



Conceção de um Sistema Autossustentável para um Edifício de Divulgação de Ciência: A Casa da Seda

Wellington Maidana da Silva

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Trabalho orientado por:

Professor Doutor Américo Vicente Leite

Professor Doutor Jakson Paulo Bonaldo

Julho de 2017



Conceção de um Sistema Autossustentável para um Edifício de Divulgação de Ciência: A Casa da Seda

Wellington Maidana da Silva

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para
obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Trabalho orientado por:

Professor Doutor Américo Vicente Leite

Professor Doutor Jakson Paulo Bonaldo

Julho de 2017

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força, graça e coragem durante estes anos de estudos.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão e ao Departamento de Engenharia Electrónica do campus, pelas oportunidades que me proporcionaram durante todos estes anos de graduação. Ao Instituto Politécnico de Bragança por ter me acolhido durante minha estadia como estudante de dupla diplomação. Sou muito honrado por ter tido a oportunidade de estudar em uma das melhores instituições de ensino de Portugal e possuo sentimento mútuo ao falar da UTFPR campus Campo Mourão.

Gostaria também de agradecer aos Professores Doutores Américo Vicente Teixeira Leite e Jakson Paulo Bonaldo por toda dedicação, conhecimento compartilhado e enorme disponibilidade em estar presente para a realização deste projeto.

Agradeço ao Professor Dr. Roberto Neli, a Professora Dr. Karla Silva e ao Professor Ms. Adriano Lopes Romero, pela oportunidade que me proporcionaram de participar do programa de dupla diplomação no IPB, e ao Ms. José dos Santos Teixeira Batista pelas contribuições no trabalho. Sou eternamente grato pelo apoio e orientações.

Não menos importante quero agradecer aos meu pai Cristovão Rodrigues, minha mãe Evanilda Maidana, minhas irmãs Sonia Cristina e Angélica Maidana e meu cunhado Aroldo Tavares, pois sempre me apoiaram em todo este percurso académico e, apesar da distância, acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

E por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa trajetória, me ajudando a realizar esse sonho e tornando esses anos de universidade memoráveis. A vocês meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo apresentar a concepção de um sistema autossustentável baseado em fontes de energia renováveis - hidrelétricas e fotovoltaicas - para um centro dedicado à divulgação e disseminação da ciência denominado Casa da Seda, que faz parte Centro Ciência Viva de Bragança. A solução é baseada numa microrrede ligada à rede elétrica, utilizando tecnologias inovadoras para produção, armazenamento e gerenciamento de energia. A microrrede é baseada num conjunto de cluster com três inversores de bateria que estabelecem um sistema de abastecimento trifásico. A energia hidroelétrica é produzida usando uma turbina de baixa queda do tipo hélice, que funciona como uma pico-hídrica, conectada à microrrede através de uma solução inovadora. A energia fotovoltaica é produzida por meio de telhas fotovoltaicas e módulos convencionais.

Palavras-chave: Sistema autossustentável; fontes de energia renováveis; microrrede; produção de energia pico-hídrica; produção de energia fotovoltaica;

Abstract

This study presents the complete design of a self-sustainable system based on renewable energy sources - hydro and photovoltaic - for a small center dedicated to the dissemination of science called House of Silk, from the "Ciência Viva" Science Center of Bragança. The solution is based on a microgrid, connected to the main grid, using innovative technologies for energy production, storage and management. The microgrid is based on a cluster of three battery inverters which establishes a three-phase supplying system. The hydro energy is generated using a low head, pico-hydro propeller turbine, connected to the microgrid through an innovative solution. The photovoltaic energy is produced by means of photovoltaic tiles and conventional modules.

Keywords: self-sustainable system; renewable energy sources; microgrid; pico-hydro system; photovoltaic;

Conteúdo

Agradecimentos

Resumo i

Abstract ii

1 Introdução 1

1.1 Objetivos 2

1.2 Organização do Trabalho 2

2 Estado da Arte 5

2.1 Produção de energia pico-hídrica 5

2.1.1 Produção de energia pico-hídrica nos países em desenvolvimento . . 6

2.1.2 Produção de energia pico-hídrica nos países desenvolvidos 8

2.2 Produção de energia fotovoltaica 9

2.3 Aplicações do conceito de microrrede 11

3 Microrredes e Sistemas Solares Fotovoltaicos 13

3.1 Sistemas solares fotovoltaicos 13

3.1.1 Sistemas ligados à rede 14

3.1.2 Sistemas isolados 16

3.1.3 Sistemas híbridos 16

3.2 Microrrede 17

3.2.1	Recursos energéticos distribuídos	18
3.2.2	Sistema de armazenamento	19
3.2.3	Sistema de controlo	20
4	Caracterização do Projeto	23
4.1	Descrição da Casa da Seda	23
4.2	Caracterização elétrica do edifício	24
4.3	Potencial energético do edifício	29
4.3.1	A estrutura do antigo moinho	29
4.3.2	Produção fotovoltaica	31
5	Caracterização da Solução	35
5.1	Medidas de eficiência energética	35
5.2	Microrede da Casa da Seda	36
5.3	Microgeração	38
5.3.1	Instalação de uma pico-hídrica	38
5.3.2	Unidades Fotovoltaicas	40
5.3.3	Gestão do fluxo e armazenamento de energia	42
5.3.4	Banco de Baterias	42
5.3.5	Monitorização	43
6	Resultados	45
6.1	Análise energética	45
6.1.1	Medidas comportamentais	46
6.1.2	Medidas técnicas	46
6.1.3	A microgeração	46
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	53
7.1	Conclusões gerais do trabalho	53
7.2	Trabalhos e desenvolvimentos futuros	54

A Cargas da Casa da Seda	59
B Artigo	61

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros da função de controlo de potência por mudança de frequência .	21
4.1	Consumo mensal de energia (kWh) dos anos de 2014, 2015 e 2016	25
4.2	Consumo média de energia (kWh) durante 7 semanas.	29
4.3	Média diária de energia produzida e irradiação solar no local	32
5.1	Consumo de energia da Iluminação	36
6.1	Estimativa de excedente e demanda não suprida de energia em kWh.	51

Lista de Figuras

2.1	(a) Escola de Khastap; (b) Mini hídrica instalada; (c) Sala de aula no local.	7
2.2	Turbina instalada no município de Casinos em Valência.	9
2.3	Evolução anual global de potência instalada fotovoltaica de 2000 - 2016 [15].	10
2.4	Microrrede instalada no IPB [18].	12
3.1	Central fotovoltaica da Amareleja, em Moura (Portugal) [20].	14
3.2	Microgeração numa residência [22].	15
3.3	Exemplo de uma microrrede residencial [27].	18
3.4	Banco de bateria [31].	19
3.5	Função de controlo de potência por mudança de frequência [27].	21
4.1	Casa da Seda	24
4.2	Diagrama de cargas do edifício, na segunda-feira, durante 7 semanas.	26
4.3	Diagrama de cargas do edifício, na terça-feira, durante 7 semanas.	26
4.4	Diagrama de cargas do edifício, na quarta-feira, durante 7 semanas.	26
4.5	Diagrama de cargas do edifício, na quinta-feira, durante 7 semanas.	27
4.6	Diagrama de cargas do edifício, na sexta-feira, durante 7 semanas.	27
4.7	Diagrama de cargas do edifício, na sábado, durante 7 semanas.	27
4.8	Diagrama de cargas do edifício, na domingo, durante 7 semanas.	28
4.9	Antiga sala de captação de água.	29
4.10	Anfiteatro da Casa da Seda onde havia um antigo moinho.	30
4.11	Áreas do telhado da Casa da Seda.	31
4.12	Gráfico da irradiação solar obtidas no software PVGIS.	33

4.13	Média de produção no IPB durante as semanas de 7 semanas analisadas.	33
5.1	Sunny Island 4.4H.	37
5.2	Conceção da Microrrede da Casa da Seda	37
5.3	Gerador PowerSpout LH.	39
5.4	Instalação típica para uma turbina LH.	39
5.5	Gráficos do gerador <i>PowerSpout LH</i> (a) Potência versus Altura; (b) Caudal versus Altura.	39
5.6	Esquema da pico-hídrica a instalar na Casa da Seda.	40
5.7	Telhas fotovoltaicas, <i>ZEP PV</i>	41
5.8	Inversor fotovoltaico SB1.5.	41
5.9	<i>Sunny Webbox</i>	43
5.10	<i>Sunny Sensorbox</i>	44
6.1	Estimativa de produção fotovoltaica na casa da seda.	47
6.2	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a segunda-feira.	48
6.3	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a terça-feira.	48
6.4	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a quarta-feira.	49
6.5	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a quinta-feira.	49
6.6	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a sexta-feira.	49
6.7	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a sábado.	50
6.8	Estimativa de produção <i>versus</i> consumo durante a domingo.	50

Lista de Abreviaturas

Ah	Ampère hora
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
$C_{bateria_{Ah}}$	Capacidade da bateria em Ampère hora
$C_{bateria_{kWh}}$	Capacidade da bateria em kilo Watt hora
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>
E_{ano}	Consumo de energia anual
E_d	Média diária de produção do sistema (kWh)
E_m	Média mensal de eletricidade produzida pelo sistema (kWh)
ESTiG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
H_d	Média diária de irradiação solar por metro quadrado (kWh/m^2)
H_m	Média mensal de irradiação solar por metro quadrado (kWh/m^2)
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
l/s	Litros por segundo
n_{bat}	Eficiência média da bateria durante a descarga

$P_{estimada}$	Potência estimada
$P_{hídrica}$	Potência hídrica
Q	Caudal (em litros por segundo)
rpm	Rotações por Minuto
T_{auto}	Tempo de autossuficiência
V_{nbat}	Tensão Nominal da Bateria
Wp	Watt pico

Capítulo 1

Introdução

A necessidade da produção de energia a partir de fontes renováveis é algo indiscutível nos dias atuais, principalmente pelas preocupações ambientais geradas pela utilização de combustíveis fósseis, sendo estes, ainda, a principal fonte de produção de energia de muitos países [1]. O desenvolvimento tecnológico atual, designadamente no âmbito da microgeração baseada em fontes renováveis de energia, permite conceber novas soluções energéticas inteligentes, em muitas aplicações de pequena dimensão, nomeadamente no setor residencial.

A disseminação destes sistemas, ainda que de baixa potência, deverá contribuir, significativamente, para o aumento da sustentabilidade a nível global. Neste contexto, os sistemas baseados em microrredes são soluções modernas e constituem uma versão em pequena escala da rede elétrica convencional, integrando produção, distribuição e gestão da energia elétrica. No caso de excesso ou défice de produção, as microrredes podem, respetivamente, fornecer ou receber energia da rede convencional [2].

As microrredes são sistemas que integram unidades de produção distribuída de energia, sistemas de armazenamento e cargas controláveis, numa rede de baixa tensão que pode funcionar tanto no modo ligado à rede como no modo autónomo [3]. As tecnologias disponíveis no mercado possibilitam atuar tanto na diminuição do consumo de energia elétrica, quanto no aumento da produção, com os requisitos necessários para criar um sistema confiável e seguro para o utilizador final. Um sistema de energia tem um elevado nível

de segurança se fornece energia para as cargas essenciais e críticas, por longos períodos, proporcionando segurança, confiabilidade, sustentabilidade e boa relação custo-benefício [2].

1.1 Objetivos

O projeto apresentado nesta dissertação visa transformar o edifício da Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança, num edifício autossustentável, através da utilização de novas tecnologias de produção de energia baseadas no conceito de microrredes. Pretende-se que a Casa da Seda, tendo em conta a sua missão, sirva como plataforma de demonstração e divulgação destas soluções inovadoras para as futuras casas das cidades inteligentes. Para o efeito, pretende-se conceber uma microrrede inteligente, baseada em tecnologias inovadoras com integração de fontes renováveis de energia. Entre outras fontes renováveis, a microrrede irá integrar energia solar fotovoltaica e uma pico-hídrica devidamente integrada no local onde outrora existiu um moinho.

1.2 Organização do Trabalho

Esta dissertação é constituída por sete capítulos. Após a presente introdução, segue-se o estado da arte que referencia o que já foi realizado nesta área de estudo. O terceiro capítulo descreve os tipos de sistemas fotovoltaicos e os principais componentes de uma microrrede.

No quarto capítulo é apresentada a caracterização do projeto a ser desenvolvido na Casa da Seda, assim como o detalhe da estrutura e a estimativa do potencial energético.

No quinto capítulo descreve-se a solução energética autossustentável baseada numa microrrede projetada para o edifício, seguido pelo sexto capítulo que demonstra os dados que asseguram a viabilidade da sua implementação, a qual será realizada 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.

Por fim, são apresentadas as principais conclusões e as perspectivas de novos desenvolvimentos.

Capítulo 2

Estado da Arte

Atualmente, soluções inovadoras para tornar as residências autossustentáveis, isoladas ou ligadas à rede elétrica, têm vindo a ser exploradas através do aproveitamento dos recursos naturais locais para produção de energia elétrica. Para isso, estes sistemas elétricos necessitam, além de capacidade de produção suficiente para alimentar as cargas instaladas, ter capacidade de armazenar energia produzida em excesso em determinados momentos, juntamente com a monitorização e controlo do fluxo de energia na rede local, o que caracteriza uma microrrede.

Para melhor contextualizar o sistema proposto, este capítulo começa por apresentar uma visão geral de como a produção hidroelétrica de pequena escala, mais propriamente a produção pico-hídrica está a ser utilizada no mundo. Em seguida, apresenta informações sobre a produção de energia fotovoltaica e, por fim, apresenta o estado da arte referente a microrredes como solução para sistemas de produção e armazenamento de energia elétrica, em edifícios residenciais e de serviços.

2.1 Produção de energia pico-hídrica

A produção de energia hidroelétrica de pequena escala tem sido uma alternativa para colmatar a falta de acesso a energia elétrica em todo mundo, principalmente em locais onde a rede não consegue satisfazer as necessidades energéticas. Na literatura atual,

tem-se verificado um crescimento nos estudos de centrais elétricas de pequena escala como solução económica, ambiental e de fácil implementação para a produção de energia renovável [4].

Pico-hídricas referem-se a pequenas infraestruturas de produção de energia hidroelétrica cuja potência máxima de produção é de 5 kW [4], e que permitem aproveitar o potencial de energia da água em locais de baixa queda (3 a 5 m) e caudal considerável (mais de 200 l/s) e ou locais com pouco caudal (30 l/s) mas alturas de queda significativas (30 l/s). As pico-hídricas encontram-se mais exploradas em áreas rurais e montanhosas onde o acesso à energia elétrica é restrito [5]. São também uma alternativa económica porque na sua instalação, não são necessários gastos com o aumento das linhas de transmissão, transformadores, entre outros equipamentos, o que normalmente requer um elevado investimento. Em contraste, projetos de pico-hídricas são desenvolvidos de acordo com as características do local e utilizando componentes comerciais [6].

2.1.1 Produção de energia pico-hídrica nos países em desenvolvimento

Na literatura atual, os principais relatos sobre pico-hídricas referem-se a sistemas projetados para fornecer eletricidade em comunidades rurais, sobretudo de países em desenvolvimento. Nessas comunidades, o não acesso à rede elétrica, muitas vezes, deve-se ao isolamento geográfico, que torna economicamente inviável a utilização de energia da rede devido aos altos custos de transporte de energia para zonas onde há baixa densidade populacional e baixo potencial de crescimento [6]. Em situações como estas, normalmente o fornecimento de energia ocorre através de pequenas turbinas hídricas, como solução para alimentar pequenas cargas como lâmpadas e rádios, possibilitando o desenvolvimento social e económico na região [4].

Normalmente, as pico-hídricas nos países mais pobres utilizam a água que é desviada de cursos dos rios locais ou de pequenas barragens, através de condutas forçadas, até às pequenas centrais hídricas. Nessas centrais a energia potencial da água é convertida em

energia elétrica, recorrendo a turbinas e geradores, dimensionados especificamente para cada aplicação, procurando sempre o maior aproveitamento da capacidade de produção [6].

Em [4], os autores apresentam as iniciativas do Ministério da Energia, Tecnologia Verde da Malásia para aumentar o uso de pico-hídricas para o fornecimento de eletricidade e desenvolvimento socioeconómico. Além disso, o governo da Malásia criou uma meta para o ano de 2020, que fixa a capacidade de 500 MW para fornecimento de energia nacional baseados em pequenas hídricas. O estudo apresentado em [7], realizado no campus da *University Malaysia Pahang*, descreve um esquema pico-hídrico para produção de 1,05 kW de potência, utilizando a água do reservatório presente no campus. Este estudo demonstra que estes sistemas são soluções atrativas e ecológicas com baixo custo de execução.

Em [8], é apresentada implementado um projeto no vilarejo de *Khastap*, situado na província de *Solu Khumbu* a uma altitude de 1500 metros, e o projeto foi executado na *Sherpa Children Assistance Association*, apresentada na Figura 2.1, que trabalha para que as crianças mais pobres possam completar a sua escolaridade. A mini-hídrica fornece eletricidade para a iluminação da associação, que atende 470 alunos. Este projeto na escola de Khastap tornou possível a melhoria das condições de ensino dos alunos e do trabalho dos professores.



Figura 2.1: (a) Escola de Khastap; (b) Mini hídrica instalada; (c) Sala de aula no local.

No ano de 2011, no *Bangladesh*, os autores de [9] apresentam a concepção de um sistema pico-hídrico aproveitando a água bombeada para irrigação, sendo estas amplamente

utilizadas para fins agrícolas nas áreas rurais do país. Esta solução mostrou-se uma alternativa para colmatar a escassez de eletricidade naquele país, elevando, assim, o padrão de vida destas comunidades.

2.1.2 Produção de energia pico-hídrica nos países desenvolvidos

Ao contrário dos países em desenvolvimento, nos países desenvolvidos e grandes centros urbanos, são os compromissos ambientais adotados através do protocolo de Quioto, economia, redução de consumo e principalmente o aumento da procura energética causados pelo crescimento populacional, que motivam a exploração de formas alternativas de produção de energia, tais como através de pico-hídricas e fotovoltaica.

Atualmente, vários estudos são realizados e visam analisar a possibilidade de aproveitar a pressão dos sistemas de abastecimento público de água e tratamento de águas residuais, para mover turbinas produzindo eletricidade [10] [11].

