



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Diogo Gouveia dos Santos Abreu

MITIGAÇÃO DO CONSUMO ELÉCTRICO URBANO COM RECURSO A ENERGIAS RENOVÁVEIS

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na especialização de Energia, orientada pelo Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura e apresentada ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Maio de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MITIGAÇÃO DO CONSUMO ELÉCTRICO URBANO COM RECURSO A ENERGIAS RENOVÁVEIS

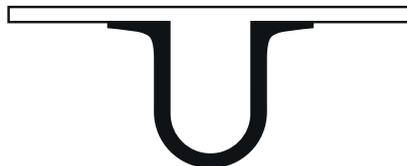
Diogo Gouveia dos Santos Abreu

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na especialização de Energia, orientada pelo Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura e pelo Engenheiro Luís António Santos Gama Silva e apresentada ao Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Maio de 2019



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Agradecimentos

“Don’t overestimate yourself. But don’t underestimate who you could be.”

Jordan B. Peterson

Em primeiro lugar, uma palavra muito especial para toda a minha família, mas, em particular, para os meus queridos pais: Ana e Luís. Não apenas por me terem dado asas, mas principalmente por me terem ensinado a voar. Por serem uma constante fonte de amor, apoio e ensinamentos. Por serem a principal razão de eu ser quem sou.

Em seguida, um obrigado aos caríssimos Engenheiro Francisco Ribeiro e Engenheiro Luís Gama, os quais foram o verdadeiro cérebro deste projecto. Por confiarem em mim ao me terem lançado este apetitoso desafio e por toda a ajuda prestada.

Não posso também deixar de agradecer ao excelentíssimo Professor Doutor Pedro Moura. Pelos conselhos, pela paciência e pelo conhecimento que me transmitiu ao longo de toda esta etapa. Por toda a disponibilidade demonstrada desde o início.

E porque a felicidade só existe quando partilhada, quero também deixar uma palavra às diversas amizades que fui construindo ao longo deste percurso. Àqueles que, mais do que simplesmente colegas, foram amigos de curso. À aventura incrível que foram os *SuperOhms*, à divertida e imprevisível *Squad*. Mas especialmente a quatro extraordinárias pessoas que me acompanharam (e sempre acompanharão) desde o meu longínquo ano de caloiro.

Um obrigado aos Neuróticos, por estarem sempre lá ao longo destes anos. Por serem o caule da minha raiz: Coimbra.

Uma das experiências que mais me marcou, a variadíssimos níveis, ao longo desta caminhada foi, sem qualquer dúvida, o ano em que estudei em Bolonha, Itália. Não poderia ter pedido mais da minha experiência Erasmus: desde as incríveis pessoas que conheci, aos sítios maravilhosos que visitei, às vivências únicas das quais tive hipótese de fazer parte. Memórias que nunca esquecerei. *Dal profondo del mio cuore, grazie mille.*

Finalmente, em jeito de homenagem, deixo uma saudação muito especial ao verdadeiro cenário onde toda esta peça se desenrolou. À enormíssima República da Praça e a todos os seus actuais e antigos membros. Por me ter proporcionado esta maravilhosa oportunidade, por todo o seu carinho e amizade e por ser como uma segunda casa.

Aos meus avôs, Abel e Arsénio...

Viva a República da Praça!

“Os que por falta de água nunca passaram sede.”

Resumo

Nos dias de hoje, as energias renováveis desempenham, cada vez mais, um papel fundamental no paradigma energético a nível mundial, seja por razões ambientais, económicas ou tecnológicas. À escala nacional, destaca-se claramente a energia solar fotovoltaica como aquela que apresenta maior potencial de crescimento, tendo em conta não apenas as condicionantes meteorológicas a que Portugal se encontra sujeito, mas também o estado de implementação actual desta tecnologia no mercado português.

Esta dissertação teve como principal objectivo estudar a viabilidade energética e financeira da introdução de sistemas baseados em fontes de energias renováveis, mais concretamente de sistemas de produção fotovoltaica, em edifícios do sector residencial, examinando de que forma é que instalações deste tipo permitem ou não mitigar os consumos de energia eléctrica em ambientes urbanos.

Foi realizada uma pesquisa acerca da constante evolução desta tecnologia, com destaque para os níveis de rendimento energético progressivamente mais elevados das células solares e para o contínuo decréscimo dos custos iniciais de investimento, passando por uma revisão das actuais regras legislativas.

