



Prosumers for the Energy Union: mainstreaming active participation of citizens in the energy transition

Modelação e Simulação de Caminhos para a Transição Energética na Freguesia de São Luís

(Relatório)

Horizon 2020 (H2020-LCE-2017)



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N°764056. The sole responsibility for the content of this document lies with the authors. It does not necessarily reflect the opinion of the funding authorities. The funding authorities are not responsible for any use that may be made of the information contained therein.

| | |
|----------------------|--|
| Parceiro responsável | FC.ID |
| Tipo de documento | Relatório |
| Data | 9 de maio de 2020 |
| Autores | Guilherme Luz (gpluz@fc.ul.pt) Rodrigo Amaro e Silva (rasilva@fc.ul.pt) |
| Equipa PROSEU | Ana Lúcia Fonseca, Esther Marín, Guilherme Luz, Inês Campos e Rodrigo Amaro e Silva |

Resumo do projeto H2020 PROSEU

O PROSEU é um projeto de investigação financiado pela União Europeia que junta onze parceiros de sete países diferente. O seu objetivo é possibilitar a generalização do fenómeno dos prosumidores de energias renováveis no contexto da União Energética. Prosumidores são utilizadores ativos de energia que, simultaneamente, produzem e consomem energia proveniente de fontes renováveis.

Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho foi apenas possível graças à colaboração de várias entidades e indivíduos aos quais agradecemos. Em primeiro lugar, ao Sérgio Maraschin, André Vizinho, Nuno Franco, à Inês Campos, Esther Marin, Ana Lúcia e Luís Cachinho por terem colaborado, apoiado e alimentado este trabalho. Agradecemos ainda a todos os membros das iniciativas “Energia com Alegria” e “Transição São Luís”, bem como a todos os participantes das várias sessões públicas organizadas no âmbito do Laboratório de Inovação de São Luís, ajudando a caracterizar a freguesia de São Luís e a definir possíveis caminhos para a sua transição energética. Ao Anderson Soares, da EDP-Distribuição, que disponibilizou dados de consumo elétrico essenciais para poder modelar o sistema elétrico da freguesia; à empresa SoDa - *Solar Data*, que cedeu dados meteorológicos que permitiram simular sistemas de produção renovável; e ao poder local (Junta de Freguesia de São Luís e Câmara Municipal de Odemira), por terem disponibilizado dados cartográficos que permitiram melhor avaliar o potencial solar da freguesia.

Importa ainda referir a importância de outras fontes de informação, tais como o portal PORDATA, a Carta de Uso e Ocupação dos Solos, ou os censos do Instituto Nacional de Estatística.

Índice

| | |
|---|----|
| Resumo do projeto H2020 PROSEU | 2 |
| Agradecimentos | 4 |
| Lista de Tabelas | 6 |
| Lista de Figuras | 7 |
| Glossário | 9 |
| 1. Introdução | 11 |
| Modelação do sistema elétrico da freguesia de São Luís | 11 |
| Organização do documento | 12 |
| 2. Metodologia | 13 |
| Modelação do sistema elétrico da freguesia de São Luís | 13 |
| Configuração da rede elétrica | 14 |
| Pontos de consumo | 14 |
| Tecnologias consideradas e sua caracterização | 15 |
| Recursos renováveis | 18 |
| Estimativa de área disponível para a instalação de sistemas de produção renovável | 19 |
| 3. Caracterização da freguesia de São Luís, Odemira | 20 |
| Consumo de energia elétrica | 20 |
| Desenho da rede elétrica local | 22 |
| Recursos para produção renovável | 23 |
| 4. Cenários para a transição energética | 28 |
| Comparação entre tecnologias | 28 |
| Uma freguesia em autoconsumo | 29 |
| Introdução de sistemas de armazenamento de energia | 32 |
| Possibilidades para uma freguesia de Balanço Elétrico Nulo (BEN) | 34 |
| Uma freguesia isolada | 35 |
| Uma freguesia conectada | 37 |
| 5. Financiamento e modelos de gestão | 40 |
| 6. Conclusões | 42 |
| Notas, comentários e referências | 44 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Tarifas de rede para os vários níveis de tensão da rede elétrica nacional. | 10 |
| Tabela 2: Caracterização das tecnologias para uma transição energética consideradas neste trabalho. | 18 |
| Tabela 3: Investimento unitário associado às tecnologias consideradas neste trabalho. | 29 |
| Tabela 4: Resultados para três cenários em que se considera individualmente diferentes tecnologias de produção. | 30 |
| Tabela 5: Resultados para um cenário onde se considera três tecnologias de produção e uma de armazenamento de energia em simultâneo. A inclusão de baterias permite alcançar um nível de autossuficiência três vezes superior aos valores relatados na Tabela 4, com a instalação de cerca de 1 MW de capacidade renovável (versus 250-380 kW). | 33 |
| Tabela 6: Resultados para quatro estratégias para alcançar um Balanço Elétrico Nulo (BEN). Os termos "integrado" e "isolado" correspondem na interligação ou separação entre a freguesia de São Luís e a rede elétrica nacional. | 35 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ilustração de como o <i>calliope</i> representa uma rede de energia, através vários nodos (identificados por X) interligados entre si. A cada nodo pode ser associado a fonte(s) de consumo e/ou de produção de energia..... | 13 |
| Figura 2: Exemplos de representação de redes de energia às escalas urbana (esquerda) e europeia (direita) no <i>calliope</i> | 14 |
| Figura 3: Sistema fotovoltaico de pequena escala na aldeia de São Luís. | 15 |
| Figura 4: Central fotovoltaica em Estarreja com 2.5 MW de potência de ligação. | 16 |
| Figura 5: Turbina eólica Nordex N29 de 250 kW. | 16 |
| Figura 6: Sistema de armazenamento com 2MWh de capacidade e 3 MW de potência. | 17 |
| Figura 7: Composição relativa dos vários tipos de consumo no concelho de Odemira ⁷ | 20 |
| Figura 8: Postos de Transformação da freguesia de São Luís. A vermelho os postos para os quais foi possível obter registos de consumo elétrico através da EDP-Distribuição. | 21 |
| Figura 9: Perfil de consumo agregado de 12 postos de transformação instalados na freguesia de São Luís para um dia exemplificativo (1 de janeiro 2018). | 21 |
| Figura 10: Configuração da rede elétrica local assumida para São Luís (a preto) e a versão simplificada da mesma que é definida no <i>calliope</i> (a azul). Os pontos vermelhos representam os postos de transformação e a subestação em Vila Nova de Milfontes, e a verde os locais onde se considera a instalação de uma central fotovoltaica e de turbinas eólicas. | 22 |
| Figura 11: Padrões de potencial solar, por unidade de área instalada, para diferentes condições meteorológicas. | 23 |
| Figura 12: Potencial solar, por unidade de área instalada, para os vários meses do ano, sendo visível uma maior produção nos meses de Verão. | 23 |
| Figura 13: Alguns padrões de potencial eólico, por turbina instalada, encontrados para São Luís em 2018. | 24 |
| Figura 14: Potencial eólico, por turbina instalada, para os vários meses do ano, sendo visível uma maior produção nos primeiros meses do ano. | 24 |
| Figura 15: Comparação entre a disponibilidade solar e eólica mensal ao longo do ano de 2018. | 25 |
| Figura 16: Áreas de mato com uma cota elevada (298 m) e pedreira (desativada) identificadas a noroeste da aldeia de São Luís através da Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018. | 26 |
| Figura 17: Mapa do edificado da aldeia de São Luís obtido através da informação cartográfica disponibilizada pela Câmara Municipal de Odemira. | 27 |
| Figura 18: Perfis de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo produção solar (gráfico de cima) e produção eólica (gráfico de baixo). | 31 |

Figura 19: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo produção solar e eólica, com o apoio de um sistema de baterias. Durante o dia verificam-se excedentes de produção que são armazenados e mais tarde consumidos. 33

Figura 20: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo um sistema elétrico isolado com produção solar e produção eólica e a ausência (em cima) e a inclusão (em baixo) de um sistema de baterias. 36

Figura 21: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo um sistema com balanço elétrico nulo (BEN) baseado em produção solar e eólica. Verifica-se uma quantidade considerável de excedentes de produção renovável durante o dia que são, por sua vez, exportados... 37

Figura 22: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo um sistema elétrico isolado com balanço elétrico nulo (BEN) com produção solar e produção eólica. Verifica-se uma quantidade considerável de excedentes de produção renovável durante o dia que são exportados.... 38

Glossário

Potência elétrica: quantifica a taxa (velocidade) a que um dado equipamento consome/produz energia elétrica, normalmente indicada com a unidade Watt (ou W). Por outro lado, energia elétrica é frequentemente identificada com a unidade Watt-hora (Wh), derivando de uma potência e tempo (em horas);

Energia elétrica: frequentemente identificada com a unidade Watt-hora (Wh), deriva de um dado equipamento funcionar a uma dada potência e período de tempo (em horas). A título de exemplo: se um gerador (ou uma lâmpada) for utilizado durante meia hora a uma potência de 100 W, 50 Wh serão produzidos (consumidos).

Potência nominal: potência máxima que um dado gerador pode disponibilizar. Para sistemas fotovoltaicos e turbinas eólicas, que dependem de um recurso natural não controlável, este valor corresponde a condições específicas (standard) de operação.

Custo unitário: custo por unidade de energia produzida ou consumida, tipicamente apresentado em €/kWh.

Investimento unitário: custo da aquisição e instalação de uma dada tecnologia de produção por unidade potência, tipicamente apresentado em €/kW.

Autoconsumo: contexto no qual um gerador, tipicamente renovável, tem como principal objetivo (e forma de rentabilização) suprir consumos locais.

Autoconsumo individual: regime de produção para autoconsumo no qual um gerador e a sua produção estão associados a uma única instalação de consumo. Em Portugal é regulado pelo Decreto-Lei 162/2019, tendo sido primeiro introduzido pelo Decreto-Lei 153/2014.

Autoconsumo coletivo: regime recentemente introduzido pelo Decreto-Lei 162/2019, em que um sistema para autoconsumo pode ser partilhado entre várias instalações de consumo, alargando o conceito de "produção local" para "produção numa região de proximidade". Importa ainda referir que esta partilha é feita através de coeficientes que, podendo ser eventualmente alterados, que definem a percentagem de energia produzida que corresponde a cada membro do coletivo.

Prosumidor: junção das palavras "produtor" e "consumidor" que descreve um consumidor de energia que é simultaneamente um produtor a partir de fontes renováveis com o intuito de suprir as suas necessidades, mas também armazenar o vender os seus excessos.

Níveis de tensão (rede elétrica): a rede elétrica nacional divide-se em vários níveis - alta, média e baixa tensão, sendo que os geradores são tradicionalmente instalados em níveis mais altos e os pontos de consumo em níveis mais baixos.

Taxas de uso das redes: custo imputado aos consumidores pela utilização dos vários níveis de tensão da rede elétrica (ver Tabela 1) para o fornecimento da eletricidade por si consumida. Com a entrada em vigor do Decreto-Lei 162/2019 a produção em autoconsumo evita parte ou a totalidade deste custo, dependendo dos níveis da rede elétrica que necessite para ser transmitida até ao(s) ponto(s) de consumo associado(s).

Tabela 1: Tarifas de rede para os vários níveis de tensão da rede elétrica nacional¹.

| Nível de tensão da rede elétrica | Taxa de uso das redes associado |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Alta | 0.59 c€/kWh |
| Média | 0.65 c€/kWh |
| Baixa | 5.88 c€/kWh |

Freguesia de Balanço Elétrico Nulo (BEN): freguesia com a capacidade de suprir, em tempo real, todo o seu consumo elétrico através de produção renovável local. Por ser extremamente exigente garantir e operar um sistema nestes moldes, considerou-se também que esta designação pode contemplar um balanço entre consumo e produção em termos anuais. Este objetivo é alcançado exportando excessos de produção renovável para outros pontos de consumo (freguesias e concelhos vizinhos) e importando da rede elétrica quando a produção local é insuficiente.

PPA: Acrónimo inglês para *Power Purchase Agreement*, referindo-se a um acordo de compra de energia entre duas partes.

1. Introdução

Desde o início de 2019 que o projeto de investigação H2020 PROSEU - *Prosumers for the Energy Union*² tem vindo a desenvolver os Laboratórios de Inovação (*Living Labs*), onde se procurou agregar um conjunto de partes interessadas de forma a co-criar uma comunidade de energia.

Um desses laboratórios tem lugar na freguesia de São Luís, no concelho de Odemira, onde foram já organizadas quatro sessões públicas onde se desenvolveram workshops de co-criação, sessões de formação técnica e discussões em parceria com o coletivo Energia com Alegria. O objetivo central destas sessões foi o de procurar definir caminhos para a transição energética na aldeia e concretamente imaginar uma comunidade de energia para uma produção de energia elétrica mais limpa, renovável e local.

Ao longo dessas sessões foram coletivamente definidas quais as características tecnológicas, técnicas, sociais e económicas que devem caracterizar um sistema de produção de eletricidade assente em energias renováveis, estendendo o trabalho que vinha já a ser desenvolvido pela comunidade desde 2012 através da Transição São Luís e, mais recentemente, o coletivo Energia com Alegria. Surgiram, assim, diversas narrativas e caminhos para a transição energética na freguesia, mas surgiu também a necessidade de um suporte analítico que permitisse avaliar as diversas opções que foram sendo co-criadas ao longo das sessões.

Surgiu, então, por parte da equipa de investigadores do PROSEU, um projeto cujo objetivo é modelar e simular computacionalmente esses caminhos, opções e narrativas desde um ponto de vista técnico, científico e económico.

