

Designing Innovative Home Energy Systems for Smart Cities: The SilkHouse Project

Marcus Silva^{1,2}, Vicente Leite¹, Paulo Araújo^{1,3}, Ananda Simões^{1,4},
Iago Dalmarco^{1,4}, Ângela Ferreira¹, Luís Queijo¹

¹ Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Bragança, Portugal

² Universidade Salvador – Salvador, Bahia, Brasil

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Campo Mourão
Paraná, Brasil

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Ponta Grossa
Paraná, Brasil

pe.mpb@hotmail.com, avtl@ipb.pt, phxaraujo@gmail.com,
ananda@alunos.utfpr.edu.br, iago.icd@gmail.com, apf@ipb.pt,
lqueijo@ipb.pt

Abstract. This paper presents the complete design of a self-sustainable microgrid based on renewable energy sources - pico-hydro and photovoltaic - for the House of Silk museum. This on grid solution is based on the SMA Flexible Storage System using innovative technologies for energy production, storage and management. The microgrid is based on a cluster of three battery inverters which establish a three-phase supplying system. The hydro energy is generated using a low head, pico-hydro propeller turbine, and a horizontal wheel of a mill. Both are tied to the microgrid through an innovative solution, connecting generators to photovoltaic inverters. The photovoltaic energy is produced by means of high-performance photovoltaic conventional modules that will be mounted on the roof of the House of Silk and the components of hydropower generation will be installed inside the gallery of a former mill.

Keywords: smartgrids; photovoltaic; pico-hydro.

1 Introdução

Uma microrrede é um conjunto de cargas interligadas e recursos de energia distribuídos, dentro de limites elétricos claramente definidos, que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede elétrica de serviço público (rede convencional) e que se pode conectar e desconectar da mesma para permitir que possa operar no modo conectado à rede convencional ou em modo isolado [1]. As microrredes, apresentam diversas vantagens como, por exemplo, a resiliência ea

integração renovável. No caso de excesso ou défice de produção, as microrredes podem, respetivamente, fornecer ou receber energia da rede convencional [2].

O projeto de microrrede a ser instalado na Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança, pretende tornar um edifício autossustentável através da utilização de novas tecnologias de produção e utilização híbrida de fontes de energia, designadamente fotovoltaica e hídrica. Projetos como este conseguem ter visibilidade e despertar interesse da sociedade em saber como funcionam sistemas híbridos de geração de energia elétrica, auxiliam na identificação de potenciais energéticos renováveis, alguns ainda pouco explorados, e conscientizam para o uso racional da eletricidade.

Não é de hoje que as microrredes estão a sair de laboratórios para uma implantação mais ampla na comunidade [1]. Como a propriedade e os modelos de negócios das microrredes ainda estão em evolução, tomemos como exemplo as companhias americanas de eletricidade, como a Duke Energy, e os próprios fabricantes, como a SMA [3], que realizam testes em laboratórios a fim de oferecerem a seus clientes serviços de qualidade, uma vez que possuem conhecimento e infraestrutura de geração e distribuição adequada. Também no meio académico se podem destacar muitas iniciativas como o projeto VERCampus – Parque Vivo de Energias Renováveis [4] que desde 2007 [5] integra um conjunto de tecnologias, infraestruturas e iniciativas realizadas no Campus universitário do Instituto Politécnico de Bragança – IPB sobre as tecnologias de energias renováveis, promoção e divulgação de sistemas de geração de energia distribuída para estudantes, partes interessadas e toda a comunidade do IPB em geral.

Os desenvolvimentos experimentais em laboratórios e já implementados no projeto VERCampus, como plataforma de pesquisa e para fins de demonstração no contexto de um campus universitário, facilitaram e contribuíram para a escolha de soluções de sistemas, equipamentos e fabricantes a serem aplicados no projeto Casa da Seda. Foi a partir dos mais de dez anos de trabalho, ao comparar módulos fotovoltaicos, inversores e geradores síncronos de ímanes permanentes, que soluções dos fabricantes SMA e PowerSpot passaram a ser adotadas por apresentarem fiabilidade comprovada em laboratório [6].

O museu da Casa da Seda é uma propriedade do município de Bragança desde 1990, localizado na margem do Rio Fervença [7]. Historicamente, a população utilizava a edificação para tingir Seda no século XVIII. Nos séculos XIX e XX a propriedade funcionou como um moinho, depois começou a produzir pães e biscoitos regionais e em 2006 o edifício passou por uma reforma viabilizada pelo Programa Polis.

Desde o início de 2016, quando houve a conceção do projeto *SilkHouse - Development of a smart microgrid based on renewable energy sources and a monitoring system for the House of Silk*, não se deixou de lado a ideia do museu se tornar uma vitrine, tanto para os visitantes como para a academia, para constituir um laboratório vivo, em contexto real, dedicado ao projeto, monitorização e disseminação dos benefícios de uma microrrede inteligente. O projeto *SilkHouse* é promovido pelo Instituto Politécnico de Bragança, em cooperação com mais 4 parceiros (Centro Ciência Viva de Bragança, Instituto Politécnico do Cávado e do Ave, Instituto Politécnico da Guarda e a empresa JG Instalações Elétricas) e com o apoio do Município de Bragança. Este projeto é financiado pela União Europeia, através da FCT - Fundação para a

Ciência e a Tecnologia, com um valor total elegível de 149.915,79 €, e a sua conclusão está prevista para meados de 2019.

Além de trazer um conceito atual de geração de eletricidade e gestão de energia elétrica, a proposta pretende preservar a arquitetura existente, com pequenas adequações na sua infraestrutura e utilizar os recursos naturais disponíveis no local, como é o caso de recuperar o moinho numa das galerias, não mais para moer cereais, mas para gerar eletricidade, integrando-a na microrrede.

