

31

ESTADO DA ARTE DA APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM EDIFÍCIOS FOTOVOLTAICOS

Juliana D'Angela Mariano¹ & Jair Urbanetz Junior²

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, Brasil

¹julianadangela@gmail.com & ²urbanetz@utfpr.ed.br

Resumo

Edifícios fotovoltaicos (FV) estão cada vez mais presentes nos centros urbanos, e são capazes de gerar sua própria energia tornando-se independentes da rede, dependendo do seu perfil de consumo. No entanto, a maioria dos consumidores residenciais e comerciais apresentam seus picos de demanda no período noturno, momento em que não há geração fotovoltaica, necessitando da rede elétrica para suprir a demanda dessas instalações. Picos de demanda ocasionam aumento de custos para estes consumidores e acabam causando perturbações na qualidade de energia da rede. Uma forma de resolver estes problemas elencados e obter maior aproveitamento da geração FV é a aplicação de sistemas de armazenamento nestes edifícios, o que já está sendo feito em alguns países. Visando buscar o estado da arte destes sistemas, neste artigo é trazida uma revisão da literatura do tema, ressaltando os possíveis modos de operação e um case real de aplicação em edifícios FV no mundo. Também são descritas as tecnologias de armazenamento mais apropriadas para aplicações nestes edifícios, destacando suas vantagens e desvantagens. Espera-se obter maior conhecimento destes sistemas, para assim superar os desafios das intermitências geradas pelas fontes renováveis, viabilizar a redução de custos com demanda de energia nestes clientes para que haja aplicação também no cenário brasileiro.

Palavras chave: Edifícios Fotovoltaicos, Armazenamento de Energia, Redução do Pico de Demanda.

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 [1]. 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 [2].

Neste sentido, os sistemas de armazenamento de energia geralmente são usados junto a 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 [3]. 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 [2].

Adicionalmente o acréscimo dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento de energia mostra-se atraentes 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 [4].

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 [1].

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, que serão descritas nesta revisão de literatura.

2. Objetivo

Com o crescimento da inserção da fonte solar fotovoltaica de forma distribuída, é cada vez mais importante buscar formas de otimizar a operação destes sistemas, uma vez que apresentam desafios a serem superados com relação à sua intermitência e qualidade de energia.

Neste sentido, os sistemas de armazenamento de energia vêm chamando a atenção de vários pesquisadores em todo o mundo, visto que se pode obter significativo ganho de produção apenas adicionando baterias e o inversor bidirecional ao sistema fotovoltaico.

O objetivo deste trabalho é identificar, avaliar e interpretar um conjunto de documentos disponíveis em coleções acadêmicas e instituições e entidades do setor de energia, destacando funções, benefícios, aplicações dentre outras melhorias obtidas pelos sistemas de armazenamento de energia, visto que ainda não existem legislações no cenário brasileiro.

3. Métodos

O armazenamento de energia integrado às energias renováveis é ainda pouco utilizado no Brasil, ficando restrito as instituições de pesquisa e desenvolvimento. Em 2018, diversos estudos foram publicados buscando divulgar experiências e resultados de aplicações destes sistemas juntos a edificações fotovoltaicas.

A metodologia utilizada na pesquisa foi estado da arte sobre o tema proposto, por meio de análise bibliométrica nas plataformas bibliográficas da

Scopus, ScienceDirect, acervos de teses e dissertações de universidades, entre outros.

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 [5].

A análise resultou da informação obtida resultando na elaboração do artigo, destacando as funcionalidades, modo de operação, benefícios, tipos de tecnologias e aplicações reais de sistemas de armazenamento, bem como os desafios a serem superados pelo setor.

O armazenamento de energia e seus modos de operação

Akhil *et al.* (2013) [6] descrevem os 18 modos de operação possíveis para as funcionalidades do armazenamento de energia e seus usos simultâneos dentro de 5 categorias: serviços ancilares, serviços de transmissão, serviços de distribuição, energia massiva (*bulk energy system*) e serviços de gerenciamento de energia no consumidor. Quando se fala em edificações fotovoltaicas, é possível aplicar estas 2 últimas categorias mencionadas anteriormente contemplando 6 modos de operação que serão descritos a seguir.

