno médio diário para o pior mês;  $N_n$  ao número de dia de autonomia; PDmax à profundidade de descarga máxima do banco de baterias;  $C_B^*$  à capacidade do banco de baterias;  $k$  à constante de perda e  $P_{ger}$  à potência do gerador FV.

#### 4. CONCLUSÃO

Durante a etapa de dimensionamento do inversor de tensão, as curvas diárias de consumo não eram tão claras, pois se alteravam de acordo com os hábitos dos moradores, os quais devem ser investigados para que as estimativas de tempo de utilização de cada equipamento fossem obtidas. Os principais parâmetros de referência são a carga instalada e os valores dos picos de partida das máquinas, os quais podem resultar num sobredimensionamento não intencional do inversor, caso os usuários operem em baixa demanda a maior parte do tempo.

Para o inversor operar com eficiência razoável é necessário que as curvas de carga diária operem à direita do “joelho” da curva de eficiência do inversor, mas pode ser inevitável a operação à esquerda, que deve ser reduzida ao mínimo. Evidencia-se aqui uma complexidade em utilizar a redução do consumo como critério de eficiência energética, pois desligar os equipamentos significa reduzir o carregamento do inversor e notoriamente torná-lo menos eficiente, ao ponto da demanda ser praticamente igual à da demanda com carga, (ver descanso do *freezer* na Figura 4). Logo, é preferível manter a carga ligada para gerar mais conforto aos usuários ou simplesmente desligar o inversor, caso não haja

nenhum equipamento ligado.

Em contrapartida, num SFI apenas em c.c. a redução do consumo pode ser efetivamente utilizada como critério de eficiência energética, pois a energia economizada é melhor aproveitada, seja para a carga do banco de baterias ou pelo menos para reduzir a sua taxa de descarga. Claramente existe um limite para esse benefício, que está atrelado ao nível de carga do banco, pois caso esteja completamente carregado e o gerador possuir a disponibilidade do recurso solar, então esse período de geração não será aproveitado. Nessa situação, incentiva-se o consumo de energia.

### **Agradecimentos**

Este trabalho foi apoiado pelas seguintes agências de pesquisa brasileiras: CAPES e CNPq. O último autor é financiado pelas bolsas 408049/2022-7 (Chamada CNPq/MCTI 25/2022 - Linha 1), 312033/2021-4 (Chamada CNPq N° 4/2021 - Bolsas de Produtividade em Pesquisa – PQ), CV 020 /2022 (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisa – FAPESPA). O Autor P. F. Torres agradece a *National Geographic Society* pelo suporte ao desenvolvimento do trabalho por meio do projeto EC-207T-18.

### **REFERÊNCIAS**

- ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 30 out. 2023.
- Atersa Grupo Elecnor. Catálogo do Inversor Senoidal Tauro BC: *Instrucciones de Funcionamiento*. 2017. Disponível em: <<https://atersa.com/es/>>. Acesso em: 9 set. 2020.
- Vieira Filho, José de Arimatéia. Desenvolvimento de uma bateadeira de açai em corrente contínua e monitoramento de sua aplicação em uma edificação ribeirinha na Amazônia suprida por sistema fotovoltaico isolado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.
- WEFORUM. the world's largest hydroelectric dams. 2023. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2022/12/worlds-largest-hydroelectric-dams-renewable-energy/>>. Acesso em: 30 out. 2023.

### **ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF INVERTERS WITH DIFFERENT NOMINAL POWER USING THE REAL LOAD CURVE OF A RIVERSIDE BUILDING**

**Abstract.** *There are several ways of designing Solar PV-based autonomous systems for the electricity supply of individual houses, and they can provide for direct current loads, alternating current loads, or both loads (continuous and alternating). In alternating current, the inverter efficiency curve and its nominal power directly influence the loss of the system. Although the manufacturers' manuals present this curve, only some of them detail its impacts since they generally operate with low loads in actual cases. Given this scenario, this work consists of analyzing the energy efficiency of voltage inverters (800, 1500, 2000, and 3000 VA), using the normalized efficiency curve of a series of inverters available on the market, and of an actual load curve as the output power of the inverters to simulate its respective input powers. The load curve, with a two-second sampling, was monitored for a year by the Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas in a Solar PV-based autonomous system that supplies a riverside family in the city of Barcarena, Pará. It was concluded, based on the rest periods of the freezer, that inverters with higher nominal power showed lower efficiency for the same amount of energy demanded. The complexity of using consumption reduction as an energy efficiency criterion is also evident, as turning off equipment means reducing the load on the inverter and noticeably making it less efficient.*

**Keywords:** *Solar PV-based autonomous systems, Voltage Inverter Efficiency, Energy Efficiency*