Deste modo, para a gestão e monitorização de energia do sistema foi projetada uma microrrede inteligente contendo conversores bidirecionais Sunny Island 4.4M da SMA, inversores Sunny Boy 1.5-1VL-40 e a gestão de energia é feita através do Sunny Home Manager 2.0. A microrrede é baseada na solução SMA designada por sistema de armazenamento flexível [8][9] e foi projetada tendo em consideração o perfil de carga do edifício para o melhor uso e aproveitamento das fontes endógenas de energia.

No sistema de armazenamento flexível da SMA as principais funcionalidades são: visualização dos dados do sistema no Sunny Portal, controle inteligente de cargas, limitação dinâmica de potência ativa, carregamento da bateria baseado em previsão, limitação de injeção de potência ativa para 0% ou 0 W, limitação automática de carga desequilibrada, controlo da energia acumulada no ponto de ligação à rede pública e acesso a serviços de gestão de rede via interface Modbus, por exemplo, para limitação de potência ativa trocada com a rede.

É importante destacar que neste projeto há a premissa de que não seja injetada potência na rede, de modo que toda a energia produzida ao longo do dia deve ser utilizada pelas cargas e a excedente seja armazenada no banco de baterias, complementada com uma gestão inteligente das cargas. Deste modo, promove-se o aumento do nível de autossustentabilidade do edifício, constituindo um modelo para as casas das cidades inteligentes.

2 Caracterização da Casa da Seda

2.1 Perfil de consumo

De uma auditoria realizada às instalações elétricas da edificação, destacam-se as seguintes informações para caracterização do perfil de consumo, fundamentais para elaboração do projeto e para estimar os benefícios da instalação da microrrede: rede de distribuição de energia em baixa tensão (BT), instalação trifásica, com potência contratada de 13,6 kW; funcionamento de terça-feira a domingo, das 10h às 18h e esporadicamente até às 24 h nos finais de semana quando ocorrem eventos; consumo médio diário de 45 kWh; consumo anual médio de 18,1 MWh, em 2014, 14 MWh, em 2015 e 16,7 MWh, em 2016. A caracterização das principais cargas da instalação, em termos da potência nominal é apresentada na Tabela 1.

No projeto da microrrede, foram consideradas as seguintes estruturas como potenciais energéticos: telhado para instalação do sistema fotovoltaico, e galeria, onde outrora existiu um moinho, para instalação de duas unidades pico-hídricas, constituídas por uma roda de água horizontal e uma turbina de hélice. Além da vantagem desta ação

em revitalizar a infraestrutura do antigo moinho para fins de demonstração, aproveitando a sua capacidade de produção de energia numa solução de autoconsumo, a exploração dos sistemas hídricos explora a complementaridade sazonal entre a geração fotovoltaica e a hídrica, contribuindo assim para a autossustentabilidade energética da Casa da Seda.

Tabela 1. Cargas disponíveis na Casa da Seda.

Descrição	Quantidade	Potência total (W)
Computadores e periféricos	21	2160
Caldeira	1	170
Projetores	4	650
Sistemas de som	1	50
Ar condicionado	2	2500
Aquecedores	1	2000
Iluminação	38	1300
Cafeteira	1	1500
Forno de microondas	1	1200

No dimensionamento da microrrede da Casa da Seda foi utilizada a ferramenta Sunny Design da SMA, a qual permite especificar e quantificar os equipamentos do sistema a ser implementado. Das propostas apresentadas pela SMA e pelo perfil de carga e consumo da Casa da Seda, o sistema de Armazenamento Flexível SMA é o mais adequado.

Na estruturação da microrrede, além dos módulos fotovoltaicos, da roda de água horizontal e da turbina, será possível armazenar o excesso da produção de eletricidade num banco de baterias, permitindo a sua utilização quando a produção de energia elétrica é insuficiente e/ou nos horários em que a tarifa da rede for mais cara ou inviável. Com a capacidade de armazenamento de energia e de gestão e controlo destes recursos e das cargas da instalação é possível aumentar a quota de autoconsumo e a quota de autossuficiência, reduzindo assim, as necessidades de interação com a rede elétrica convencional, procurando obter um saldo anual nulo, entre a energia produzida e a consumida.

2.2 Conceitos de quota de autoconsumo, quota de autossuficiência e autossustentabilidade na Casa da Seda

O projeto analítico da geração fotovoltaica para o edifício da Casa da Seda foi complementado com o Sunny Design, que é o programa da SMA para a conceção de sistemas fotovoltaicos, com ou sem armazenamento.

O projeto foi baseado num sistema ligado à rede (*on grid*), com autoconsumo através do armazenamento da energia excedente - produzida pelas fontes de energia da microrrede - num banco de baterias. Como foi adotado o sistema de armazenamento flexível da SMA, o autoconsumo e a autossuficiência podem ser otimizados para o

melhor aproveitamento das fontes de energia, fotovoltaica e pico-hídrica, em relação ao perfil da carga do consumidor.

Assim, na perspectiva de compreender e justificar o conceito de autossustentabilidade do projeto, torna-se necessário analisar as quotas de autoconsumo e de autossuficiência do sistema [9]. Ao estimar a geração fotovoltaica (PV) e a demanda anual, percebe-se que a geração PV é diretamente proporcional à quota de autossuficiência e inversamente proporcional à quota de autoconsumo (Fig. 1). Já em relação à demanda ocorre o contrário. O ideal é, para uma determinada demanda, maximizar essas quotas, o que não é fácil uma vez que a geração PV não é controlada e a demanda depende do perfil de consumo.

Geração PV anual	Demanda anual	Quota de autoconsumo	Quota de autossuficiência
↓	↑	↑	↓
↑	↓	↓	↑
↑	●	↑	↑

Fig. 1. Análise das quotas de autoconsumo e autossuficiência.

Como a geração de energia fotovoltaica está limitada aos períodos em que há radiação solar, pretende-se fazer a gestão de cargas da microrrede nos períodos de maior produção, recorrendo à rede elétrica apenas quando necessário. Isto aumenta significativamente a quota de autoconsumo, com o objetivo de consumir toda a energia produzida, em termos anuais.