Para energia massiva há 2 modos de operação: **deslocamento de carga (*time-shifting*)** e **fornecimento de energia (*electric supply capacity*)**. No modo de operação de **deslocamento de carga**, a energia é comprada durante períodos em que os preços são mais baixos, podendo ser armazenada nestes sistemas para uso ou venda nos momentos em que os preços de energia são altos. Este modo de operação aliado à geração FV, pode ainda armazenar o excedente de energia produzida para ser usada quando há maior demanda por energia [6].

Já no modo de **fornecimento de energia**, também conhecido como *peak-shaving* é uma forma de operação que possibilita a redução dos picos de demanda, através do armazenamento para atender uma determinada carga ou redução da necessidade de comprar nova demanda de energia. Com este modo de operação, o sistema FV estará

apto a descarregar sua energia através das baterias durante um período, como por exemplo, no horário de ponta.

Com relação aos serviços de gerenciamento de energia no consumidor, há 4 modos de operações ([6], 2013): *qualidade de energia, confiabilidade (back-up), venda de energia na ponta e gerenciamento de carga pela demanda*. As operações no modo de **qualidade de energia**, envolvem a aplicação do armazenamento para proteção das cargas no cliente contra eventos que possam afetar suas cargas, como por exemplo:

- Variações da tensão (por exemplo, picos ou quedas de curto prazo, picos de longo prazo ou quedas).
- Variações na frequência primária de 60 Hertz (Hz) na qual a energia é fornecida.
- Baixo fator de potência (tensão e corrente excessivamente defasadas entre si).
- Harmônicos (ou seja, a presença de correntes ou tensões em frequências diferentes da frequência primária).
- Interrupções no serviço, de qualquer duração, variando de uma fração de segundo a vários segundos.

No modo de **confiabilidade** também conhecido como *back-up* de energia, um sistema de armazenamento é capaz de suportar efetivamente cargas de clientes quando há uma perda total de energia. A capacidade de energia do sistema de armazenamento em relação ao tamanho da carga que ele está protegendo, determina a duração de tempo que o armazenamento pode atender a essa carga e sejam ressincronizados, sendo um recurso disponível como redução de demanda [6].

A fim de reduzir os custos com energia elétrica, existe a possibilidade de os usuários finais utilizarem o armazenamento para a **venda de energia na ponta**. Este modo de operação consiste na aplicação do armazenamento quando o cliente cobra por este serviço em períodos fora de pico e, em seguida, descarregam a energia durante os períodos em que os preços de energia são mais elevados.

Esta aplicação é semelhante ao tempo de deslocamento da energia elétrica, embora os preços

da energia elétrica sejam baseados na tarifa de varejo do cliente, enquanto que, a qualquer momento, o preço do deslocamento de energia elétrica é o preço de atacado [6].

Por fim, é ainda possível para o consumidor **gerenciar sua carga de acordo com a demanda**, a fim de reduzir dos custos com energia elétrica nos picos de demanda especificados pela concessionária. Akhil *et al.* (2013) [6] destacam que para evitar uma cobrança de demanda, a carga deve ser reduzida durante todas as horas do período de cobrança de demanda, geralmente um período especificado (por exemplo, das 19h00 às 21h00) e em dias especificados (mais frequentemente nos dias úteis).

Com relação os usos simultâneos [6], o armazenamento de energia pode ser aplicado para qualquer um dos serviços mencionados anteriormente, pois não é comum que o uso de apenas um serviço não resulte em um retorno de investimento atraente.

Entretanto, os usos simultâneos destes serviços elencados dependem do tipo de tecnologia empregada e da localização do sistema dentro da rede, pois existem restrições regulatórias e operacionais. Por isso, essas aplicações combinadas requerem um planejamento cuidadoso e deve ser analisado caso a caso, principalmente com relação ao inversor escolhido.

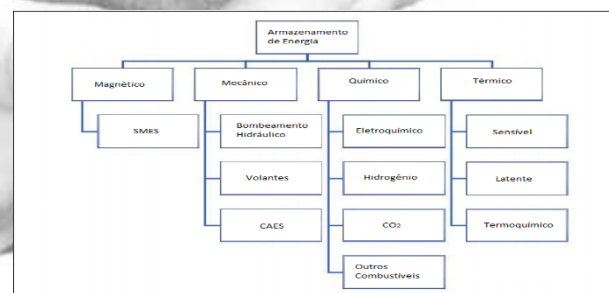


Figura 1 - Classificação das tecnologias de armazenamento

Fonte: Adaptado de [7].