Foram analisadas as principais formas de integração em edifícios, tendo este trabalho como foco o edifício da República da Praça, situado no centro histórico de Coimbra. Foi efectuada uma análise completa das suas características constructivas, necessidades energéticas e das condições apresentadas para a aplicação de módulos fotovoltaicos.

Fez-se um estudo integral de três cenários distintos relativamente a potenciais sistemas fotovoltaicos a aplicar no edifício em causa, fazendo uma comparação dos mesmos do ponto de vista da viabilidade energética através do ajustamento de diversas variáveis, desde o número de painéis fotovoltaicos à hipótese de utilização de baterias de armazenamento.

Avaliaram-se as diversas opções de uma perspectiva económico-financeira e, tendo em conta a viabilidade do investimento a partir deste ponto de vista, calcularam-se parâmetros como a poupança financeira estimada e o tempo de retorno associado a esse mesmo valor, demonstrando que este tipo de tecnologia é totalmente viável, apesar dos elevados investimentos no momento inicial.

Concluindo, foi possível aferir que a aplicação de sistemas deste tipo promove, indubitavelmente, uma diminuição clara dos consumos eléctricos de energia proveniente da rede pública, melhorando os índices de auto-sustentabilidade dos edifícios e permitindo poupanças económico-financeiras significativas aos utilizadores. No entanto, a energia fotovoltaica continua a exigir investimentos iniciais de elevada grandeza, pelo que, actualmente, este tipo de tecnologia ainda não se encontra tão vastamente acessível como seria desejável.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Autoconsumo, Dimensionamento, Impacto Económico, Sector Residencial.

Abstract

Nowadays, renewable energy plays an increasingly important role in the global energy paradigm, whether it is for environmental, economic or technological reasons. At the national level, photovoltaic solar energy is clearly the one with the greatest growth potential, taking into account not only the meteorological conditions to which Portugal is subject, but also this technology's current implementation state in the Portuguese market.

This dissertation's main goal was to study the energetic and financial viability of the introduction of renewable energy sources based systems, more specifically of photovoltaics, in buildings of the residential sector, examining how these installations allow or not the mitigation of electricity consumption in urban environments.

Research has been carried out on the constant evolution of this technology, with emphasis on the progressively higher levels of solar cells energetic efficiency and the continuous decline in initial investment costs. A revision of the current legislative rules was also made.

The main forms of building integration were analyzed. The main focus of this dissertation was the República da Praça's building, located in Coimbra's historic center. A complete analysis of the building was made, taking into account its construction characteristics, its energy needs and the its existing conditions for the application of photovoltaic modules.

A complete study was carried out, consisting of an analysis of three different scenarios. This study looked into potential photovoltaic systems to be applied in the specified building, comparing them from the energetic viability point of view by adjusting several variables: from the number of photovoltaic panels to be used to the hypothetical usage of storage batteries.

The various options were evaluated from an economic-financial perspective and, taking into account the viability of the investment from this point of view, parameters like the estimated financial savings and the expected time of return were calculated, demonstrating that this type of technology is totally viable, despite the high investments in the initial moment.

In conclusion, it was possible to verify that the implementation of such systems undoubtedly promotes a clear reduction of the electric energy consumptions coming from the public network, improving buildings' self-sustainability indices and allowing significant economic-financial savings to the users. However, photovoltaics continue to require very high initial investments, so, as of today, this type of technology is not yet as widely available as it would be desirable.

Palavras-chave: Photovoltaics, Auto-consumption, Sizing, Economic Impact, Residential Sector.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Acrónimos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	1
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Estado da Arte (<i>State of the Art</i>)	4
2.1 Situação Portuguesa	4
2.1.1 Potencial	4
2.1.2 Produção Eléctrica	4
2.2 Viabilidade Económica	6
2.2.1 Custos de Investimento	6
2.3 Tecnologias Existentes	7
2.4 O Fotovoltaico em Edifícios	9
2.4.1 Formas de Integração	9
2.4.2 Desajuste entre Geração e Consumo	11
3 Legislação e Licenciamento	14
3.1 Legislação Anterior	14
3.2 Legislação Actual	14
3.2.1 Pagamento da Energia Proveniente das UPAC	15
3.2.2 Outros Artigos Importantes	16
4 Estudo de Caso	19
4.1 O Edifício	19
4.2 Diagrama de Carga	20
4.2.1 Perfil de Utilização	22
4.3 Facturação Energética	22
4.3.1 Escolha do Tarifário	23
4.4 Localização dos Painéis	25