O fluxo de potência é controlado de forma a que, antes de recorrer à rede elétrica convencional, é dada prioridade ao consumo de energia proveniente dos sistemas PV e pico-hídricos, ou ainda, utilização da energia armazenada nas baterias. Nos casos em que seria possível injetar potência na rede, que não é o caso desta microrrede, ou reduzir a potência gerada pelos inversores PV, deve-se prioritariamente, carregar as baterias e ligar cargas selecionadas para o efeito.

A gestão de produção, consumo e armazenamento de energia na microrrede é realizada através da parametrização do Sunny Home Manager 2.0, no qual é inserido o perfil de carga do consumidor e assim é monitorizado o fluxo de energia do sistema. As ações de carga e descarga das baterias, e quando se deve utilizar a energia da rede, são tomadas pelo Sunny Home Manager 2.0 que troca comandos com o Sunny Island 4.4M. Este conversor bidirecional realiza, física e eletricamente, esta gestão de cargas. Se o Sunny Home Manager 2.0 não fosse instalado, que potencialmente é um equipamento que garante uma melhor gestão e segurança do fluxo de energia e comandos dentro da microrrede, parte destas funções caberia ao *master* Sunny Island.

O Sistema de Armazenamento Flexível da SMA suporta o aumento do autoconsumo através das seguintes medidas: armazenamento temporário de energia em excesso no banco de baterias (48 V), conectado aos conversores Sunny Island; controlo de cargas deslastráveis e monitorização dos sistemas de produção com o Sunny Home Manager.

Como a SMA disponibiliza diagramas que podem ser utilizados, como ponto de partida, no planeamento detalhado do armazenamento de energia de um sistema de armazenamento flexível [9], conclui-se que esse ponto ótimo ocorre quando as quotas de autoconsumo e autossuficiência atingem valores em torno de 55% (Fig. 2 e 3). Um requisito importante para aumento das quotas de autoconsumo e autossuficiência é o balanço correto entre os valores anuais da geração PV e da demanda de energia.

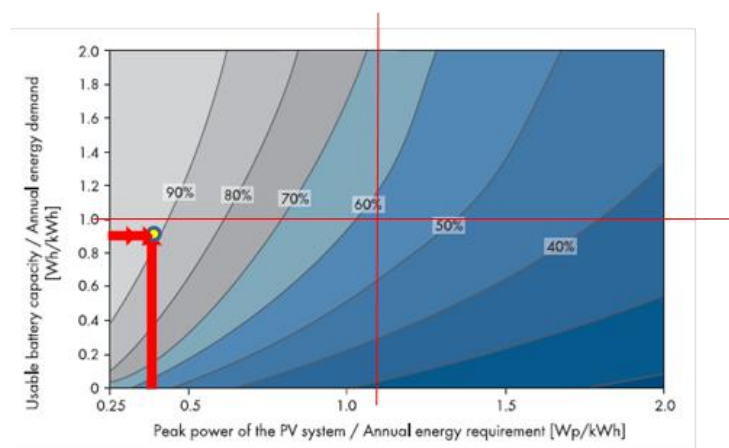


Fig. 2. Análise da quota de autoconsumo da casa da seda (adaptada de [9]).

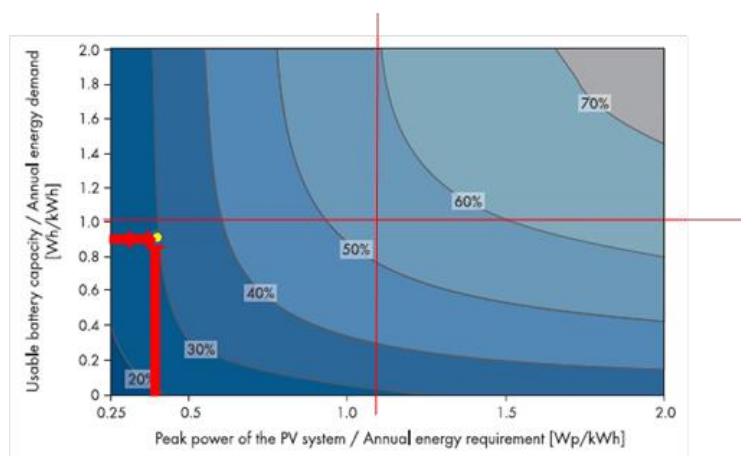


Fig. 3. Análise da quota de autossuficiência da casa da seda (adaptada de [9]).

Para se determinar o valor dessas quotas, através dos diagramas das Fig. 2 e 3, numa primeira fase é calculado o fator W_p/kWh (eixo das abcissas) sem considerar o banco de baterias e ações de eficiência energética, como por exemplo a substituição do sistema de iluminação por um mais eficiente, que, no caso em estudo, é igual a $0,25 W_p/kWh$. A quota de autoconsumo, neste caso, é de 57% e a de autossuficiência é, sensivelmente, 18%. Ao considerar a capacidade de armazenamento das baterias a 50% e a ações de

eficiência energética, sendo expectável uma redução no consumo de 1,9 MWh/ano [7], o fator Wh/kWh (eixo das ordenadas) é igual a 0,9, deslocando as quotas de autoconsumo e autossuficiência para, 92% e 28%, respetivamente.

Assim, para o projeto da Casa da Seda, ao depender apenas da geração PV e ao introduzir o banco de baterias com capacidade de 30 kWh, o aumento da quota de autoconsumo em aproximadamente 35% é mais relevante que o ganho de 10% na quota de autossuficiência. No entanto, ao considerar a geração pico-hídrica, poder-se-á atingir um novo ótimo entre esses dois parâmetros se a potência de pico produzida pelas fontes de energia renovável atingir 15 kWp. No entanto, o projeto para a microrrede da Casa da Seda prevê uma produção PV de 4,5 kWp e pico-hídrica em torno de 1,5 kWp, totalizando 6 kWp. Assim, a otimização absoluta das quotas só poderá ser atingida se houver a redução da demanda anual (cargas elétricas). Este equilíbrio, para além de melhorar a relação produção vs. consumo, também permite aumentar a vida útil das baterias.