Em [10], por exemplo, sugere-se a substituição de válvulas reguladoras de pressão por microturbinas, demonstrando através de simulações a viabilidade desta utilização como alternativa sustentável para controle de pressão e, simultaneamente, para a produção de energia elétrica. Seguindo a mesma motivação, no Reino Unido, como exposto em [11], foi realizado um estudo para o aproveitamento do potencial de produção, presente nas tubulações de tratamento de água e efluentes, com o intuito de utilizar a energia produzida para autoconsumo. Nestes processos, a energia consumida é responsável por cerca de 30 a 80% do custo de produção e a solução apresenta-se favorável e economicamente viável.

No Brasil, foi realizado um estudo para aproveitamento do potencial hidroelétrico de um edifício, utilizando água pluvial para produção de energia, que seria utilizada para a iluminação exterior do mesmo. A solução demonstrou-se economicamente viável devido ao baixo custo de investimento e retorno pela economia de energia [11].

Em [12] relata-se que a cidade de Boulder, no estado de Colorado nos Estados Unidos, já possui instalado, na sua rede de abastecimento de águas municipais, várias turbinas capazes de fornecer energia suficiente para assegurar 7% do consumo de eletricidade da

cidade, que possui 125 mil moradores. Este projeto envolveu a instalação de turbinas hídricas acopladas a geradores elétricos em pontos onde anteriormente operavam válvulas de redução de pressão no sistema de abastecimento. A pressão da água que flui na canalização é usada para produzir energia e os lucros da comercialização desta eletricidade produzida estão a ser utilizados para melhorar a qualidade e reduzir as taxas de água locais.

No município de Casinos, localizado na província de Valência, Espanha, foi colocada uma turbina de 40 kW para injetar a energia produzida diretamente na rede. A turbina instalada em linha com um tubo de 500 mm de diâmetro que liga dois reservatórios localizados em alturas diferentes é apresentada na Figura 2.2. Anteriormente, a água fluía a partir de reservatórios regulados por uma válvula de estrangulamento, que foi substituída por esta turbina. O sistema trabalha com uma diferença de pressão de 4 bar, caudal de 105 l/s e um gerador de 37 kW. Esta instalação apresenta uma eficiência superior a 75% e pode ser controlada remotamente. Com isso, registou-se uma diminuição dos custos de energia dos reservatórios localizados no município [13].



Figura 2.2: Turbina instalada no município de Casinos em Valência.

2.2 Produção de energia fotovoltaica

Em paralelo com a energia produzida por sistemas hídricos, a produção de energia solar fotovoltaica tem sido uma alternativa muito explorada nos últimos anos. É cada vez

mais frequente a instalação de grandes parques fotovoltaicos, com potências instaladas cada vez mais elevadas [14].

Segundo James Watson, atual *CEO* da *Solar Power Europe*, “Nunca antes, se viu instalar mais energia solar num único ano, como em 2016” [15]. O mercado global de energia solar fotovoltaica cresceu muito mais do que o esperado, com um crescimento de 50%, quando comparado com o ano de 2015, atingindo uma potência total instalada de 76,6 GW, como se pode observar na Figura 2.3. Pela primeira vez, a energia solar superou a eólica, em termos de instalações anuais. Juntamente com a energia eólica, a energia solar contribuiu com mais de três quartos das instalações na União Europeia em 2016. Pelo segundo ano consecutivo, as fontes renováveis de energia adicionaram mais de metade das novas capacidades globais de produção de energia [15].

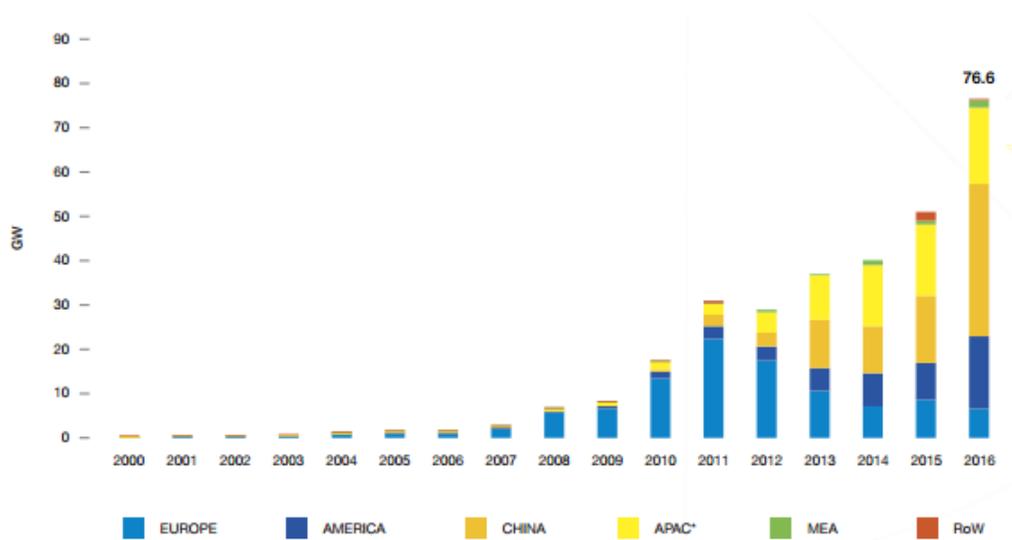


Figura 2.3: Evolução anual global de potência instalada fotovoltaica de 2000 - 2016 [15].

Atualmente, a energia solar para autoconsumo, mesmo não subsidiada, é mais barata do que a energia produzida por outros recursos, como as novas turbinas a gás de ciclo combinado, o carvão e as centrais nucleares, assim como a energia da rede pública. Além disso, a energia solar possibilita o surgimento de novos empregos. Nos Estados Unidos, que no último ano duplicou as instalações de energia fotovoltaica no ano de 2016, um em cada 50 novos empregos foi criado pelo setor de energia solar [15].

2.3 Aplicações do conceito de microrrede

A utilização de uma microrrede, intrínseca a sistemas autónomos de produção de energia, como os que utilizam energias renováveis, é muito versátil, podendo ser utilizada desde instalações residenciais até comunidades isoladas [16].

Em 2012, por exemplo, foi proposta uma microrrede para uma instalação em Waterloo, Canadá, utilizando módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, uma pico-hídrica e um gerador a gásóleo, para colmatar as necessidades energéticas de uma comunidade rural de consumo estimado em 5000 kWh/dia, com pico de consumo estimado em 1183 kW [17]. Utilizando o *software* HOMER, foram simuladas várias configurações de microrrede, utilizando diferentes combinações dos equipamentos. O estudo demonstrou, entre outros resultados, a viabilidade da implementação de sistemas sem emissão de carbono, apenas com recursos provenientes de fontes renováveis [17].

A Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG), do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), dispõe, desde 2012, de uma microrrede integrando apenas fontes renováveis de energia elétrica [18]. O projeto utiliza um inversor bidirecional para fazer o controlo e gestão dos fluxos de energia. A microrrede tem uma potência nominal de 5 kW e integra uma turbina eólica, um seguidor solar, um painel fotovoltaico fixo, um gerador a biodiesel que pode ser ligado ao sistema e um banco de baterias, como observado na Figura 2.4.

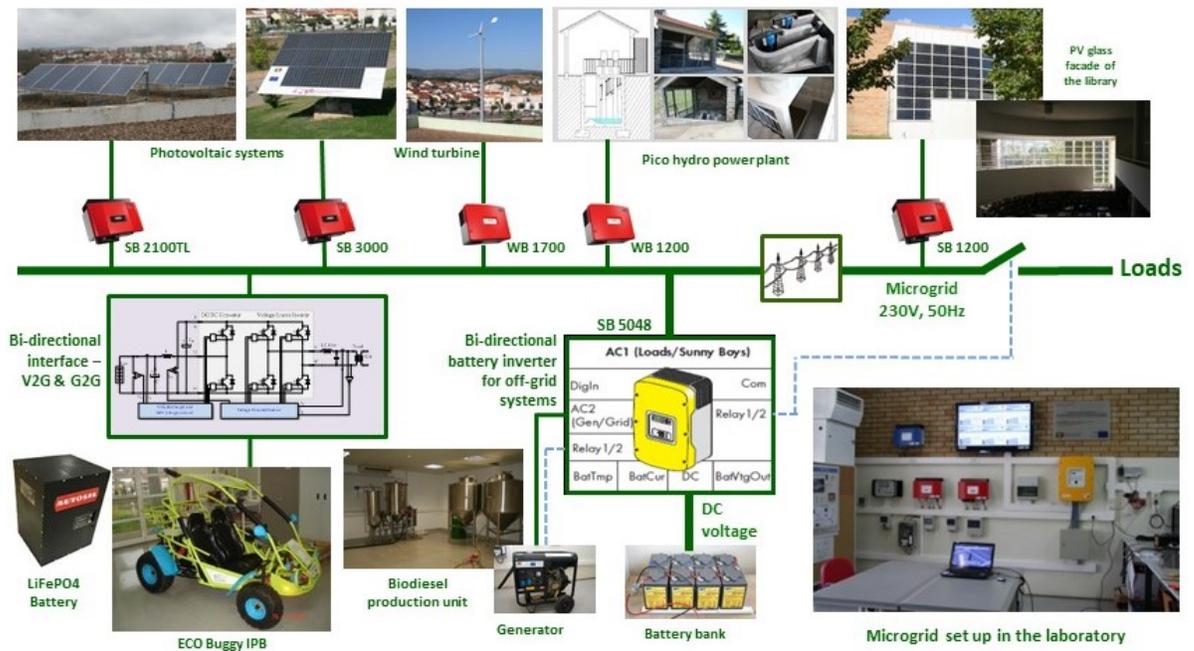


Figura 2.4: Microrrede instalada no IPB [18].

Capítulo 3

Microrredes e Sistemas Solares Fotovoltaicos

Neste capítulo serão apresentados os tipos de sistemas fotovoltaicos, abordando as diferenças entre os mesmos, assim como os conceitos gerais de uma microrrede e seus principais componentes.

3.1 Sistemas solares fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos permitem transformar a irradiação solar em eletricidade, através da utilização de inversores fotovoltaicos, de forma a poder ser utilizada diretamente pelas cargas, ou injetada na rede elétrica. Estes sistemas são constituídos por módulos fotovoltaicos e conversores eletrônicos, responsáveis pela conversão eficiente, da energia produzida pelos módulos. Estes, por sua vez, são constituídos por células fotovoltaicas, normalmente ligadas em série, que convertem, diretamente, a irradiação solar em energia elétrica. As células fotovoltaicas são formadas por duas camadas, uma negativa (com excesso de elétrons) e outra positiva (com falta de elétrons que migram para a zona negativa), de materiais semicondutores sendo, o mais comum, o silício. A irradiação solar, ao incidir nas células fotovoltaicas, provoca a interação entre os elétrons produzindo eletricidade. Quanto maior for a intensidade de irradiação maior será a produção de

eletricidade [19].

Uma grande vantagem dos sistemas fotovoltaicos é que eles permitem produzir a energia próximo ao local de consumo. Os sistemas solares fotovoltaicos são amplamente utilizados, ligados à rede ou isolados, conforme será aprofundados nas próximas subsecções.

3.1.1 Sistemas ligados à rede

Os sistemas de produção de energia fotovoltaica ligados à rede são constituídos por módulos, ligados em série e ou paralelo, e inversores fotovoltaicos, sendo os módulos fotovoltaicos responsáveis pela produção de eletricidade em corrente contínua (CC) e o inversor responsável por converter essa energia em corrente alternada (CA). Sistemas ligados à rede podem ser classificados como:

1. Centrais de produção: São sistemas de produção fotovoltaica em que toda a energia produzida é vendida à rede, como por exemplo a Central Fotovoltaica na Amareleja, apresentada na Figura 3.1, que possui 45,78 MWp de potência instalada [20].



Figura 3.1: Central fotovoltaica da Amareleja, em Moura (Portugal) [20].

2. Microgeração: O conceito de microgeração engloba a geração de eletricidade em pequena escala. Esta modalidade de produção foi muito incentivada em Portugal e em toda a União Europeia, ao longo de mais de uma década, através de taxas bonificadas. A queda do preço desta tecnologia nos últimos anos, tem encorajado o

investimento e instalação ao abrigo de novas normas legislativas [21]. Neste conceito, o produtor vende toda a energia à rede elétrica, como ilustrado e exemplificado na Figura 3.2. No início, o preço de venda era muito superior ao de compra, o que já não acontece, devido à diminuição significativa do preço e a novos regimes legais de produção. Atualmente, a legislação em vigor promove o autoconsumo.

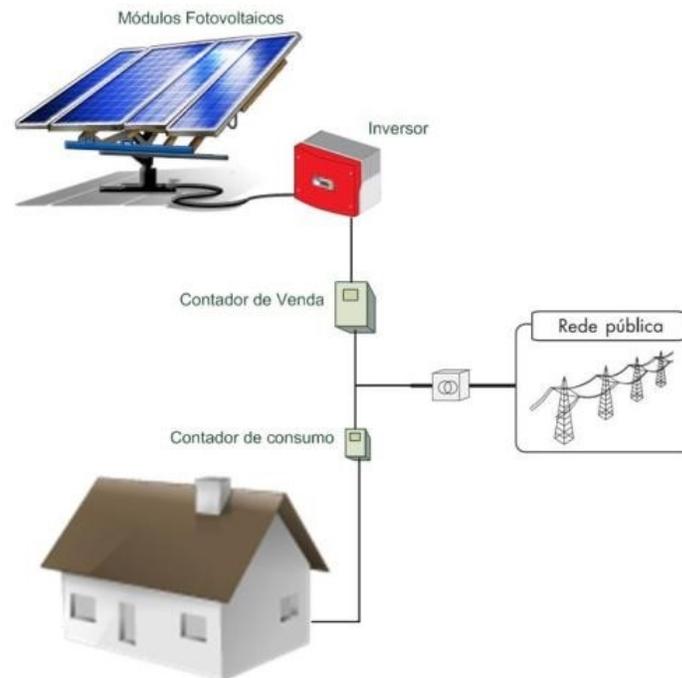


Figura 3.2: Microgeração numa residência [22].

3. Autoconsumo: O regime de autoconsumo assemelha-se ao conceito de microgeração, mas, neste caso, o objetivo principal é que a produção seja para consumo próprio da instalação e não a venda [23].

Inversor fotovoltaico

O inversor, ou conversor CC/CA, é um equipamento elétrico que permite converter corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Em geral, os inversores para ligação à rede elétrica são controlados em corrente. Isto quer dizer que transformam a tensão contínua, à sua entrada, numa corrente sinusoidal à saída, síncrona com a tensão da rede, garantindo, assim, fator de potência unitário [19].

Uma vez que a esmagadora maioria das redes elétricas e grande parte dos equipamentos elétricos, funcionam em corrente alternada, o inversor torna-se um dos equipamentos mais importantes num sistema de produção de energia. Para além da conversão eficiente de energia, com rendimentos da ordem de 98%, os inversores fotovoltaicos são responsáveis pelo seguimento do ponto de potência máxima dos módulos, proteção anti-ilha, quando falha a rede, compensação de energia reativa, de entre outras funcionalidades.

3.1.2 Sistemas isolados

Os sistemas isolados, ou autónomos, são unidades de produção fotovoltaica que se encontram desligados da rede elétrica. Este é um tipo comum, por exemplo, em locais isolados, onde não há acesso à rede elétrica.

Este tipo de sistema fotovoltaico pode ser utilizado para fins domésticos, como por exemplo, na iluminação, frigoríficos, entre outros equipamentos, em residências em locais remotos [24]. Os sistemas isolados também podem ser utilizados para fins não domésticos como em sistemas de bombeamento de água, sinalização e controle de tráfego de veículos, em sistemas de telecomunicação, entre outras aplicações [25].

Em geral, os sistemas isolados possuem armazenamento de energia, realizado por acumuladores que permitem utilizar a energia produzida nos momentos em que não há irradiação solar. Os inversores para sistemas isolados são diferentes dos referidos na secção anterior. Neste caso são responsáveis por criar a tensão alternada à saída (230 V, 50 Hz), a partir de baterias. O seguimento do ponto de potência máxima é, em geral, realizado por um regulador de carga, que carrega as baterias a partir da energia produzida pelos módulos.

3.1.3 Sistemas híbridos

Os sistemas fotovoltaicos híbridos são desenvolvidos para complementar a produção fotovoltaica através da combinação com outras fontes de produção de energia e podem

ser ligados à rede ou funcionar como um sistema isolado. Este tipo de sistema é, atualmente, uma solução adotada nas situações em que é necessário garantir o fornecimento ininterrupto de energia, em regiões onde as redes são instáveis ou não existem.

Os sistemas híbridos podem ser compostos, por exemplo, pela combinação de produção fotovoltaica com pequenas hidroelétricas, com geradores a gás ou a gasóleo. Uma vez que estes sistemas conjugam diferentes tecnologias, requerem sistemas de controlo mais eficientes do que no caso dos sistemas autónomos simples, sendo este tipo mais comum em microrredes.

3.2 Microrrede

Uma microrrede pode ser descrita como um sistema que inclui recursos energéticos distribuídos (da sigla em inglês DER), sistemas de armazenamento de energia e cargas controláveis interligados numa rede de baixa tensão, que pode funcionar em modo conectado à rede ou em modo autónomo. Uma microrrede é utilizada em diversos contextos, como em residências, comércios e parques industriais [3]. Segundo [26], o conceito de microrrede pressupõe a produção de energia próximo das cargas, sendo uma plataforma para a integração entre microgeração, unidades de armazenamento e controlo de consumo (cargas controláveis) localizadas na rede de distribuição local.

Uma microrrede residencial ou de serviços, como a ilustrada na Figura 3.3, pode funcionar em modo conectado à rede ou em modo isolado (em ilha). A mesma deverá suprir o consumo energético, controlar cargas e gerir os fluxos de energia. Esta microrrede pode operar em vários modos de funcionamento. No modo conectado à rede, o excesso de energia produzida é fornecido à rede e quando houver défice de produção recorre-se a baterias ou à rede para suprir o consumo. Para o funcionamento no modo isolado, a microrrede necessita de uma maior capacidade de armazenamento de energia devido à não coincidência entre o momento do consumo e da produção e à variabilidade do recurso solar [26].