5	Dimensionamento do Sistema PV	28
5.1	Critérios de Dimensionamento	28
5.1.1	Dilemas entre Critérios	28
5.2	Dimensionamento	29
5.2.1	Consumo Anual	29
5.2.2	Local de Aplicação	31
5.2.3	Módulos Fotovoltaicos	33
5.2.4	Cenário com Armazenamento de Energia	37
6	Análise de Resultados	39
6.1	Poupança Financeira e Tempos de Retorno	39
7	Conclusões e Trabalho Futuro	41
	Referências Bibliográficas	43
	Anexos	46

Lista de Figuras

1	Radiação Solar Média Anual na Europa (em kWh/m ²) [1]	4
2	Repartição da Produção Eléctrica em Portugal em 2018 (em %) [2]	5
3	Evolução da Potência Global Instalada com Recurso a FER [3]	5
4	Evolução do Custo do Módulo PV (em \$/Watt) entre 2014 e 2018 [4]	6
5	Evolução da Eficiência de Conversão das Tecnologias de Células PV [5]	7
6	Painel Fotovoltaico Instalado no Telhado de um Edifício [8]	9
7	<i>Solar Roof</i> da Tesla (Telhas Solares) [9]	9
8	Fachada de um Edifício Composta por Células Solares [10]	10
9	Solar Gaps [11]	10
10	<i>Duck Curve</i> ou “Curva do Pato” [12]	12
11	Edifício da República da Praça	19
12	Instalação do Monitor de Consumo Energético	21
13	Variação do Consumo Energético (e Respectivo Valor Pago) do Edifício ao Longo de 12 Meses.	23
14	Vista Aérea do Edifício (Direcção Sul-Norte) [23]	26
15	Vista de Satélite do Edifício (Direcção Norte-Sul) com a Utilização da Ferramenta <i>Online Protractor</i> [24] [25]	32
16	Esboço da Estrutura Metálica a Partir de Vista de Satélite [24] [26]	33
17	Dados Meteorológicos Importados Relativos à Cidade de Coimbra [27]	34
18	Variáveis Respeitantes à Montagem e Alinhamento do Sistema PV [23]	34
19	Cenário A: 6 Módulos Fotovoltaicos (1,68 kWp) e Inversor de 1,5 kW	35
20	Cenário B: 8 Módulos Fotovoltaicos (2,24 kWp) e Inversor de 2 kW	36
21	Cenário C: 6 Módulos Fotovoltaicos (2,24 kWp) e Inversor de 5,2 kW com Acumulador de Iões de Lítio Integrado com Capacidade de 2 kWh	37

Lista de Tabelas

1	Comparação de Diversas Características Entre as Diferentes Tecnologias de Painéis Fotovoltaicos [5] e [7]	8
2	Valores Resultantes da Média Aritmética Simples dos Preços de Fecho do Mercado do OMIE para Portugal e Respectiva Remuneração da Energia Injectada na RESP em 2018 (em c€/kWh) [20]	16
3	Desagregação da Potência Instalada pelos Três Pisos do Edifício	20
4	Dados de Facturação, em Termos de Consumo e Valor Pago, Relativos aos 12 Meses Imediatamente Anteriores ao Início do Projecto.	22
5	Custo dos Diferentes Tarifários da EDP em 2019 (sem IVA) [21]	24
6	Desagregação Mensal do Consumo por Período Horário (em kWh)	24
7	Desagregação Mensal do Consumo por Período Horário (em kWh)	30