3 Caracterização da Solução

3.1 Proposta inicial

O projeto da Casa da Seda [7] foi desenvolvido em 2017 e consistia numa microrrede composta pelos seguintes equipamentos (Fig. 4): 3 conversores Sunny Island, 4 inversores Sunny Boy, 1 turbina pico-hídrica, 1 fileira de telhas PV, de 9 W cada, do fabricante ZEP, 3 kWp de módulos PV, banco de baterias, ainda sem especificação do controle remoto de gestão das baterias. Além disso, estava prevista uma ação de eficiência energética, que incluía a substituição do sistema de iluminação por um sistema recorrendo a lâmpadas LED. Esta ação está a ser programada no âmbito do projeto em curso, bem como a reabilitação da galeria onde vão ser instaladas as unidades pico-hídricas, através do seu isolamento térmico e acústico.

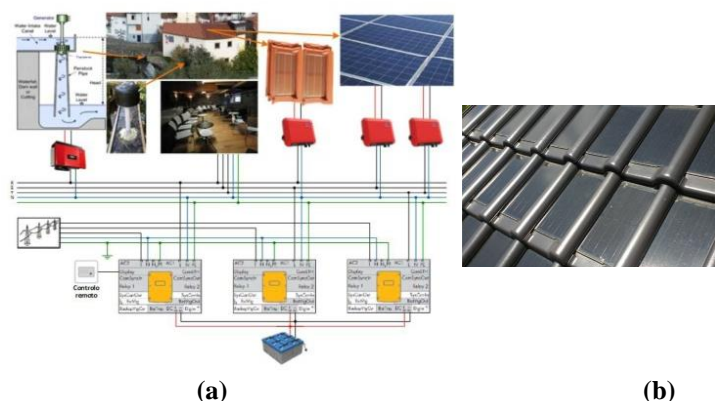


Fig. 4. Microrrede para a Casa da Seda: (a) conceção inicial [7], (b) 30 telhas fotovoltaicas ZEP Blackline em fase de testes [10].

3.2 Proposta atual

O projeto inicial sofreu algumas adaptações, designadamente, substituição das telhas fotovoltaicas por módulos fotovoltaicos convencionais, atendendo a que os custos acrescidos com a substituição de parte do telhado, tornam esse projeto inviável no âmbito do projeto SilkHouse. Acresce ainda que os testes realizados com 30 telhas fotovoltaicas ZEP Blackline, apresentada na Fig. 4.b, evidenciam sombreamento parcial das células PV, produzido pelas próprias telhas, de manhã e à tarde. A Fig. 5 apresenta a nova versão da microrrede, baseada na solução de armazenamento flexível da SMA.

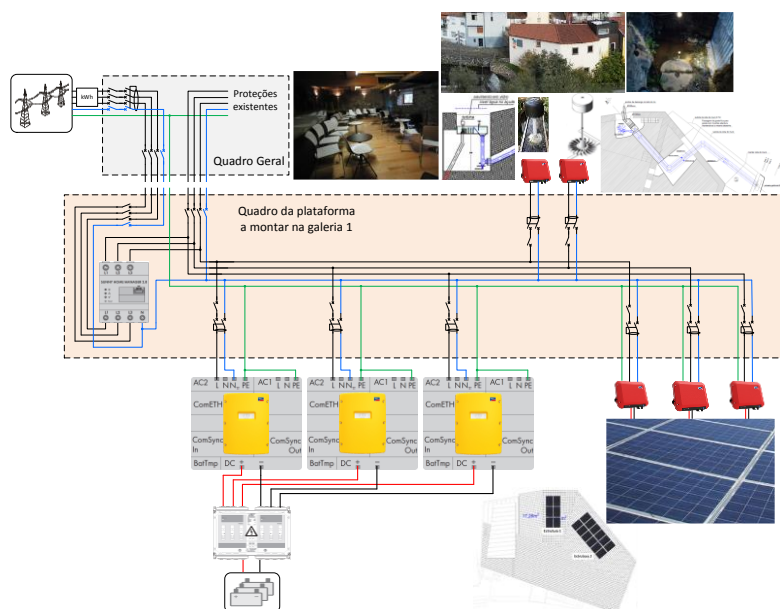


Fig. 5. Microrrede para a Casa da Seda, com integração de produção hídrica e fotovoltaica baseada no sistema de armazenamento flexível da SMA.

O *core* deste sistema consiste no inversor Sunny Island e no sistema de gestão de energia, o Sunny Home Manager 2.0. O projeto da Casa da Seda contará com um cluster formado por três conversores bidirecionais Sunny Island 4.4M, na configuração mestre-escravo, cinco inversores Sunny Boy 1.5-1VL-40, um Sunny Home Manager 2.0, 24 baterias A602/625 da Sonnenschein Solar, 18 módulos fotovoltaicos VBHN295SJ46 da Panasonic, uma roda de água horizontal, uma turbina de hélice, quadro elétrico e circuitos de proteção e seccionamento. Embora o Sunny Home Manager 2.0 possua as funções do Energy Meter integradas, para os geradores da roda de água horizontal e da turbina, poderão ser instalados dois Energy Meter da SMA, conectados via *speedwire* ao Sunny Home Manager 2.0, para que este possa controlar o fluxo de energia da produção hídrica na microrredes. Na eventualidade de se utilizar inversores de outro

fabricante, que não a SMA, a solução final vai depender dos testes laboratoriais em curso, de ligação dos geradores à microrrede.

