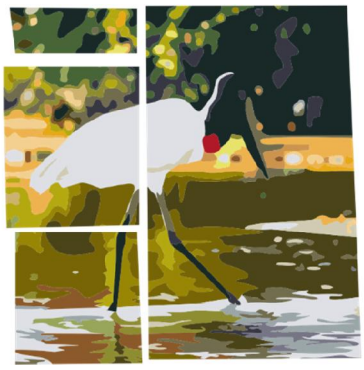

XICBPE
CONGRESSO BRASILEIRO
DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

CUIABÁ - MT
11 a 14 de setembro de 2018

A Integração dos Sistemas de Armazenamento de Energia na Geração Distribuída

Juliana D'Angela Mariano; Victor Baiochi Riboldi; Jair Urbanetz Junior.

RESUMO

A geração distribuída já é realidade em todo mundo. Entretanto este tipo de geração, proveniente de fontes renováveis como a solar fotovoltaica, ainda enfrenta problemas com relação à intermitência e qualidade de energia entregue à rede elétrica. Uma solução para estes problemas mencionados é a integração de sistemas de armazenamento de energia através de baterias. Neste artigo é trazida uma revisão da literatura do tema, ressaltando os possíveis modos de operação e *cases* reais aplicados no Brasil e no mundo. Portanto, é possível superar estes desafios com a integração destes sistemas obtendo melhor aproveitamento da geração fotovoltaica.

Palavras-chave: Geração distribuída, Energia fotovoltaica, Armazenamento

ABSTRACT

Distributed generation is already a reality everywhere. However, this type of generation, from renewable sources such as photovoltaic, still faces problems with regards to the intermittency and energy quality delivered to the electric grid. One solution is the integration of energy storage systems through batteries. In this paper a review of the literature will be presented, highlighting the possible modes of operation and cases applied in Brazil and globally. Therefore, it is possible to overcome these challenges by integrating these systems to obtain better use of photovoltaic generation.

Keywords: Distributed generation, Photovoltaic energy, Storage

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de armazenamento de energia são vistas como elementos chaves para um futuro sustentável no fornecimento de energia através da geração distribuída (Munzke *et al.*, 2017). Nos sistemas fotovoltaicos, em que normalmente operam com níveis de penetração substanciais devido à geração intermitente, existem alguns desafios a serem superados tanto na diferença de custos nos horários que ocorrem o pico de demanda, assim como a qualidade de energia que estes sistemas entregam à rede elétrica (Wang *et al.*, 2018).

Neste sentido, os sistemas de armazenamento de energia geralmente são usados junto à sistemas de energia descentralizados, como por exemplo, em sistemas fotovoltaicos para gerenciamento de energia, ou seja, nivelamento de carga ou redução do pico de demanda, para pontes de energia e melhorias de qualidade de energia (Opiyo, 2016). Assim, o armazenamento de energia é melhor, não só para a redução dos picos de demanda, mas também para reduzir os custos de energia dos clientes. A operação conjunta destes sistemas com a resposta pelo lado da demanda pode reduzir de forma eficiente o custo de energia e aliviar os picos de demanda da rede elétrica (Wang *et al*., 2018).

Adicionalmente o acréscimo dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento de energia mostra-se atraente para os maiores consumidores de energia elétrica, onde incidem as maiores cobranças de demanda. Para que estes sistemas apresentem viabilidade é necessário determinar prontamente e com precisão as reduções na demanda de pico, pois as taxas de demanda constituem a maior parte das contas comerciais de energia elétrica e, em alguns casos, podem ser maiores que 40% da fatura de energia elétrica (Park; Lappas, 2017).

Por outro lado, países como Alemanha a utilização destes sistemas em consumidores residenciais em pequena escala já é realidade nos últimos anos. Isso se dá devido ao aumento dos preços da energia elétrica e a diminuição dos preços desses sistemas, onde mesmo com os vários aspectos críticos inerentes à sua implementação, ainda se tornam atrativo também para aplicações residenciais (Munzke *et al.*, 2017).