Lista de Acrónimos

- **AEMO** - *Australian Energy Market Operator* (Operador do Mercado de Energia Australiano)
- **AGC** - *Automatic Generation Control* (Controlo de Geração Automático)
- **APREN** - Associação Portuguesa de Energias Renováveis
- **CAISO** - *California Independent System Operator* (Operador de Sistema Independente da Califórnia)
- **DGEG** - Direcção-Geral de Energia e Geologia
- **DL** - Decreto-Lei
- **EDP** - Energias de Portugal
- **EIA** - *U.S. Energy Information Administration* (Administração de Informação de Energia dos EUA)
- **EPA** - *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Protecção Ambiental)
- **FCAS** - *Frequency Control Ancillary Services* (Serviços Auxiliares de Controlo de Frequência)
- **FER** - Fontes de Energia Renovável
- **GHG** - *Greenhouse Gases* (Gases de Efeito Estufa)
- **IVA** - Imposto de Valor Acrescentado
- **HPR** - *The Hornsdale Power Reserve Battery Energy Storage System* (Sistema de Armazenamento de Energia de Reserva em Baterias de Hornsdale)
- **IHME** - *Institute for Health Metrics and Evaluation* (Instituto de Métricas e Avaliação de Saúde)
- **IRENA** - *International Renewable Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Renovável)
- **NOAA** - *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos EUA)
- **NREL** - *National Renewable Energy Laboratory* (Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA)
- **PV** - *Photovoltaics* (Fotovoltaico)
- **REN** - Redes Energéticas Nacionais
- **SI** - Sistema Internacional (de Unidades)
- **STC** - *Standard Test Conditions* (Condições Padrão de Teste)
- **UE** - União Europeia

1 Introdução

1.1 Motivação

Num período em que a actualidade é dominada por temas como o combate às alterações climáticas e o rápido avanço da tecnologia, uma das bandeiras que melhor representa ambas estas matérias é o investimento e a aposta em projectos e sistemas de produção eléctrica com recurso a fontes de energias renováveis. Estes, permitem não apenas aumentar a independência energética dos utilizadores, mas também reduzir os níveis de emissão de gases poluentes e obter poupanças económicas significativas. Esta dissertação visa sublinhar o valor incalculável que uma fonte de energia como o Sol representa, por ser uma fonte inesgotável à escala humana e pelo potencial específico que Portugal apresenta no que diz respeito ao aproveitamento desta tecnologia.

No que diz respeito à implementação e utilização de sistemas fotovoltaicos em ambientes urbanos, isto é, em edifícios residenciais, estes sistemas têm-se vindo a revelar como uma mais-valia cada vez maior. Em primeiro lugar, ao longo dos últimos anos, os custos de investimentos têm decaído de forma contínua. Em segundo, existe, desde 2014, legislação que tornou este tipo de investimentos mais rentáveis, uma vez que privilegia o autoconsumo em detrimento da injeção de energia da rede pública, devido ao facto de esta remunerada a um valor muito mais baixo em relação àquele que é pago aos comercializadores pela energia consumida da rede. Por conseguinte, torna-se fundamental dimensionar adequadamente os sistemas de produção fotovoltaica, realizando uma avaliação do seu impacto energético e económico, pois pretende-se minimizar ao máximo a quantidade de energia produzida não consumida. Adicionalmente, de modo a potencializar ao máximo a chamada quota de autoconsumo, em algumas situações, torna-se igualmente pertinente efectuar uma análise das opções de baterias para armazenamento de energia.

Esta dissertação teve, como o seu foco principal e caso de estudo, o edifício da República da Praça, situado no centro histórico da cidade de Coimbra, tendo sido desenvolvida em ambiente empresarial, que resultou de um acordo de estágio entre uma empresa do sector fotovoltaico português, a GPS-Energia, Lda e a Universidade de Coimbra. A celebração deste acordo visou dotar o aluno de capacidades de resolução de problemas reais e consequente ganho de experiência profissional.

1.2 Objectivos

O objectivo principal desta dissertação é estudar a viabilidade energética e financeira de sistemas com base em fontes de energias renováveis em edifícios do sector residencial, mais especificamente de sistemas de produção fotovoltaica. Pretende-se avaliar se, mesmo em situações onde existam orçamentos limitados, a instalação de sistemas fotovoltaicos se apresenta como um investimento adequado e rentável. Neste sentido, esta dissertação propõe-se a realizar um estudo completo constituído por um processo sequencial de diversas tarefas.

Desde logo, tem-se como objectivo realizar um estudo energético do caso de estudo, avaliando as suas necessidades energéticas através, não apenas de uma análise da sua facturação anual, mas também de uma observação atenta do diagrama de carga do edifício, o qual se pretende obter através da monitorização dos consumos ao longo de uma janela temporal adequada. Por outro lado, é importante apreciar as características físicas do próprio edifício, com o intuito de estudar qual a melhor opção para a instalação dos módulos fotovoltaicos, analisando factores como a inclinação e a orientação dos locais apropriados.