Modelação do sistema elétrico da freguesia de São Luís

O presente trabalho consiste num estudo de modelação e simulação de sistemas de energia com recurso a modelos computacionais. Esta abordagem é essencial para avaliar a viabilidade e funcionamento de vários cenários para um sistema de produção de eletricidade renovável, limpa e local na freguesia de São Luís.

O desenvolvimento deste género de estudo exige uma recolha extensa de dados e informação relativamente ao local em estudo (população, configuração de infraestruturas, configuração da rede elétrica, registos de consumo elétrico, existência de sistemas de produção local, entre outros). Para tal, é necessário aceder a diferentes fontes: à comunidade local e agentes do setor energético (REN, EDP-Distribuição, DGEG, APREN); órgãos de poder local (juntas de freguesia, câmaras municipais, agências regionais de desenvolvimento, entre outros); repositórios de estatísticas e dados abertos (por exemplo, PORDATA, *Open Street Maps*, *Renewables.ninja*); ou outros estudos previamente desenvolvidos como é o caso da tese de mestrado "*Estudo de potencial para comunidades de energia renovável em Portugal: o caso da aldeia de São Luís*"³.

É, no entanto, importante compreender que um trabalho de modelação e simulação é, por norma, assente em modelos matemáticos, pressupostos e simplificações que, em conjunto, procuram descrever um fenómeno complexo. Por isso, deve ser tido em conta que as análises apresentadas ao longo deste documento servem de orientação, indicação ou sugestão e que a complexidade de um sistema elétrico

real está longe de ser representada na sua totalidade. Pode-se, contudo, fazê-lo de uma forma que, embora parcial e limitada, seja uma boa aproximação a essa realidade e que deste processo resultem análises que, pela sua generalidade, constituam importantes e valiosos resultados que permitem compreender o sistema com uma profundidade que, de outra forma, seria impossível.

Além disso, interessa sublinhar que o presente estudo, bem como o modelo utilizado como ferramenta para a sua elaboração, não são elementos estáticos e fechados. Mais do que apresentar um conjunto de resultados numéricos e uma análise técnica fechada, espera-se que o presente trabalho disponibilize uma metodologia que incentive e facilite que outras comunidades (freguesias, aldeias, bairros) realizem os seus próprios estudos e planeiem os seus próprios processos de transição energética. Por isso mesmo, o modelo usado (softwares, código e instruções de utilização) serão disponibilizados em regime de código aberto para que possa, justamente, ser replicado, adaptado e aplicado a outras realidades. Existem, no entanto, dados de consumo, cedidos pela EDP-Distribuição, que não serão divulgados por estarem sujeitos a um acordo de confidencialidade.

Organização do documento

Os restantes capítulos do presente documento estão organizados da seguinte forma: De seguida é apresentada a metodologia e as ferramentas usadas na modelação do sistema energético, seguidamente a freguesia de São Luís é caracterizada através dos dados recolhidos. Posteriormente os cenários e opções para a transição energética são concebidos e os resultados apresentados e as possibilidades para o seu financiamento e organização discutidos. Por fim é apresentada uma súmula das principais conclusões obtidas com o presente estudo.

2. Metodologia

Modelação do sistema elétrico da freguesia de São Luís

No presente capítulo é apresentada a metodologia usada para desenhar o sistema energético de uma região, ou seja, dimensionar os sistemas de produção bem como indicar os custos monetários e impacto em emissões de CO₂ associados. A metodologia é geral e pode ser aplicada a diversas escalas desde bairros, cidades, pequenas regiões até países inteiros. Neste caso em concreto será aplicada à escala de uma freguesia.

A ferramenta computacional escolhida para o efeito foi o *calliope*⁴, uma biblioteca de código aberto desenvolvida em *Python* (linguagem de programação), para a **modelação e simulação** de sistemas de energia em múltiplas escalas

Para implementar esta ferramenta, é primeiro necessário:

- Definir um conjunto de pontos na região a considerar.
- Associar-lhes um consumo de eletricidade e/ou a possibilidade de serem instaladas tecnologias de produção, conversão ou armazenamento de energia.
- Definir o recurso natural para cada tecnologia de produção de energia.
- Definir as interligações entre os vários pontos definidos.

Na Figura 1 pode ser vista a representação de uma rede genérica considerada pelo *calliope*. Esta ferramenta é muito versátil e permite ainda que se imponham eventuais constrangimentos no sistema a desenhar, tais como limites de área disponível para a instalação das tecnologias definidas ou limites de potências a instalar em cada local.

Figura 1: Ilustração de como o *calliope* representa uma rede de energia, através vários nodos (identificados por X) interligados entre si. A cada nodo pode ser associado a fonte(s) de consumo e/ou de produção de energia⁵.



Depois de caracterizado cada local, interligação, tecnologia e os recursos naturais da freguesia, a ferramenta *calliope* permite encontrar **a configuração ótima do sistema, de um ponto de vista económico**, ou seja, a solução que minimiza o custo total do sistema (investimento e operação).

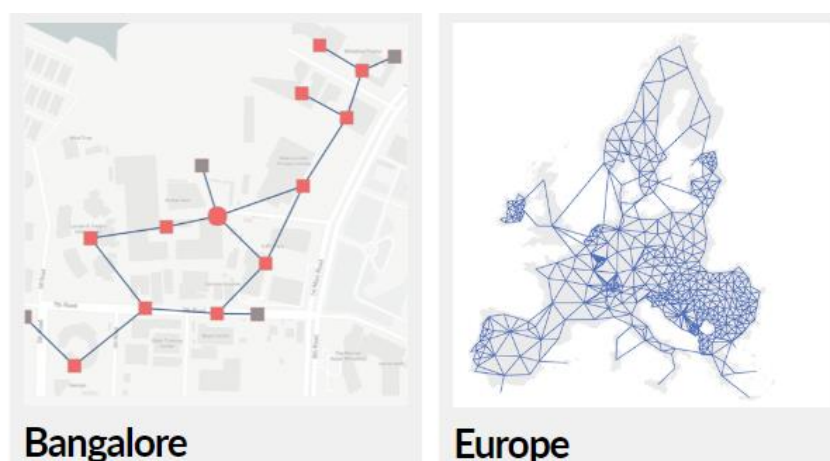
Cada solução consiste numa sugestão de potências a instalar de cada tecnologia para os vários locais considerados, complementado por uma série de indicadores económicos e ambientais. A ferramenta devolve ainda uma simulação do comportamento do sistema de energia para um período de tempo definido pelo utilizador (um dia, uma semana, um ano). Embora possam ser consideradas outras formas

de energia como calor, no presente trabalho considera-se unicamente eletricidade. Seguidamente são descritos os vários procedimentos que permitem preparar os dados e obter as possíveis soluções.

Configuração da rede elétrica

Como referido anteriormente, o *calliope* define uma rede de energia como um conjunto de nodos interligados entre si e que podem ter consumos e/ou produção a si associados (exemplos na Figura 2).

Figura 2: Exemplos de representação de redes de energia às escalas urbana (esquerda) e europeia (direita) no *calliope*⁶.



Este estudo apenas considerou a rede elétrica de média tensão, que interliga os postos de transformação do local em estudo entre si e com a subestação mais próxima. Não tendo acesso ao traçado dessa mesma rede, assumiu-se, por simplificação, que esta segue o traçado da rede viária e que existem derivações que conectam aos vários postos de transformação. Embora possa não corresponder à realidade, esta configuração tem pouco impacto nos resultados, já que o mesmo se foca em avaliar balanços de energia entre os pontos de consumo e produção tendo em conta a potência nominal que cada posto de transformação permite transitar.

Esta configuração serve de base para definir a rede elétrica na ferramenta *calliope*, através de nodos interligados entre si. No entanto, definir um maior número de nodos resulta num modelo mais complexo, e por isso mais exigente em termos computacionais. Optou-se, portanto, por uma representação simplificada: consideram-se os vários postos de transformação e os pontos de derivação que os ligam à rede principal, interligando-os entre si.

No capítulo 3 o resultado deste processo está ilustrado na Figura 10.

Pontos de consumo

Para testar e avaliar possíveis cenários de produção de eletricidade renovável é importante conhecer o consumo de energia elétrica atual do local em estudo. Os únicos registos publicamente acessíveis são disponibilizados no portal PORDATA⁷, uma base de dados com estatísticas oficiais para Portugal e a Europa. Os dados recolhidos desta base de dados quantificam o consumo total de cada ano, desagregado ao nível do concelho e por tipo de consumo (p.e. doméstico ou agricultura).

No entanto, para que os cenários traçados fossem mais realistas e credíveis, era importante utilizar dados que tivessem um maior nível de detalhe, nomeadamente séries temporais de dados de consumo pois essa é a informação com a qual o *calliope* trabalha. Foi por isso importante entrar em contacto com a EDP-Distribuição, que disponibilizou registos, com uma resolução temporal de 15 minutos de consumo elétrico ao nível dos postos de transformação. Este equipamento, ao fazer a transformação entre os níveis de média e baixa tensão da rede elétrica, alimenta a rede de distribuição de baixa tensão e, por isso, agrega o consumo das diversas instalações de consumo a ele ligadas. É importante notar que, por imposição do Regulamento Geral de Proteção de Dados (RGPD), a EDP-Distribuição está apenas autorizada a partilhar dados de consumo elétrico que correspondam a agregados de pelo menos 20 instalações de consumo⁸.

Na nossa abordagem, os pontos a considerar para a região, no *calliope*, correspondem aos postos de transformação fornecidos pela EDP-Distribuição.

Tecnologias consideradas e sua caracterização

As tecnologias presentes no processo de modelação têm de ser definidas a priori e, em linha com os objetivos de um sistema energético assente em energias renováveis, foi considerado o seguinte conjunto de tecnologias de produção de energia elétrica renovável, limpa e local:

- Sistema de produção fotovoltaica de pequena escala (Figura 3).
- Sistema de produção fotovoltaica de grande escala (Figura 4).
- Turbina eólica de pequena dimensão, com 40 metros de altura (Figura 5).
- Sistema de armazenamento comunitário por baterias de ião-lítio (Figura 6).

Figura 3: Sistema fotovoltaico de pequena escala na aldeia de São Luís⁹.



Figura 4: Central fotovoltaica em Estarreja com 2.5 MW de potência de ligação¹⁰.



Figura 5: Turbina eólica Nordex N29 de 250 kW¹¹.



Figura 6: Sistema de armazenamento com 2MWh de capacidade e 3 MW de potência¹².



No presente trabalho são considerados sistemas fotovoltaicos com painéis modelo *P17* de 350 W da empresa *SunPower*. Para as turbinas eólicas considerou-se o modelo *Nordex N29 250* com 40 metros de altura. Foi dada preferência a uma turbina de dimensão relativamente reduzida, de forma a minimizar o potencial impacto na paisagem natural da região. Relativamente a sistemas de armazenamento de eletricidade foram consideradas baterias de ião-lítio. Apesar destas não serem um elemento consensual, devido aos seus impactos ambientais, são muito relevantes num sistema altamente renovável.

Para cada uma destas tecnologias foi recolhida informação que permitisse caracterizá-las de um ponto de vista técnico e económico. Foram tidas em conta as seguintes características:

- **Eficiência de conversão:** a percentagem do recurso natural que é convertido em eletricidade por cada tecnologia (em %).
- **Potência por unidade:** a potência que corresponde a uma unidade de cada tecnologia (em kW/unidade), neste caso um módulo fotovoltaico ou uma turbina eólica;
- **Área ocupada por unidade de potência:** a área ocupada que corresponde a 1 kW instalado de cada tecnologia (em m²/kW).
- **Preço por unidade de potência:** o custo correspondente a 1 kW de cada tecnologia (em €/kW).
- Fator de emissões: o nível de emissões de CO₂ associado ao ciclo de vida (fabrico, operação e desmantelamento) de um dado equipamento por cada unidade de energia que este produz durante o mesmo período de tempo (em gCO₂e/kWh).
- **Tempo de vida:** período em que um equipamento consegue estar operacional, sendo posteriormente necessária a sua substituição.

Os valores assumidos para as tecnologias de produção renovável e de armazenamento de eletricidade consideradas neste trabalho podem ser consultados na Tabela 2, tendo sido recolhidos de bibliografia existente ou de informação facilitada por agentes do setor elétrico português. De notar que os sistemas fotovoltaicos de grande escala, quando comparados com os de pequena escala, representam um investimento unitário menor, devido a efeitos de escala. No entanto, exigirem uma maior área por potência instalada.

Relativamente aos elementos já existentes na rede elétrica local, postos de transformação e subestação, foi apenas considerada a sua potência nominal, visto que esta limita a potência que pode transitar num equipamento. Por outro lado, definiu-se um custo unitário de 0.21 c€/kWh, incluindo tarifas de rede, e emissões de 330 gCO₂e/kWh¹³ para a energia fornecida pela rede elétrica.