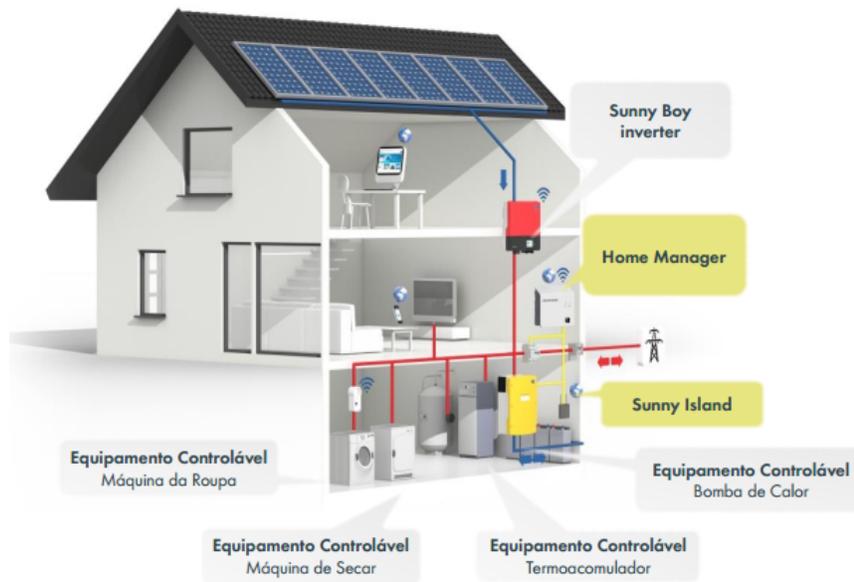


Figura 3.3: Exemplo de uma microrrede residencial [27].

3.2.1 Recursos energéticos distribuídos

Os recursos energéticos distribuídos, são fontes de energia e de potência que tendem a ser menores do que os sistemas de produção convencionais e geralmente instalados próximos dos locais de consumo. Os DER, incluem [28]:

1. Produção distribuída: Qualquer unidade de produção de energia (fotovoltaica, hídrica, CHP, células de combustíveis, entre outras) localizada próxima do consumo.
2. Armazenamento: Unidades de produção que utilizam a energia armazenada em dispositivos de armazenamento. Pode utilizar energia proveniente de vários tipos de tecnologias, como por exemplo banco de baterias e estações de carregamento de veículos elétricos (EV) [1].
3. Cogeração: Produção de calor e de eletricidade a partir de vapor ou outras formas de energia produzidas como subproduto de outro processo de produção de calor.
4. Unidades de emergência, *Stand-by* e *back-up*: São unidades geradoras utilizadas para situações de emergência, como a alimentação de cargas críticas onde o fornecimento de energia não pode ser interrompido.

3.2.2 Sistema de armazenamento

As unidades de armazenamento de energia constituem um componente de grande importância numa microrrede, e são responsáveis pela acumulação de energia nos momentos em que a produção excede o consumo das cargas. Esta energia acumulada é utilizada quando ocorre o inverso, ou seja, quando a produção não é suficiente para alimentar as cargas. Tal é feito através de um inversor bidirecional que é responsável por converter a energia CC da bateria em CA e vice-versa. A Figura 3.4 apresenta o banco de baterias que faz parte da microrrede instalada na ESTiG [29], [30].



Figura 3.4: Banco de bateria [31].

Dentro dos vários tipos de baterias disponíveis no mercado para os sistemas solares fotovoltaicos, existem:

- Baterias de chumbo-ácido;
- Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd);
- Bateria de níquel-hidretos metálicos (Ni-MH);
- Bateria de íões de lítio;
- Bateria de íões de lítio com eletrólito de polímero.

Atualmente, as baterias de íões de lítio são as que possuem um maior período de vida e uma maior resistência aos ciclos de carga e descarga. No entanto, são as mais caras no

mercado. Por outro lado, as baterias de chumbo-ácido possuem um custo menor, sendo as mais utilizadas nas instalações fotovoltaicas. Estas, apresentam uma melhor relação qualidade-preço, podendo fornecer corrente elevada durante a carga e descarga [32].

3.2.3 Sistema de controle

O que distingue uma microrrede de um sistema de distribuição com recursos energéticos distribuídos é exatamente a capacidade de controle. A gestão eficiente do fluxo de energia em microrredes é um item de grande importância pois é responsável por otimizar a relação entre produção e consumo de energia nestes sistemas [26].

O controle da microrrede pode ser realizado através do controle da tensão e frequência, da potência ativa e reativa e do consumo, de entre outras opções de controle que podem depender do tipo de tecnologia que está a ser usado e do tipo de algoritmo que é utilizado para o controle da mesma [36]. Esses algoritmos de controle permitem uma rápida reação às flutuações de energia, típicas na rede de energia autónoma. Normalmente, são utilizadas nas configurações de rede no local instalado (400 V ou 230 V / 50 Hz) [27].

Um exemplo de controle em microrredes é o adotado pela SMA nos seus inversores bidirecionais, que são responsáveis pelo controle do fluxo de energia e controle da produção fotovoltaica. A Figura 3.5 apresenta esta função de controle de potência e os seus principais parâmetros são descritos na Tabela 3.1. O seu funcionamento consiste em controlar a produção de energia através da frequência imposta pelo inversor de bateria para a microrrede e caso haja uma redução súbita nas cargas alimentadas, o inversor de bateria aumenta a frequência na microrrede e, com isso, os inversores fotovoltaicos reduzirão a sua potência de saída, garantindo que o sistema permaneça equilibrado.

Esta limitação torna-se necessária quando, por exemplo, o banco de baterias estiver totalmente carregado e a energia produzida exceder o consumo das cargas. Para evitar que o excesso de energia sobrecarregue as baterias, o inversor bidirecional reconhece essa situação e aumenta a frequência de saída. Este aumento de frequência é monitorizado pelo inversor fotovoltaico. Assim que a frequência da rede aumentar além do valor especificado

em $f_{Start\ Delta}$, como se pode observar na Figura 3.5, o inversor fotovoltaico limitará a potência de saída conforme ilustrado [27].

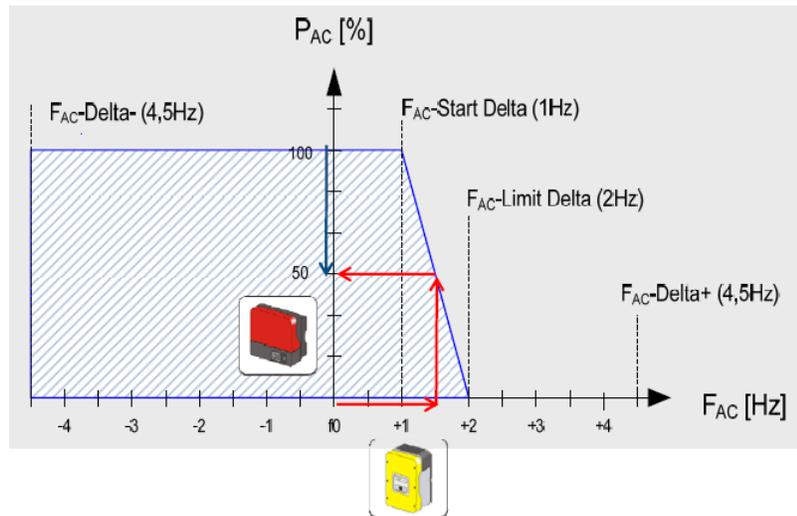


Figura 3.5: Função de controle de potência por mudança de frequência [27].

Tabela 3.1: Parâmetros da função de controle de potência por mudança de frequência

Parâmetro	Descrição
F	Frequência de funcionamento da rede (50 Hz)
f Delta- para f Delta+	Alcance máximo em relação à frequência da rede na qual o inversor fotovoltaico está ativo
f Start Delta	Aumento de frequência em relação à frequência de base, momento em que começa a limitar a potência em função da frequência
f Limit Delta	Aumento de frequência em relação à frequência de base, momento em que a regulação de potência, via frequência, termina. A potência à saída do inversor PV é de 0 W.

Capítulo 4

Caracterização do Projeto

A presente secção apresenta a caracterização da Casa da Seda, através de informações sobre a estrutura do edifício e a instalação elétrica do mesmo, para efeitos do desenho da solução autossustentável a conceber.

4.1 Descrição da Casa da Seda

A Casa da Seda é um museu situado num antigo moinho, na margem esquerda do rio Fervença, no coração da cidade de Bragança. É um espaço interativo, integrado no Centro Ciência Viva de Bragança, e é dedicado à história da seda. A Casa da Seda está localizada num antigo edifício onde diz-se que as pessoas costumavam tingir sedas no século XVIII. Nos séculos XIX e XX a propriedade funcionou como um moinho e ainda mantém as características originais da sua arquitetura. Mais tarde, tornou-se propriedade privada e produzia pão e biscoitos regionais, usando o potencial do moinho. Em 1990, o Município de Bragança adquiriu o edifício e recuperou-o durante a intervenção no Programa Polis, em 2006.

Atualmente, a Casa da Seda é um museu dedicado à divulgação e disseminação de ciência, onde ocorrem cursos, palestras e exposições. O museu conta, também, com uma exposição permanente sobre a história da seda, dando uma visão geral das várias fases da sua produção desde o desenvolvimento da lagarta e formação do casulo até ao processo de

fiação e tecelagem. A Casa da Seda recebe por ano, em média, mais de 11500 visitantes.

O edifício, apresentado na Figura 4.1, encontra-se localizado no concelho de Bragança, no centro da zona urbana, a uma altitude de 664 m. Quanto à arquitetura, trata-se de um edifício em banda, de 3 pisos e com boa exposição solar. Apresenta uma estrutura de pedra, cobertura em madeira e telha cerâmica, paredes rebocadas, vãos de madeira e, no seu interior, existem tabiques e alvenarias de pedra tradicional original.



Figura 4.1: Casa da Seda

4.2 Caracterização elétrica do edifício

A instalação elétrica é alimentada a partir da rede pública de distribuição de energia em baixa tensão, trifásica, com potência contratada de 13,6 kW. Trata-se de um edifício com um período de utilização semanal, de terça-feira a domingo, com funcionamento centrado no período diurno, entre as 10:00 horas e as 18:00 horas. Para além do funcionamento normal, são realizados, de forma regular, diversos eventos, principalmente no final da semana, estendendo as atividades até cerca das 24:00h.

Para a caracterização elétrica do perfil de consumo da Casa da Seda foram feitas duas análises. A primeira baseou-se no histórico de consumo de energia de três anos, 2014, 2015 e 2016, através da análise das faturas de energia fornecida pela EDP (concessionária local). Como se pode observar, a Tabela 4.1 apresenta o consumo mensal deste período juntamente com o consumo total durante cada ano. Realizando uma média entre o consumo total destes três anos, pode-se concluir que a média de consumo para este período é de 44,6 kWh/dia.

Tabela 4.1: Consumo mensal de energia (kWh) dos anos de 2014, 2015 e 2016

Mês	2014	2015	2016
Janeiro	702	1204	1545
Fevereiro	677	1090	1356
Março	3976	1171	1204
Abril	1075	986	2673
Mai	901	959	1087
Junho	2975	1044	996
Julho	953	1513	1000
Agosto	885	991	1136
Setembro	2726	1002	999
Outubro	975	822	1645
Novembro	1010	1760	1599
Dezembro	1247	1466	1463
Total	18102	14008	16703

A segunda análise foi feita através dos dados de registos da potência solicitada pelo edifício. Para tal, foi feita a monitorização com um equipamento registador de potências e energias, designadamente o modelo PEL 103 do fabricante *Chauvin Arnoux*, durante 7 semanas completas, de segunda-feira a domingo, sendo que as medições foram realizadas entre 6 de fevereiro a 2 de abril de 2017. Os dados são apresentados nos gráficos representados pelas figuras a seguir.

Como referido anteriormente, não são realizadas atividades no local às segundas-feiras e como se pode observar na Figura 4.2, a maior parte dos registos realizados neste dia da semana não ultrapassa a potência de 0,5 kW, salvo em algumas exceções como se pode observar.

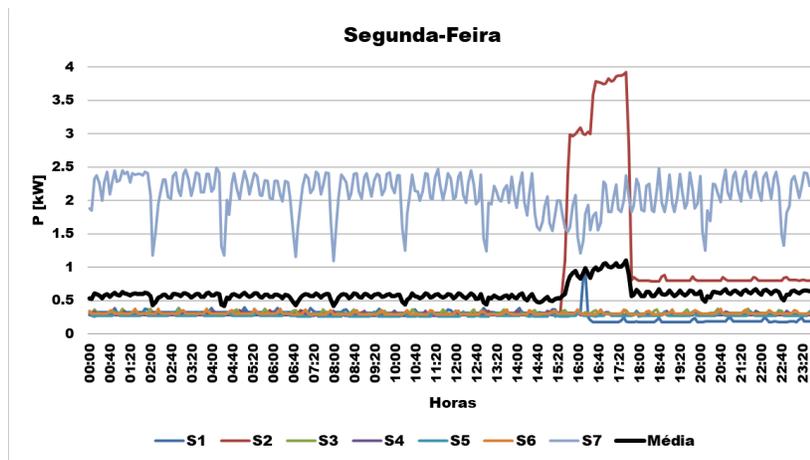


Figura 4.2: Diagrama de cargas do edifício, na segunda-feira, durante 7 semanas.

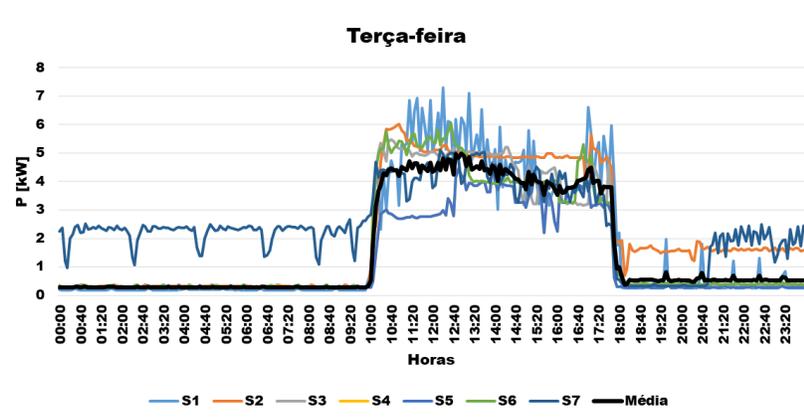


Figura 4.3: Diagrama de cargas do edifício, na terça-feira, durante 7 semanas.

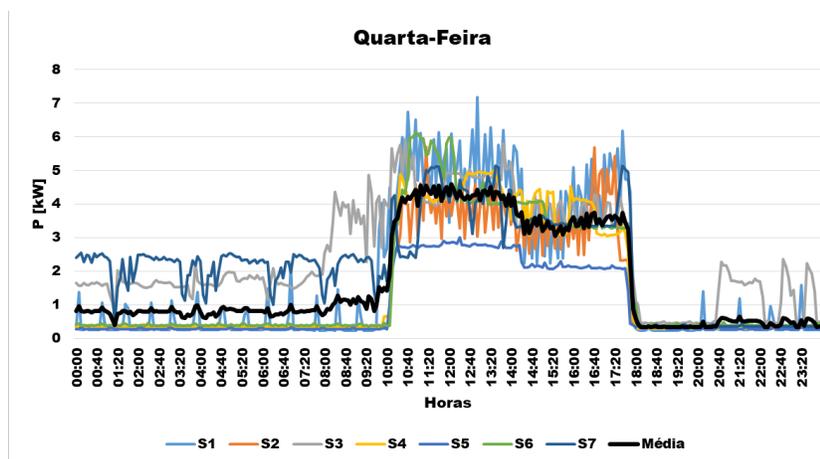


Figura 4.4: Diagrama de cargas do edifício, na quarta-feira, durante 7 semanas.

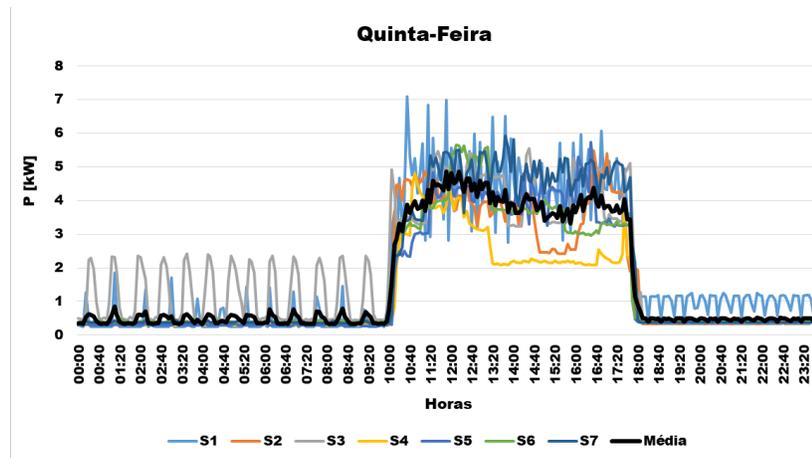


Figura 4.5: Diagrama de cargas do edifício, na quinta-feira, durante 7 semanas.

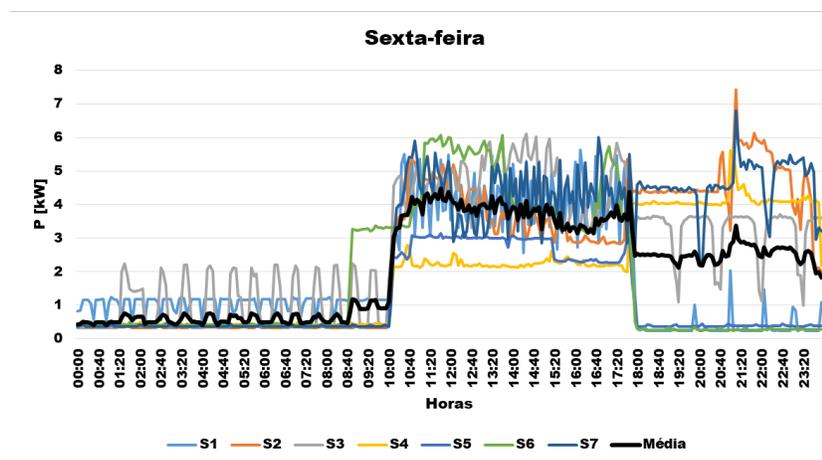


Figura 4.6: Diagrama de cargas do edifício, na sexta-feira, durante 7 semanas.