As principais funções do Sunny Home Manager 2.0 serão medir, gerir e tomar decisões através de três funcionalidades: *energy balance*, *load balance and control* e *battery management*. Com este equipamento será possível gerar recomendações para controlar as cargas, registar a energia PV e pico-hídrica gerada, receber previsões meteorológicas atualizadas via *internet*, evitar a injeção de energia na rede, monitorizar a energia elétrica comprada à rede, determinar a quantidade de energia consumida e criar perfis de carga, que podem ser diferentes para cada dia da semana. Além da cablagem necessária para a rede trifásica e de uma rede local *speedwire* para comunicação entre os equipamentos SMA, é necessário que o utilizador configure alguns parâmetros diretamente em cada equipamento e utilize a plataforma Sunny Portal da SMA através da *internet*, sendo este recurso o mais favorável, permitindo a configuração e monitorização remotas.

Além de um controlo automático das cargas que poderão ser ligadas em dias e horários específicos, através da utilização de tomadas inteligentes, SP-2101W, também poderão ser ligadas e desligadas manualmente cargas especiais porque o Sunny Home Manager 2.0 é capaz de prever situações baseadas no histórico de consumo e no fluxo de energia e indicar momentos de maior produção ou disponibilidade de eletricidade a baixo custo a partir da rede pública. Como estas tomadas são controladas via radiofrequência, é necessária uma rede local de comunicação para o sistema de gestão de energia.

Aproveitando as funcionalidades do sistema, através da função *energy balance* é possível acompanhar o consumo de energia e o estado das baterias, limitar a potência injetada na rede, prever consumo e geração PV e otimizar o consumo manual e inteligente. Pelo *load balance and control* é possível monitorizar o tempo de operação de cargas, o mix de energia no sistema e programar em que momento poderão ser ligadas cargas não essenciais e/ou deslustráveis ao menor custo.

Ao ativar a função *storage management* do Sunny Home Management no Sunny Portal, são obtidas informações quanto ao estado de carga e de saúde das baterias. Isto garante que a carga das baterias pelo Sunny Island seja baseada na previsão. Se não for ativada, a gestão ficará por conta do Sunny Island.

Como a cidade de Bragança apresenta, na maior parte do ano, temperaturas abaixo de 20°C, e no inverno são atingidas temperaturas que podem chegar a -10°C, estas condições obrigam o operador do sistema a acompanhar o funcionamento e o ciclo de carga e descarga das baterias com maior atenção, em função das solicitações do Sunny Island. A parametrização do sistema de armazenamento em função da temperatura, com os valores propostos pelo fabricante das baterias, será importante para não prejudicar o seu tempo de vida útil.

Atendendo ao requisito de não injetar potência na rede quando houver produção excessiva de eletricidade, se as baterias estiverem carregadas e não se puder utilizar uma carga elétrica para consumo, como por exemplo do sistema de climatização, o Sunny Home Manager sinaliza ao Sunny Island que a frequência da microrrede deve ser aumentada a fim de os inversores PV começarem a reduzir sua produção, desde 100% até zero. Este controlo designado por *Frequency Shift Power Control* – FSPC

[11] permite que os inversores PV regulem a produção em função do consumo. Nestas situações, o controlo de fluxo de energia é feito através do aumento da frequência da microrrede [11]. Assim, evita-se a carga das baterias baseada na previsão de geração PV e o excesso pode ser armazenado para suprir uma necessidade posterior da microrrede. Toda esta comunicação ocorre dentro do sistema elétrico trifásico da microrrede e não pela rede de telecomunicações porque todos os conversores e inversores especificados possuem um *firmware* compatível com essa topologia de controlo. Assim, se a versão do *firmware* do Sunny Home Management for 1.11.4.R, este encarrega-se da limitação de injeção de energia ativa à rede pública. Caso a versão seja 1.13.x.R, é o Sunny Island responsável por esta função.

3.2.1 Características do sistema fotovoltaico

No pressuposto da configuração definida na secção 3.3, a especificação dos módulos PV foi realizada atendendo ao custo e à tecnologia recente. Assim, foram seleccionados os módulos da Panasonic, modelo VBHN295SJ46, da série HIT [12].

São utilizadas 3 fileiras (*strings*), compostas por 6 módulos PV cada, em duas áreas do telhado, orientadas para o sul e com inclinação de 12° (Fig. 6). A colocação das fileiras, em função da orientação das áreas disponíveis, permite distribuir a energia PV produzida durante o dia e evitar sombreamentos. A simulação realizada no Sunny Design permite estimar um autoconsumo PV de 7,14 MWh/ano. Os inversores instalados serão três Sunny Boy 1.5-1VL-40.

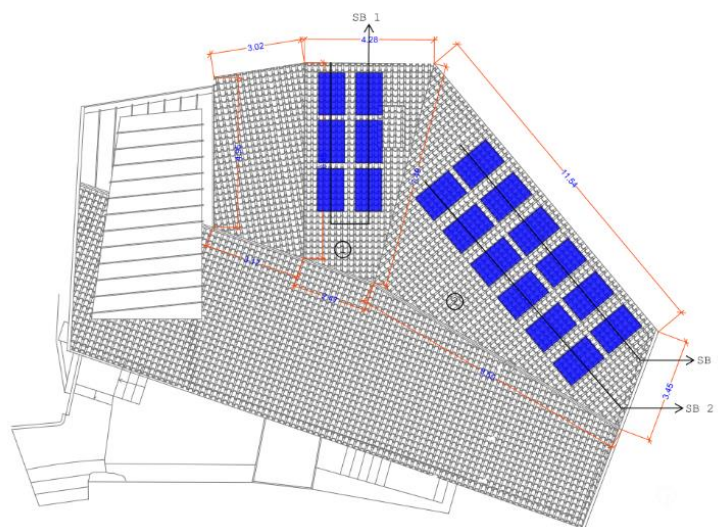


Fig. 6. Distribuição dos 18 módulos fotovoltaicos no telhado.