A metodologia utilizada na pesquisa foi a revisão bibliográfica sobre o tema proposto por meio de análise bibliométrica nas plataformas bibliográficas da Scopus, ScienceDirect entre outras. O objetivo da pesquisa é identificar, avaliar e interpretar

um conjunto de documentos disponíveis em coleções acadêmicas e instituições e entidades do setor de energia.

Quanto aos critérios de seleção, foram levados em consideração os seguintes aspectos: (i) títulos de artigos alinhados com o tema de pesquisa; (ii) resumos alinhados ao tema da pesquisa; (iii) filtro de relevância do resultado; e (iv) texto completo de artigos alinhados com o tema da pesquisa. Não existe uma limitação temporária das publicações (Monteiro *et al.*, 2017). A análise resultou da informação obtida resultando na elaboração do artigo, destacando seu funcionamento, aplicações reais de sistemas de armazenamento, bem como os desafios a serem superados pelo setor.

2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Sistemas de armazenamento de energia consistem no uso de baterias e inversor/carregador acoplado com a geração distribuída promovendo diversos benefícios para estes sistemas, podendo operar em várias funções, como por exemplo: redução de *peak-shaving*; *backup* de energia; deslocamento de carga (*load-shifting*); sistema de ilhamento; regulação dos níveis de tensão; regulação de frequência e controle reativo de alimentadores. Na Figura 1 é mostrado um esquemático com os componentes do sistema de armazenamento.

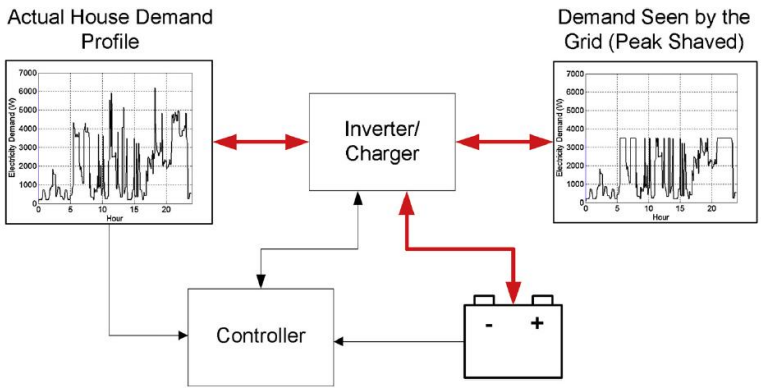

Figura 1 – Sistema de armazenamento atuando no modo *Peak-Shaving*. (Leadbetter e Swan (2012)

A seguir são descritos os possíveis modos de operação desse sistema:

Gerador: Este modo é destinado para uma larga faixa de fontes CA (corrente alternada), incluindo geradores com uma forma de onda CA desigual ou imperfeita. O inversor pode utilizar energia do gerador mesmo quando o gerador é subdimensionado ou de qualidade inferior.

Suporte: Este modo é destinado a sistemas que utilizam a rede elétrica ou um gerador. A dimensão, fiação, ou outras limitações da fonte CA podem requerer assistência temporária para rodar cargas muito grandes. O inversor adiciona energia renovável ou de bateria à fonte CA para assegurar que as cargas recebam a energia que necessitam. Este modo pode reduzir demanda de energia de pico na rede elétrica.

Grid Tied: Este modo é destinado a sistemas *grid-interactive*. Quando as fontes de energia renovável carregam as baterias acima de uma tensão "alvo" selecionada, o inversor enviará a energia excedente para quaisquer cargas. Se as cargas não utilizarem toda a energia excedente, então o inversor venderá essa energia para a rede elétrica.

UPS: Este modo é destinado a sistemas principalmente destinados a manter energia nas cargas com mínima interrupção ao comutar entre entrada CA e baterias. A velocidade de resposta foi aumentada para que se ocorrer uma desconexão CA, o tempo de resposta será minimizado.

Backup: Este modo é destinado a sistemas que têm uma rede elétrica ou um gerador disponível, mas não têm requisitos de particularidades tais como venda ou suporte. A fonte CA fluirá através do inversor para alimentar as cargas a menos que a energia se perca. Se a energia se perder, então o inversor fornecerá energia para as cargas a partir do banco de baterias até que a fonte CA retorne.