Posteriormente, tendo em conta os dados recolhidos, pretende-se efectuar um dimensionamento do sistema fotovoltaico que se adegue às necessidades e consumos de energia do edifício, através da análise de diversos cenários. Serão analisadas situações com diferentes quantidades de módulos fotovoltaicos e respectivas potências instaladas, com e sem armazenamento de energia. Pretende-se avaliar os diferentes cenários de um ponto de vista energético e que permita maximizar a quota de autoconsumo.

Por fim, os diferentes cenários serão avaliados tendo em conta as poupanças financeiras estimadas e respectivos tempos de retorno. Serão igualmente consideradas as restrições económicas a que esta dissertação está sujeita, de modo a escolher a opção que será colocada em prática futuramente.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada e dividida em sete diferentes capítulos. Em primeiro lugar, no Capítulo 1, é feita uma introdução à própria dissertação, explicando a motivação da qual esta resulta e definindo os principais objectivos a que esta se propõe. É ainda feita uma breve descrição do modo como esta se encontra estruturada. No Capítulo 2, é abordado o Estado da Arte, avaliando quais as características que Portugal apresenta no que diz respeito à energia solar fotovoltaica, fazendo uma breve análise dos desenvolvimentos tecnológicos desta tecnologia e respectiva evolução de custos. Olha-se ainda para as principais formas de integração em edifícios existentes, uma vez que é esse o foco da dissertação. Ao longo do Capítulo 3, verifica-se de que forma a Legislação Portuguesa regula todas as instalações de sistemas fotovoltaicas, avaliando de que forma a evolução legislativa afectou, até hoje, o paradigma energético nacional.

Passando de uma análise geral para uma mais específica, o Capítulo 4 trata de analisar diversas questões relativas ao Estudo de Caso, sendo feita uma consideração acerca dos aspectos constructivos do próprio edifício, observando quais as suas necessidades energéticas, avaliando a sua facturação anual e analisando o diagrama de carga quanto à sua variabilidade. Ao longo do Capítulo 5, são avaliados e explorados diferentes cenários possíveis para o Dimensionamento do Sistema PV, com recurso a um *software* de simulação, verificando quais as vantagens e desvantagens energéticas de cada um. Chegando ao Capítulo 6, este trata de realizar uma Análise de Resultados, não apenas de uma perspectiva energética, mas principalmente das consequentes poupanças financeiras, permitindo escolher a opção que mais se adequa ao caso de estudo. Por último, no Capítulo 7, são discutidas e avaliadas as principais Conclusões desta dissertação, tendo em consideração quais os próximos passos a dar num Trabalho Futuro.

2 Estado da Arte (*State of the Art*)

2.1 Situação Portuguesa

Em primeiro lugar, é importante avaliar qual o ponto actual de desenvolvimento em que se encontra Portugal relativamente à energia solar fotovoltaica. Esta avaliação consiste na análise de diversos factores, desde o potencial exibido ao estado de implementação no mercado deste tipo de tecnologia em Portugal.

2.1.1 Potencial

No contexto europeu, devido à sua localização geográfica singular, Portugal possui um elevado potencial no que diz respeito ao possível aproveitamento da energia proveniente do Sol, através da tecnologia fotovoltaica. Esta característica é partilhada apenas com um restrito grupo de países do Sul da Europa, nomeadamente a Espanha, Itália e Grécia (Figura 1).

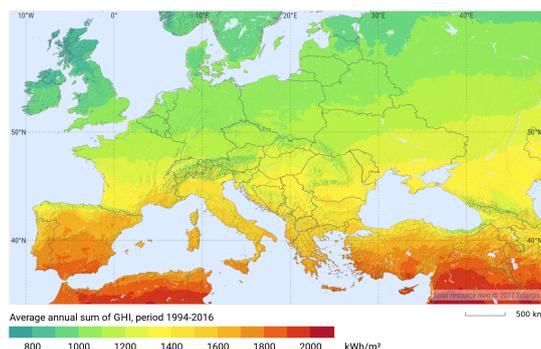


Figura 1: Radiação Solar Média Anual na Europa (em kWh/m²) [1]

O contraste entre Norte e Sul no continente europeu fica evidenciado pelos dados apresentados. Por exemplo, o mesmo painel fotovoltaico, quando instalado em Sevilha e em Estocolmo, irá apresentar graus de rentabilidade muito superiores no primeiro caso. Os valores mais elevados em Portugal Continental verificam-se, igualmente, nas regiões mais a Sul - Alentejo e Algarve - onde se encontra a grande maioria das centrais solares existentes actualmente.