3.2.2 Características da roda de água horizontal

Os aproveitamentos hidroelétricos de pequena escala apresentam um enorme potencial ainda inexplorado e com muitas vantagens [13]-[19]. Estes sistemas, com potências até 5 kW são designados por pico-hídricos [20] [21]. Quando ligados à rede elétrica através de equipamentos convencionais são uma solução emergente para um significativo número de aplicações [14]-[18]. Por todo o mundo, os moinhos de água tiveram um papel relevante no desenvolvimento das populações e constituem um património histórico a conservar. A Casa da Seda, em Bragança, é um bom exemplo.

Junto à Casa da Seda existe um dique construído aquando da requalificação daquela zona ribeirinha do rio Fervença. Por outro lado, a reconstrução do edifício conservou a galeria onde outrora existiu um moinho, bem como de algumas condutas de água originais. Considerando o recurso endógeno e a infraestrutura disponíveis, e tendo em conta que a Casa da Seda é um museu de divulgação de ciência, o projeto em curso pretende conciliar a recuperação do património arquitetónico e cultural do edifício com conservação do ambiente e a produção de energia a injetar na microrrede. Desta forma, pretende-se que a Casa da Seda possa funcionar como uma atividade regular de demonstração de sistemas mais sustentáveis, em cidades inteligentes, para os visitantes e um caso de estudo da os estudantes do Instituto Politécnico de Bragança.

Neste contexto, o projeto inclui dois sistemas pico-hídricos: uma roda de água horizontal, a construir com novos materiais e para emular o antigo moinho, e uma turbina de hélice de baixa queda. Para a roda de água, dispõe-se de uma cota 3,5 m e o caudal previsto é de 20 l/s. Em pequenas turbinas hídricas o rendimento é raramente superior a 80 %. De acordo com [14], o rendimento global espectável é de aproximadamente 50 %. Assim, a potência elétrica estimada para a roda de água, obtida através de

$$P = \eta ghQ \quad (1)$$

onde η é a rendimento global, que contempla todas as perdas no sistema, a aceleração da gravidade $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, h é altura de queda bruta de 20 m, e Q um caudal de 3,5 l/s, produz, aproximadamente, 340 W. Considerando uma potência útil, a injetar na microrrede, não superior a 300 W, e considerando uma utilização anual da potência instalada de, sensivelmente 5100 h, de forma a considerar os períodos em que o recurso primário não estará disponível e indisponibilidade do sistema para tarefas de manutenção, a energia produzida será superior a 1,5 MWh/ano. O primeiro protótipo da roda de água foi construído em laboratório com o objetivo de obter uma primeira estimativa da eficiência (e da potência) e da velocidade de rotação, para melhor especificar o gerador e a sua ligação à microrrede. O protótipo, apresentado nas Fig. 7 e 8, foi construído à escala real e tem em conta os requisitos reais de projeto, nomeadamente, as restrições geométricas impostas pelas instalações da Casa da Seda, designadamente o diâmetro máximo.

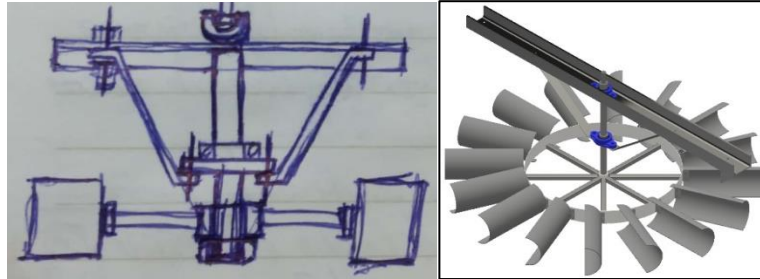


Fig. 7. Croqui e desenho em CAD do protótipo e da sua estrutura

Com o protótipo instalado no Laboratório de Geotecnologia do Instituto Politécnico de Bragança (Fig. 8), a sua estrutura superior de sustentação está assentada sobre o tanque. Um eixo vertical é apoiado nesta estrutura de modo a limitar a sua oscilação horizontal e, com a roda livre para girar no interior do tanque. São posicionados jatos d'água, devidamente direcionados para o ataque das pás. A água é obtida a partir de um reservatório a uma altura específica 3,5 m, ou seja, a mesma cota disponível na Casa da Seda.



Fig. 8. Protótipo e *layout* laboratorial para o teste da roda de água.

3.2.3 Características da turbina pico-hídrica

Não é a primeira vez que o Rio Fervença é objeto de pesquisa do IPB como um potencial microgeração de eletricidade ao utilizar turbinas pico-hídricas. Através do projeto VERCampus [22] foram analisadas em laboratório e implementadas, em contexto real, soluções para pico-hídricas baseadas na turbina ZD2.5-1.0DCT4-Z, geradores síncronos de ímanes permanentes e inversores eólicos (Windy Boy WB 1200) para conexão à rede. Com base na experiência adquirida e pelas características locais e requisitos de instalação, a turbina a ser instalada no projeto da Casa da Seda será do tipo hélice de baixas quedas, de 1 m até 5 m, com caudais até 56 l/s, modelo LH450HP da PowerSpout, que integra um gerador de ímanes permanentes com potência de 1421 W e velocidade nominal 1536 rpm. Para as condições nominais de

funcionamento da turbina, queda de 5 m e caudal de 56 l/s, a tensão DC é 212 V em carga e 450 V em vazio. A corrente nominal é de 6,7 A.

Sendo esta, uma turbina de reação, a hélice precisa de estar submersa para poder funcionar [14]. Será utilizada a infraestrutura já existente do antigo moinho, com a instalação de tubagens e de canais para a instalação da turbina. Estima-se que o local tenha caudal suficiente para produção de energia durante 70% do ano, considerando os períodos de baixo caudal no rio e de paragem para manutenção. Com uma altura de 5 m resulta, então, uma produção de energia, estimada a partir de (1), aproximadamente de 26 kWh/dia [7], já considerando 25% de perdas derivadas à curva no tubo de descarga. A produção anual estimada é de 6,5 MWh/ano.