Mini Grid: Este modo é destinado a sistemas que têm a rede elétrica como uma entrada e uma quantidade considerável de energia renovável. O sistema irá drenar a energia renovável até que a tensão da bateria caia para um nível baixo especificado. Quando isto ocorre, o inversor irá se conectar à rede elétrica para alimentar as cargas. O inversor irá se desconectar da rede elétrica quando as baterias estiverem suficientemente recarregadas.

Grid Zero: Este modo é destinado a sistemas que têm a rede elétrica como uma entrada e uma quantidade considerável de energia renovável. As cargas permanecerão conectadas à rede elétrica, mas irão restringir o uso da rede exceto quando nenhuma outra alimentação estiver disponível. As fontes de alimentação *default* são as baterias e energia renovável, que tentam zerar o uso da fonte CA. As baterias são descarregadas e recarregadas (a partir de fontes renováveis) enquanto permanecem conectadas à rede. Este modo não permite ao inversor carregar baterias ou vender.

Assim, estes sistemas são adequados para edificações, comunidades e serviços ancilares em alimentadores devido a sua operação segura, silenciosa,

escalável, baixa manutenção dentre outras (Leadbetter; Swan, 2012). Na seguida são trazidos alguns exemplos de sistemas instalados reais e seus respectivos resultados.

3. CASOS APLICADOS

3.1 *Solar Bristol Project*

O primeiro caso aplicado é o projeto SoLa Bristol (*Buildings, Renewables and Integrated Storage, with Tariffs to Overcome Network Limitations*), localizado na Inglaterra. A iniciativa originou-se por meio da concessionária Western Power Distribution, que contemplou 26 residências e 6 edifícios comerciais, incluindo 5 escolas e 1 escritório na cidade de Bristol. Este projeto apresentou 2 fases, sendo a primeira a adesão dos módulos fotovoltaicos nos telhados destes clientes, enquanto que na segunda fase compreendeu a instalação de baterias para atendimento de cargas, conforme mostrado na Figura 2 (Wang *et al*., 2018), (KWMC, 2018) (Western Power, 2018).

Figura 2 – Sistema fotovoltaico com armazenamento de pequeno porte. (KWMC, 2018; Western Power, 2018).

Devido às limitações técnicas nas redes de baixa tensão, geralmente causadas pelo aumento da penetração de energia fotovoltaica, o projeto destinou-se aplicação de técnicas de teste facilitando a penetração fotovoltaica a um custo reduzido, com o auxílio do armazenamento de energia. Tanto nos clientes residenciais, como nos edifícios comerciais podem-se compartilhar energia com a rede nos momentos de picos de demanda. Através de a adesão desses sistemas, de tarifas variáveis e técnicas integradas de controle de rede de BT (baixa tensão) para

superar as restrições de rede, faz com que o projeto apresente inovação na geração de energia (Wang *et al*., 2018), (Western Power, 2018).

Conforme mostrado na Figura 2, todo o sistema de geração de energia, armazenamento, controle e proteções estão localizados no telhado e abaixo dele, ocupando pouco espaço na edificação. Na Figura 3 é mostrado o diagrama deste sistema contemplando a divisão de toda instalação elétrica das cargas CA e CC (corrente contínua) da residência, sendo o monitoramento do conjunto realizado pela Universidade de Bath (Wang *et al*., 2018).