2.1.2 Produção Eléctrica

Em 2018, segundo a Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), a taxa de incorporação de Fontes de Energia Renovável (FER) na produção total de energia eléctrica em Portugal foi de 53,1% [2]. Estes dados evidenciam o papel fundamental que as FER possuem actualmente, sendo responsáveis por mais de metade da produção energética nacional (Figura 2).

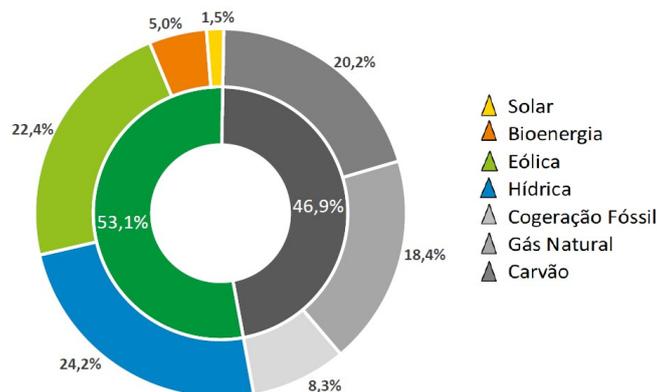


Figura 2: Repartição da Produção Eléctrica em Portugal em 2018 (em %) [2]

Face ao ano anterior de 2017, o aumento da produção renovável foi de 26% [2]. Este aumento deveu-se principalmente, segundo a mesma fonte, a um “melhor índice de produtividade hidroeléctrica”, sendo a Energia Hídrica então responsável por 24,2% [2]. Tal crescimento revela, em certa medida, a variabilidade característica das FER, pelo facto de existir sempre uma enorme dependência das condições meteorológicas.

Todavia, a energia solar representou somente 1,5% da produção [2], o que não deixa de ser um valor extremamente reduzido, principalmente tendo em conta os factos já apresentados. Deste modo, torna-se claramente evidente que a implementação desta tecnologia em Portugal tem ainda um longo caminho a percorrer.

À escala global, contudo, o panorama apresenta-se bastante mais favorável no que diz respeito à energia solar (Figura 3). Em 2017, esta tecnologia já representava, aproximadamente, 18% da Potência Instalada com Recurso a FER [3]. Estes dados traduzem um incrível crescimento de, aproximadamente, 5 vezes relativamente aos valores existentes em 2011. Tal facto reflecte uma tendência cada vez maior em todo o planeta no que concerne à aposta em Energias Renováveis.

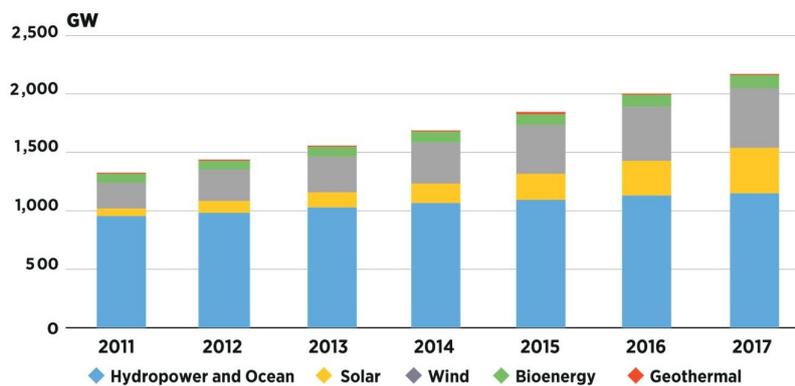


Figura 3: Evolução da Potência Global Instalada com Recurso a FER [3]

2.2 Viabilidade Económica

Quando um certo tipo de tecnologia ou de produto é comercializado, para além de ser feita uma apreciação de todas as suas características científicas e eventuais benefícios consequentes para a sociedade, torna-se sempre imprescindível realizar uma avaliação ao nível da vertente económica, aferindo a sua viabilidade.

2.2.1 Custos de Investimento

Uma das principais barreiras à proliferação da tecnologia fotovoltaica, tal como acontece com praticamente todas as inovações tecnológicas ao serem colocadas no mercado, era o custo de investimento inicial que a sua aquisição acarretava. Os valores praticados eram de tal forma elevados que praticamente impediam qualquer tipo de retorno financeiro, tornando-se num produto comercialmente pouco atractivo.