A ligação da turbina pico-hídrica à microrrede será feita utilizando soluções inovadoras com inversores fotovoltaicos convencionais [15]-[18]. O inversor fotovoltaico a utilizar será o Sunny Boy 1.5-1VL-40 da SMA. Para evitar sobretensões devidas ao funcionamento em vazio da turbina, será necessário utilizar um circuito de proteção contra sobretensões [15]-[18].

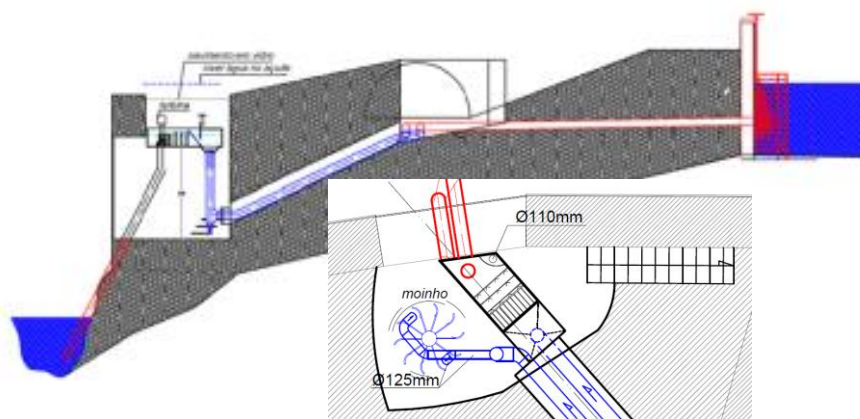


Fig. 9. Corte transversal do terreno e detalhe da vista superior do dique, tubagem e galeria com a roda de água horizontal do moinho e turbina.

3.2.4 Emulação do sistema de conversão de energia utilizando Inversor PV

Ao montar um sistema [19] capaz de emular turbinas, tanto hídricas quanto eólicas, para uso didático e de investigação (Fig. 10), pretendeu-se analisar integração de geração hídrica em microrredes utilizando inversores fotovoltaicos convencionais, amplamente disponíveis no mercado e a baixo custo.

O sistema contém uma interface com utilizador desenvolvido no software LABVIEW, um inversor de frequência (ACS 600), que aciona um motor de indução acoplado com um gerador síncrono de ímãs permanentes, uma ponte retificadora, um circuito de proteção e o inversor fotovoltaico ligado à rede ou à microrrede existente no laboratório.

A ponte retificadora é utilizada para a retificação do sistema trifásico da tensão do gerador e o circuito de proteção é utilizado para evitar sobretensões em caso de falha na rede, por exemplo.

Este sistema permite o desacoplamento de frequência entre o gerador e a rede, de forma que o gerador possa ser acionado a velocidade variável, aumentando a eficiência do sistema e fazendo com que o inversor fotovoltaico possa injetar a potência na rede [16]. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Eletromecatrônicos do IPB com os inversores Sunny Boy 2100, Sunny Boy 1.5-1VL-40 e o Omnik-2k-TL2.

Sempre que o inversor se desconectar da rede, ou durante as colocações em serviço, após paragens, uma vez que os inversores podem demorar mais de 1 minuto a iniciar a injeção de energia na rede, o circuito de proteção dissipa a potência do gerador numa resistência externa, prevenindo assim sobretensões perigosas [16]. O inversor fotovoltaico encarrega-se de fazer o seguimento do ponto de potência máxima, neste caso do gerador hídrico, e injetar a energia na rede [15]-[18].

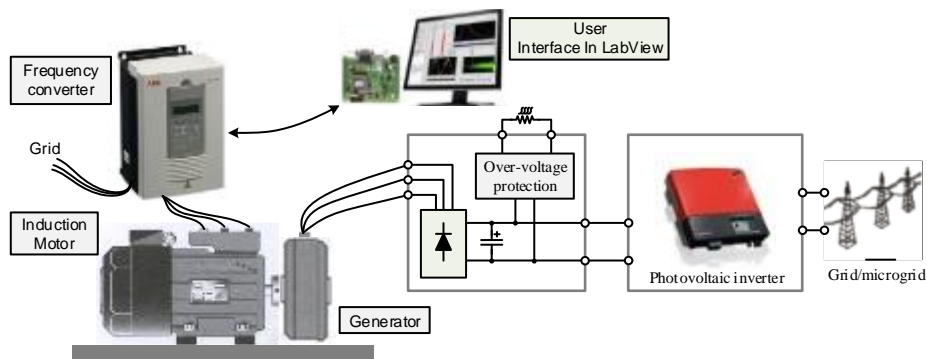


Fig. 10. Diagrama da emulação do gerador [19].

4 Resultados

Estima-se que a energia produzida por ano seja de 7,14 MWh de geração PV, com base nos dados de produção PV no local, 1,5 MWh devido à roda de água horizontal e 6,5 MWh da turbina, atingindo 15,14 MWh, praticamente 16,7 MWh, que é o valor do último consumo anual registrado (2016). Por outro lado, a complementaridade da produção hídrica com a produção PV contribui para a otimização das quotas de autoconsumo e de autossuficiência.

A solução para a integração da roda de água e da turbina pico-hídrica consiste em ligar a tensão retificada do gerador diretamente à entrada de inversores fotovoltaicos, que realizam a interface com a microrrede. Para isso, torna-se necessário utilizar um circuito de proteção para limitar a velocidade do gerador e a tensão à entrada do inversor, em situações transitórias. Assim, tanto o Sunny Boy 1.5-1VL-40 como outros

inversores testados apresentaram resultados que garantem a injeção de potência hídrica na microrrede [16].