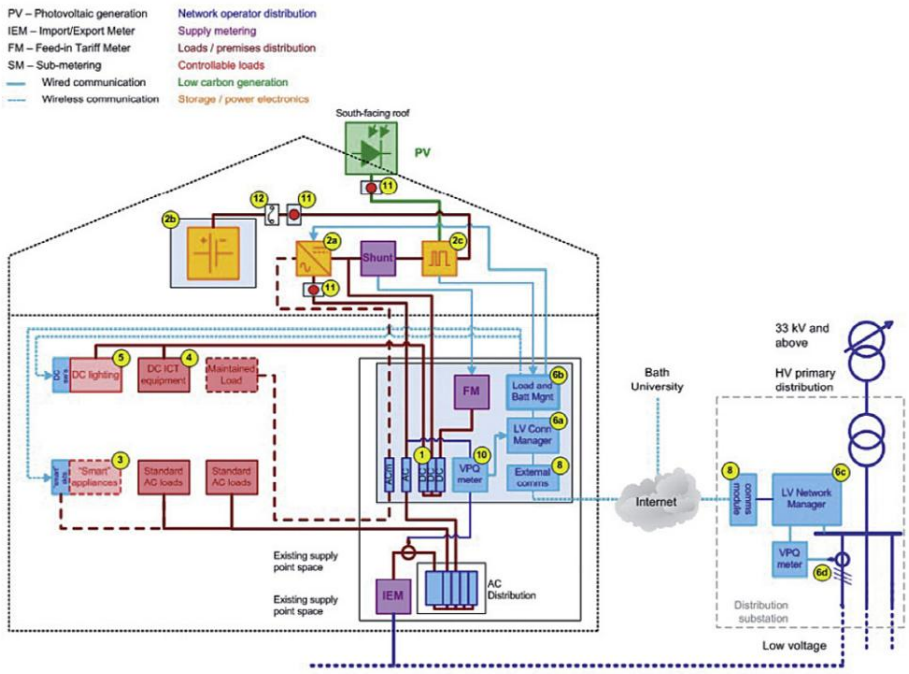

Figura 3 – Diagrama do sistema fotovoltaico com armazenamento. (Wang *et al*., 2018)

Alguns gráficos são apresentados a seguir, a fim de demonstrar os modos de operação e resultados alcançados com a implantação desse conjunto. Estes sistemas operam nos modos: Redução de *Peak Shaving*; Deslocamento de carga; Regulação do nível de tensão, utilizando baterias de chumbo-ácido (4,8 kWh) e 3,5 kWp de potência instalado de fotovoltaica. Na Figura 4 são mostrados a diferenciação dos períodos de carga e descargas realizada pelo banco de baterias.

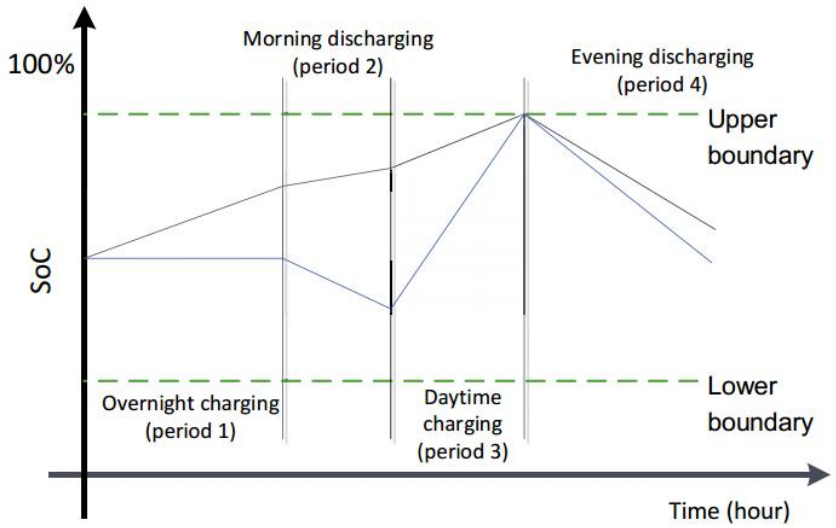

Figura 4 – Diferenciação entre os períodos de carga e descarga das baterias. (Wang *et al*., 2018)

De acordo com a saída do sistema fotovoltaico e perfis de carga há aproximadamente quatro períodos: carregamento durante a noite (Período 1), descarregamento matinal (Período 2), carregamento durante o dia (Período 3) e descarregamento noturno (Período 4). O Período 1 é o carregamento da bateria em resposta a preços de energia fora do pico e o Período 2 é descarregamento da energia armazenada e prepara a cobrança no Período 3. No Período 3, devido a energia ser produzida principalmente durante o dia, o carregamento de armazenamento é incentivado. No Período 4, em virtude a pouca saída fotovoltaica e a demanda de pico ocorrer neste período, o armazenamento é descarregado (Wang *et al*., 2018).