No entanto, ao longo da última década, esse paradigma tem-se vindo a alterar drasticamente (Figura 4). Como consequência, passou a existir uma procura progressivamente maior deste tipo de produto, tal como já foi referido anteriormente, aumentando a produção eléctrica fotovoltaica (PV) de um modo geral.



Figura 4: Evolução do Custo do Módulo PV (em \$/Watt) entre 2014 e 2018 [4]

Uma atenta observação da Figura 4 permite igualmente perceber que, apesar de ter existido um decréscimo contínuo no que toca ao custo médio mensal do módulo PV, esta redução não se deu sempre com a mesma velocidade, podendo-se considerar a existência de duas fases distintas. Enquanto que, inicialmente, a diminuição foi acontecendo a um ritmo extremamente acelerado, posteriormente, foi-se verificando uma redução de preços muito mais suave.

A queda acentuada inicial na generalidade dos preços dos módulos PV pode ser explicada pelo contínuo aumento da produção global desta indústria, nomeadamente por parte da China, resultando num enorme excedente de fabricação. Tendo em conta a Lei da Oferta e da Procura, ao existir uma oferta que excede a procura existente, os preços tendem naturalmente a diminuir.

Nos últimos anos, apesar de se continuar a registar uma queda nos preços, esta deu-se a um ritmo menos acelerado. Isto pode ser explicado pelo constante avanço da tecnologia (Figura 5). Ao existirem painéis mais eficientes, ou seja, com maiores valores de conversão energética para a mesma área de células fotovoltaicas, os preços tendem a diminuir progressivamente.

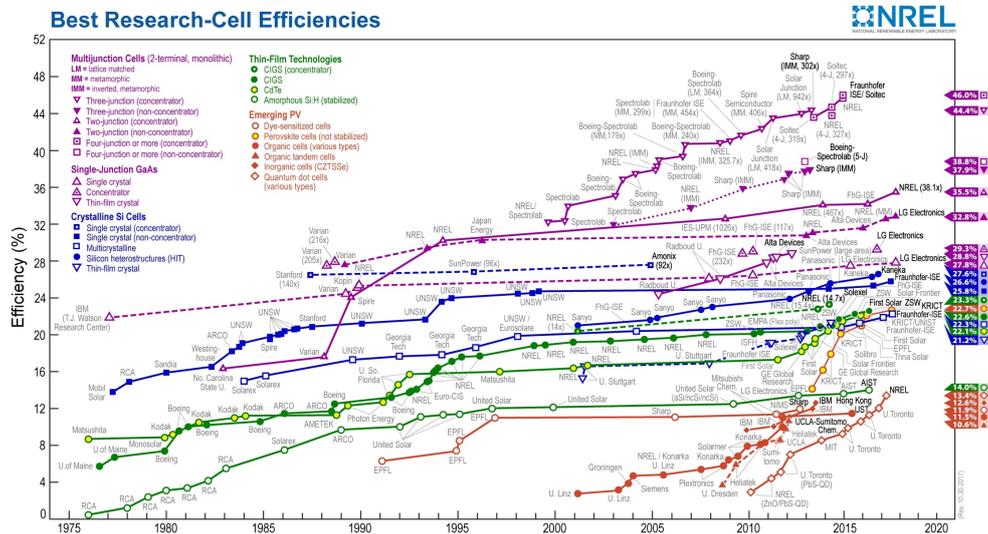


Figura 5: Evolução da Eficiência de Conversão das Tecnologias de Células PV [5]

2.3 Tecnologias Existentes

Em primeiro lugar, o nome “fotovoltaico” resulta da junção de dois termos distintos. O primeiro, tem origem na palavra grega $\varphi\omega\sigma$ (phos), a qual significa “luz”. Por sua vez, o segundo termo, *volt*, é a unidade do SI da força electromotriz, a qual homenageia o inventor da bateria: o físico italiano Alessandro Volta. Este efeito foi descoberto em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel e consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semiconductor, a qual é produzida pela absorção da luz, ou seja, muito sucintamente, o termo Fotovoltaico (*PV*) refere-se à conversão de luz em electricidade ao utilizar um material semiconductor que exiba o efeito fotovoltaico.