Tabela 2: Caracterização das tecnologias para uma transição energética consideradas neste trabalho.

| Tecnologia | Eficiência | Parâmetro | | | | |
|--------------------------------|------------------------|----------------------|--|------------------------------------|---|---------------|
| | | Potência por unidade | Área por potência instalada | Investimento unitário | Emissões em ciclo de vida | Tempo de vida |
| Fotovoltaico de pequena escala | 14.5% ^{14,15} | 350 W | 10 m ² /kW ¹⁶ | 1500 €/kW ¹⁷ | 40 gCO ₂ e/kWh ¹⁸ | 25 anos |
| Fotovoltaico de grande escala | | | 20 m ² /kW ¹⁶ | 700 €/kW ¹⁷ | | |
| Turbinas eólicas | 30% ¹⁹ | 250 kW | 25,4 m ² /kW ^{20,21} | 4 260 €/kW ²² | 10 gCO ₂ e/kWh ²³ | |
| Sistema de baterias ião-lítio | 99% | - | 9,4 m ² /kWh ²⁴ | 396 €/kW + 114 €/kWh ²⁵ | 110 gCO ₂ e/kWh ^{26,27} | 5 anos |

Recursos renováveis

Pelo facto de a produção de eletricidade solar ou eólica estar naturalmente dependente do sol e do vento, é também necessário conhecer os recursos naturais que caracterizam o local de estudo e converter esse mesmo recurso em potencial de produção renovável. No caso do recurso solar, foi possível obter estimativas de irradiância solar (fluxo de radiação incidente por unidade de área, em W/m²), temperatura do ar e velocidade do vento ao nível do solo através da empresa SoDa: *Solar Radiation Data*²⁸.

Este recurso é posteriormente convertido em potencial fotovoltaico, tendo em conta vários elementos:

- A eficiência de conversão do módulo fotovoltaico em condições de referência.
- A eficiência geral do sistema, englobando fatores como perdas no inversor, nos cabos elétricos ou por temperatura.
- A área instalada de módulos fotovoltaicos.

Para o recurso eólico foi utilizada uma ferramenta disponibilizada na plataforma *Renewables.ninja*²⁹. Esta ferramenta permite obter uma estimativa do potencial eólico para um local, modelo de turbina (*Nordex N29*) e altura de turbina (40 metros) definidos pelo utilizador.

Estimativa de área disponível para a instalação de sistemas de produção renovável

A ferramenta *calliope* permite ter em conta a ocupação de área exigida pelas várias tecnologias, nos vários locais considerados, e definir uma ocupação máxima para as mesmas.

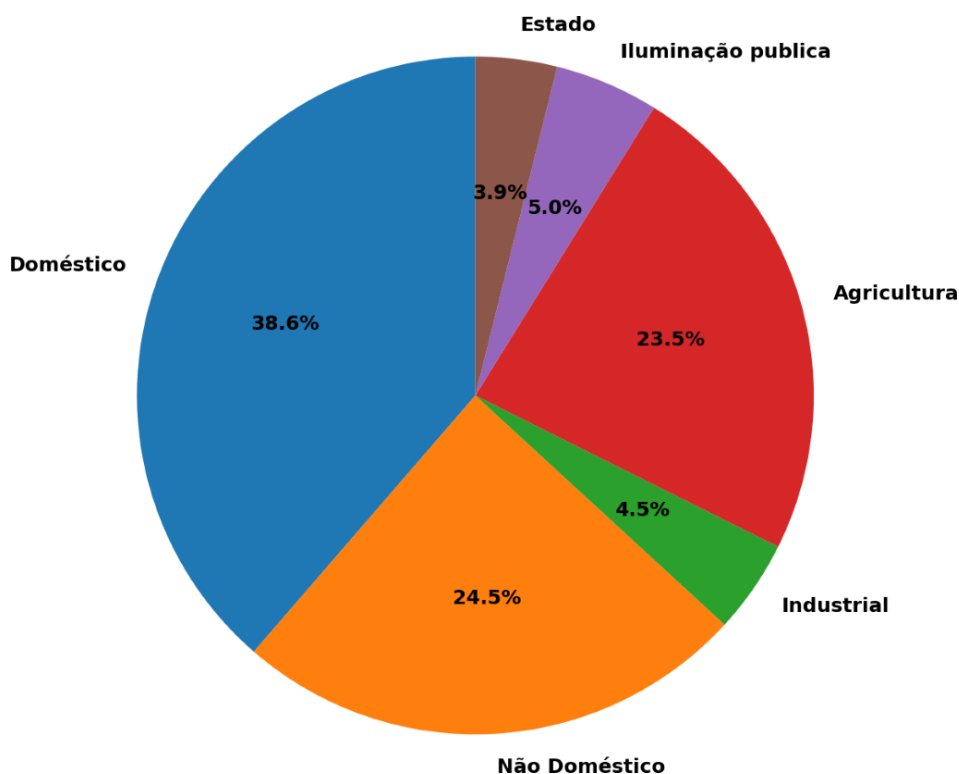
Para avaliar a área disponível em telhados para instalação de sistemas fotovoltaicos de pequena escala foram usados mapas do edificado através de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Para avaliar locais possíveis para a instalação de centrais fotovoltaicas e de turbinas eólicas, foi considerada a Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental³⁰, um documento que classifica e mapeia tipologias de uso do solo.

3. Caracterização da freguesia de São Luís, Odemira

Consumo de energia elétrica

Os dados obtidos do portal PORDATA indicam um consumo de energia elétrica para o concelho de Odemira a rondar os 85 GWh em 2017, o último ano registado. A Figura 7 descreve como este consumo se distribui entre os diversos setores de atividade.

Figura 7: Composição relativa dos vários tipos de consumo no concelho de Odemira⁷.



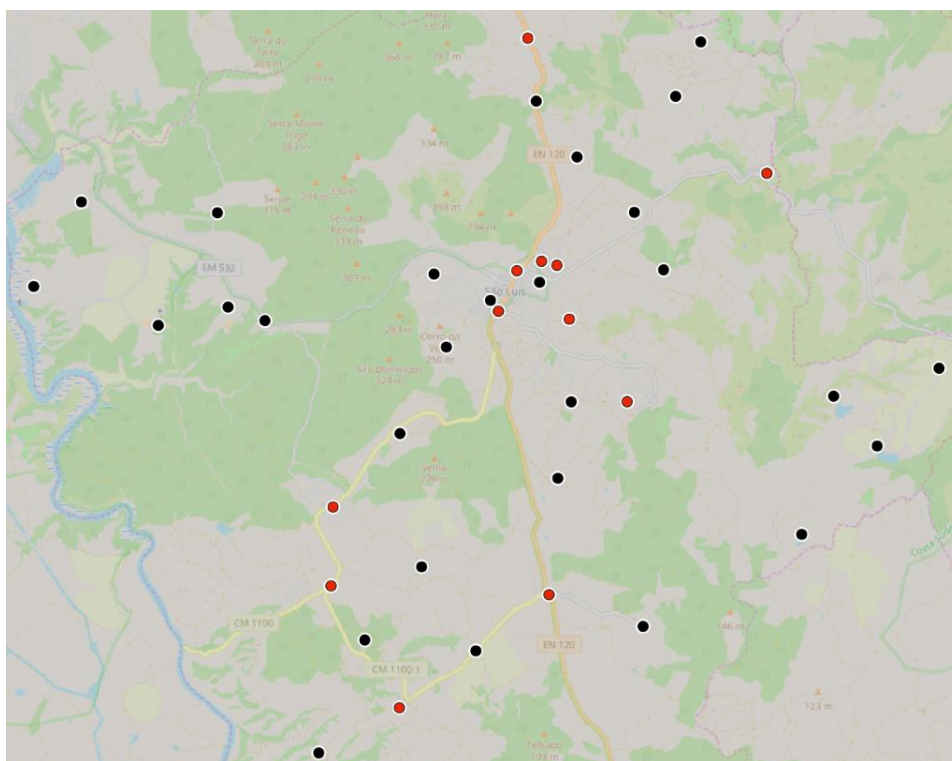
De forma a extrapolar o consumo da freguesia de São Luís a partir dos dados totais para o concelho, assumiu-se que este é proporcional à população residente. Os censos mais recentes de 2011³¹ indicam que, das 26.066 pessoas que residem no concelho de Odemira, 1989 das quais (cerca de 7.6 %) residem na freguesia São Luís. Portanto, assumindo que 7.6% dos 85 GWh antes referidos correspondem à freguesia, o consumo de São Luís num ano seria de 6.5 GWh. Esta estimativa pode baixar até 5 GWh, visto que a agricultura (que corresponde a 23.5% do consumo total de Odemira) é mais reduzida e menos intensiva na freguesia de São Luís do que em outras partes do concelho.

Para se ter uma noção de qual o significado pratico destes consumos pode-se notar que a freguesia de São Luís, quando comparada, por exemplo, com a freguesia de Alvalade em Lisboa, ocupa uma área 28 vezes superior, tem cerca de 16 vezes menos população e regista um consumo de energia elétrica cerca de 30 vezes inferior.

Através da EDP-Distribuição foi possível obter o mapa de 40 postos de transformação existentes na freguesia de São Luís. No entanto, pelo facto de nem todos agregarem o mínimo de 20 instalações de consumo (ver capítulo anterior), apenas foi possível obter dados de consumo para 12 (ver Figura 8).

Agregando o consumo dos pontos disponíveis, verificou-se um consumo de eletricidade anual em 2018 de 3.32 GWh, tendo variado entre 7.4-11.4 MWh em termos diários e 240-320 MWh em termos mensais.

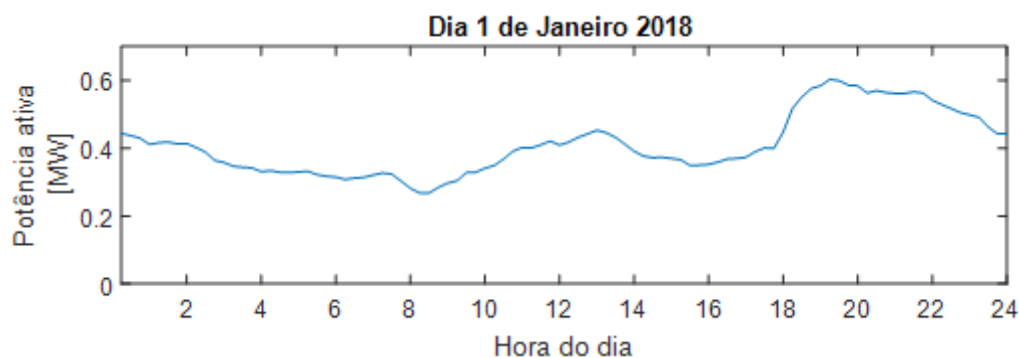
Figura 8: Postos de Transformação da freguesia de São Luís. A vermelho os postos para os quais foi possível obter registos de consumo elétrico através da EDP-Distribuição.



Embora o número de postos de transformação disponíveis corresponda a 30% do número total, o seu consumo corresponde a 50-66% do consumo da freguesia, dependendo do peso atribuído à agricultura da freguesia (também discutido no capítulo anterior).

Em termos de consumo de potência ativa para 15 minutos, verificam-se valores entre 0.2 e 0.75 MW para 2018. A Figura 9, ilustra, a título de exemplo, o consumo para o dia 1 de janeiro, onde se pode observar um padrão diário típico onde o pico de consumo se regista entre as 19 e 20 horas.

Figura 9: Perfil de consumo agregado de 12 postos de transformação instalados na freguesia de São Luís para um dia exemplificativo (1 de janeiro 2018).



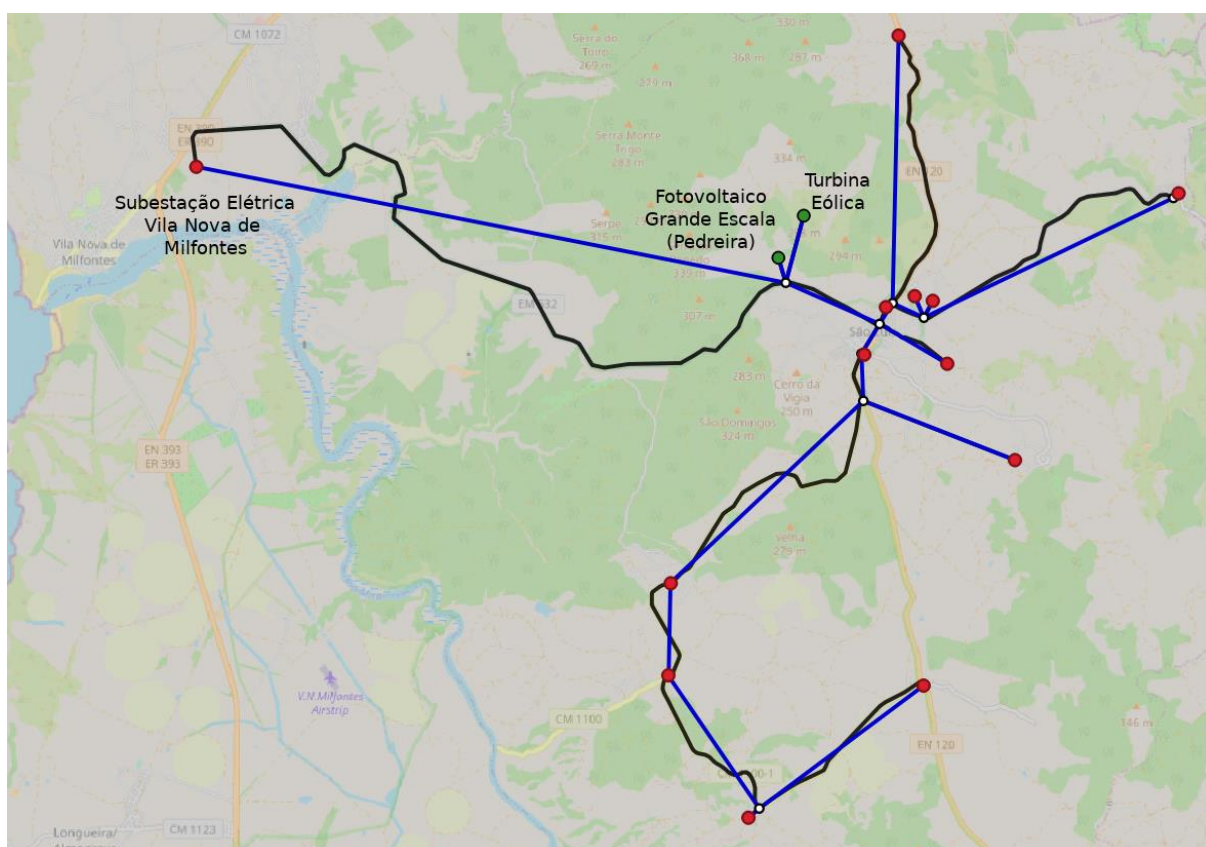
Desenho da rede elétrica local

Seguindo a metodologia descrita no capítulo anterior, foi desenhado o traçado da rede ilustrado na Figura 10 (linha preta). Nela podem-se identificar os seguintes elementos:

- A subestação mais próxima localizada em Vila Nova de Milfontes³², responsável por fornecer a eletricidade provinda da rede elétrica nacional.
- O conjunto de postos de transformação (12) para os quais foram disponibilizados dados de consumo.
- Os pontos de produção considerados para a instalação de um sistema fotovoltaico de grande escala (antiga Pedreira) e turbinas eólicas (zona de matos).