Aplicações de armazenamento de energia em edificações FV

Del Pero *et al.*, (2018) [7] afirmam que a energia pode ser armazenada e recuperada posteriormente, em local diferente e talvez em diferentes níveis de temperatura, para preencher a lacuna entre a oferta

e a demanda de energia. Isto é possível com base nas leis termodinâmicas das transformações de energia entre diferentes formas de energia. Neste sentido, há 4 tipos de tecnologias disponíveis para aplicação de armazenamento de energia: magnética, mecânica, química e térmica, conforme mostrado na Figura 1.

Dentre estas diversas topologias, as aplicações mais adequadas às edificações estão descritas a seguir (*SMES: *Supermagnetic Energy Storage*; *CAES: *Compressed Air Energy Storage*) [7]:

- Armazenamento passivo de curto prazo: consiste no uso dos componentes da edificação para armazenamento de energia térmica na forma de armazenamento de calor sensível ou latente;

- Armazenamento ativo de curto prazo: consiste na aplicação de tanques de água com ou sem materiais de mudança de fase (latente/sensível térmico), armazenamento de gelo (latente térmico), baterias (eletroquímicas), volantes (mecânicos), supercapacitores (eletroquímicos), armazenamento de energia de ar comprimido e hidrogênio (químico);

- Armazenamento sazonal ativo: normalmente, usando armazenamento de energia térmica subterrânea (UTES) (sensível ao calor) ou termoquímica.

O armazenamento de energia em edifícios é geralmente destinado ao fornecimento de energia, aquecimento, resfriamento de água quente. A seguir são descritas as 3 aplicações de armazenamento de energia mais comuns em edificações.

Para que a edificação possa realizar os serviços de: deslocamento de carga (*time-shifting*); fornecimento de energia (*electric supply capacity*); qualidade de energia, confiabilidade (*back-up*), venda de energia na ponta e gerenciamento de carga pela demanda, é necessário a aplicação de tecnologias de armazenamento químico e mecânico. Entretanto, o armazenamento ativo através dos volantes e supercapacitores (mecânicos) apresentam uma penetração energética muito limitada para estes serviços, sendo a tecnologia eletroquímica a mais apropriada.

De acordo com Del Pero *et al.*, (2018) [7] diversos são os parâmetros que devem ser

considerados dependendo da aplicação, sendo eles: energia, profundidade de descarga, custo, segurança, condições garantidas pelo fabricante, temperatura ambiente, ciclo de vida, manutenção, bem como disponibilidade de espaço requerida para sua instalação na edificação. Para tal tipo de aplicação, há no mercado uma diversidade de tecnologias disponíveis, com parâmetros técnicos e capacidade nos seguintes tipos:

- Baterias de chumbo-ácido: são os dispositivos eletroquímicos recarregáveis mais antigos e mais amplamente utilizados, onde se utilizam eletrodos de chumbo e óxido de chumbo em um eletrólito com cerca de 37% de ácido sulfúrico [8].
- Baterias de fluxo: são baterias onde a energia é armazenada diretamente na solução eletrolítica para ciclos de vida estendidos e tempos de resposta rápidos [8].
- Baterias de íons de lítio: consiste em uma célula que contém dois materiais reativos capazes de sofrer uma reação química de transferência de elétrons [6].

Akbari *et al.*, (2018) [8] afirmam que as baterias de chumbo-ácido foram inventadas em 1859, e continuam a serem uma opção popular de armazenamento para qualidade de energia, fonte de alimentação não interceptável (UPS) e algumas aplicações de reserva giratória. Devido a sua limitação ao curto ciclo de vida e baixa densidade energética, a aplicação para o gerenciamento de energia fica muito comprometida. Neste sentido, é necessário um sistema de gerenciamento de parâmetros térmicos afim de superar o desempenho reduzido de baixa temperatura dessa tecnologia.