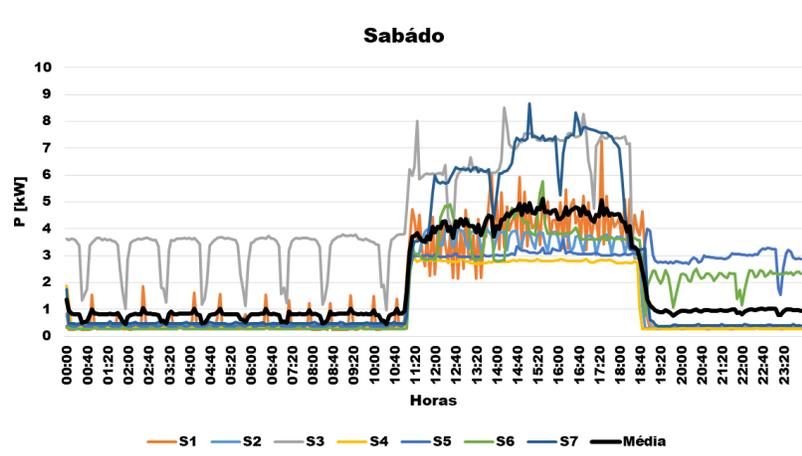


Figura 4.7: Diagrama de cargas do edifício, na sábado, durante 7 semanas.

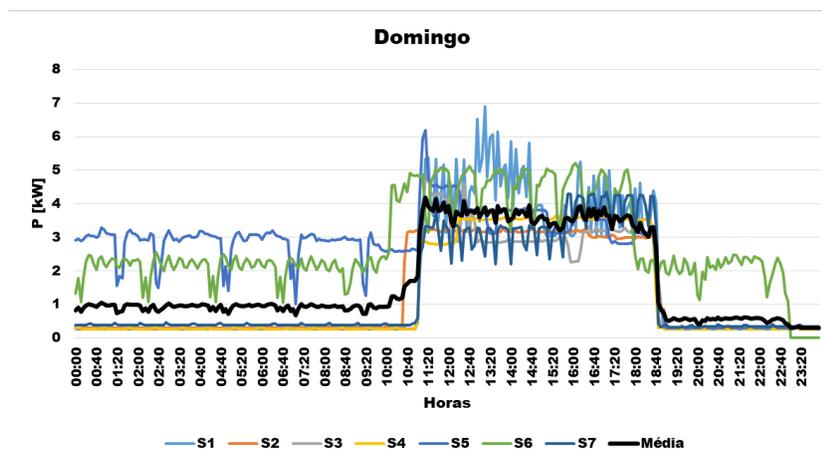


Figura 4.8: Diagrama de cargas do edifício, na domingo, durante 7 semanas.

Nos demais dias, como pode ser visto a partir da Figura 4.3 até à Figura 4.8, o consumo de energia ocorre durante o horário normal de funcionamento do museu das 10:00 horas da manhã até as 18:00 horas e também se pode observar, pela média (linha preta em destaque), que a potência consumida fica em torno de 4 kW durante as atividades da Casa da Seda. O mesmo se verificará nos restantes dias da semana (Figura 4.3 à Figura 4.8).

Nota-se, também, nestes gráficos, que em alguns momentos existem alguns picos de potência, porém, nunca excedendo 9 kW e de curta duração. Outro ponto importante é apresentado no gráfico representado na Figura 4.6, pois mostra a potência consumida pelas cargas nos dias em que, no local, se realizam atividades fora do horário normal de funcionamento.

Uma informação que é apresentada nos registos de leitura é o consumo de potências não expectáveis durante as horas em que não há atividades na Casa da Seda. Analisando as formas obtidas nestes períodos pode-se dizer que este consumo é causado por uma carga resistiva, neste caso um aquecedor a óleo. Tal foi confirmado posteriormente.

Por fim, realizando o somatório dos valores médios apresentados em cada gráfico, obtém-se o consumo médio de energia do período em que foi realizada a monitorização, como apresentado na Tabela 4.2. Visto isso, observou-se que a energia consumida no edifício, neste período, não excede os 26 kWh.

Tabela 4.2: Consumo média de energia (kWh) durante 7 semanas.

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
7,34	19,47	20,58	19,10	25,45	23,28	20,59

4.3 Potencial energético do edifício

Da análise ao edifício, destacam-se duas estruturas para o estudo do seu potencial energético: a estrutura do antigo moinho, que conta com um dique junto à Casa da Seda e o telhado com excelente exposição solar. Estas estruturas serão explanadas nas subsecções a seguir.

4.3.1 A estrutura do antigo moinho

Como referido no início deste capítulo, na Casa da Seda funcionava um moinho que era movido pela água desviada do Rio Fervença, que passa mesmo junto ao edifício, como se pode observar na Figura 4.1. Os espaços interiores originais foram conservados, como se pode observar na Figura 4.9 e Figura 4.10, o que possibilita, com algumas adaptações simples, a instalação de uma pico-hídrica para produção de energia, sem alteração arquitetónica da infraestrutura do edifício.

A produção de energia através de hídricas depende tanto do caudal quanto da altura de queda da água para produzir potência. Porém, nem toda potência resultante do caudal e da altura é convertida em potência elétrica, isto porque existem perdas de potência elétricas e, sobretudo, hidráulicas [6].



Figura 4.9: Antiga sala de captação de água.



Figura 4.10: Anfiteatro da Casa da Seda onde havia um antigo moinho.

A potência produzida, segundo [6], é dada pela equação:

$$P_{hídrica} = h \times Q \times g \times \text{eficiência} \quad (4.1)$$

Esta equação, simples, em que $P_{hídrica}$ é a potência produzida em kW, h a altura, da queda de água disponível, em metros, Q o caudal em l/s e g a aceleração da gravidade, é muito importante para o desenvolvimento de projetos baseado em fonte hídrica. Ainda segundo [6], a eficiência do sistema depende de vários fatores que causam perdas durante a produção, fatores esses como: perdas nas tubagens, na turbina, no gerador, nos cabos, entre outras. Somando-se todas estas perdas pode-se considerar uma eficiência de 50% [6]. Assim, a potência hídrica pode ser estimada pela equação:

$$P_{hídrica} = h \times Q \times g \times \text{eficiência} \approx 5 \times h \times Q \quad (4.2)$$

Através destas informações, é possível estimar a potência produzida no local. Sabendo que no edifício existe uma altura máxima de cerca de 5 metros e um caudal disponível de 55 l/s, é possível, nestas condições, produzir uma potência de 1,38 kW e produção diária de 33,12 kWh.

Uma grande vantagem desta ação é a recuperação da infraestrutura do antigo moinho para fins de demonstração, aproveitando a sua capacidade de produção de energia, que será consumida no próprio edifício. Embora a solução do aproveitamento hidroelétrico apresente um comportamento sazonal, identificam-se duas vantagens importantes:

produção não intermitente, contribuindo para uma menor capacidade do sistema de armazenamento de energia a instalar, e complementaridade sazonal relativa à energia solar fotovoltaica, com maior potencial durante os meses de inverno, quando a irradiação solar é menor, podendo não funcionar nos meses de verão, quando o caudal for muito baixo.

Estima-se que o tempo de paragem seja não superior a 30%, incluindo os períodos de falta de caudal [29] e de paragem para limpeza e manutenção. Nestas condições, a energia produzida por dia será de 35 kWh e o valor anual estimado é de 8900 kWh. Este valor corresponde a 45% do consumo médio anual, da Casa da Seda, registado nos últimos 3 anos.

4.3.2 Produção fotovoltaica

Tendo em consideração a área do telhado, como se pode observar na Figura 4.11, o edifício possui quatro áreas preferenciais para a instalação de módulos fotovoltaicos: a área A com $21,57\text{m}^2$, B com $17,26\text{m}^2$, C com $23,13\text{m}^2$ e D com $51,66\text{m}^2$. Todas possuem orientação aproximadamente a sul, com inclinação de cerca de 16° .



Figura 4.11: Áreas do telhado da Casa da Seda.

Através de informações como latitude, longitude e inclinação do telhado foi possível

simular no *software* PVGIS a irradiação no local para uma potência instalada de 1 kWp e, conforme apresentado na Tabela 4.3, a média anual obtida é 1960 kWh/m².

Tabela 4.3: Média diária de energia produzida e irradiação solar no local

Mês	E_d	E_m	H_d	H_m
Janeiro	2,31	71,6	2,86	88,7
Fevereiro	3,57	100	4,46	125
Março	4,34	135	5,62	174
Abril	4,38	131	5,79	174
Mai	4,73	147	6,34	197
Junho	5,15	154	7	210
Julho	5,38	167	7,45	231
Agosto	5,29	164	7,3	226
Setembro	4,79	144	6,47	194
Outubro	3,75	116	4,89	152
Novembro	2,8	83,9	3,51	105
Dezembro	2,29	70,9	2,84	88,1
Média anual	4,07	124	5,38	164
Total por ano	1480		1960	

Através da análise do gráfico apresentado na Figura 4.12, pode-se perceber que durante os meses de junho, julho e agosto, correspondentes ao verão, tem-se o período de maior irradiação solar.

Outro dado que contribui para a estimativa de produção são os dados reais de unidades fotovoltaicas, de 15 kW de potência CA, instaladas desde 2010, num local com características climáticas similares, a 2 km de distância, na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do IPB. Segundo dados reais obtidos das instalações, o valor da produção de energia é de 1466,9 kWh por ano, por kWp instalado, sendo que, neste caso, a inclinação foi otimizada para o local, 35°.

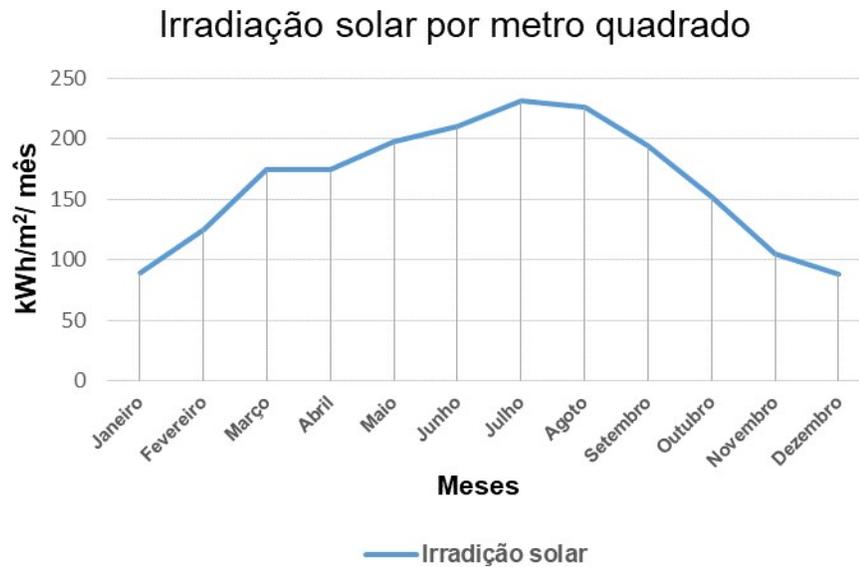


Figura 4.12: Gráfico da irradiação solar obtidas no software PVGIS.

Com base nos dados de produção fotovoltaica obtidos nas instalações da ESTiG, durante o mesmo período em que foi realizada a leitura de consumo de potência na Casa da Seda (de 6 de fevereiro a 2 de abril de 2017), na Figura 4.13 é apresentada a média de produção fotovoltaica diária.

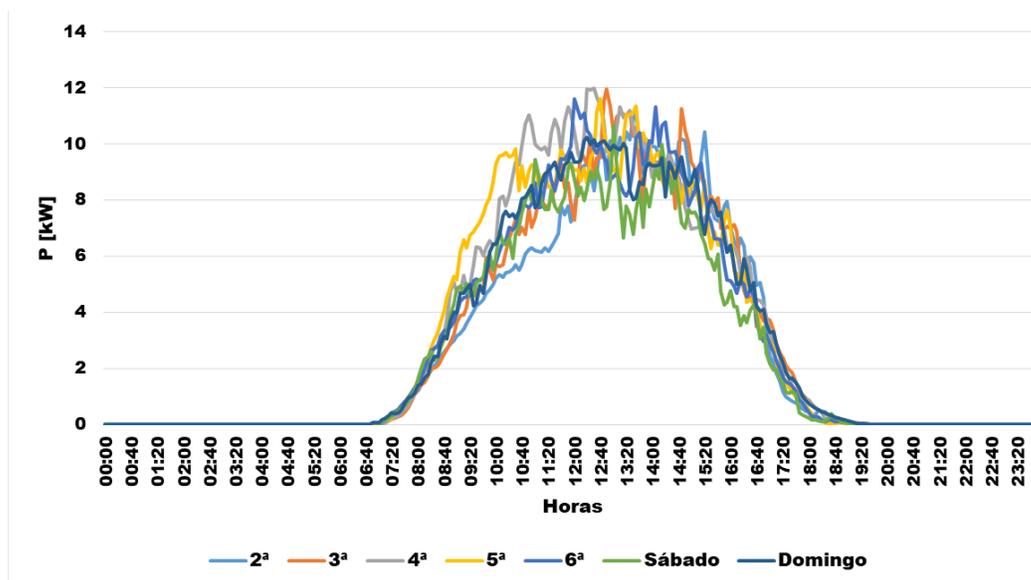


Figura 4.13: Média de produção no IPB durante as semanas de 7 semanas analisadas.

Em relação ao potencial energético, conclui-se que a utilização combinada destes recursos endógenos (hídrico e fotovoltaico) podem suprir a energia consumida no edifício, contribuindo para a autossustentabilidade da Casa da Seda, com um saldo anual nulo, entre a energia produzida e consumida. Se devidamente integradas numa microrrede, com alguma capacidade de armazenamento de energia e de gestão e controlo destes recursos e das cargas da instalação, é possível aumentar a quota de autoconsumo, reduzindo assim as necessidades de interação com a rede elétrica convencional.

Na secção seguinte apresenta-se a conceção de uma solução energeticamente autossustentável.

Capítulo 5

Caracterização da Solução

A solução energeticamente autossustentável para a Casa da Seda, no contexto de um edifício dedicado à divulgação e disseminação da ciência, passa pela implementação de medidas de eficiência energética, complementarmente à instalação de uma microrrede integrando energia hídrica e fotovoltaica, conforme apresentado nas secções a seguir.

5.1 Medidas de eficiência energética

Com base na caracterização energética do edifício é possível identificar o perfil de consumo de energia da Casa da Seda, através da análise dos diagramas de carga apresentados na Figura 4.2 à Figura 4.8, juntamente com a análise das faturas de energia, e estimar o potencial de redução de consumo no local. Com a redução de consumo é possível dimensionar os sistemas de produção de energia para uma potência menor, o que implica uma redução de custo no projeto.

Uma das principais medidas a serem implementadas será a realização de ações de sensibilização, incentivando a utilização da energia elétrica de forma mais racional, evitando consumos desnecessários.

Outra medida será a requalificação da iluminação, que conta, ainda, com um número elevado de lâmpadas de halogéneo, apresentado no Anexo A e evidenciado na Tabela 5.1.

Através da substituição de lâmpadas de halogéneo por lâmpadas mais eficientes, como

Tabela 5.1: Consumo de energia da Iluminação

Tipo de lâmpada	Potência [W]	Quantidade	Tempo médio de funcionamento [h]	Consumo [kWh/-dia]
FT5 (18W)	18	5	5	450
Halogéneo (28W)	28	16	5	2240
Halogéneo (50W)	50	15	5	3750

as de LED com potência de 5 W, por exemplo, podemos estimar a redução a partir da Equação 5.1:

$$N_{lamp} \times (P_{halo} - P_{LED}) \times \frac{horas}{1000} = \frac{kWh}{dia} \quad (5.1)$$

Apenas com a substituição das lâmpadas de halogéneo estima-se para a mesma quantidade de lâmpadas uma redução de consumo mínima até 5 kWh/dia.

5.2 Microrede da Casa da Seda

A microrrede a ser instalada no edifício será baseada na experiência adquirida num projeto implementado num laboratório no IPB, em 2012, descrito em [18] e [29]. Pretende-se manter as características atuais da instalação elétrica da Casa da Seda, designadamente a alimentação trifásica.

Para isso propõe-se a utilização de três conversores bidirecionais *Sunny Island* (SI4.4H-11, Figura 5.1), da SMA [33], que serão responsáveis por estabelecer um sistema trifásico (230 V, 50 Hz). Um dos inversores funcionará como master e será responsável pelo controlo do fluxo de energia. A potência nominal de cada um é de 3,3 kW, totalizando uma potência nominal de 9,9 kW. Estes inversores podem disponibilizar uma potência de 13,2 kW durante 30 minutos devido à sua capacidade de sobrecarga.

A microrrede da Casa da Seda, ilustrada na Figura 5.2, integrará um sistema distribuído de produção de energia baseado em fontes renováveis (hídrica e fotovoltaica,



Figura 5.1: Sunny Island 4.4H.

incluindo telhas fotovoltaicas), armazenamento (banco de baterias) e gestão de consumo. Será um sistema ligado à rede, que fornecerá energia quando o consumo for superior à produção. A solução contará com um sistema de monitorização remoto, com características similares ao sistema instalado em [18]. Estes sistemas, produção, gestão, armazenamento de energia e monitorização, serão detalhados na secção a seguir.