Esta representação é, então, simplificada para um conjunto mínimo de retas interligando os vários nodos (também na Figura 10, mas com linha azul), antes de ser integrada no *calliope*.

Figura 10: Configuração da rede elétrica local assumida para São Luís (a preto) e a versão simplificada da mesma que é definida no *calliope* (a azul). Os pontos vermelhos representam os postos de transformação e a subestação em Vila Nova de Milfontes, e a verde os locais onde se considera a instalação de uma central fotovoltaica e de turbinas eólicas.



Recursos para produção renovável

Tal como referido anteriormente, os dados relativos aos recursos solar e eólico para São Luís foram cedidos pela empresa Soda: Solar Data ou obtidos pela plataforma online *Renewables.ninja*, respetivamente.

É importante sublinhar que ambos os recursos variam no tempo e dependem de fatores como a hora do dia, a estação do ano ou as condições meteorológicas. Na produção de energia fotovoltaica é patente o impacto de um ciclo diário, com um aumento de produção no início do dia, atingir o seu máximo a meio do dia (assumindo uma orientação ótima para sul) e uma diminuição à medida que o Sol se põe. Em termos de meteorologia, distinguem-se três padrões de produção (Figura 11): dias totalmente nublados, com uma produção globalmente reduzida; dias parcialmente nublados, com frequentes variações de produção ao longo do dia; e dias de céu limpo, em que o ciclo diário é evidente e a produção é máxima. Quando o recurso solar é avaliado em termos mensais, torna-se também visível um aumento de produção progressivo de janeiro até aos meses de julho e agosto, seguido de uma redução até ao final do ano (Figura 12).

Figura 11: Padrões de potencial solar, por unidade de área instalada, para diferentes condições meteorológicas.

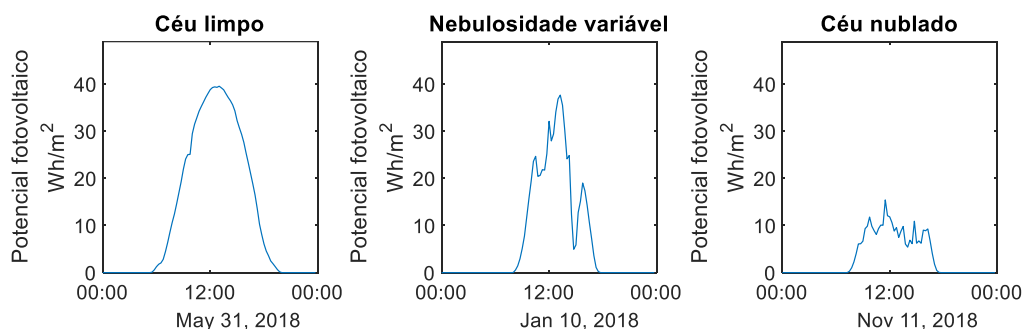
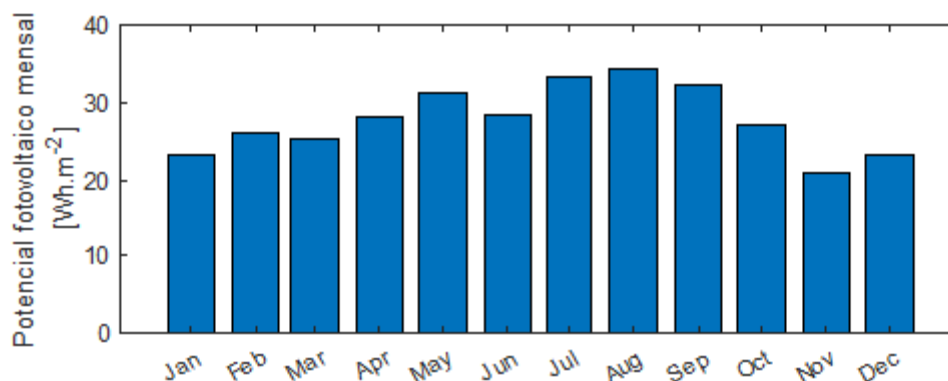


Figura 12: Potencial solar, por unidade de área instalada, para os vários meses do ano, sendo visível uma maior produção nos meses de Verão.



Quando se trata do recurso eólico, a presença de um ciclo diário torna-se menos evidente. Por outro lado, é aparente a presença de uma quantidade padrões de produção mais diversa e complexa (Figura 13). Por exemplo, observam-se dias de maior produção noturna; de maior produção diurna; de produção estável; de produção variável; e até dias de produção quase inexistente. No entanto, em média, esta produção reparte-se em 54% no período diurno (entre as 7 e 19 horas) e 46% no noturno. Em termos mensais verifica-se um padrão sazonal evidente, com uma maior produção entre janeiro e março e outubro e dezembro (Figura 14).

Figura 13: Alguns padrões de potencial eólico, por turbina instalada, encontrados para São Luís em 2018.

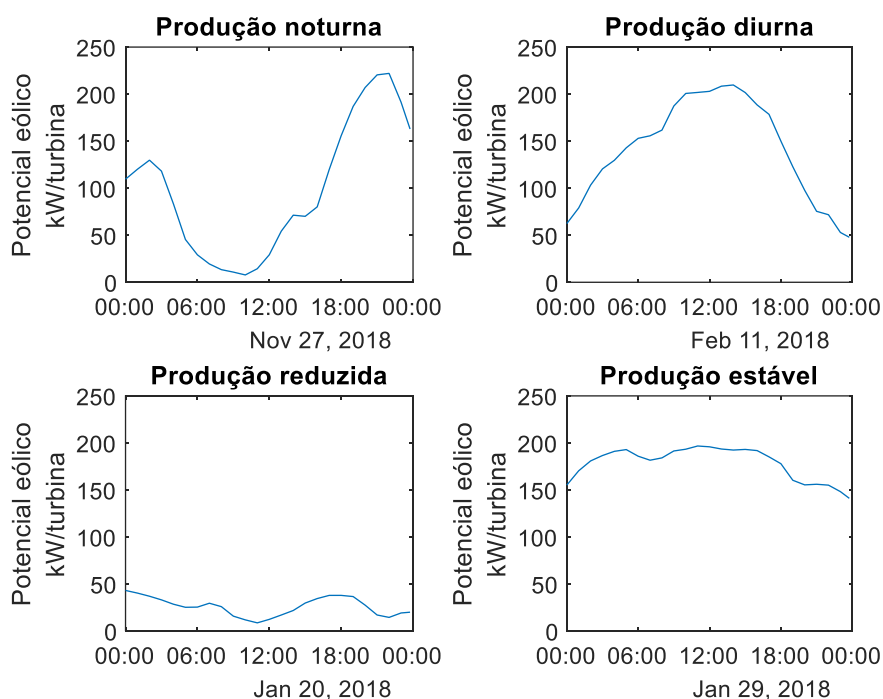
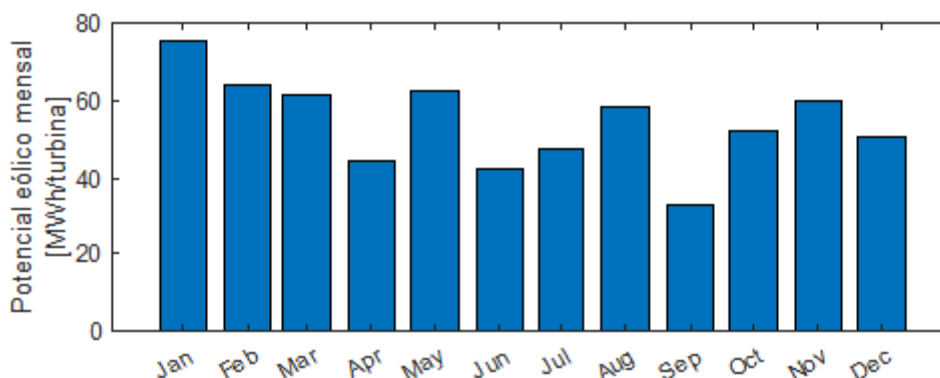
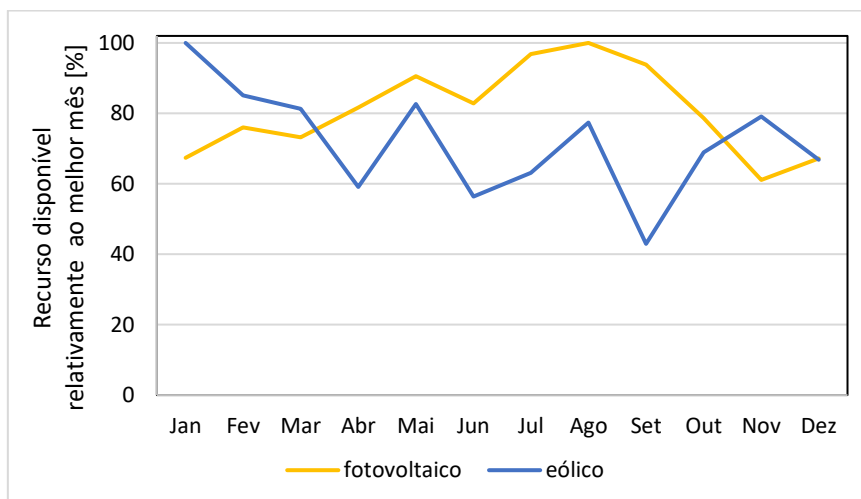


Figura 14: Potencial eólico, por turbina instalada, para os vários meses do ano, sendo visível uma maior produção nos primeiros meses do ano.



A predominância de produção diurna no solar e de produção noturna no eólico, aliada ao padrão anual de cada um destes recursos, torna evidente a sua complementaridade e sugere um potencial para o aproveitamento conjunto das tecnologias solar e eólica.

Figura 15: Comparação entre a disponibilidade solar e eólica mensal ao longo do ano de 2018.



Para quantificar as áreas disponíveis na freguesia de São Luís foram considerados dois conjuntos de dados:

- A Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal (COS) de 2018³³.
- Informação cartográfica sobre o edificado da freguesia de São Luís fornecido pela Câmara Municipal de Odemira (dados de 2005), onde estão identificados os telhados e o tipo de edifício associado.

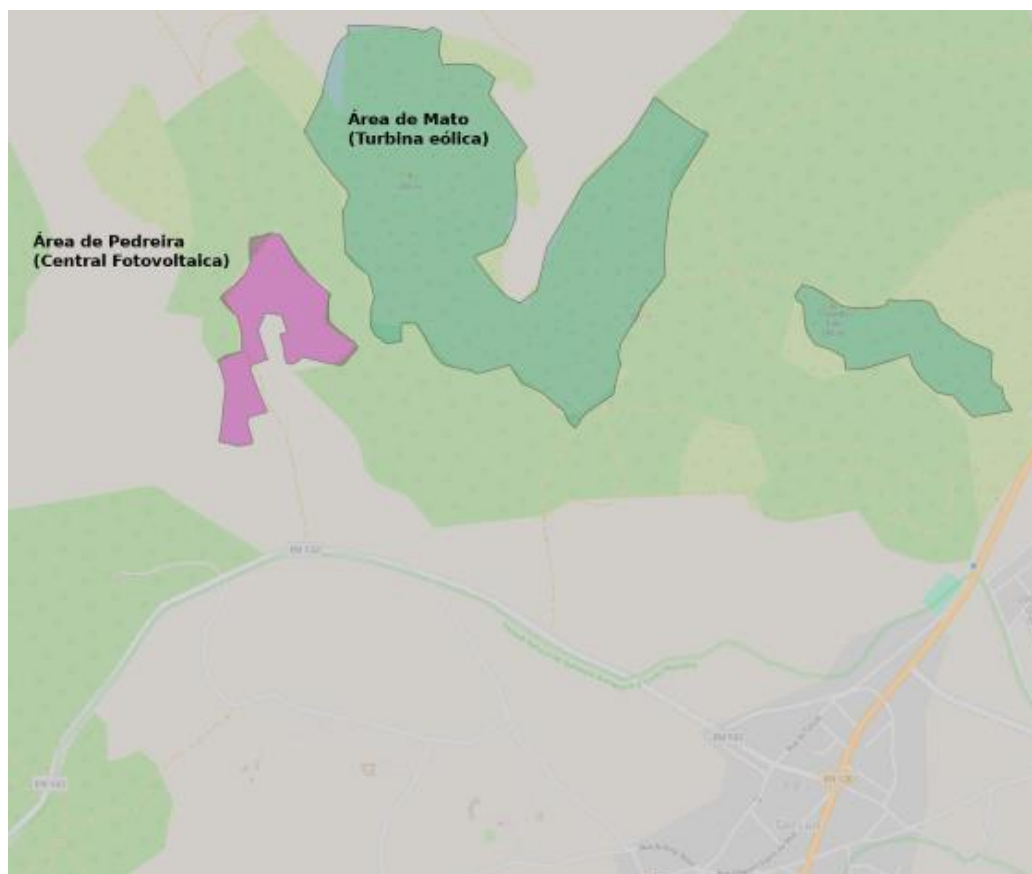
Através da COS foi possível considerar os seguintes locais para a instalação de:

- Sistema fotovoltaico de grande escala localizados no terreno da Pedreira de São Luís, atualmente desativada.
- Um sistema de armazenamento de escala comunitária no terreno da Pedreira.
- Turbina eólica localizada num terreno de matos, com maior elevação, perto da Pedreira.