Em contraste com as baterias convencionais, as baterias de fluxo armazenam energia nas soluções eletrolíticas. As classificações de potência e energia são independentes da capacidade de armazenamento determinada pela quantidade de eletrólito usada e a classificação de potência pela área ativa da pilha das células. As baterias de fluxo podem liberar energia continuamente a uma alta taxa de descarga por até 10 horas [8].

Já nas baterias de íons de lítio sua eficiência é quase 100% se comparada a outras tecnologias. Essa tecnologia está presente em 50% mercado de pequenos dispositivos portáteis, e seu maior desafio

é a produção em alta escala, devido ao alto custo (>600 / kWh), pois necessitam embalagens especiais e circuitos internos de proteção contra sobrecarga. Entretanto, sua alta reatividade com ar e umidade pode causar incêndio, o que representa um alto risco de segurança [8].

Del Pero *et al.*, (2018) [7] ainda destacam a existência de outras tecnologias emergentes de armazenamento, como por exemplo o hidrogênio e ar comprimido, onde algumas empresas já estão fornecendo em seu portfólio, mas que ainda não há viabilidade na sua aplicação, devido à baixa eficiência, limitação técnica, altos investimentos e aplicação bastante limitada nas edificações.

Estudo de caso de um sistema FV residencial com armazenamento de energia

No cenário brasileiro, há poucas aplicações de sistemas fotovoltaicos que contemplem armazenamento eletroquímico ficando restrito à universidade e centros de pesquisa. Por este motivo, será apresentado a seguir, um estudo de caso do 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 [2] [9] [10].



Figura 2 - Sistema fotovoltaico com armazenamento.

Fonte: [9] [10].

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. A Figura 3 apresenta a diferenciação dos períodos de carga e descargas realizadas pelo banco de baterias.

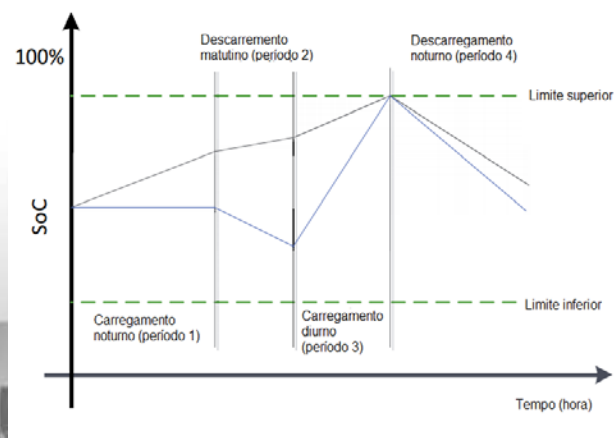


Figura 3 - Diferenciação entre os períodos de carga e descarga das baterias.

Fonte: Adaptado de [2].

De acordo com a saída do sistema fotovoltaico e perfis de carga há aproximadamente quatro períodos, onde no Período 3, devido à 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 [2]. Na Figura 4 são mostrados os perfis em um dia de inverno típico.

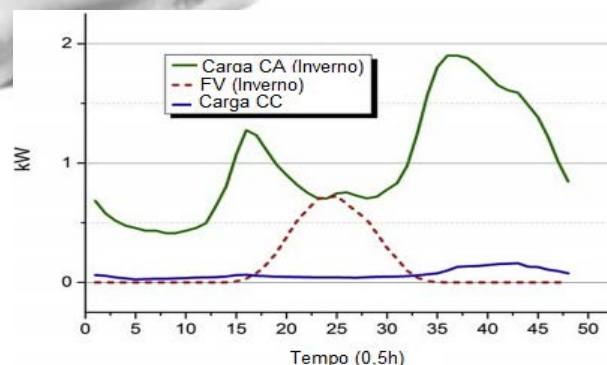


Figura 4 - Perfis de cargas e geração fotovoltaica no inverno.

Fonte: Adaptado de [2].

Wang *et al.*, (2018) [2] afirmam que geralmente a demanda de carga CA (corrente alternada) no inverno é maior do que em outras estações, com pico no início da noite próximo a 2 kW. As estratégias de carregamento para armazenamento de bateria em diferentes estações foram projetadas com base nos perfis típicos de carga e saída do sistema FV. Na Figura 5 Wang *et al.*, (2018) [2] trazem um gráfico que demonstra o perfil de carga nestes clientes, analisando dias típicos de inverno com sobrecarga de rede.