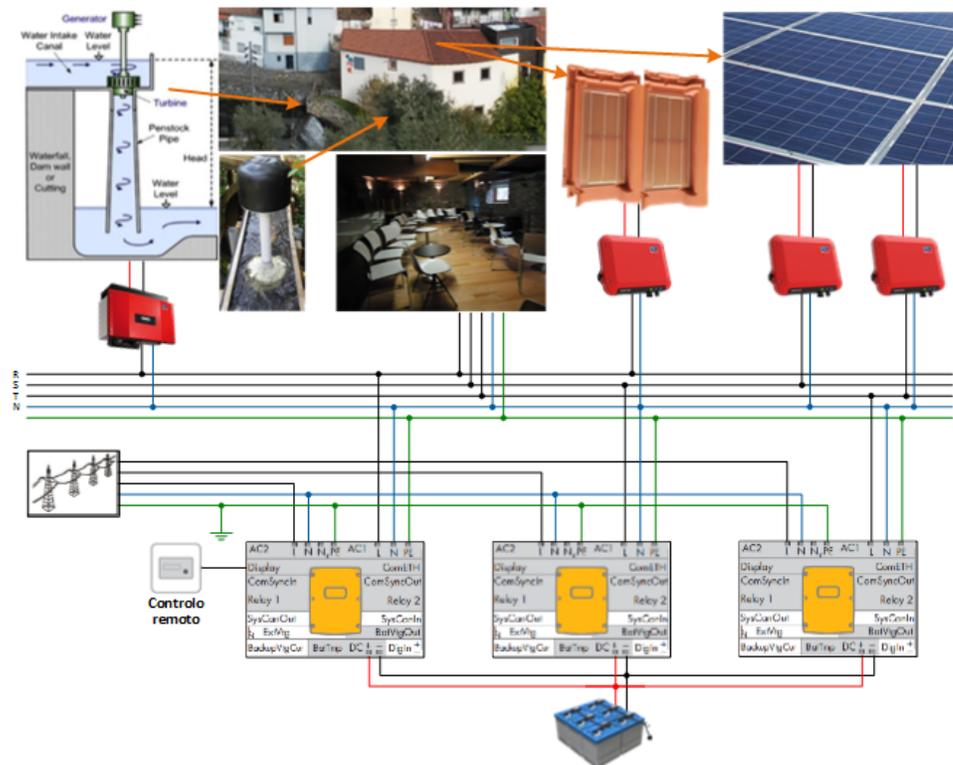


Figura 5.2: Conceção da Microrrede da Casa da Seda

5.3 Microgeração

Para colmatar a necessidade de energia do edifício será aproveitado o seu potencial energético, hídrico e fotovoltaico, apresentado na secção anterior.

5.3.1 Instalação de uma pico-hídrica

Aproveitando as atuais características físicas do edifício da Casa da Seda, não serão necessárias intervenções significativas, principalmente no que se refere à implantação da pico-hídrica, tirando proveito da infraestrutura do antigo moinho e da proximidade do dique, junto do edifício.

Respeitando o património arquitetónico do edifício, pretende-se aproveitar o potencial hídrico existente. Tendo como referência os trabalhos já realizados no mesmo contexto [34] e considerando o enquadramento local, apresenta-se como muito favorável a instalação de uma turbina do tipo hélice de baixa queda (*Low Head*), sendo selecionada a turbina do fabricante *PowerSpout*. Este tipo de turbina consegue obter a rotação máxima do eixo do gerador com baixas cotas, produzindo, dessa forma a sua potência máxima.

A turbina é instalada num pequeno caudal, na extremidade superior do tubo de carga utilizado para a restituição, como exemplificado na Figura 5.3. No tubo de carga não pode entrar ar para que se possa extrair toda a potência hidráulica. O movimento da hélice é criado pelo efeito de sucção da água no tubo a jusante da turbina. Uma vantagem de ficar situada na parte superior do tubo de carga é garantir que a turbina LH não sofra inundações em momentos de precipitação excepcionalmente alta, conforme explicitado na Figura 5.4.

A capacidade de produção deste tipo de turbina está diretamente ligada ao caudal e à altura de queda da água, sendo esta altura máxima de 5 metros [35]. A Figura 5.5 (a), apresenta o gráfico referente à relação entre potência produzida e altura e a Figura 5.5 (b) apresenta a relação entre caudal e a altura. Com estes gráficos é possível obter o aproveitamento máximo da pico-hídrica que será instalada.



Figura 5.3: Gerador PowerSpout LH.

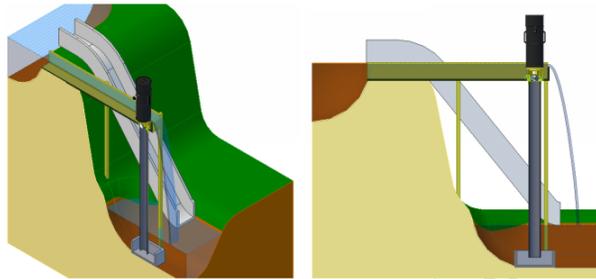


Figura 5.4: Instalação típica para uma turbina LH.

Como já foi referido anteriormente, uma grande vantagem da implementação da pico-hídrica é a possibilidade de aproveitamento da água do rio Fervença durante a maior parte do ano, e do dique já existente, não sendo necessárias grandes obras para a implementação do sistema.

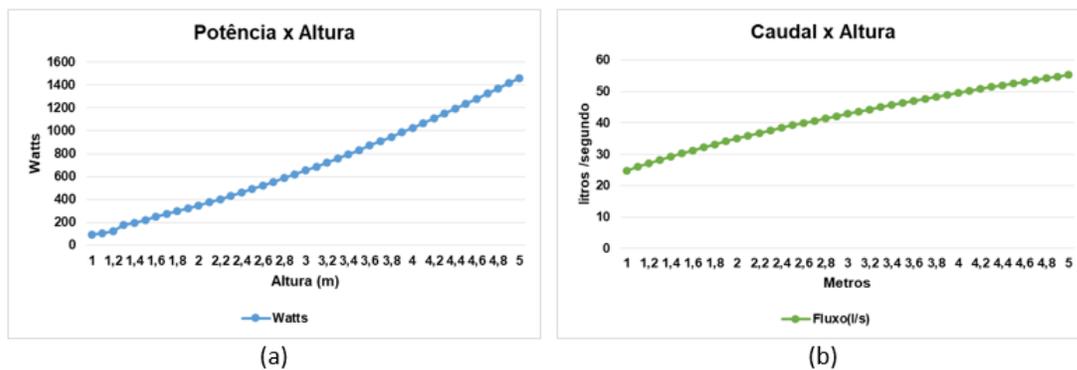


Figura 5.5: Gráficos do gerador *PowerSpout LH* (a) Potência versus Altura; (b) Caudal versus Altura.

De acordo com estudos já realizados no rio, visando o mesmo contexto, de acordo com a referência [11], mesmo levando em consideração períodos com pouca chuva, no verão, estima-se que haverá disponível um caudal de 55 l/s, suficiente para a produção de energia, num período mínimo de 70% do ano, durante 24 horas por dia.

A Figura 5.6, apresenta as cotas e ilustra o trajeto previsto, nesta fase, a ser percorrido pela água desviada do rio. Pela figura, pode-se verificar que a altura de queda da água até à restituição ao rio é de aproximadamente 5 m.

Prevê-se a utilização de uma turbina do tipo LH400, da *PowerSpout*, que integra um gerador de imanes permanentes com potência de 1,6 kW, velocidade máxima de 1600 rpm e tensão em circuito aberto de 400 V. Para a turbina selecionada, a potência elétrica disponível estimada será de 1,1 kW, admitindo perdas de carga de 25% devido ao facto de o tubo de carga não poder ser instalado na vertical e ter inevitavelmente algumas curvas [35]. Nestas condições reais, estima-se que a energia produzida será de 26,3 kWh/dia.

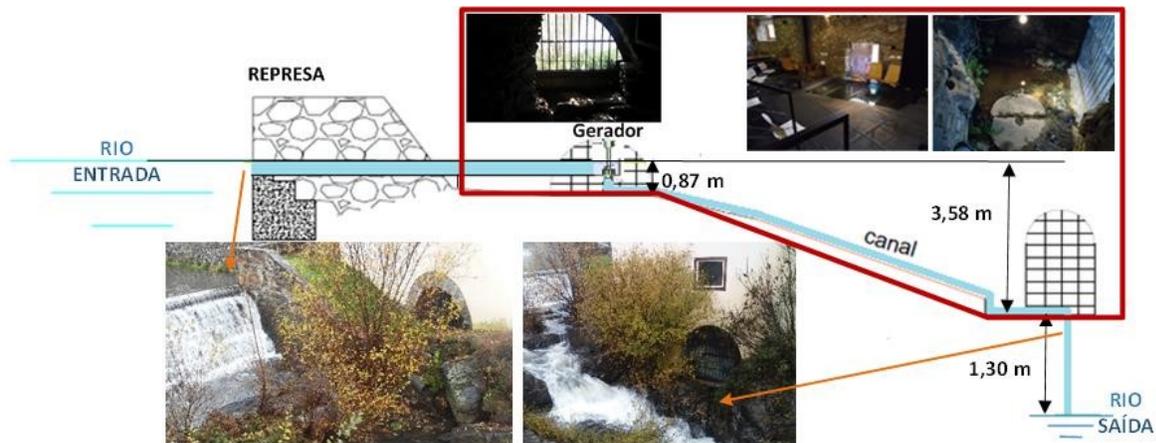


Figura 5.6: Esquema da pico-hídrica a instalar na Casa da Seda.

5.3.2 Unidades Fotovoltaicas

Para complementar a produção de energia do edifício será aproveitado o potencial solar existente, principalmente durante o verão, quando a pico-hídrica não funcionar. Este potencial será aproveitado através da instalação de telhas fotovoltaicas e módulos convencionais. A principal motivação da utilização de telhas fotovoltaicas é demonstrar

a integração de energia fotovoltaica nos edifícios e analisar o desempenho desta nova tecnologia ao longo do tempo em condições reais e, mesmo com área suficiente para suprir o consumo energético apenas com telhas, por razões de custo, esta potência será limitada.

Serão realizados testes preliminares com telhas do fabricante *ZEP PV*, apresentadas na 5.7. Segundo as características técnicas, cada telha possui duas células fotovoltaicas de 9 Wp, cujo rendimento é de 20.22%. São necessárias 168 telhas que serão responsáveis por produzir 1,5 kW e para esta potência o inversor fotovoltaico a utilizar será o SB1.5, também com 1,5 kW.



Figura 5.7: Telhas fotovoltaicas, *ZEP PV*.

Adicionalmente, serão instalados mais 3 kWp, distribuídos por duas fileiras de módulos fotovoltaicos convencionais distribuídos pelo telhado do edifício para complementar a produção de energia. Para as fileiras serão utilizados dois inversores fotovoltaicos SB1.5, apresentado na Figura 5.8.



Figura 5.8: Inversor fotovoltaico SB1.5.

Esta conceção modular, da produção fotovoltaica, permite uma melhor distribuição da energia produzida pelas fases e melhor aproveitamento das secções do telhado com orientações diferentes.

5.3.3 Gestão do fluxo e armazenamento de energia

Como referido no início do capítulo, o equipamento responsável pela gestão do fluxo de energia será o inversor bidirecional *Sunny Island*. Este equipamento alimenta as cargas e carrega o banco de bateria com a energia disponibilizada pela produção. Além disso, é também utilizado para aumentar o autoconsumo da instalação.

O *Sunny Island*, segundo o manual do fabricante [33], tem um rendimento superior a 95% devido ao seu sistema de gestão de unidade de produção, é capaz de comandar um gerador a gásóleo com pouco consumo de combustível e permite, além disso, a ligação à rede elétrica. O inversor também pode desligar cargas automaticamente, se a bateria não for capaz de disponibilizar energia elétrica suficiente ou não houver fontes de energia disponíveis.

Sendo um componente crítico em sistemas isolados, a bateria é monitorizada e gerida de forma otimizada *Sunny Island*. A gestão inteligente da bateria assegura uma deteção exata do estado de carga e possui um sistema de regulação inteligente da carga e proteção eficaz contra descargas profundas, o que evita a deterioração prematura das baterias devido ao carregamento incorreto.

Na verdade, tal como ilustrado na Figura 5.2, será constituído um *cluster* formado por 3 *Sunny Island*, para reproduzir o atual sistema trifásico da Casa da Seda.

5.3.4 Banco de Baterias

A capacidade de armazenamento necessária, a tensão da bateria e o tipo de bateria são fatores decisivos na seleção do banco de baterias. A capacidade de armazenamento depende primeiramente dos seguintes fatores: autonomia ou tempo de autossuficiência, consumo de energia anual e eficiência média da bateria durante a descarga. Normalmente

é especificada em kWh ou Ah e pode ser calculada pelas Equações 5.2 e 5.3.

$$C_{bateria_{kWh}} = \frac{T_{auto} \times \frac{E_{ano}}{365}}{n_{bat}} \quad (5.2)$$

$$C_{bateria_{Ah}} = C_{bateria_{kWh}} \times \frac{1000}{V_{n_{bat}}} \quad (5.3)$$

Sendo a tensão nominal da bateria para os dispositivos *Sunny Island* de 48 V, estima-se uma capacidade de armazenamento das baterias de 400 Ah para a presente microrrede, sabendo que, para alcançar a vida útil mais longa possível da bateria, apenas uma percentagem é usada para carregar e descarregar. A capacidade da bateria calculada aqui é baseada nesse intervalo utilizável. Neste caso serão utilizadas baterias de chumbo-ácido com uma gama utilizável de aproximadamente 50% da capacidade nominal.

5.3.5 Monitorização

Complementando a solução, prevê-se integrar na microrrede a *Sunny Webbox*, apresentada na Figura 5.9. Este dispositivo serve como *interface* de comunicação entre a microrrede (inversores) e o operador. A *Sunny Webbox* recolhe e regista todos os dados dos dispositivos conectados e fornece todo o histórico de dados via internet [36].

Além disso, com este dispositivo é possível configurar a microrrede ou realizar um diagnóstico remoto via computador. Isso permite uma monitorização contínua da microrrede e deteção de falhas de maneira individual.

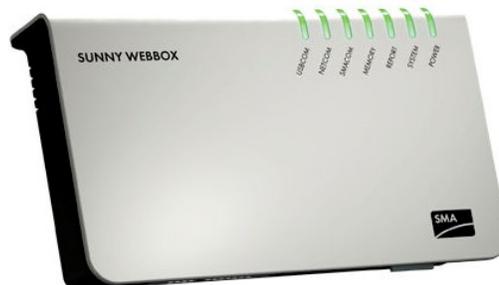


Figura 5.9: *Sunny Webbox*.

Este equipamento, comunica com os inversores ligados na microrrede através de um barramento serial RS485, possuindo também comunicação com outro componente importante para a monitorização, a *Sunny SensorBox*, apresentada na 5.10. A sua principal função é registrar os dados ambientais relevantes para a monitorização do desempenho fotovoltaico. Para este efeito, a *Sunny SensorBox* possui um sensor de irradiação integrado e sensores externos para medir a temperatura ambiente e dos módulos. Também é possível ligar um sensor (anemómetro) para medir a velocidade do vento. Deste modo, são obtidas informações completas sobre as condições ambientais presentes no local onde a solução será instalada bem como dados de produção de energia, diária, anual, até um dado momento, etc.



Figura 5.10: *Sunny Sensorbox*.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo reúnem-se os resultados esperados com as medidas propostas para a autossustentabilidade da Casa da Seda, através da implementação de uma microrrede, sendo que, serão considerados valores em termos médios anuais.

Numa primeira fase, são apresentados os resultados da análise energética realizada na Casa da Seda, assim como o potencial de redução de consumo através de medidas educativas e substituição de cargas.

Numa segunda fase, é realizado um estudo comparativo entre o consumo de energia e a estimativa de produção baseadas num período de sete semanas, com o objetivo de demonstrar a viabilidade em termos energéticos da implementação da microrrede na Casa da Seda.

6.1 Análise energética

Feita a análise na Casa da Seda, como mencionado, identificam-se oportunidades de racionalização de energia de modo a melhorar o desempenho energético do edifício. Estas medidas podem ser comportamentais e técnicas.

6.1.1 Medidas comportamentais

A alteração do comportamento dos utilizadores internos também é fundamental para uma redução dos consumos energéticos. Assim, recomenda-se que haja uma campanha de sensibilização para todos os utilizadores, com o objetivo de alertar para a necessidade de quando os equipamentos e iluminação não são utilizados serem desligados e qual o impacto positivo que este comportamento possui tanto a nível económico como a nível ambiental.

6.1.2 Medidas técnicas

Da análise às faturas do consumo de energia relativas ao período de 2015 e 2016, resulta uma média de consumo anual de 15355 kWh. Estima-se que o consumo anual de energia seja mitigado através das medidas de eficiência energética apresentadas anteriormente. É expectável uma redução anual de consumo próximo de 1900 kWh/ano, através da adequação de comportamentos e da substituição de cargas, designadamente as lâmpadas de halogéneo por lâmpadas LED.

Após as medidas de eficiência energética, estima-se que o consumo anual passe a ser de 13455 kWh/ano, que corresponde a uma redução de 12.3% relativamente à média antes da implementação do plano de eficiência energética. Esta estimativa de consumo anual permite saber a quantidade de energia que deve ser produzida através das fontes renováveis para colmatar as necessidades anuais do edifício.

6.1.3 A microgeração

Como solução para a autossustentabilidade do edifício foram apresentadas duas alternativas que se mostraram favoráveis, como apresentado na secção anterior. A pico-hídrica possui enormes vantagens, uma vez que funciona 24 horas por dia, oferecendo uma capacidade de produção diária de 26,4 kWh, apenas com uma potência de 1,1 kW. Atendendo ao fator de utilização anual da potência instalada de 70%, como indicado na secção 4.3.1, a produção estimada da pico-hídrica é de 6745,2 kWh/ano.

A produção fotovoltaica deverá ser responsável pela parcela restante de energia que é necessário produzir. Da potência a ser instalada em telhas fotovoltaicas, 1,5 kWp, estima-se uma produção média diária 6,22 kWh/dia, de acordo com a informação do fabricante, tendo como referência a região do Porto, devendo ser superior na região de Bragança, se comparado com os dados de produção na ESTiG apresentados na secção 4.3.2. A energia restante será produzida por 3 kWp em módulos convencionais, com base em dados reais conhecidos para o local (4,1 kWh/dia, por kWp instalado), totalizando um potencial de produção fotovoltaico de 4,5 kWp instalado no edifício. Assim, estima-se que a produção fotovoltaica seja 6759,5 kWh/ano. Através da estimativa de produção da pico-hídrica e fotovoltaica, é expectável que a produção de energia total seja de 13504,7 kWh/ano.

Com os dados médios de produção na cobertura da ESTiG, do dia 6 de fevereiro a 2 de abril de 2017, apresentados em 4.3.2, é possível estimar qual seria a produção fotovoltaica caso já estivessem instalados os 4,5 kWp no edifício. Tratando-se de valores reais, através da divisão da potência atual produzida por 15 kWp que é a potência total CA instalada na ESTiG, obtém-se a potência produzida por kW instalado e, multiplicando o resultado desta divisão pela potência a ser instalada na Casa da Seda, obtém-se a estimativa de potência que seria produzida, como demonstrado pela Equação 6.1. O resultado desta estimativa é apresentado na Figura 6.1.