5 Conclusão

Este artigo apresenta o estado atual do desenvolvimento e implementação de uma microrrede na Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança, Portugal. Este trabalho está a ser implementado no âmbito do Projeto SilkHouse - *Development of a smart microgrid based on renewable energy sources and a monitoring system for the House of Silk*, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. O projeto visa transformar a Casa da Seda, um museu dedicado à disseminação de ciência, num edifício autossustentável em termos médios anuais. O projeto da Casa da Seda decorre dos resultados de projetos e estudos anteriores baseados nas tecnologias da SMA (Sunny Island) e da PowerSpout (turbinas pico-hídricas para baixas quedas), e na utilização de geradores síncronos de ímanes permanentes ligados à rede através de inversores fotovoltaicos convencionais. A solução desenvolvida consiste na instalação de uma microrrede inteligente, baseada no sistema de armazenamento flexível da SMA. A microrrede tem como fontes de energia os recursos endógenos e renováveis locais, designadamente, sistemas fotovoltaicos e pico-hídricos. Estes últimos consistem numa turbina de hélice de baixa queda e numa roda de água horizontal, a instalar no local onde existiu um moinho e cuja infraestrutura foi conservada. A microrrede tem, ainda, um banco de baterias para aumentar a quota de autoconsumo, uma vez que estará ligada à rede elétrica de serviço público, mas sem injeção de energia na mesma.

A Casa da Seda, como museu de divulgação de ciência, pretende ser um modelo real de dissiminação deste tipo de soluções, servido de referência para futuras casas eficientes, em cidades inteligentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia o apoio financeiro concedido no âmbito do projeto SilkHouse, ao Município de Bragança o apoio na implementação física do projeto, o Centro Ciência Viva de Bragança, designadamente à Ivone Fachada e Estefania Gonçalves a colaborarão nas atividades realizadas, à ESTiG-IPB pelo apoio nos testes laboratoriais, ao Rui Oliveira os desenhos e apoio na memória descritiva, ao José Batista, Wellington Maidana, Vitor Gomes, Jorge Paulo e Abílio Marcelo, o apoio nas atividades realizadas.

Referências

1. A. Hirsch, Y. Parag e J. Guerrero. "Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, pp. 402-411, 2018.

2. Q. Fu, L.F. Montoya e A. Solanki, “Microgrid Generation Capacity Design with Renewables and Energy Storage Addressing Power and Quality and Surety”, Microgrid Generation Capacity Design with Renewables, December 2012, pp. 2019-2027.
3. SMA. Sunny Island System Guide - System Solutions for Reliable Off-Grid Power Supply. <http://www.termsenergy.cz/content/files/text20141219102338/sma-offgrid-sunny-island.pdf> 2014 last accessed 2018/09/08.
4. V. Leite, J. Batista e O. Rodrigues. “VERCampus – Live Park of Renewable Energies” International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 28-20 Março 2012
5. IPB. Ver Campus – Campus de Energias Renováveis. http://vercampus.ipb.pt/portal/page?_pageid=495,291936&_dad=portal&_schema=PORTAL last accessed 2018/09/08.
6. V. Leite, A. Ferreira, J. Batista e J. Couto. “Analysis of the Operation of a Microgrid with Renewable Distributed Generation”. III Congreso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, 1-2 Dezembro, 2015.
7. W. Maidana, V. Leite, A. Ferreira, L. Queijo, J. Batista, J. Bonaldo, E. Gonçalves. “Design of a Self-sustainable System Based on Renewable Energy Sources for a Small Museum of Science Dissemination - the House of Silk”, III Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia, 12-15 Julho 2017.
8. SMA FLEXIBLE STORAGE SYSTEM - System description. SI44M-80H-12-FSS-IA-en-10, Version 1.0. 2017 <http://files.sma.de/dl/30486/SI44M-80H-12-FSS-IA-en-10.pdf> last accessed 2018/06/19.
9. SMA SMART HOME - Planning Guidelines. SI-HoMan-PL-en-50, Version 5.0. 2017 <https://zerohomebills.com/wp-content/uploads/Planning-Guidelines-SMA-SMART-HOME-The-System-Solution-for-Greater-Independence.pdf> last accessed 2018/06/19.
10. ZEP. Solar Roof Tiles - Technical Specifications. <https://www.zepbv.nl/technical-specifications> last accessed 2018/05/17.
11. SMA. PV Inverters - Technical Information. <http://files.sma.de/dl/7910/SB-OffGrid-TI-US-en-19.pdf> last accessed 2018/06/11
12. Panasonic. Photovoltaic module HIT VBHN295SJ46 https://eu-solar.panasonic.net/cps/rde/xbcr/solar_en/VBHN295SJ46_EN.pdf last accessed 2018/05/17.
13. R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard e J. W. Mitchell, Fox and McDonald’s Introduction to fluid mechanics, 9th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.
14. A. Harvey. Micro-Hydro Design Manual: a guide to small-scale water power schemes. Intermediate Technology Publications, 1993.
15. V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "A Practical Approach for Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters", IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 4-8 abril 2016.
16. V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Compatibility Analysis of Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters”, 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2016), Karlsruhe, Germany, 6-8 setembro 2016.
17. V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Pico-hydro Systems: Microgrid-Connection approaches”, IV Congreso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, Concepción, Chile, 27-28 outubro 2016.

18. V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, “Grid-connection approaches for pico-hydro systems.” II Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia - CIEEMAT 2016, 8-11 novembro 2016.
19. K. Brito. “Plataforma para Emulação de sistemas Pico-hídricos ligados à Rede Elétrica, utilizando Inversores Fotovoltaicos Convencionais”. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, 2016.
20. M. Basar, A. Ahmad, N. Hasim, K. Sopian. “Introduction to the pico hydro power and the status of implementation in Malaysia”. In 2011 IEEE Student Conference on Research and Development, SCORED 2011.
21. K. Sopian, J. Razak. “Pico hydro: clean power from small streams”. In Proceedings of the 3rd World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference on Renewable Energy Sources, Tenerife, Spain (Vol. 13). 2009.
22. V. Leite, T. de Figueiredo, T. Pinheiro, A. Ferreira e J. Batista. “Dealing with the Very Small: First Steps of a Picohydro Demonstration Project in an University Campus”. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 28-20 Março 2012