Relativamente ao terreno da Pedreira, considerou-se que apenas 80% (54.700 m², ou 5.47 ha) do mesmo poderia ser aproveitado. Considerou-se, ainda, que apenas seria possível instalar até 2 turbinas em São Luís, de forma a minimizar o impacto na paisagem natural de São Luís.

Na Figura 16 podem-se ver as áreas consideradas para estas duas tecnologias.

Figura 16: Áreas de mato com uma cota elevada (298 m) e pedreira (desativada) identificadas a noroeste da aldeia de São Luís através da Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018.

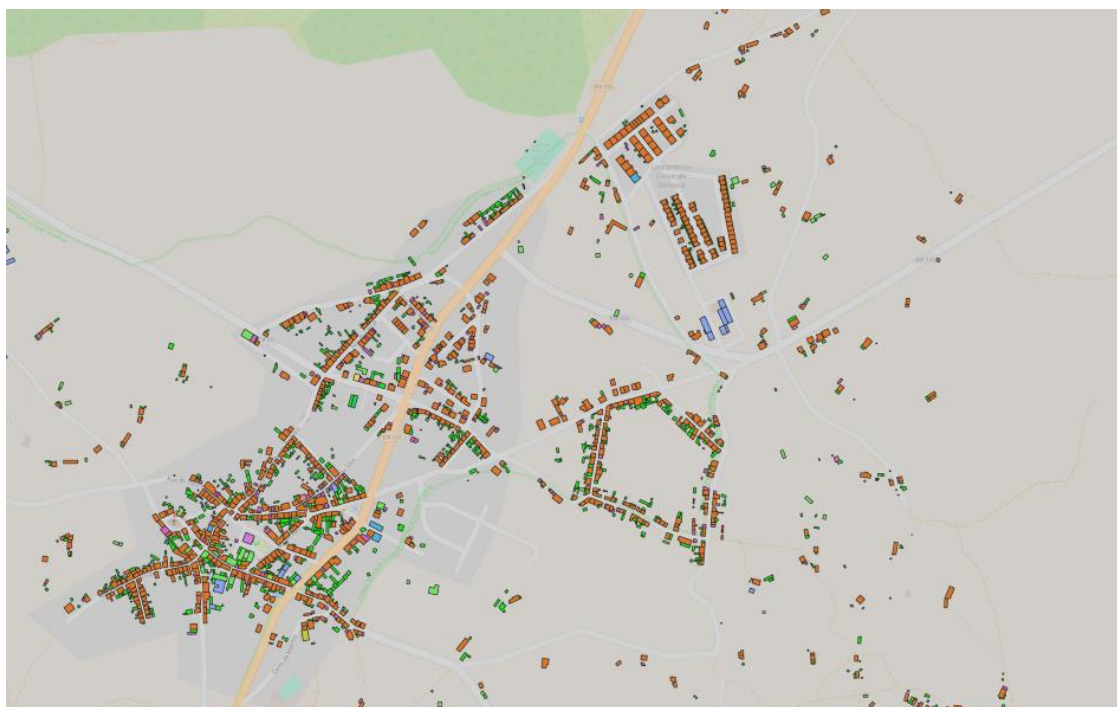


Para os sistemas fotovoltaicos de pequena escala foram apenas consideradas instalações em telhados, de forma a minimizar a ocupação de outro tipo de terrenos. Através de dados cartográficos para o edificado da freguesia, foram identificados 144.000 m² de área de telhado disponível, variando entre 4.000 e 23.000 m² dependendo do posto de transformação ao qual estão associados. Das diversas classes de edifícios contemplados, foram apenas considerados habitações em geral, armazéns, arrecadações e edifícios públicos ou empresariais cujo telhado apresentasse pelo menos 10 m² de área. Na Figura 17 pode-se ver o edificado considerado para a aldeia de São Luís.

Em termos anuais, estima-se que o aproveitamento da totalidade dos telhados tenha o potencial de produzir dez vezes o consumo da freguesia. Este valor dá uma grande margem para, numa fase de implementação, se desconsiderarem alguns telhados por não apresentarem condições adequadas para o efeito (inclinação, orientação, forma, estado da infraestrutura, entre outros).

Segundo um levantamento feito pela comunidade local, existem à data aproximadamente 100 kW de capacidade fotovoltaica, repartida entre telhados e pequenas instalações no solo.

Figura 17: Mapa do edificado da aldeia de São Luís obtido através da informação cartográfica disponibilizada pela Câmara Municipal de Odemira.



Apesar de não considerados neste trabalho, a consulta da COS2018 permitiu ainda identificar diversos terrenos de mato ou descampados que poderiam ser considerados para a instalação de outras sistemas de produção.

4. Cenários para a transição energética

Tendo descrito a metodologia a usar, bem como recolhidos os dados que permitem caracterizar a freguesia de São Luís, interessa agora construir cenários que exploram diferentes caminhos para a transição energética na freguesia de São Luís. O racional que orienta esta escolha prende-se com a sua relevância num contexto comunitário, promovendo a participação das comunidades locais nesta transição.

Cada cenário é, em primeiro lugar, contextualizado, descrito e justificado, sendo posteriormente apresentados e analisados os resultados das simulações realizadas. Importa, no entanto, tecer algumas considerações prévias. Os valores aqui apresentados devem ser vistos apenas como orientações gerais e indicativas para o estabelecimento de uma freguesia com produção de energia renovável, limpa e local. Neste sentido, deve ser colocada especial atenção ao facto de se tratar de resultados de simulações, realizadas através de modelos computacionais, mas também devido ao facto de ter sido apenas possível obter amostras parciais de diversos dados, nomeadamente:

- Os dados de consumo elétrico cedidos pela EDP-Distribuição não representam a totalidade do consumo da freguesia, apesar de representarem uma parte considerável do mesmo (50 66%).
- Apenas foi possível considerar um ano de dados (2018), sendo que o consumo e os recursos solar e eólico variam de ano para ano.

Comparação entre tecnologias

Tal como referido no capítulo anterior, são consideradas três tecnologias de produção renovável:

- Um sistema fotovoltaico de grande escala, através de uma central de grande dimensão instalada nos terrenos da Pedreira desativada de São Luís.
- Sistemas fotovoltaicos de pequena escala, através de instalações de pequena dimensão nos telhados da freguesia.
- Turbinas eólicas de pequena escala, com unidades de 40 metros de altura e 250 kW de potência nominal a serem instaladas numa zona de mato junto aos terrenos da Pedreira de São Luís. Pelo potencial impacto ambiental e paisagístico decorrente da tecnologia eólica, foi considerado um número máximo de 2 turbinas.

De forma apoiar e facilitar a interpretação dos resultados apresentados de seguida são aqui colocados novamente os valores usados para o custo da tecnologia, um parâmetro de extrema importância na definição de um sistema energético.

Tabela 3: Investimento unitário associado às tecnologias consideradas neste trabalho.

| Tecnologia | Investimento unitário |
|--------------------------------|-----------------------|
| Fotovoltaico de pequena escala | 1500 €/kW |
| Fotovoltaico de grande escala | 700 €/kW |
| Turbinas eólicas | 4260 €/kW |
| Sistem de materiais ião-lítio | 396 €/kW + 114 €/kWh |

Tendo em conta os custos das várias tecnologias e o recurso solar e eólico identificados para São Luís, foi possível determinar os seguintes custos unitários: 1.9 c€/kWh e 4 c€/kWh para a produção fotovoltaica de grande e pequena escala, respetivamente, e 7.4 c€/kWh para a produção eólica.

É importante referir que, à luz da legislação aprovada, a noção de proximidade exigida para novos projetos entre produção e consumo não está explicitada. Isto faz com que não seja possível avaliar se uma central fotovoltaica de grande dimensão localizada fora da aldeia (na pedreira), que apresenta um custo unitário menor, é possível num contexto de comunidade energética.

Uma freguesia em autoconsumo

Como primeiro cenário, considerou-se que a freguesia de São Luís supre o seu consumo de eletricidade através da produção local ou da rede elétrica não dependendo das regiões circundantes para exportar eventuais excessos de produção. Em suma, desenhou-se um sistema energético onde a produção local nunca excede o consumo da freguesia. Este cenário pode ser interpretado, desde um ponto de vista meramente técnico, como correspondendo ao autoconsumo.

Apesar de esta ser uma limitação bastante restritiva, permite perceber qual a importância da rede elétrica nacional não só para o fornecimento de energia nos períodos em que a produção renovável é insuficiente, mas também para receber eventuais excessos de energia (evitando, ou pelo menos diminuindo, a necessidade de armazenamento).

Em todos os casos é importante ter em conta que uma proporção considerável de energia exportada é indesejável, por dois motivos:

- Desvirtua o conceito de produção local e, por consequência, leva a uma produção menos eficiente.
- Resulta numa provável sobrecarga das redes locais no caso hipotético, mas possível, em que a produção renovável se torna relevante em todo o concelho de Odemira³⁴.

Em primeiro lugar, cada tecnologia foi avaliada individualmente e os resultados das principais grandezas encontram-se na Tabela 4. Como se pode verificar, as três opções resultam em investimentos iniciais, poupanças (através da fatura elétrica) e áreas ocupadas bastante diferentes, mas resultam em níveis de autossuficiência e em reduções das emissões de CO₂ semelhantes (cerca 20% e 17-19%, respetivamente). A área necessária para os sistemas fotovoltaicos, independentemente da escala, é

bastante reduzida em todos estes cenários (uma ocupação inferior a 15% na antiga Pedreira e inferior a 10% nos telhados).

Tabela 4: Resultados para três cenários em que se considera individualmente diferentes tecnologias de produção.

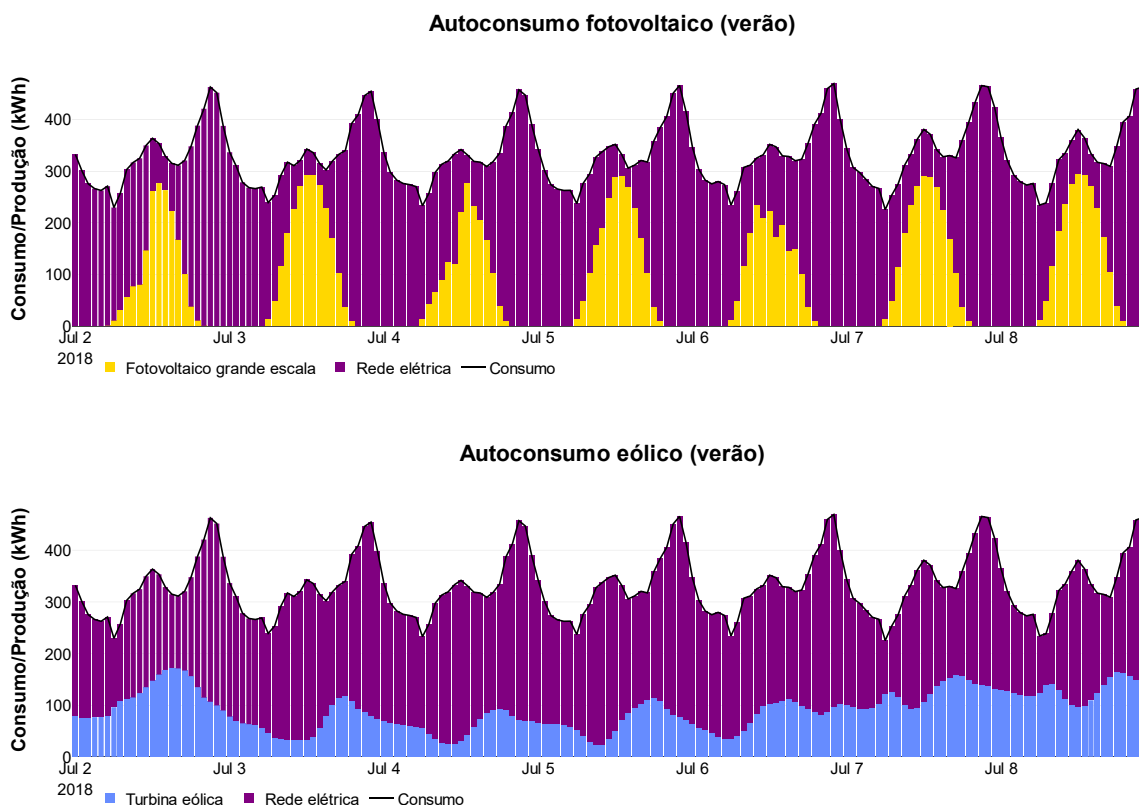
| Tecnologia | Considerando cada tecnologia individualmente | | |
|-------------------------------------|--|--------------------------------|----------------------|
| | Fotovoltaico de grande escala | Fotovoltaico de pequena escala | Turbinas eólicas |
| Potência a instalar | 380 kW | 380 kW | 250 kW |
| Investimento inicial | 300 000 € | 640 000 € | 1 210 000 € |
| Poupança | 2 350 000 € | 2 960 000 € | 2 440 000 € |
| Área ocupada | 7 500 m ² | 3 750 m ² | 6 125 m ² |
| Nível de autossuficiência | 19% | 19% | 20% |
| Redução de emissões CO ₂ | 17% | 17% | 19% |

Como se pode verificar na tabela, a potência instalada nas duas opções de fotovoltaico consideradas é igual pois, uma vez mais, este é o valor que corresponde à supressão dos consumos sem a existência de qualquer excesso de produção (um regime que pode ser considerado aproximado ao autoconsumo).