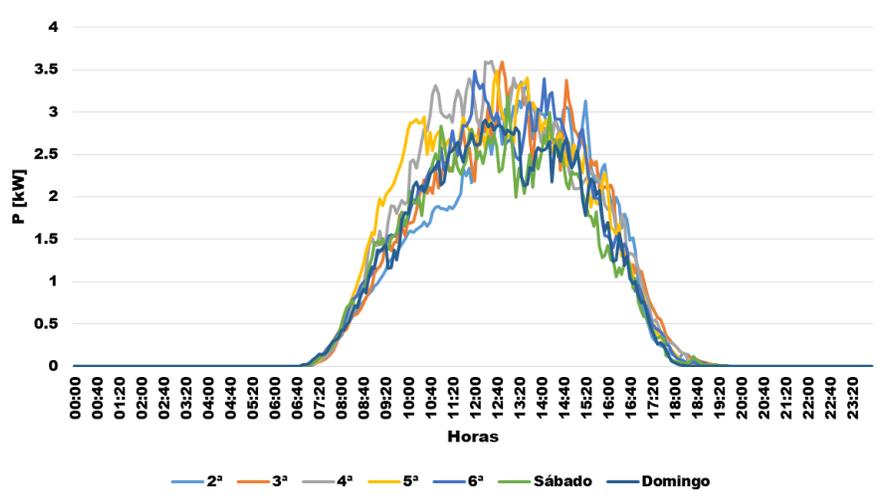


Figura 6.1: Estimativa de produção fotovoltaica na casa da seda.

$$P_{estimada} = \frac{P_{estig}}{15} \times 4,5[kW] \quad (6.1)$$

Unindo estas estimativas com as médias de consumo diárias apresentadas na secção 4.2, obtiveram-se os gráficos comparando a produção de cada dia da semana com o consumo estimado, que são apresentados da Figura 6.2 à Figura 6.8. Destaca-se que os dados são apresentados em termos médios e que as observações que sustentam as estimativas, tanto de produção como de consumo, foram obtidas no mesmo período.

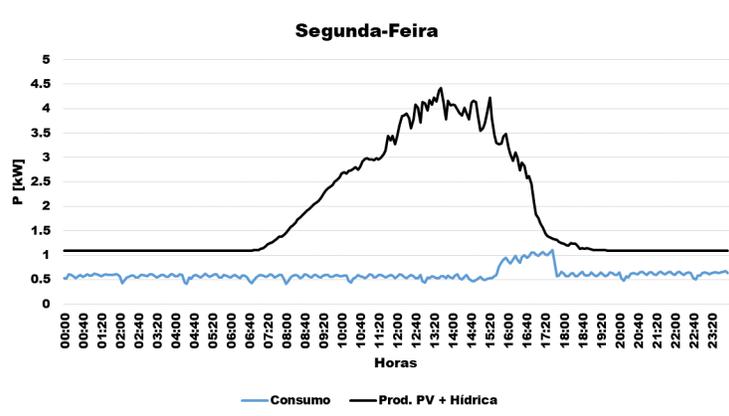


Figura 6.2: Estimativa de produção *versus* consumo durante a segunda-feira.

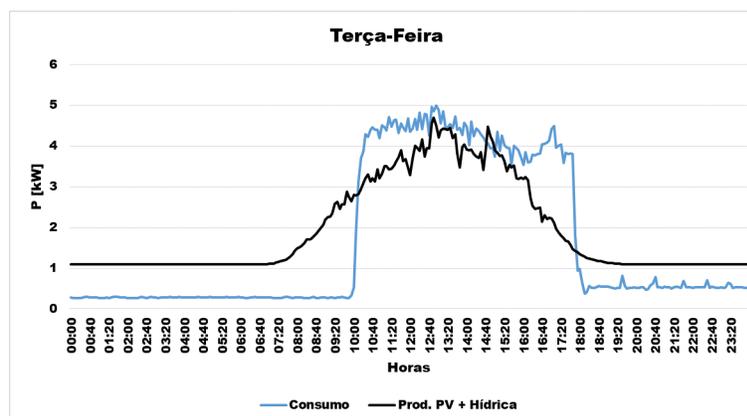


Figura 6.3: Estimativa de produção *versus* consumo durante a terça-feira.

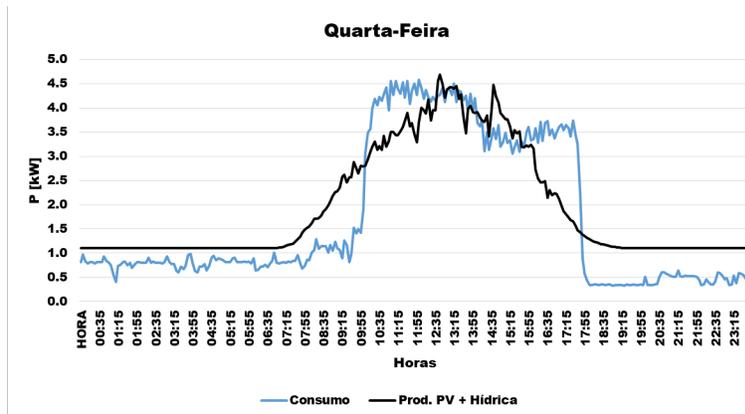


Figura 6.4: Estimativa de produção *versus* consumo durante a quarta-feira.

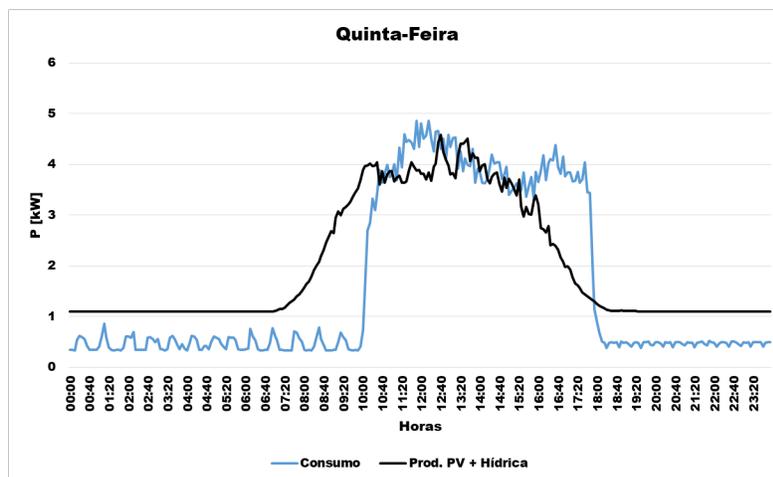


Figura 6.5: Estimativa de produção *versus* consumo durante a quinta-feira.

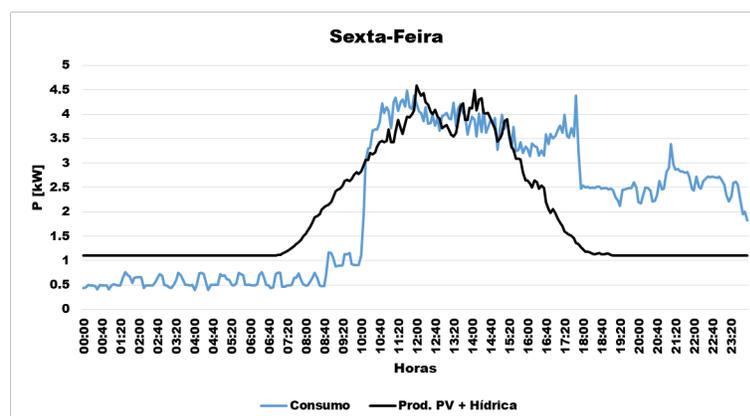


Figura 6.6: Estimativa de produção *versus* consumo durante a sexta-feira.

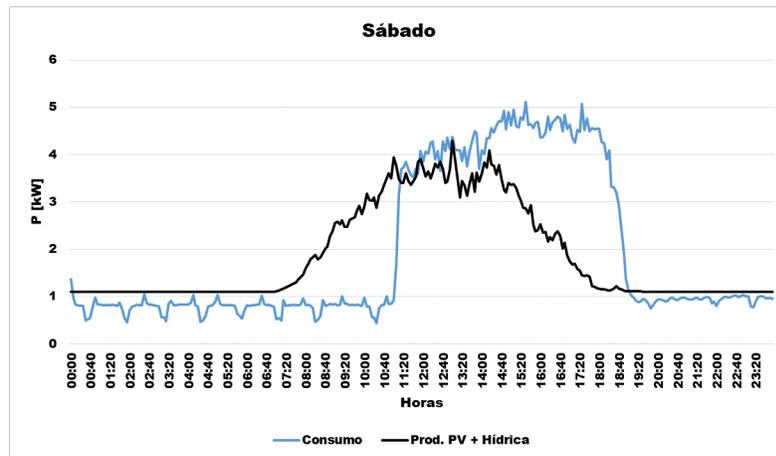


Figura 6.7: Estimativa de produção *versus* consumo durante a sábado.

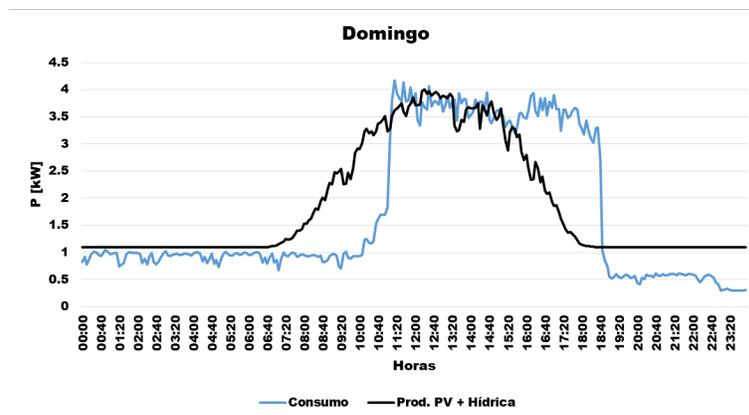


Figura 6.8: Estimativa de produção *versus* consumo durante a domingo.

Como a Casa da Seda não abre às segundas-feiras, nota-se que a produção de energia será superior ao consumo durante este dia, conforme ilustra a Figura 6.2. Esse excesso de produção face ao consumo, acarreta que às segundas-feiras ocorrerá a maior entrega de energia à rede, durante a semana.

Às terças-feiras, conforme apresentado na Figura 6.3, já é possível notar o contraste do consumo de energia no período de funcionamento do local, das 10h às 18h, com a estimativa de produção. Como a irradiação solar não é constante, há períodos onde a produção varia consideravelmente. Nestes momentos, o inversor bidirecional é acionado e compensa esta diferença retirando energia do banco de baterias e devolvendo posteriormente quando a produção for maior que o consumo.

Semelhante à terça-feira, a estimativa de produção versus consumo para a quarta-feira, conforme Figura 6.4, apresenta um consumo alto no horário de funcionamento da Casa da Seda, com pico de produção próximo do meio dia e com regiões de consumo superior à produção, que serão colmatadas pela microrrede.

A Figura 6.5 mostra a comparação entre produção e consumo da quinta-feira, com comportamento semelhante às terças e quartas-feiras. Vale ressaltar que, neste padrão de comportamento, haverá sempre períodos onde será necessário complementar a produção com energia da rede ou do banco de baterias.

Esporadicamente, às sextas-feiras ocorrem eventos na Casa da Seda, no período que decorre entre às 19:00h e às 24:00h. Estes eventos causam um aumento do consumo no período noturno, onde somente a pico-hídrica está a produzir energia, o que pode ser visto na Figura 6.6. Este consumo durante a ausência de produção fotovoltaica acaba por exigir uma quantidade considerável de energia seja colmatada pela microrrede, e, com certeza, um dos períodos onde haverá necessidade de recorrer à rede pública.

Aos fins-de-semana, o horário de funcionamento da Casa da Seda é das 11h às 19h, o que acaba por resultar em um perfil menos favorável em termos de potencial fotovoltaico. Como para os dias da semana, com exceção de segunda e sexta-feira, há pequenos períodos onde o consumo é maior que a produção. Contudo, o deslocamento do consumo numa hora acarreta num maior contraste entre a produção e o consumo ao fim do dia do que nos dias de semana destacados anteriormente, o que se verifica no sábado e no domingo, na Figura 6.7 e Figura 6.8, respectivamente.

A Tabela 6.1 apresenta uma estimativa do excedente de energia produzido durante o dia, assim como, a situação oposta, quando a produção fica aquém do consumo.

Tabela 6.1: Estimativa de excedente e demanda não suprida de energia em kWh.

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
Excedente	30.69	14.13	9.75	14.64	8.1	9.33	9.46
Falta	0	6.62	4.41	5.02	12.64	11.53	5.8

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Nesta dissertação foi apresentada a concepção de um sistema autossustentável assente numa microrrede, ligada à rede elétrica convencional, que integra fontes renováveis de energia, e que utiliza tecnologias inovadoras que permitem a produção, armazenamento e consumo de energia de forma flexível e eficiente. O sistema foi concebido para um pequeno museu de divulgação e disseminação da ciência, designado por Casa da Seda. A concepção da microrrede para este edifício assentou na exploração dos dois principais recursos endógenos no local, designadamente uma pico-hídrica e unidades fotovoltaicas baseadas em telhas fotovoltaicas e módulos convencionais. Para a autossustentabilidade da Casa da Seda foi estimada uma produção anual de energia similar ao consumo médio anual de energia nos últimos dois anos, reduzido o valor previsto de poupança pela implementação de medidas de eficiência energética.

7.1 Conclusões gerais do trabalho

Para os valores previstos de produção de energia, quer hídrica quer fotovoltaica, foram utilizados dados de produção reais conhecidos, pelo que os resultados esperados de produção, ao serem comparados com o consumo, podem ser considerados fiáveis e demonstram a viabilidade da implementação do projeto. Do ponto de vista da sua realização física, especialmente a pico-hídrica, o projeto não implica dificuldades construtivas uma vez que

será utilizada a infraestrutura onde outrora existiu um moinho e um dique já existente, ao lado do edifício. Quanto à instalação elétrica existente, também não haverá alterações significativas, uma vez que se irá manter o sistema trifásico, mas que passará a ser composto por um *cluster* de 3 inversores bidirecionais, ligados a um banco de baterias. De realçar, ainda, dois aspetos inovadores: a avaliação de produção de energia a partir telhas fotovoltaicas e a integração da pico-hídrica na microrrede utilizando inversores fotovoltaicos convencionais, amplamente disponíveis no mercado e a baixo custo.

Por fim, a microrrede apresentada constituirá uma exposição permanente de disseminação de sistemas sustentáveis, baseados em fontes renováveis de energia, num pequeno museu dedicado à divulgação e disseminação de ciência – a Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança.

7.2 Trabalhos e desenvolvimentos futuros

Ao longo deste trabalho foi identificado um conjunto de atividades, que pode ser realizado futuramente durante e após a execução do projeto. As análises realizadas sobre a capacidade de produção das telhas fotovoltaicas, nas condições locais, apresentam-se favoráveis para realização de estudos posteriores, já que as telhas foram pouco exploradas, apresentando assim informações à comunidade sobre a viabilidade da sua instalação. Outra questão, seria a análise da solução inovadora a utilizar na ligação a microrrede.

Por fim, poderia-se, posteriormente, analisar o comportamento da microrrede quando a mesma estiver em funcionamento, podendo-se, assim, obter resultados concreto, bem como informações sobre a gestão do fluxo de energia no edifício.

O projeto da Casa da Seda continuará a ser desenvolvido ao longo do próximo ano, através de testes de validação, em condições reais, nos laboratórios da ESTiG, ou no Posto Aquícola de Castrelos, designadamente a pico-hídrica. Numa fase subsequente, será realizada a instalação no edifício.

Admite-se que, em função da continuação do projeto e dos testes a realizar, algumas soluções possam ser modificadas.

Bibliografia

- [1] M. Tushar, C. Assi, M. Maier e M. Uddin, “Smart microgrids: Optimal joint scheduling for electric vehicles and home appliances”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, n° 1, pp. 239–250, 2014.
- [2] Q. Fu, L. Montoya, A. Solanki, A. Nasiri, V. Bhavaraju, T. Abdallah e C. Y. David, “Microgrid generation capacity design with renewables and energy storage addressing power quality and surety”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, n° 4, pp. 2019–2027, 2012.
- [3] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou e A. Dimeas, “Microgrids management”, *IEEE power and energy magazine*, vol. 6, n° 3, 2008.
- [4] M. Basar, A. Ahmad, N. Hasim e K. Sopian, “Introduction to the pico hydro power and the status of implementation in malaysia”, em *Research and Development (SCORED), 2011 IEEE Student Conference on*, IEEE, 2011, pp. 283–288.
- [5] A. Lahimer, M. Alghoul, K. Sopian, N. Amin, N. Asim e M. Fadhel, “Research and development aspects of pico-hydro power”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 8, pp. 5861–5878, 2012.
- [6] A. Harvey, A. Brown, P. Hettiarachi e A. Inversin, *Micro-hydro design manual*. 1993.
- [7] A. Haidar, M. Senan, A. Noman e T. Radman, “Utilization of pico hydro generation in domestic and commercial loads”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 1, pp. 518–524, 2012.

- [8] E. s. frontières, *Khastap: Electricity for the village*, <https://www.electriciens-sans-frontieres.org/en/projet/khastap-electricity-for-the-village/>, jun. de 2017.
- [9] M. Syed, N. Ali, F. Hossain, S. Haque e A. Siddique, “Prospect of a pico hydro power plant based on irrigation pump in perspective of rural areas in bangladesh”, em *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on*, IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [10] M. Machado et al., “Microturbinas em redes de abastecimento de água”, tese de mestrado, Universidade de Aveiro, 2015.
- [11] P. Iorra, “Análise do potencial de microgeração hidroelétrica predial”, 2013.
- [12] I. E. Agency, “Small-scale hydro within a municipal water supply system”, *CAD-DET Center for Renewable Energy*, vol. 1, 1998.
- [13] Tecnoturbines, *Tecnoturbines powering water*, <http://tecnoturbines.com/portfolio/turbina-conectada-red>, jun. de 2017.
- [14] J. Fernandes, “Problemas de controlo e exploração de grandes unidades de produção solar e fotovoltaica”, 2014.
- [15] S. P. Europe, *Global market outlook for solar power/ 2017 - 2021*, 1st. Brussels, Belgium: Publicações, lda, 2017.
- [16] S. Zhang, J. Yang, X. Wu e R. Zhu, “Dynamic power provisioning for cost minimization in islanding micro-grid with renewable energy”, em *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES*, IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [17] O. Hafez e K. Bhattacharya, “Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids”, *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 7–15, 2012.
- [18] V. Leite, Â. 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*, dez. de 2015.
- [19] D. Prasad e M. Snow, *Designing with solar power: A source book for building integrated photovoltaics (bipv)*. Routledge, 2014.