A seguir são mostrados os principais resultados alcançados durante o primeiro ano de teste nos consumidores residências. Nas Figura 5 Wang *et al*., (2018) trazem gráficos que demonstram o perfil de carga nestes clientes, analisando dias típicos de inverno com sobrecarga de rede e no dia de verão com violação de tensão. Estes dados apresentados são originais e foram medidos nestas estações nos clientes elencados, o que confere uma análise mais assertiva do comportamento do conjunto.

De acordo com a Figura 5(a), a nova curva de carga apresenta uma redução de 0,082 MW na demanda de pico, com a aplicação do armazenamento de energia. Por sua vez, a demanda durante o dia é significativamente reduzida devido à geração fotovoltaica, que normalmente ocorre nos momentos de menores demandas por energia em uma residência. Na Figura 5(b) são mostrados a mesma análise feita no período do verão, onde a geração fotovoltaica é maior.

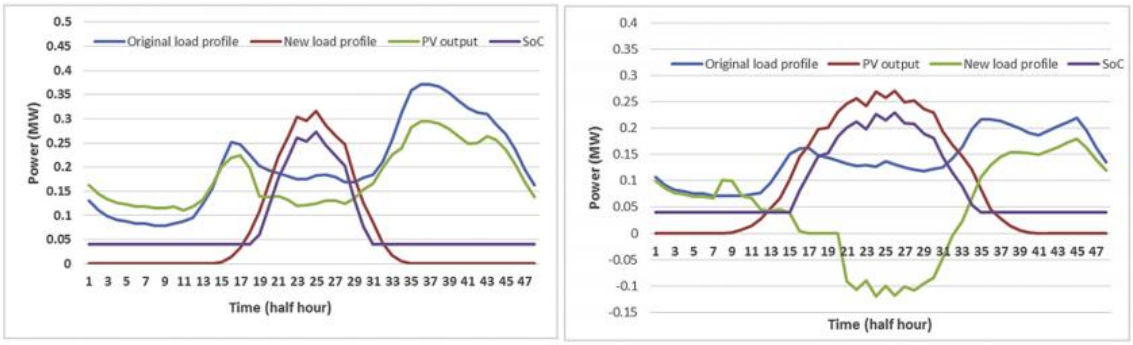

Figura 5 – Perfil de carga analisado durante o inverno (a) e verão (b). (Wang *et al*., 2018)

Conforme a Figura 5(b), o fluxo máximo de energia reversa no verão é de 0,122 MW, também causado pela geração abundante de energia fotovoltaica, o que torna mais eficaz para resolver as restrições térmicas da rede. Como na Inglaterra o sistema de compensação utilizado é o *feed-in*, quando há a demanda negativa significa que os clientes vendem eletricidade para a rede, onde o preço unitário é de £ 3 / kWh (Wang *et al*., 2018).

3.2 Universidade de São Paulo

No cenário brasileiro, há poucas aplicações de sistemas fotovoltaicos que contemplem armazenamento eletroquímico ficando restrito à universidade e centros de pesquisa, conforme o próximo exemplo a seguir. O próximo caso aplicado é o sistema fotovoltaico instalado na Universidade de São Paulo (USP), que possui diversos inversores bidirecionais instalados em várias minirredes monofásicas e trifásicas utilizadas para testes e pesquisa do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEE-USP).

O caso trazido para este artigo é o sistema fotovoltaico de 3 kWp em uma minirrede trifásica instalado no local citado para acoplamento CA. De acordo com Mocelin (2014), o sistema fotovoltaico está instalado em uma cobertura de um estacionamento, enquanto que o banco de baterias é composto por 24 elementos, cada um com chumbo-ácido sulfúrico em seu interior. As características elétricas desse banco e de 500 Ah e 2 V para cada elemento, sendo que o inversor bidirecional opera com tensão de 48 V. Na Figura 6 são mostrados o sistema fotovoltaico com seu respectivo sistema de acumulação.

Figura 6 – Sistema fotovoltaico e seu banco de baterias. (Mocelin, 2014)

Como se trata de um centro de pesquisa, há a aplicação de diversos equipamentos que monitoram sinais elétricos na fração de microssegundos. No caso do sistema fotovoltaico com armazenamento, devido aos diversos sistemas de medição e protocolos de comunicação de diferentes fabricantes, há uma vastidão de dados coletados, o que requer sistemática de análise. Para resolver esse problema, a equipe do IEE-USP desenvolveu uma plataforma computacional utilizando o programa LabView, que além da visualização rápida, permite também identificar as variáveis em função do tempo (Mocelin, 2014). Na Figura 7 é mostrado a interface deste programa e os inversores bidirecionais instalados nas edificações da USP.