No entanto, estas duas opções divergem no custo tendo a opção centralizada um investimento mais reduzido devido ao menor investimento unitário. De facto, as duas opções de fotovoltaico correspondem a configurações diferentes. Ao passo que no caso centralizado existe uma instalação única, de grande dimensão, provavelmente ligada à rede de média tensão, no caso descentralizado trata-se de múltiplas instalações distribuídas pelos diversos pontos de consumo na baixa tensão, em telhados ou terrenos contíguos às habitações. Esta diferença de configurações reflete-se ao nível das áreas utilizadas pois a instalação de uma central fotovoltaica acarreta um maior uso de espaço que uma instalação em telhados.

Na Figura 18 podemos ver os perfis de produção e consumo para a opção fotovoltaico e eólico para uma semana de verão. Apesar de ambos os casos sugerirem a instalação de mais potência renovável, existe já, para cada caso, uma hora do ano em que a produção iguala o consumo. Portanto, potência adicional violaria a premissa de ausência de excedentes de produção.

Figura 18: Perfis de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo produção solar (gráfico de cima) e produção eólica (gráfico de baixo).



À luz do Decreto-Lei 162/2019, esta diferença de configuração impacta ainda os custos de operação de um sistema para autoconsumo, através das tarifas de rede³⁵. A energia produzida numa central de grande dimensão teria necessariamente de ser transmitida nas redes de média e baixa tensão até aos pontos de consumo da freguesia. Por outro lado, sistemas distribuídos necessitam muitas vezes de apenas da rede interna do prédio onde estão instalados o que permitiria reduzir alguma pressão sobre a rede de distribuição pública. Uma solução descentralizada permitiria ainda a eletrificação de alguns consumos (por exemplo, fogões e veículos elétricos) sem que sejam necessários investimentos de reforço da rede. Esta diferença leva a que sistemas fotovoltaicos de pequena escala, apesar de mais caros, resultem numa maior poupança. No entanto, é importante ter em conta que estes custos de rede estão diluídos ao longo do tempo de vida dos equipamentos (cerca de 25 anos), o que pode alterar a perceção dos custos globais do sistema. Quando visto do ponto de vista do investimento inicial a configuração centralizada é a opção mais indicada caso a área esteja disponível. De um ponto de vista de custos globais do sistema energético e de uma ocupação de área reduzida a opção distribuída apresenta claras vantagens.

Relativamente à energia eólica, é visível que esta exige uma menor capacidade instalada³⁶ para obter o mesmo nível de autossuficiência. Mas embora esta necessite de uma menor área por unidade de potência, exige um investimento consideravelmente maior. Além disso, tal como no caso de uma central fotovoltaica de grande escala, as poupanças que resultam desta solução são condicionadas pelas tarifas de rede já que também a energia produzida por uma central eólica terá de ser distribuída através da rede até aos pontos de consumo.

Quando todas as tecnologias são consideradas em conjunto, permitindo ao processo de modelação “escolher” qual a solução ótima, esta considera unicamente sistemas fotovoltaicos de pequena escala já que de um ponto de vista meramente económico a melhor solução é aquela que minimiza os custos globais do sistema ao longo do tempo de vida dos equipamentos (25 anos). Consequentemente, uma mistura de tecnologias, condicionada pela impossibilidade de exportar excedentes, aumentaria ainda o investimento necessário sem que daí resultasse um aumento de poupanças.

Introdução de sistemas de armazenamento de energia

Qualquer sistema de energia necessita de algum tipo de tecnologia que permita balancear o consumo e produção a cada momento. No caso dos sistemas com elevadas penetrações de fontes renováveis (o sol e o vento são variáveis no tempo) um dos desafios prende-se com a necessidade de canalizar os excessos de produção.

A rede pública de eletricidade, na prática, serve também para este propósito, exportando excessos de produção para locais onde exista um défice. Caso isto não seja possível, ou desejável, é necessário recorrer a sistemas de armazenamento e por isso foi considerado um cenário em que é possível instalar um sistema de baterias comunitário (caracterizado na Tabela 2).

O sistema resultante do processo de simulação é descrito na Tabela 5 e a Figura 15 ilustra o seu perfil de operação para uma semana de verão (julho). Como se pode verificar, a configuração do sistema muda radicalmente com a introdução de sistemas de armazenamento, combinando agora diferentes tecnologias de produção. Os níveis de produção renovável e, por consequência, de autossuficiência triplicam, sendo que apenas 20% dessa produção é excedente e, por isso, armazenada em baterias. Os resultados ilustram ainda como um sistema mais completo consegue explorar as vantagens de cada solução:

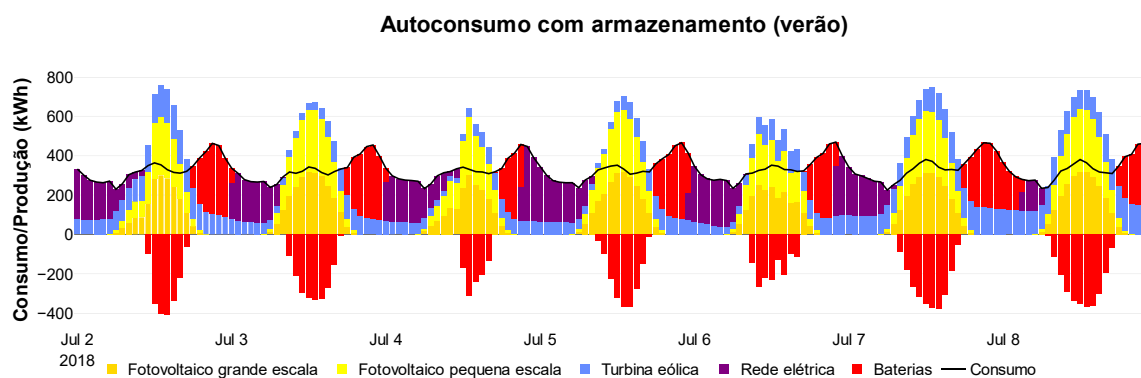
- Os sistemas fotovoltaicos de pequena escala suprem diretamente consumos na baixa tensão.
- O sistema fotovoltaico de grande escala supre consumos diurnos quando os sistemas pequenos são insuficientes e armazena o seu excedente nas baterias para que seja consumido durante a noite.
- A turbina eólica assume um papel semelhante ao fotovoltaico de grande escala, se bem que com uma maior produção durante a noite que será consumida na baixa tensão.

Contribui para isto também a complementaridade sazonal já referida no capítulo de caracterização da freguesia de São Luís, com os meses do ano com produção solar mais reduzida a corresponder a meses de maior produção eólica e vice-versa.

Tabela 5: Resultados para um cenário onde se considera três tecnologias de produção e uma de armazenamento de energia em simultâneo. A inclusão de baterias permite alcançar um nível de autossuficiência três vezes superior aos valores relatados na Tabela 4, com a instalação de cerca de 1 MW de capacidade renovável (versus 250-380 kW).

| Considerando as várias tecnologias em conjunto com armazenamento | | | | |
|--|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| Tecnologia | Fotovoltaico de grande escala | Fotovoltaico de pequena escala | Turbinas eólicas | Sistema de baterias |
| Potência a instalar | 410 kW | 410 kW | 250 kW | 0.52 MW/ 3.14 MWh |
| Investimento inicial | 5 130 000 € | | | |
| Poupança | 7 920 000 € | | | |
| Área ocupada | 8 200 m ² | 4 100 m ² | 6 125 m ² | 335 m ² |
| Nível de autossuficiência | 62% | | | |
| Redução de emissões CO ₂ | 56% | | | |

Figura 19: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo produção solar e eólica, com o apoio de um sistema de baterias. Durante o dia verificam-se excedentes de produção que são armazenados e mais tarde consumidos.



Tal como esperado, um sistema com esta configuração implica um investimento inicial muito maior (mais de 5 milhões de euros). Apesar de este aumento não ser acompanhado em igual proporção pelos custos evitados, o nível de autossuficiência e reduções de emissões alcançados são muito superiores.

Possibilidades para uma freguesia de Balanço Elétrico Nulo (BEN)

O segundo cenário considerado consiste em assumir que a freguesia de São Luís tem um balanço energético nulo. Tal como explicitado no glossário deste documento, uma freguesia BEN implica que, em termos anuais, praticamente todo o seu consumo tenha sido suprido através de produção de energia renovável local. Importa sublinhar que, num cenário BEN, a energia que é exportada e consumida em outros locais fora da freguesia é também contabilizada para efeitos de autossuficiência.

O que diferencia estes cenários dos anteriores prende-se com a imposição de níveis de autossuficiência de 100%, ao passo que nos cenários de autoconsumo a autossuficiência atingiu apenas valores entre 20% e 62%. Porque este objetivo é bastante mais exigente do ponto de vista tecnológico, a imposição de um máximo de duas turbinas não foi aqui considerada.

Para atingir este objetivo foram testadas quatro estratégias diferentes:

- **Sistema isolado:** nesta estratégia considera-se que São Luís é totalmente autónoma e autossuficiente e que o seu sistema elétrico está desconectado da rede elétrica nacional. Neste caso a freguesia pode ser vista como uma ilha energética, tendo de ser capaz de balançar o consumo e produção a cada instante.
- **Sistema isolado com baterias:** idêntica à estratégia 3, mas considerando sistemas de armazenamento de energia para gerir o balanço entre consumo e produção a cada instante.
- **Sistema integrado na rede:** nesta estratégia promovem-se as fontes renováveis economicamente mais rentáveis, sendo que se atribui à rede elétrica nacional um papel equivalente ao de uma bateria de grande dimensão, sempre disponível para acomodar excedentes de produção ou suprir consumos quando a produção renovável é insuficiente.
- **Sistema integrado na rede com baterias:** idêntica à estratégia anterior, mas considerando sistemas de armazenamento de energia que reduz a dependência da rede para gerir o balanço entre consumo e produção a cada instante.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da simulação de cada uma das estratégias consideradas em termos de investimento inicial, dependência da rede externa e potência instalada de cada tecnologia. A atual legislação e operação da rede elétrica está ainda longe de ser compatível com o conceito de uma freguesia BEN³⁷. Dito isto, optou-se por apenas indicar o investimento necessário para a concretização de uma freguesia BEN sem indicar a respetiva poupança.

Uma primeira conclusão geral que pode ser retirada é que, tal como no cenário anterior, todas as estratégias simuladas consideram uma combinação das diferentes tecnologias renováveis. Por outro lado, importa sublinhar, novamente, que a configuração do sistema não é apenas determinada pelo investimento inicial em tecnologia, mas também pelos custos inerentes à operação da rede elétrica.

Tabela 6: Resultados para quatro estratégias para alcançar um Balanço Elétrico Nulo (BEN). Os termos “integrado” e “isolado” correspondem na interligação ou separação entre a freguesia de São Luís e a rede elétrica nacional.

| Estratégia | Investimento inicial | Energia importada | Energia exportada | FV de grande escala | FV de pequena escala | Eólico | Baterias |
|------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------|----------------------|
| Sistema isolado | 33 040 000 € | - | - | 2740 kW | 380 kW | 6 250 kW | - |
| Sistema isolado + baterias | 16 480 000 € | - | - | 2740 kW | 1 170 kW | 1 250 kW | 400 kW/ 8 000 kWh |
| Sistema integrado | 4 760 000 € | 29 % | 31 % | 270 kW | 540 kW | 750 kW | - |
| Sistema integrado + baterias | 6 310 000 € | 15 % | 17 % | 730 kW | 510 kW | 500 kW | 400 kW/ 2 760 kWh |

Uma freguesia isolada

Garantir a todo o instante um equilíbrio entre o consumo e a produção requer planeamento e coordenação em qualquer rede elétrica. No entanto, esta tarefa torna-se praticamente impossível num sistema pequeno e isolado alimentado por fontes variáveis no tempo e cuja produção não é controlável.