- [20] A. Energy, *Amareleja photovoltaic plant*, <http://www.acciona-energia.com/areas-of-activity/photovoltaic/major-projects/amareleja-photovoltaic-plant/>, 2008.
- [21] P. M. Costa e M. A. Matos, “Economic analysis of microgrids including reliability aspects”, em *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on*, IEEE, 2006, pp. 1–8.
- [22] AltogaGreen, *Sistemas com painéis fotovoltaicos*, <http://www.altogagreen.com/sf/if/pt/solar/sistema.htm>, Maio de 2017.
- [23] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson e J. Palm, “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review”, *Applied Energy*, vol. 142, pp. 80–94, 2015.
- [24] L. R. Valer, A. R. Manito, T. B. S. Ribeiro, R. Zilles e J. T. Pinho, “Issues in pv systems applied to rural electrification in brazil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1033–1043, 2017.
- [25] A. Abella, E. Lorenzo e F. Chenlo, “Pv water pumping systems based on standard frequency converters”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, n^o 3, pp. 179–191, 2003.
- [26] N. Hatziargyriou et al., *Microgrids: Architectures and control*. Wiley Online Library, 2014.
- [27] SMA, *Solar stand alone power and backup power supply*. Niestetal, Germany: SMA Solar Technology AG, 2015.
- [28] N. A. E. R. Corporation, *Distributed energy resources*, <http://www.nerc.com>, 2017.
- [29] V. Leite, Â. Ferreira e J. Batista, “On the implementation of a microgrid project with renewable distributed generation”, *I Congresso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables*, 2013.
- [30] V. Leite, A. Ferreira e J. Batista, “Bidirectional vehicle-to-grid interface under a microgrid project”, em *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2014 IEEE 15th Workshop on*, IEEE, 2014, pp. 1–7.

- [31] P. de Cooperação Transfronteiriça - Espanha e Portugal, *Acção integrada para a promoção e implementação de eficiência energética e energias renováveis como factor de competitividade*, http://portal.ipb.pt/portal/page?_pageid=395,192288&_dad=portal&_schema=PORTAL, jan. de 2011.
- [32] SMA, *Design of off-grid systems with sunny island devices*. Niestetal, Germany: SMA Solar Technology AG, 2017.
- [33] —, *Instalation manual sunny island 3.0m/4.4m/6.0h/8.0h*. Niestetal, Germany: SMA Solar Technology AG, 2016.
- [34] V. Leite, T. Figueiredo, T. Pinheiro, Â. Ferreira e J. Batista, “Dealing with the very small: First steps of a picohydro demonstration project in an university campus”, *Renewable Energy & Power Quality Journal*, pp. 683–685, 2012.
- [35] PowerSpout, *Instalation manual powerspout low head turbine*. New Zealand: PowerSpout, 2015.
- [36] SMA, *User manual sunny webbox*. SMA America, 2013.

Anexo A

Cargas da Casa da Seda

Tipo	Descrição	Potência [W]	Quantidade	Tempo médio de funcionamento (h)	Consumo (kWh)
Lâmpada	FT5	18	5	5	450
	Halogêneo	28	16	5	2240
	Refletor (Halogéneo)	50	15	5	3750
	LED	5	2	5	50
Equipamento de informática	Projektor Benq	200	1	1	200
	Projektor Benq	200	2	5	2000
	Projektor Benq	250	1	5	1250
	Notebook	19	2	5	190
	Notebook	19	1	2	38
	Desktop	200	8	5	8000
	Monitor	30	8	5	1200
	Impressora	65	1	0.5	32.5
	Som	50	1	2	100
	Sistema de Segurança	200	1	24	4800
Aquecimento	Ar-Condicionado	2500	2	3	15000
	Aquecedor a óleo	2000	1	2.5	5000
	Caldeira	170	1	7	1190
Outras	Refrigerador	14	1	24	336
	Cafeteira	1500	1	0.3	450
	Micro-ondas	1200	1	0.2	240

Anexo B

Artigo

Design of a Self-sustainable System Based on Renewable Energy Sources for a Small Museum of Science Dissemination - the House of Silk

Wellington Maidana^{1,2}, Vicente Leite^{1,3}, Ângela Ferreira^{1,3}, Luís Queijo¹,
José Batista¹, Jakson Bonaldo², Estefânia Gonçalves⁴

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

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus de Campo Mourão
Paraná, Brasil

³ CISE - Electromechatronic Systems Research Centre
Covilhã, Portugal

⁴ Centro Ciência Viva de Bragança
Bragança, Portugal

wellington-maidana@hotmail.com; avtl@ipb.pt; apf@ipb.pt; lqueijo@ipb.pt;
jbatista@ipb.pt; jbonaldo@gmail.com; stefeat@gmail.com

Abstract—This paper presents the complete design of a self-sustainable system based on renewable energy sources - hydro and photovoltaic - for a small museum dedicated to the dissemination of science called House of Silk. The solution is based on a microgrid, connected to the main grid, 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, connected to the microgrid through an innovative solution. The photovoltaic energy is produced by means of photovoltaic tiles and conventional modules.

Keywords—*self-sustainable system; renewable energy sources; microgrid; pico-hydro system; photovoltaic.*

I. INTRODUÇÃO

A necessidade da produção de energia a partir de fontes renováveis é algo indiscutível nos dias atuais, principalmente pelas preocupações ambientais geradas pela utilização de combustíveis fósseis, sendo estes, ainda, a principal fonte de produção de energia de muitos países [1]. O desenvolvimento tecnológico atual, designadamente no âmbito da microgeração baseada em fontes renováveis de energia, permite conceber novas soluções energéticas inteligentes, em muitas aplicações de pequena dimensão, nomeadamente no setor residencial. A disseminação destes sistemas, ainda que de baixa potência, deverá contribuir, significativamente, para o aumento da sustentabilidade ao nível global. Neste contexto, os sistemas baseados em microrredes são soluções modernas e constituem

uma versão em pequena escala da rede elétrica, integrando produção, distribuição e gestão da energia elétrica. No caso de excesso ou défice de produção, as microrredes podem, respetivamente, fornecer ou receber energia da rede convencional [2]. As microrredes são sistemas que integram unidades de produção distribuída de energia, sistemas de armazenamento e cargas controláveis, numa rede de baixa tensão que pode funcionar tanto no modo ligado à rede como no modo autónomo [3]. As tecnologias disponíveis no mercado possibilitam atuar tanto na diminuição do consumo de energia elétrica, quanto no aumento da produção, com os requisitos necessários para criar um sistema confiável e seguro para o utilizador final. Um sistema de energia tem um elevado nível de segurança se fornece energia para as cargas essenciais e críticas, por longos períodos, proporcionando segurança, confiabilidade, sustentabilidade e boa relação custo-benefício [2].

A utilização de uma microrrede, intrínseca a sistemas autónomos de produção de energia, como os que utilizam energias renováveis, é muito versátil, podendo ser utilizada desde instalações residenciais até comunidades isoladas [4]. Em 2012, por exemplo, foi proposta uma microrrede para uma instalação em Waterloo, Canadá, utilizando módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, uma pico-hídrica e um gerador a diesel, para suprir a as necessidades energéticas de uma comunidade rural de consumo estimado em 5000 kWh/dia, com pico de demanda estimado em 1183 kWh [5]. Utilizando o *software* HOMER, foram simuladas várias configurações de microrrede utilizando diferentes combinações dos equipamentos. O estudo demonstrou, entre outros resultados, a viabilidade da implementação de sistemas sem emissão de carbono, apenas com recursos provenientes de fontes renováveis [5]. Em 2013, em Porto Alegre, Brasil, realizou-se

Os autores agradecem o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, para a implementação desta iniciativa, no âmbito do Projeto SilkHouse - *Development of a smart microgrid based on renewable energy sources and a monitoring system for the House of Silk.*

um estudo de aproveitamento do potencial de microgeração hidroelétrica predial, utilizando a pressão normal da tubagem, fornecida pela concessionária, e a água das chuvas, além do esgoto [6]. As conclusões da análise foram favoráveis, mostrando que caudais considerados pequenos podem gerar energia de maneira significativa no consumo de energia elétrica de instalações residenciais. A Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG), do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), dispõe, desde 2012, de uma microrrede integrando apenas fontes renováveis de energia elétrica [7]. O projeto utiliza um inversor bidirecional para fazer o controlo e gestão dos fluxos de energia. A microrrede tem uma potência nominal de 5 kW e integra uma turbina eólica, um seguidor solar, um painel fotovoltaico fixo, um gerador a biodiesel que pode ser ligado ao sistema e um banco de baterias.

O projeto apresentado neste artigo visa transformar a Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança, num edifício autossustentável, através da utilização de novas tecnologias de produção e utilização de energia baseadas no conceito de microrredes. Pretende-se que a Casa da Seda, tendo em conta a sua missão, sirva como plataforma de demonstração e divulgação destas soluções inovadoras para as futuras casas das cidades inteligentes. Para o efeito, pretende-se conceber uma microrrede inteligente, baseada em tecnologias inovadoras com integração de fontes renováveis de energia. Entre outras fontes renováveis, a microrrede irá integrar energia solar fotovoltaica e uma pico-hídrica devidamente integrada no local onde outrora existiu um moinho.

O presente artigo começa por caracterizar a Casa da Seda e estimar o seu potencial energético. Depois é concebida uma solução energética autossustentável baseada numa microrrede projetada para o edifício, com dados que demonstram a viabilidade da sua implementação, a qual será realizada 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.

II. CARACTERIZAÇÃO DA CASA DA SEDA

Esta secção apresenta a caracterização da Casa da Seda para efeitos do desenho da solução autossustentável a conceber para o edifício.

A. Descrição da Casa da Seda

A Casa da Seda é um museu situado num antigo moinho, na margem esquerda do rio Fervença, no coração da cidade de Bragança. É um espaço interativo, integrado no Centro Ciência Viva de Bragança, e é dedicado à história da seda. A Casa da Seda está localizada num antigo edifício onde as pessoas costumavam tingir sedas, no século XVIII. Nos séculos XIX e XX a propriedade funcionou como um moinho e ainda mantém as características originais da sua arquitetura. Mais tarde, tornou-se propriedade privada e produzia pão e biscoitos regionais, usando o potencial do moinho. Em 1990, o Município de Bragança adquiriu o edifício e recuperou-o durante a intervenção no Programa Polis, em 2006.

Hoje em dia, a Casa da Seda é um museu dedicado à divulgação e disseminação de ciência, onde ocorrem cursos,



Fig. 1. Casa da Seda.

palestras e exposições. O museu conta, também, com uma exposição permanente sobre a história da seda, dando uma visão geral das várias fases da sua produção desde o desenvolvimento da lagarta e formação do casulo até ao processo de fiação e tecelagem. A Casa da Seda recebe por ano, em média, mais de 11500 visitantes.

O edifício, apresentado na Fig. 1, encontra-se localizado no concelho de Bragança, no centro da zona urbana, a uma altitude de 664 m. Quanto à arquitetura, trata-se de um edifício em banda, de 3 pisos e com boa exposição solar. Apresenta uma estrutura de pedra, cobertura em madeira e telha cerâmica, paredes rebocadas, vãos de madeira e, no seu interior, existem tabiques e alvenarias de pedra tradicional original.

B. Caracterização elétrica do edifício

A instalação elétrica é alimentada a partir da rede de distribuição de energia em baixa tensão, trifásica, com potência contratada de 13,6 kW. Trata-se de um edifício com um período de utilização semanal, de terça-feira a domingo, com funcionamento centrado no período diurno, entre as 10:00h e as 18:00h. Para além do funcionamento normal, são realizados, de forma regular, diversos eventos, principalmente no final da semana, estendendo as atividades até cerca das 24:00h.

Por se tratar de um museu, as principais cargas elétricas do edifício são, essencialmente, computadores, monitores, projetores, sistemas de som, ar condicionado, alguns aquecedores e iluminação. A Tabela I, apresenta a energia consumida nos últimos três anos, obtida a partir do histórico das faturas de eletricidade.

TABELA I - ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA NOS ÚLTIMOS TRÊS ANOS

Consumo anual de energia elétrica (kWh)	2014	2015	2016
	18102	14008	16703

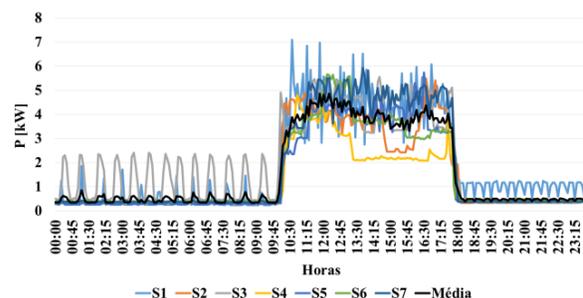


Fig. 2 Diagrama de cargas do edifício, num dia típico da semana (quinta-feira), durante as 7 semanas de monitorização (S1 a S7).

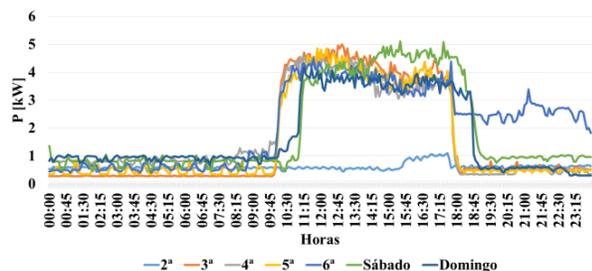


Fig. 3 Média da potência das cargas no edifício, por dia da semana.

As Figuras 2 e 3 apresentam outros dados importantes, designadamente os registos da potência consumida no edifício, adquiridos utilizando o analisador de energia PEL 103, durante 7 semanas, concretamente de 6 de fevereiro a 2 de abril de 2017. A Figura 2 apresenta os diagramas de potência das cargas, durante um dia típico (quinta-feira), juntamente com a média das leituras desse dia da semana, durante aquele período.

A Figura 3, apresenta o diagrama de cargas com a potência média de cada dia da semana, durante o mesmo período.

Com base nos dados apresentados, pode-se estimar que o consumo de energia do edifício, em dias de atividade normal, é, em média, de 45 kWh por dia. Por outro lado, confirma-se que o consumo mais significativo ocorre entre as 10h00 e as 18h00, prolongando-se, em alguns dias, até às 24 horas.

C. Caracterização do potencial energético do edifício

Da análise ao edifício, destacaram-se duas estruturas para o estudo do seu potencial energético: o telhado com excelente exposição solar e a estrutura do antigo moinho e um dique mesmo junto à Casa da Seda. Levando em consideração a área do telhado do edifício, existem duas áreas preferenciais para a instalação de módulos fotovoltaicos: uma com 40 m² e outra com 20 m². Ambas possuem orientação ao sul e com inclinação do telhado de aproximadamente, 16°. O potencial de produção anual de energia fotovoltaica é de aproximadamente 1395 kWh/kWp, por ano, segundo uma estimativa realizada pelo software PVGIS [8]. De acordo com os dados reais de unidades fotovoltaicas instaladas desde 2010, num local com características climáticas similares, a 2 km de distância, no Campus do IPB, a produção de energia é de 1466,9 kWh por ano, por kWp instalado, sendo que, neste caso a inclinação foi otimizada para o local, 35°.

Como referido anteriormente, na Casa da Seda funcionava um moinho e os espaços originais foram conservados, o que possibilita, com algumas adaptações simples, a instalação de uma pequena hídrica para produção de energia, sem alteração arquitetónica das infraestruturas. Uma pico-hídrica, conforme definido em [7], caracteriza-se por uma capacidade de produção até 5 kW. Considerando uma altura de queda bruta, h, em metros, um caudal, Q, em litros por segundo, a aceleração da gravidade, g = 9,8, em m/s² e uma eficiência global de 50%, que contempla todas as perdas no sistema, a estimativa de potência produzida é dada por [9]:

$$P = 0,5 \times 9,8 \times h \times Q \approx 5 \text{ h Q} \quad (1)$$

No local existe uma altura máxima disponível de 5 m e a instalação será dimensionada para um caudal de 55 l/s sendo possível, nestas condições, produzir uma potência de 1,46 kW, utilizando uma turbina do tipo hélice, de baixa queda [10]. Uma outra vantagem desta ação é a revitalização da infraestrutura do antigo moinho para fins de demonstração, aproveitando a sua capacidade de produção de energia, que será consumida no próprio edifício. Embora a solução do aproveitamento pico hidroelétrico apresente um comportamento sazonal, identificam-se duas vantagens importantes: produção não intermitente, contribuindo para uma menor capacidade do sistema de armazenamento de energia a adotar, e complementaridade sazonal relativamente à energia solar fotovoltaica, pois tem maior potencial durante os meses de inverno, quando a radiação solar é menor, podendo não funcionar nos meses de verão, quando o caudal for muito baixo.

Estima-se que o tempo de paragem seja não superior a 30%, incluindo os períodos de falta de caudal [11] e de paragem para limpeza e manutenção. Nestas condições, a energia produzida por dia será de 35 kWh e o valor anual estimado é de 8900 kWh. Este valor corresponde a quase metade (45%) do consumo médio anual, da Casa da Seda, registado nos últimos 3 anos.

Com base no potencial energético, conclui-se que a utilização combinada destes recursos endógenos (hídrico e fotovoltaico) pode suprir a energia consumida no edifício, contribuindo para a autossustentabilidade da Casa da Seda, com um saldo anual nulo, entre a energia produzida e consumida. Se devidamente integradas numa microrrede, com alguma capacidade de armazenamento de energia e de gestão e controlo destes recursos e das cargas da instalação é possível aumentar a quota de autoconsumo, reduzindo assim, as necessidades de interação com a rede elétrica convencional. Na secção seguinte apresenta-se a conceção de uma solução energeticamente autossustentável.

III. CARACTERIZAÇÃO DA SOLUÇÃO

A solução energeticamente autossustentável para a Casa da Seda, no contexto de um edifício dedicado à divulgação e disseminação da ciência, passa pela implementação de medidas de eficiência energética, complementarmente à instalação de uma microrrede integrando energia hídrica e fotovoltaica.