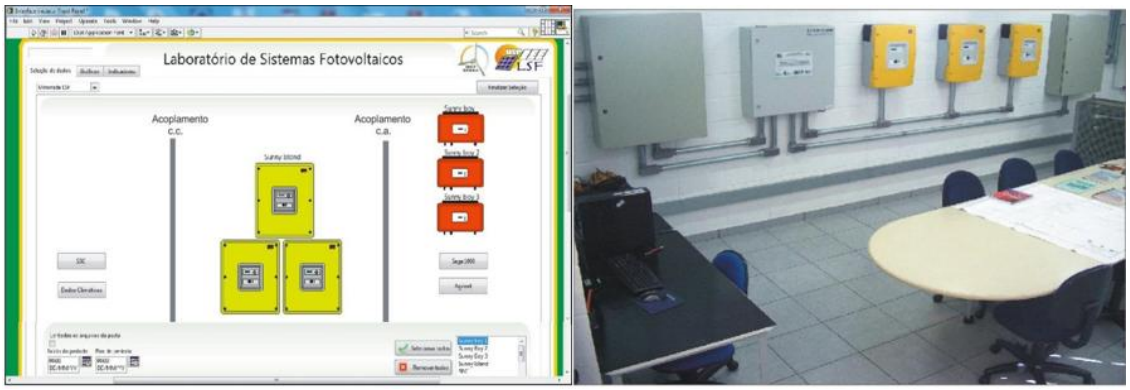

Figura 7 – Interface do programa desenvolvido para coleta de dados da minirrede (a) e os inversores (b). (Mocelin, 2014)

Esta plataforma mostrada na Figura 7(a), possibilita a seleção do equipamento que se deseja coletar dados, evitando o uso de diferentes *softwares*, agregando todas as informações conjuntas em uma mesma tela. Através dessa plataforma, é possível coletar diversos dados dos modos de operação deste sistema, e seus modos de operação são: Redução de *Peak Shaving*; Deslocamento de carga;

Regulação do nível de tensão. Conforme a imagem apresentada há a presença de 3 inversores bidirecionais (Figura 7b), que controlam todo o funcionamento da minirrede, os níveis de tensão alternada, a frequência, a carga e descarga do banco de baterias, o ângulo de fase do sistema trifásico, enfim, todo o controle do fluxo de energia entre os componentes do sistema híbrido.

De acordo com Mocelin (2014), o sistema fotovoltaico bidirecional opera de modo dinâmico de forma que nos momentos de alta produtividade e baixa demanda por eletricidade na USP, o inversor extrai a potência do barramento CA carregando as baterias. Quando ocorre o contrário, o inversor bidirecional atua extraindo energia das baterias suprindo o barramento CA. Mocelin (2014), traz alguns resultados da aplicação deste sistema a partir de gráficos mostrados a seguir, como por exemplo, irradiância, potência de saída dos inversores, frequência da rede de distribuição e da tensão da bateria.

Na Figura 8 são mostrados os dados citados anteriormente medidos neste sistema de pequeno porte durante quatro dias consecutivos.