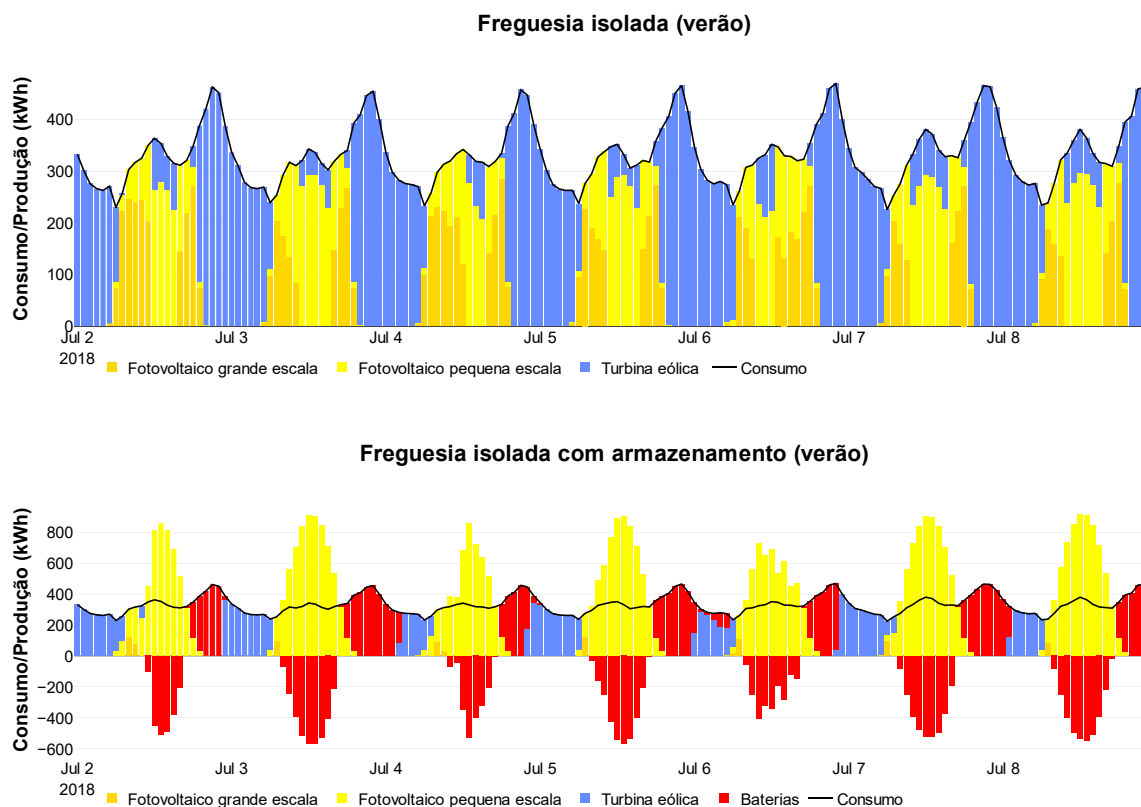
Para lidar com esta questão, e porque este cenário constitui uma hipótese remota, considerou-se que os sistemas renováveis conseguem regular a sua produção, dentro dos limites permitidos pelo recurso. Na prática, este é o único mecanismo disponível para operar um sistema isolado sem armazenamento.

Os resultados para as duas estratégias de sistemas isolados demonstram a dificuldade técnica que é tornar São Luís numa freguesia autossuficiente sem o apoio de uma rede elétrica de maior dimensão. Este contexto obriga a um sistema sobredimensionado, com a instalação de potências consideravelmente mais elevadas, e por isso bastante mais dispendioso.

Por outro lado, a presença de baterias facilita esta gestão, permitindo reduzir os custos em cerca de 50% (16 milhões de euros), pois apesar de promover ligeiramente a presença de tecnologia fotovoltaica (+800 kW) a presença de turbinas eólicas é consideravelmente reduzida (-5000 kW).

Na Figura 20 podemos ver os perfis de produção e consumo para as estratégias consideradas de uma freguesia isolada para uma semana de verão (julho). É possível verificar que na ausência de baterias o consumo noturno é, naturalmente, suprido pela produção eólica, sendo que estes sistemas são desligados sempre que a produção solar é suficiente. A instalação de uma bateria comunitária reduz consideravelmente a necessidade de produção eólica (que é mais dispendiosa) armazenando produção solar excedente durante o dia.

Figura 20: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo um sistema elétrico isolado com produção solar e produção eólica e a ausência (em cima) e a inclusão (em baixo) de um sistema de baterias.



No entanto, importa sublinhar que mesmo o cenário com menos potência instalada implica uma ocupação considerável de terreno para a instalação de sistemas renováveis:

- 31 250 m² (3.1 ha) para a instalação de 5 turbinas eólicas.
- Cerca de 55.000 m² (55 ha) para uma grande central fotovoltaica, ou seja, a totalidade do terreno disponível da Pedreira.
- Entre 2 e 25% dos telhados existentes, dependendo do posto de transformação.

Importa referir que o sistema de armazenamento considerado ocuparia apenas 850 m², uma área bastante reduzida quando comparado com as restantes tecnologias.

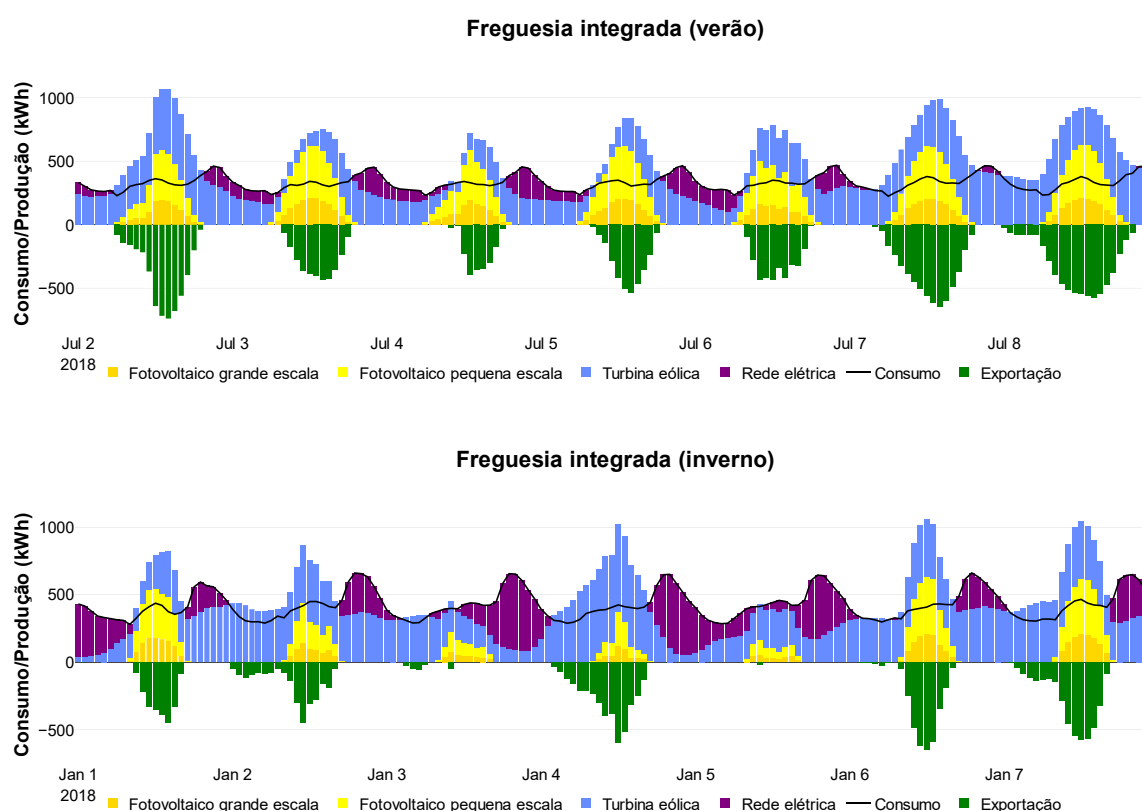
Uma freguesia a operar isoladamente da restante rede implica um sistema energético extensamente sobredimensionado. Como as fontes renováveis são variáveis no tempo, o sistema tem de poder suprir o consumo em momentos em que estes recursos são pequenos ou inexistentes, o que leva, necessariamente, à conclusão de que, sem armazenamento, não seria possível.

Uma freguesia conectada

Quando se considera que a freguesia de São Luís está integrada na rede elétrica nacional, o investimento, as potências a instalar e as áreas a ocupar reduzem drasticamente quando comparado com o cenário anterior. As simulações realizadas sugerem uma aposta equilibrada entre produção fotovoltaica (cerca de 810 kW distribuídos entre os telhados de São Luís e o terreno da Pedreira) e eólica (750 kW, três turbinas), com um investimento total de 4.76 milhões de euros.

Apesar da produção renovável igualar o consumo total da freguesia ao fim do ano, é necessário que a rede elétrica supra 29% do consumo através de importações e receba 31% de produção renovável excedente (exemplo de uma semana de verão e inverno na Figura 21). Será, portanto, preciso garantir que a rede elétrica tem a capacidade e disponibilidade para receber esta exportação de eletricidade. Neste sentido, é preciso ter em conta que a existência de uma quantidade considerável de excedentes pode implicar investimentos avultados no reforço da infraestrutura da rede elétrica (não contemplados neste trabalho).

Figura 21: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo um sistema com balanço elétrico nulo (BEN) baseado em produção solar e eólica. Verifica-se uma quantidade considerável de excedentes de produção renovável durante o dia que são, por sua vez, exportados.

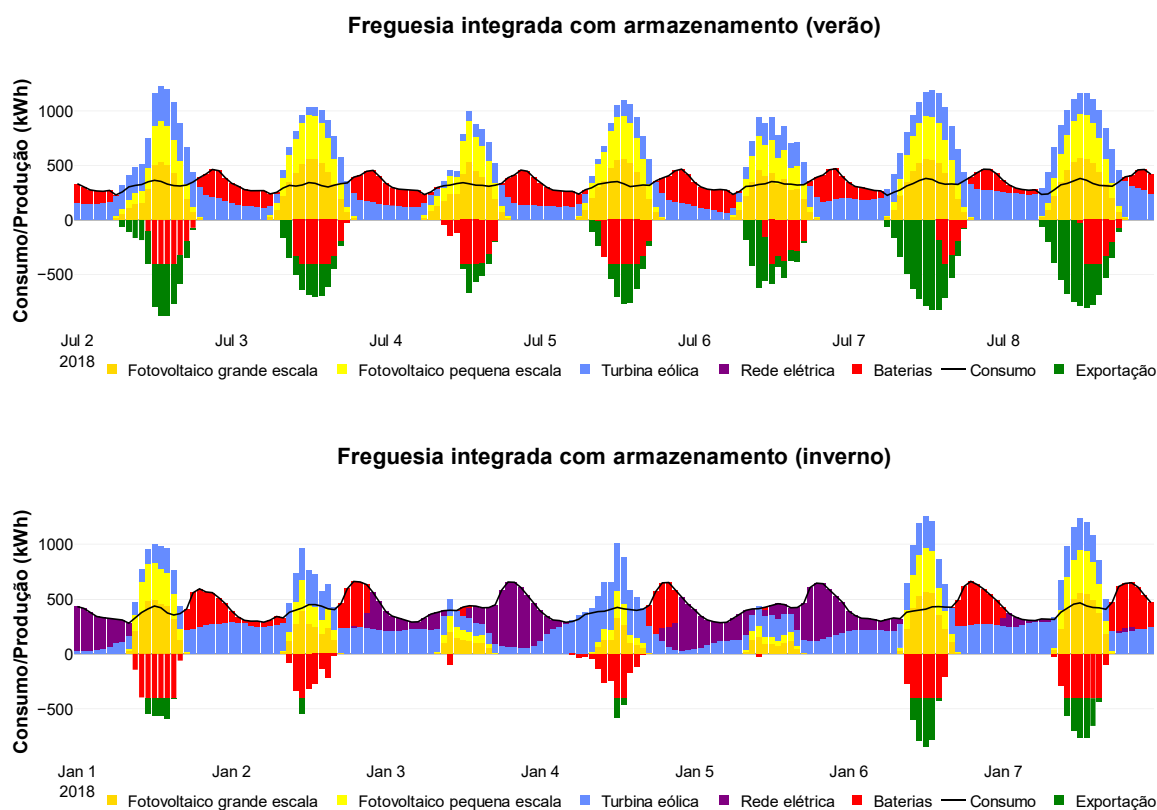


Uma alternativa mais interessante consiste na instalação de um sistema de armazenamento que permita diminuir esta dependência da rede externa. Os resultados demonstram que um sistema de baterias com 2760 kWh de capacidade e 400 kW de potência instalada permitiria reduzir a importação e exportação de eletricidade sensivelmente para metade, exigindo um custo acrescido de 1.55 milhões de euros. Por outro lado, o sistema beneficiaria de uma reconfiguração, substituindo potência eólica (-250 kW) por fotovoltaico (+430 kW). A gestão das baterias seria feita principalmente em coordenação com os

sistemas fotovoltaicos, que são mais económicos. Desta forma, parte dos excedentes de produção seriam canalizados para o carregamento do sistema de baterias que, por sua vez, é descarregado justamente nos períodos de pico de consumo no final da tarde.

Como se pode verificar na Figura 22, tanto numa semana de verão como de inverno uma parte do excesso de produção fotovoltaica é armazenado em baterias para consumo nos períodos noturnos, nos quais a geração eólica é insuficiente. No entanto, é de notar que na semana de verão a importação de eletricidade da rede se anula por completo passando a freguesia a operar de forma parcialmente autónoma, pois embora não use a rede para suprir os seus consumos continua a exportar energia através desta para garantir que opera num regime BEN.

Figura 22: Perfil de produção e consumo para uma semana de verão (julho) assumindo um sistema elétrico isolado com balanço elétrico nulo (BEN) com produção solar e produção eólica. Verifica-se uma quantidade considerável de excedentes de produção renovável durante o dia que são exportados.



É importante também referir que este sistema de armazenamento foi desenhado apenas para apoiar a autossuficiência da freguesia de São Luís. No entanto, existem fontes adicionais de rendimento que devem ser consideradas e talvez justifiquem uma aposta num sistema de maior potência, tal como o fornecimento de serviços de rede (por exemplo, para absorver/compensar picos de produção ou consumo). Outro elemento a considerar seria na utilização das baterias no apoio à integração de veículos elétricos na rede local, através de dois mecanismos:

- Mitigar picos de consumo gerados pelo carregamento de veículos elétricos.
- Operando o sistema enquanto estação de troca de baterias³⁸.