A. Medidas de eficiência energética

Com base na caracterização energética do edifício é possível identificar o perfil de consumo de energia da Casa da Seda, através da análise dos diagramas de carga apresentados nas Figuras 2 e 3, e estimar o potencial de redução de consumo no local. Uma das principais medidas a serem implementadas será a realização de ações de sensibilização, incentivando a utilização da energia elétrica de forma mais racional, evitando consumos desnecessários. Outra medida será a requalificação da iluminação, que conta, ainda, com um número elevado de lâmpadas de halogéneo, como pode ser observado na Tabela II. Através da substituição de lâmpadas de halogéneo por lâmpadas mais eficientes, como as de LED por exemplo, estima-se uma redução de consumo mínima até 5 kWh por dia.

TABELA II – CONSUMO DE ENERGIA DA ILUMINAÇÃO

Tipo de lâmpada	Potência [W]	Quantidade	Tempo médio de funcionamento (h)	Consumo (kWh)
FT5 (18W)	18	5	5	450
Halogéneo (28W)	28	16	5	2240
Halogéneo (50W)	50	15	5	3750

B. Microrrede da Casa da Seda

A microrrede a instalar no edifício, será baseada na experiência adquirida num projeto implementado num laboratório no IPB, em 2012, descrito em [7] e [12]. Pretende-se manter as características atuais da instalação elétrica da Casa da Seda, designadamente a alimentação trifásica. Para isso serão utilizados três conversores bidirecionais Sunny Island (SI4.4H-11), da SMA [13], que serão responsáveis por estabelecer um sistema trifásico (400 V, 50 Hz). Um dos inversores funcionará como *master* e será responsável pelo controlo do fluxo de energia. A potência nominal de cada um é de 3,3 kW, totalizando uma potência nominal de 9,9 kW. Estes inversores podem disponibilizar uma potência de 13,2 kW durante 30 minutos. A microrrede da Casa da Seda, conforme ilustrado na Fig. 4, integrará um sistema de energia com fontes renováveis (hídrica e fotovoltaica, incluindo telhas fotovoltaicas), armazenamento (banco de baterias) e gestão de consumo. O sistema contará com um sistema de monitorização remoto, com características similares ao sistema instalado em [7].

C. Sistemas de microgeração

Para colmatar a necessidade de energia do edifício será aproveitado o seu potencial energético, hídrico e fotovoltaico, apresentado na secção anterior. Aproveitando as atuais características físicas da Casa da Seda, não serão necessárias

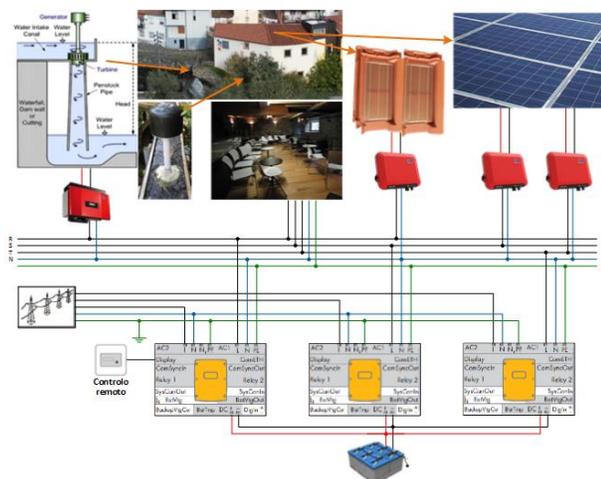


Fig. 4 Microrrede para a Casa da Seda, com integração de produção hídrica e fotovoltaica baseada em telhas fotovoltaicas e módulos convencionais, armazenamento e gestão de consumo.

intervenção significativas, principalmente no que se refere à implantação da pico-hídrica, tirando proveito da infraestrutura do antigo moinho e da proximidade do dique, mesmo junto do edifício.

Respeitando o património arquitetónico do edifício, pretende-se aproveitar o potencial hídrico existente. Tendo como referência os trabalhos já realizados no mesmo contexto [11], e considerando o enquadramento existente, apresenta-se como muito favorável a instalação de uma turbina do tipo hélice de baixa queda. Com efeito, a captação de água, para seu funcionamento, não causará danos ambientais nem alterações físicas, além de ser uma plataforma para disseminação e demonstração de produção de energia através do uso da água. A turbina ficará visível para o público, através de uma janela no pavimento já existente. Será utilizada uma turbina LH400, da PowerSpout, que integra um gerador de ímãs permanentes com potência de 1,6 kW, velocidade máxima de 1600 rpm e tensão em circuito aberto de 400 V. Esta será instalada a uma cota superior cerca de 5 metros, com um caudal estimado de 55 l/s.

Outra grande vantagem da implementação da pico-hídrica é a possibilidade de aproveitamento da água do rio Fervença durante a maior parte do ano, e do dique já existente. De acordo com a referência [11], mesmo levando em consideração períodos com pouca chuva, no verão, estima-se um caudal suficiente para a produção de energia, num período mínimo de 70% do ano, durante 24 horas por dia. A Figura 5, apresenta as cotas e o ilustra o trajeto percorrido pela água desviada do rio. Pela figura pode-se verificar que a altura de queda da água até à restituição ao rio é de aproximadamente 5 m. Para a turbina selecionada, a potência elétrica disponível estimada será de 1,1 kW, admitindo perdas de carga de 25% devido ao facto de o tubo de carga não poder ser instalado na vertical e ter inevitavelmente algumas curvas [10]. Nestas condições reais, estima-se que a energia produzida será de 26,3 kWh/dia.

Foram publicadas, recentemente, soluções inovadoras para a ligação à microrrede de sistemas pico-hídricos, com resultados fiáveis utilizando inversores fotovoltaicos convencionais, amplamente disponíveis no mercado e a baixo custo [14], [15] e [16]. A solução para esta integração consiste em ligar a tensão retificada do gerador diretamente à entrada de um inversor fotovoltaico, que realiza a interface com a microrrede. Esta solução requer a utilização de um circuito de proteção para limitar a velocidade do gerador e a tensão à entrada do inversor, em situações transitórias. Sempre que o

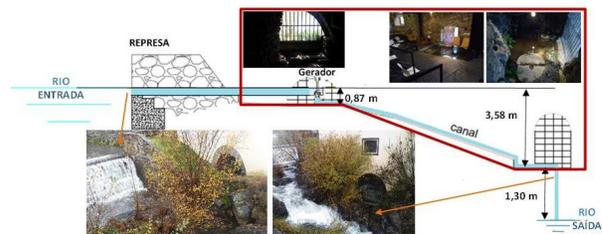


Fig. 5 Esquema da pico-hídrica a instalar na Casa da Seda.

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 sobrelevação da tensão [15]. 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 [14] e [17]. O sistema de produção pico-hídrico para a Casa da Seda será baseado nestes trabalhos e o inversor selecionado será o SB2100TL, cuja compatibilidade foi garantida em [14].

Para complementar o consumo de energia do edifício será aproveitado o potencial solar existente, principalmente durante o verão, quando a pico-hídrica não funcionar. Serão instalados 1,5 kW em telhas fotovoltaicas da marca ZEP PV, com duas células fotovoltaicas de 9 Wp por telha (de cor vermelha), cujo rendimento é de 20.22%. São necessárias 168 telhas para a potência requerida e o inversor fotovoltaico a utilizar será o SB1.5, de 1500 W. A principal motivação da utilização de telhas fotovoltaicas é demonstrar a integração de energia fotovoltaica nos edifícios e analisar o desempenho desta nova tecnologia ao longo do tempo em condições reais. Por razões de preço, a potência a instalar em telhas é limitada, sendo necessário instalar adicionalmente 3 kWp em módulos fotovoltaicos convencionais distribuídos pelo telhado do edifício para complementar a produção de energia. Para tal serão utilizados dois inversores fotovoltaicos: SB1.5, perfazendo 3 kW.

IV. RESULTADOS

Nesta secção, serão apresentados os resultados esperados com as medidas propostas para a autossustentabilidade da Casa da Seda, em termos médios anuais. Da análise das faturas de energia relativas ao consumo no período de 2015 e 2016, resulta uma média de consumo anual é de 15355 kWh. Estima-se que o consumo anual de energia seja mitigado através das medidas de eficiência energética apresentadas anteriormente. É expectável uma redução anual de consumo próximo de 1900 kWh/ano, através da adequação de comportamentos e da substituição de cargas, designadamente as lâmpadas de halógeno por lâmpadas LED. Contudo, após as medidas de eficiência energética, o consumo anual passe a ser de 13455 kWh/ano, que corresponde a uma redução de 12.3% relativamente à média antes da implementação do plano de eficiência energética. Esta estimativa de consumo anual permite saber a quantidade de energia que deve ser gerada através das fontes renováveis para colmatar as necessidades anuais do edifício. A pico-hídrica apresenta enormes vantagens, conforme discutido na secção anterior, uma vez que funciona 24 horas por dia, oferecendo uma capacidade de produção diária de 26,4 kWh, apenas com uma potência de 1,1 kW. Daqui, e atendendo ao fator de utilização anual da potência instalada de 70%, como indicado na secção III.C, a produção estimada da pico-hídrica é de 6745,2 kWh/ano.

A produção fotovoltaica deverá ser responsável pela restante parcela da energia que é necessário produzir. Da potência a instalar em telhas fotovoltaicas, de 1,5 kWp, estima-

se a produção média diária em 6,22 kWh/dia, de acordo com a informação do fabricante (tendo como referência a região do Porto, devendo ser superior na região de Bragança). A restante energia será produzida por 3 kWp em módulos convencionais, cuja produção diária será 12,3 kWp, com base em dados reais conhecidos para o local (4,1 kWh/dia, por kWp instalado). Assim, estima-se que as telhas produzam 2270 kWh/ano e que os módulos produzam 4489,5 kWh/ano.

Atendendo às estimativas anteriores, as microfuentes renováveis (hídrica e fotovoltaicas) assegurariam uma produção de 13505 kWh/ano, sendo este valor ligeiramente superior à energia anual consumida no edifício, demonstrando, desta forma, a possibilidade de tornar a Casa da Seda autossustentável, com base em recurso endógenos sem impacto arquitetónico ou ambiental. Esta autossustentabilidade fica assegurada em termos médios anuais, mas a mesma não é possível em termos instantâneos ou mesmo diários devido à intermitência dos recursos renováveis, designadamente a energia solar, e a imprevisibilidade do consumo instantâneo. Nos sistemas isolados, esta dificuldade é resolvida com recurso a bancos de baterias de maior capacidade e, em último caso, a um grupo motor-gerador. Na Casa da Seda, uma vez que a rede convencional está presente, o balanço instantâneo de energia pode ser conseguido através de injeção do excesso de energia na rede e do fornecimento, a partir da mesma, sempre que a produção e a energia armazenada forem insuficientes. Atendendo à legislação em vigor, o preço por kWh, da energia vendida à rede é muito inferior ao preço da energia comprada, no momento da entrada em funcionamento da instalação. Esta situação traduz-se num compromisso entre a energia injetada na rede e a capacidade de armazenamento das baterias. Assim, há vantagens em aumentar a capacidade de armazenamento durante os períodos de excesso de produção instantânea, relativamente ao consumo, aumentando, assim, a quota de autoconsumo e minimizando a quota de venda à rede elétrica. Contudo, esta vantagem implica um maior investimento no banco de baterias. Do ponto de vista da instalação (consumidor) a situação ideal seria a de não haver diferença de preço, na compra e venda de energia e, nesse caso, a rede funcionaria como um sistema de armazenamento de capacidade ilimitada, fornecendo a energia necessária quando o consumo fosse superior à produção recebendo, na situação inversa.

Se a rede elétrica não estivesse disponível, seria necessário um banco de baterias com capacidade de armazenamento elevada, de modo a assegurar um ou mais dias de autonomia. O aumento da capacidade de armazenamento faz subir o investimento, sendo justificável em microrredes instaladas em locais isolados sem acesso à rede pública ou, nas situações em que, por razões legais, não é possível injetar energia na rede. Estas situações não se aplicam na Casa da Seda. Neste caso, prevê-se a instalação de um banco de baterias com capacidade mínima de 400 Ah, cerca de 20 kWh. Desta capacidade apenas será utilizada 50% (200 Ah) de modo a salvaguardar a vida útil das baterias [13]. Esta capacidade, utilizável, garante a acumulação do excesso de energia durante a noite, em que a pico-hídrica está a funcionar e produz mais energia do que é consumida.

Por fim, realizou-se um estudo comparativo entre o consumo de energia nos meses de inverno e nos meses de verão,

dos anos de 2015 e 2016, para que se possa comparar a estimativa de produção diária com a média do consumo nestes dois períodos, já considerando uma redução do consumo diário de 5,22 kWh. Estes são os meses onde há maior consumo de energia devido ao uso de aquecedores e ar condicionado, respetivamente. Conforme apresentado na Tabela 3, o consumo médio diário no inverno foi de 43,4 kWh e 31,8 kWh no verão. Considerando a produção diária de 37 kWh, verifica-se que a produção de energia no inverno será insuficiente, sendo necessário obter energia a partir da rede elétrica. No verão há excesso de energia e o sistema injetará energia na rede.

TABELA III – CONSUMO MÉDIO DIÁRIO DURANTE O INVERNO E VERÃO

Anos	Inverno (kWh/dia)	Verão (kWh/dia)
2016	47,0	38,6
2015	39,8	34,2
Média	43,4	31,8

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta a conceção de um sistema autossustentável assente numa microrrede, conectada à rede elétrica convencional, que integra fontes renováveis de energia, e que utiliza tecnologias inovadoras que permitem a produção, armazenamento e consumo de energia de forma flexível e eficiente. O sistema foi concebido para um pequeno museu de divulgação e disseminação da ciência, designado por Casa da Seda. A conceção da microrrede para este edifício assentou na exploração dos dois principais recursos endógenos no local, designadamente uma pico-hídrica e unidades fotovoltaicas baseadas em telhas fotovoltaicas e módulos convencionais. Para a autossustentabilidade da Casa da Seda foi estimada uma produção anual de energia similar ao consumo médio anual de energia nos últimos dois anos, reduzido do valor previsto de poupança pela implementação imediata de eficiência energética. Para os valores previstos de produção de energia, quer hídrica quer fotovoltaica, foram utilizados dados de produção reais conhecidos, pelo que os resultados esperados de produção podem ser considerados fiáveis e demonstram a viabilidade da implementação do projeto. Do ponto de vista da sua realização física, especialmente a pico-hídrica, o projeto não implica quaisquer dificuldades uma vez que será utilizada a infraestrutura onde outrora existiu um moinho e um dique já existente, ao lado do edifício. Quanto à instalação elétrica existente, também não haverá alterações significativas, uma vez que se manterá o sistema trifásico, mas que passará a ser baseado num *cluster* de 3 inversores bidirecionais, ligados a um banco de baterias.

De realçar, ainda, dois aspetos inovadores: a avaliação de produção de energia a partir telhas fotovoltaicas e a integração da pico-hídrica na microrrede utilizando inversores fotovoltaicos convencionais, amplamente disponíveis no mercado e a baixo custo.

Por fim, a microrrede apresentada neste artigo constituirá uma exposição permanente de disseminação de sistemas sustentáveis, baseados em fontes renováveis de energia, num pequeno museu dedicado à divulgação e disseminação de ciência – a Casa da Seda, do Centro Ciência Viva de Bragança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ivone Fachada do Centro Ciência Viva e a Rui Oliveira e Vitor Gomes do Instituto Politécnico de Bragança, o apoio prestado durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] M. H. K. Tushar, C. Assi, M. Maier e M. F. Uddin, "Smart Microgrids: Optimal Joint Scheduling for Electric Vehicles and Home Appliances," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, pp. 239 - 250, 2014.
- [2] Q. Fu, L. F. Montoya e A. Solanki, "Microgrid Generation Capacity Design With Renewables and Energy Storage Addressing Power Quality and Surety," *Microgrid Generation Capacity Design with Renewables*, December 2012, pp. 2019-2027.
- [3] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou e A. Dimeas, "Microgrids Management," *IEEE Power & Energy Magazine*, pp. 54-65, 2008.
- [4] S. Zhang, J. Yang, X. Wu e R. Zhu, "Dynamic Power Provisioning for Cost Minimization in Islanding Micro-Grid with Renewable Energy," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2014.
- [5] O. Hefez e K. Bhattacharya, "Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids," *Renewable Energy*, vol. 45, 2012, pp. 7-15.
- [6] P. R. d. Q. Iorra., "Análise do Potencial de Microgeração Hidroelétrica Predial," Porto Alegre, Brasil, 2013.
- [7] V. Leite, Â. Ferreira, J. Batista e J. Couto, "Analysis of the Operation of a Microgrid with Renewable Distributed Generation," *III Congresso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables*, 1-2 December 2015.
- [8] PVGIS, "https://goo.gl/GF39cU". [Online].
- [9] A. Harvey, *Micro-Hydro Design Manual*, Great Britain: Exeter, 1993.
- [10] PowerSpout, "http://www.powerspout.com/low-head/," [Online]. [Acesso em Maio 2017].
- [11] V. Leite, T. d. Figueredo, T. Pinheiro, Â. 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*, 28-30 March 2012.
- [12] V. Leite, Â. Ferreira e J. Batista, "On the Implementation of a Microgrid Project with Renewable Distributed Generation," *I Congresso Iberoamericano sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables*, Soria, Spain, 23-24 September 2013.
- [13] SMA, "Design of Off-Grid Systems with Sunny Island Devices," 2017. [Online].
- [14] V. Leite, J. Couto, F. Ângela e J. Batista, "A Practical Approach for Grid-connected Pico-hydro Systems using Conventional Photovoltaic Inverters," *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 4-8 April 2016.
- [15] V. Leite, A. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "Reliability 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 September 2016.
- [16] V. Leite, A. P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "Pico-hydro Systems: Microgrid-Connection approaches," *IV Congresso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, Concepción, Chile*, 27-28 October 2016.
- [17] V. Leite, P. Ferreira, J. Couto e J. Batista, "Abordagens para a Ligação à Rede de Sistemas Pico-Hidroelétricos," *II Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e Tecnologia - CIEEMAT 2016*, 8-11 Novembro 2016.
- [18] M. H. K. Tushar, C. Assi e M. Maier, "Smart Microgrids: Optimal Joint Scheduling for Electric Vehicles and Home Appliances," *IEEE Transactions on Smart Grid (Volume: 5, Issue: 1, Jan. 2014)*, 06 January 2014, pp. 239 - 250.