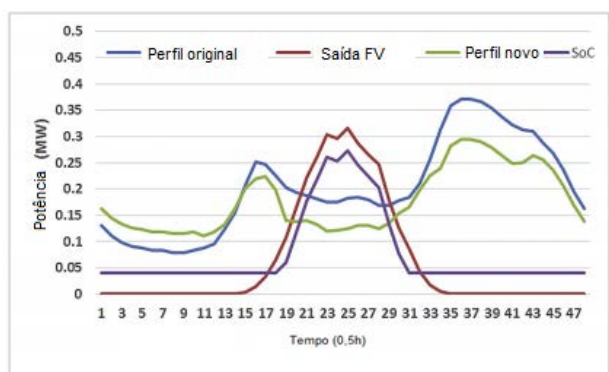


Figura 5 – Novo perfil no inverno.

Fonte: Adaptado de [2].

De acordo com a Figura 5, 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.

Fazendo uma projeção ao cenário brasileiro, a aplicação conjunta dos sistemas de armazenamento de energia aliado aos sistemas FV em edificações, poderiam apresentar um maior aproveitamento quanto ao carregamento das baterias utilizando o sistema FV. Esta premissa poderia ser aplicada em edificações comerciais, onde seu perfil de demanda por energia geralmente é diurno, além de apresentar maior disponibilidade para aplicação destes sistemas.

Neste sentido, a partir desse estudo, propõem-se maior análise da aplicação de diferentes tecnologias de armazenamento compatíveis com o cenário brasileiro, para que haja maior penetração

energética gerada pelos sistemas FV, que cada vez mais se expandem no Brasil.

4. Conclusões

Este artigo de revisão trouxe as diversas opções de armazenamento de energia para energia fotovoltaica, incluindo sistemas de armazenamento de energia elétrica. A do armazenamento de energia em edifícios FV, descreve o papel do armazenamento para a solução da intermitência da geração FV no contexto de futuras opções de aplicações destes sistemas, principalmente no cenário brasileiro, onde existe uma abundância do recurso solar e expansão da aplicação de sistemas FV.

Portanto, cada tecnologia apresenta seus prós e contras, no caso de baterias de chumbo-ácido apresentam custo reduzidos, mas números de ciclos e densidade energética reduzidos em contrapartida. Baterias de fluxo oferecem números de ciclos e custo intermediários, porém densidade energética baixa, o que requerem maiores espaços para sua aplicação.

Por outro lado, baterias de íons de lítio requerem maior investimento, porém apresentam maiores densidade energética e número de ciclos. Logo, cada aplicação requer análise minuciosa dos parâmetros elétricos, químicos e ambientais, além do custo das tecnologias quanto aos objetivos que se desejam alcançar com armazenamento nas edificações.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento destas pesquisas, e à COPEL-DIS pelo apoio e financiamento dos recursos para realização desde projeto de P&D.

6. Referências

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] OPIYO, N. "Energy storage systems for PV-based communal grids". Journal of Energy Storage, 2016, n. 7, p. 1-12, 2016.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] AKHIL, A. A.; HUFF, G.; CURRIER, A. B.; KAUN B. C.; RASTLER D. M.; CHEN S. B.; COTTER, A. L.; BRADSHAW, D. T.; GAUNTLETT, W. D.; "DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA", Sandia National Laboratories, 2013.
- [7] DEL PERO, C.; ASTE, N.; PAKSOY, H.; HAGHIGHAT, F.; GRILLO, S.; LEONFORTE, F. "Energy storage key performance indicators for building application", on Sustainable Cities and Society, 2018. n. 40, p. 54-65. 2018.
- [8] AKBARI, H.; BROWNE, M. C.; ORTEGA, A.; HUANG, M. J.; HEWITT, N. J.; NORTON, B.; MCCORMACK, S. J.; Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.052>> Acesso em 24 mar. 2018.
- [9] KWMC (Knowle West Media Centre) - Disponível em: <<http://kwmc.org.uk/projects/solabristol/>>. Acesso em 24 mar. 2018.
- [10] WESTERN POWER. Disponível em: <<http://www.westernpower.co.uk/>>. Acesso em 24 mar. 2018.