Por fim, importa voltar a sublinhar que os custos apresentados se referem unicamente ao investimento inicial relativo à compra dos equipamentos. Existirão, portanto, outros custos decorrentes do seu uso e da operação da rede elétrica.

5. Financiamento e modelos de gestão

No capítulo anterior foram sugeridas diversas configurações para o sistema energético que procuram otimizar o retorno de um potencial investimento em tecnologia. Um dos resultados transversais a todos os cenários é que o investimento necessário aumenta quanto maior a produção renovável pretendida. Consequentemente, a definição dos modelos de financiamento e gestão para catalisar a transição energética em São Luís são de extrema importância.

Inevitavelmente, formas de financiamento e organização estão intimamente relacionadas e a sua definição deve ser uma tarefa da exclusividade da comunidade de São Luís. Não obstante, o presente trabalho pode apresentar diversas possibilidades para resolver estes problemas com o objetivo de contribuir para a discussão.

No capítulo anterior foi referido que os sistemas fotovoltaicos de pequena escala implicam um investimento inicial maior, apesar de poderem resultar numa maior poupança económica e uma rede de distribuição menos sobrecarregada. No entanto, importa referir que em termos de implementação, esta tecnologia permitiria também que a aposta numa grande quantidade de sistemas fosse feita de forma parcelada e progressiva. Apesar de possível, fazer o mesmo com sistemas de maior dimensão é bastante mais complicado.

No que toca ao financiamento podem-se contemplar dois modelos principais, ambos transversais às várias opções tecnológicas consideradas e que contemplam, ambos, diversas opções:

Financiamento por uma única entidade terceira: uma cooperativa (por exemplo Coopérnico³⁹), empresa ou organismo público avança com o investimento total necessário, sendo proprietário e gestor dos sistemas de produção.

Este modelo é ideal de um ponto de vista técnico (um processo de aquisição e gestão dos sistemas é mais célere e ágil) e remove a necessidade de disponibilização de capital por parte dos cidadãos. No entanto, desvirtua os conceitos de comunidade de energia e autossuficiência, já que configura um cenário de maior dependência face a uma única entidade externa. Importa ainda referir que se o investimento for feito por uma cooperativa, existe a hipótese de os residentes se poderem tornar cooperantes, passando a participar no processo de gestão.

Neste contexto, o investidor/proprietário pode estabelecer um contrato bilateral com uma comercializadora e vender a sua produção. Estudos demonstram que a inclusão de produção renovável e local é um fator cada vez mais determinante para consumidores^{40,41}. Este efeito torna-se ainda mais assinalável quando a sua comercialização é feita por empresas públicas ou cooperativas⁴². Residentes da freguesia poderiam ainda ceder/alugar os seus telhados, caso se decida instalar sistemas fotovoltaicos de pequena escala.

Fica ainda por compreender, na sua totalidade, a viabilidade legal desta comunidade à luz da legislação em vigor: a atual legislação está focada em contextos de proximidade (prédios, condomínios, complexos industriais); mas, por outro lado, está planeada uma revisão do decreto-lei para 2021.

Financiamento coletivo por parte de residentes e/ou entidades de São Luís: um conjunto de cidadãos e/ou organismos públicos e/ou empresas privadas sediadas em São Luís investe coletivamente em sistemas de produção renovável. Este formato é o que mais se adequa a uma comunidade de energia, atribuindo aos seus membros a responsabilidade no processo de planeamento, investimento, gestão e rentabilização dos sistemas de produção. No entanto, este processo pode ser menos ágil ou célere, por dois motivos: i) exige a capacidade de investimento por parte dos membros do coletivo e; ii) requer que estes se organizem coletivamente e acordem sobre os tramites em que o projeto se desenvolve e concretiza. Por outro lado, seria também necessário gerir o balanço entre investimento e retorno dos vários participantes.

Como alternativa ou complemento, as partes interessadas de ambas as modalidades podem recorrer a um empréstimo através de bancos ou empresas de *crowdlending* (por exemplo, GoParity⁴³).

6. Conclusões

Ao longo deste trabalho é descrita uma metodologia de modelação e simulação de sistemas de energia, seguido de uma caracterização da freguesia de São Luís, terminando com os resultados de várias simulações que procuram explorar possíveis caminhos para a transição energética da freguesia de São Luís.

De seguida, é apresentada uma síntese das principais conclusões a retirar deste trabalho:

- Modelar e simular de sistemas de energia requer um leque variado de dados e informação. Neste processo deve-se privilegiar o contacto e colaboração com as comunidades.
- Alcançar um maior nível de autossuficiência implica necessariamente um maior investimento, pois requer a aquisição de um maior número de sistemas de produção renovável e, possivelmente, de armazenamento. De facto, a transição energética implica investimentos consideráveis, mas com retorno económico, social e ambiental no médio prazo.
- Quando se considera a impossibilidade de exportar eventuais excedentes de produção para pontos de consumo vizinhos, os sistemas de armazenamento tornam-se essenciais para alcançar níveis de autossuficiência interessantes. No caso de São Luís, considerar um sistema de baterias comunitário permitiria aumentar este valor de 17-19% para 62%.
- Converter São Luís numa freguesia de Balanço Elétrico Nulo (BEN), onde todo o consumo é suprido por produção renovável local, é tecnologicamente possível. Alcançar este balanço a cada instante, mesmo com o apoio de baterias, é bastante exigente e dispendioso, com uma instalação excessiva de sistemas de produção. Caso este balanço seja feito em termos anuais, com a rede elétrica a receber eventuais excedentes e a fornecer eletricidade em períodos de carência, a capacidade renovável necessária (e, por isso, o investimento necessário) reduz-se em dois terços.
- Num cenário BEN, a instalação de baterias resulta num sistema mais equilibrado e consideravelmente menos dependente da rede elétrica nacional. Esta opção exige um acréscimo considerável do investimento (+33%, ou +1.5 milhões de euros), sem que as poupanças resultantes cresçam na mesma proporção. Contudo, as baterias podem gerar receitas adicionais através, por exemplo, da provisão de serviços de apoio à rede elétrica ou enquanto promotor de mobilidade elétrica. Por outro lado, os sistemas de armazenamento têm impactos ambientais que importa considerar.
- Este trabalho aborda unicamente o consumo elétrico, que representa apenas uma pequena parte do consumo energético de São Luís. No entanto, todos os cenários colocados sugerem a existência de uma área considerável de telhados por explorar, além de vários terrenos de mato que não foram considerados. O mesmo poderia não acontecer caso se tratasse de um contexto urbano, onde o consumo está mais densificado e a área disponível para produção renovável é menor.

- Todos os cenários coletivos colocados no presente trabalho são compatíveis com o conceito geral de Comunidade de Energia, onde cidadãos, pequenas empresas e poder local se juntam, como utilizadores finais de energia para cooperar na geração, consumo, distribuição, armazenamento e agregação de energia proveniente de fontes renováveis ou oferecer serviços de eficiência energética ou gestão da procura⁴⁴. No entanto, não quer isso dizer que os cenários aqui apresentados sejam, necessariamente, viáveis à luz da legislação em vigor (Decreto-Lei 162/2019). Uma das problemáticas prende-se com a noção de proximidade entre consumo e produção não estar, de forma deliberada⁴⁵, explicitamente definida no decreto. Isso faz com que não seja possível avaliar se a instalação uma central fotovoltaica de grande escala, localizada fora da aldeia (na pedreira), é possível.

Notas, comentários e referências

¹ Tarifas e preços para a energia elétrica e outros serviços em 2020, ERSE. Disponível em <https://www.erse.pt/media/xcbw23n2/tarifaspres%C3%A7os2020.pdf>

² <https://proseu.eu/>

³ Luís Pedro Dias Cachinho, “Estudo de potencial para comunidades de energia renovável em Portugal: o caso da aldeia de São Luís”, Dissertação de Mestrado, 2017, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/29987>

⁴ <https://www.calio.pe>

⁵ <https://calliope.readthedocs.io/>

⁶ <https://www.callio.pe/model-gallery/>

⁷ <https://www.pordata.pt/Municipios/Consumo+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-25>

⁸ Existem estudos que demonstram ser possível extrair consumos de instalações individuais a partir de dados agregados quando o nível de agregação é reduzido, o que ameaça a privacidade dos consumidores de energia. Por exemplo: Niklas Buescher, [Two Is Not Enough: Privacy Assessment of Aggregation Schemes in Smart Metering](#) (Proceedings on Privacy Enhancing Technologies, 2017).

⁹ Daniel Rocha, [Bater à porta do vizinho para comprar electricidade](#) (Jornal Público, 22 novembro 2019)

¹⁰ <http://www.waseenergy.pt/pt/>

¹¹ <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/56-nordex-n29>

¹² <https://www.ingetteam.com/Pressroom/Corporate/tabid/1574/articleType/ArticleView/articleId/2248/Ingeteam-commissions-a-battery-energy-storage-system-for-a-plant-in-the-United-Kingdom.aspx>

¹³ Valor médio estimado considerando [50 TWh de consumo anual](#) e através de [níveis de emissões relatados pela APREN](#).

¹⁴ Considerou-se 17% de eficiência do painel fotovoltaico SunPower P17 e 85% de eficiência de sistema (devido a perdas nos cabos ou por efeito de temperatura).

¹⁵ <https://us.sunpower.com/sites/default/files/media-library/data-sheets/ds-sunpower-p17-355-commercial-solar-panels.pdf>

¹⁶ <http://www.suncyclopedia.com/en/area-required-for-solar-pv-power-plants/>

¹⁷ O investimento unitário para sistemas fotovoltaicos foi indicado por agentes do setor.

¹⁸ Valor obtido através da plataforma ENVI-PV, http://viewer.webservice-energy.org/project_iea/

¹⁹ Este valor compara a potência nominal com a potência máxima teórica, de acordo com o limite de Betz (https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine#Efficiency), para um vento de 15 m/s. Na prática, a operação de uma turbina depende do modelo considerado e está descrita numa curva de potência (<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/56-nordex-n29#powercurve>).

²⁰ Foi considerado um espaçamento entre turbinas equivalente a três vezes o diâmetro do seu rotor. http://energypedia.info/wiki/Layout_of_Wind_Projects

²¹ O valor indicado sugere o espaçamento ideal entre turbinas, de forma a maximizar a produção agregada. A área por potência instalada efetivamente ocupada por turbinas eólicas é consideravelmente inferior.

²² [Wind Technologies Market Report 2018](#), Department of Energy (USA).

²³ R. H. Crawford, [Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield](#), (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009).

²⁴ Por simplificação, assumiu-se que a área ocupada é proporcional à capacidade do sistema de baterias, usando como referência o projeto descrito em https://www.yurika.com.au/_data/assets/pdf_file/0008/733490/Townsville-Community-Scale-Battery-Storage-Project.pdf

²⁵ Custos referentes a 2023, 30% inferiores aos de 2018, apresentados em [Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage](#), National Renewable Energy Laboratory (USA), 2019.

²⁶ Maarten Messagie, [Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles](#) (Transport & Environment, 2016).

²⁷ Ao contrário de sistemas de produção, as emissões de CO₂ por kWh dizem respeito não à energia produzida, mas sim à capacidade da bateria.

²⁸ <http://www.soda-pro.com/>

²⁹ <https://www.renewables.ninja/>

³⁰ http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/cartografia_de_uso_e_ocupacao_do_solo_cos_clc_e_copernicus/

³¹ https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao

³² Escolher subestação no mapa disponibilizado em <https://edp-distribuicao-rede.wntech.com/Nut/19>

³³ http://www.dgterritorio.pt/noticias/carta_de_uso_e_ocupacao_do_solo_para_2018/

³⁴ O que resultaria numa necessidade geral de exportar excedentes de produção, pois é expectável que os padrões de consumo e de potencial renovável, principalmente solar, sejam relativamente homogéneos.

³⁵ O decreto-lei define que à energia produzida por um sistema para autoconsumo apenas se aplicam as tarifas de acesso às redes correspondentes aos níveis de rede que essa mesma energia percorre.

³⁶ Para uma mesma potência, uma turbina eólica funciona mais horas e produz mais eletricidade ao fim de um ano que um sistema fotovoltaico.

³⁷ O próprio conceito de comunidade energética e a sua contextualização na legislação atual estão ainda em desenvolvimento.

³⁸ Uma estação de troca de baterias, ou *battery swap stations*, é um local onde veículos elétricos podem substituir a sua bateria descarregada por outra carregada. A bateria recolhida é então recarregada e mais tarde colocada noutro veículo. Um exemplo em <https://insideevs.com/news/392660/nio-battery-swap-loved-by-customers/>

³⁹ <https://www.coopernico.org/>

⁴⁰ Esther Mengelkamp et al., [The value of local electricity - a choice experiment among German residential customers](#) (Energy Policy, 2019)

⁴¹ Chunbo Ma et al., [Warm glow from green power: evidence from Australian electricity consumers](#) (Journal of Environmental Economics and Management, 2016)

⁴² Jens Rommel et al., [Quality uncertainty and the market for renewable energy: evidence from German consumers](#) (Renewable Energy, 2016)

⁴³ <https://goparity.com/pt-pt>

⁴⁴ <https://www.rescoop.eu/definitions>

⁴⁵ Margarida Ramires, [autoconsumo e comunidades de energia](#) (Renováveis Magazine, Edição 41)