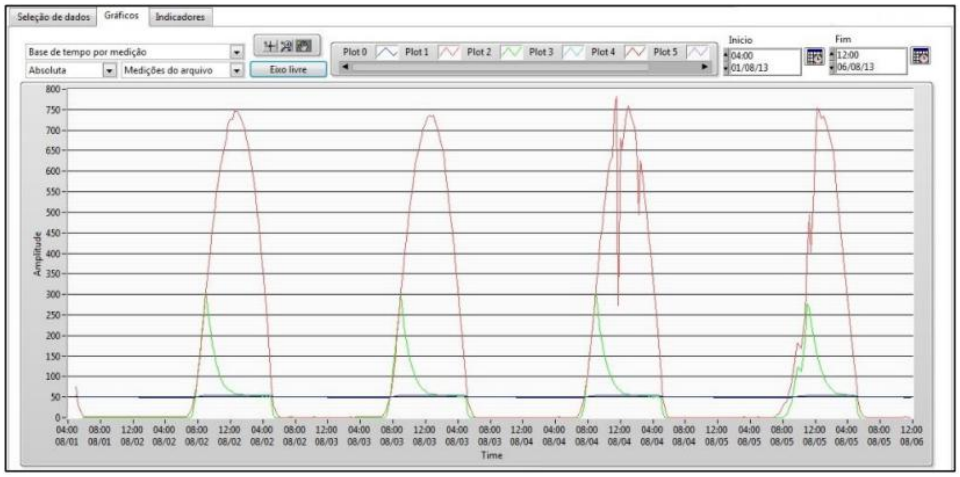

Figura 8 – Curva da irradiância, da potência na saída dos inversores. (Mocelin, 2014)

Cabe ressaltar que os sistemas instalados na USP, incluindo as minirredes com inversores bidirecionais representam o estado da arte dessa aplicação, assim como os sistemas instalados pelo Grupo de Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da UFPA (GEDAE), dentre experiências vivenciadas pela comunidade europeia descritas no projeto *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids* (Mocelin, 2014).

4. CONCLUSÕES

Por se tratar de um tema relativamente inédito no contexto brasileiro, essa pesquisa apresenta sua relevância, pois contribui com o conhecimento dessa tecnologia e maior gestão da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos. Cabe ressaltar que o objetivo dessa pesquisa é disseminar o conhecimento da tecnologia em questão, destacando seu funcionamento, cenário atual de sistemas de armazenamento, bem como os desafios a serem superados pelo setor quanto à aplicação desses sistemas.

Por meio da metodologia proposta identificou-se que a utilização das energias renováveis, é uma opção de energia renovável para complementar a demanda de energia prevista para os próximos anos, principalmente com o crescimento da inserção da fonte solar fotovoltaica de forma distribuída. No entanto, estes sistemas apresentam desafios a serem superados com relação à intermitência e qualidade de energia produzida por estes.

Portanto, como se trata de uma nova tecnologia, é necessário conhecimento aprofundado para quantificar o nível de inteligência do controle do sistema de armazenamento em termos de benefícios para o operador da rede, bem como nas aplicações residenciais, objetivando melhorar a resiliência dos sistemas de energia convencionais e contribuir para uma matriz energética mais diversificada e distribuída.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento do trabalho pela CPFL Energia no âmbito do programa de P&D da ANEEL (PD-02937-3018/2016) e ao Lactec.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KWMC (Knowle West Media Centre) – Disponível em: <http://kwmc.org.uk/projects/solabristol/>. Acesso em 24 mar. 2018.

LEADBETTER, J.; SWAN, L.; “*Battery storage system for residential electricity peak demand shaving”*. Energy and Buildings, 2012, n. 55, p. 685–692, 2012.

MOCELIN, A. R. “*Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos*”. 2014. 299 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

MUNZKE, N.; SCHARWZ; B.; BARRY, J. "*The impact of control strategies on the performance and profitability of li-ion home storage system*". On 11th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2017, 14-16 March 2017, Düsseldorf, Germany. Energy Procedia, 2017, n. 135, p. 472–481, 2017.

MONTEIRO, N. DA S. C.; MONTEIRO R. A. B.; MARIANO J. D. A.; URBANETZ JUNIOR J.; ROMANO, C. A. "*Brazil Market Outlook for Photovoltaic Solar Energy: A Survey Study*", British Journal of Applied Science & Technology, 2017, n. 33408, p 1-11, 2017.

OPIYO, N. "*Energy storage systems for PV-based communal grids"*. Journal of Energy Storage, 2016, n. 7, p. 1–12, 2016.

PARK, A.; LAPPAS, P. "*Evaluating demand charge reduction for commercial-scale solar PV coupled with battery storage"*. Renewable Energy, 2017, n. 108, p.523-532, 2017.

WANG, Z.; GU, C.; LI F.; "*Flexible operation of shared energy storage at households to facilitate PV penetration*", on Renewable Energy, 2018. n. 116, p. 438-446, 2018.