A Potência Fotovoltaica é definida como a potência de saída máxima (de pico) medida nas Condições Padrão de Teste (STC) e a sua unidade é o Watt-pico (Wp). Estas condições são utilizadas em toda a indústria para avaliar o desempenho de módulos *PV*, especificando as seguintes condições-padrão: temperatura da célula de 25°C, radiação solar de 1000 W/m² e uma massa de ar de 1.5 AM [6]. Deste modo, a potência real obtida num determinado instante no tempo pode ser superior ou inferior a este valor uniformizado, ou de referência, uma vez que este está dependente de certas variáveis às quais os painéis estão sujeitos, como por exemplo a localização geográfica, a hora do dia, condições meteorológicas, entre outras.

A eficiência de conversão eléctrica (ou rendimento) de uma célula *PV* é uma propriedade física que representa a quantidade de potência que uma dada célula solar pode produzir dada uma determinada radiação solar, em percentagem (%). Este é portanto um bom indicador do quão rentável pode ser uma certa tecnologia.

É possível ter uma noção generalizada da evolução ao longo dos anos dos níveis de eficiência eléctrica apresentados pelas diferentes tecnologias de células solares fotovoltaicas a partir da observação da Figura 9. Porém, existem outros aspectos que devem também ser tidos em conta numa avaliação deste tipo, como por exemplo, o seu custo ou os impactos ambientais consequentes da sua utilização. Uma análise bastante mais completa de todos estes importantes parâmetros relativamente a três tecnologias distintas é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação de Diversas Características Entre as Diferentes Tecnologias de Painéis Fotovoltaicos [5] e [7]

Tecnologia	Silício Cristalino	Filmes Finos	Emergentes
Eficiência	Elevada (21-28%)	Média (14-24%)	Reduzida (10-14%)
Custo	Médio	Reduzido	Muito Reduzido
Tempo de Vida	Prolongado	Médio	Curto
Maturação	Muito Elevada	Média	Muito reduzida
Impacto Ambiental	Emissões de GHG*	Toxicidade do Cádmio	Nenhum
Outros Problemas	Custo da Prata	Raridade dos Materiais	Nenhuns

*Emissões apenas associadas à energia necessária para a produção dos painéis

Como é possível observar, a tecnologia de silício cristalino é portanto considerada “madura”, enquanto que a de filmes finos ainda se encontra em “optimização”, tal como seria de esperar. No entanto, a segunda acarreta custos de investimento muito menores, o que é um sinal extremamente positivo, uma vez que o potencial de crescimento da tecnologia de filmes finos é bastante mais elevado. Adicionalmente, a tecnologia de filmes finos é aquela que apresenta melhores condições relativamente à sua possível integração em edifícios, uma vez que é a mais flexível e portanto está disponível em “diversas cores, formas e tamanhos” [7].

As energias renováveis não são totalmente limpas. Por exemplo, no caso da energia solar, apesar de não haver emissão de gases com efeito de estufa (GHG) aquando da conversão de energia luminosa em energia solar, existe alguma poluição durante a produção dos próprios painéis, uma vez que é necessário fundir materiais como o silício, a qual é feita com recurso a fornos eléctricos, maioria dos quais é alimentada por energia produzida a partir da queima de combustíveis fósseis. No entanto, comparativamente, a energia solar apresenta níveis de emissões muito mais reduzidos, sendo então considerada uma fonte energia “verde”.

2.4 O Fotovoltaico em Edifícios

A utilização de painéis fotovoltaicos é feita de dois principais modos: em grandes centrais fotovoltaicas ou directamente em edifícios (geração distribuída). A segunda opção, a qual assume maior relevância no desenvolvimento deste projecto, tem sido alvo de diversas inovações tecnológicas ao longo dos últimos anos.

2.4.1 Formas de Integração

A forma de integração de energia fotovoltaica em edifícios mais comumente utilizada continua a ser o modo tradicional: a aplicação de painéis fotovoltaicos nos telhados dos edifícios (Figura 6). Em termos de mercado, este é ainda o método mais procurado. Relativamente aos custos iniciais de investimento, esta opção apresenta-se como a mais acessível, sendo que é possível aumentar a potência instalada a qualquer momento. Um dos principais contrapontos é o relativamente difícil acesso ao local de instalação. Contudo, esta não é uma integração total, uma vez que os painéis não pertencem à estrutura do próprio edifício: são um acréscimo ao edifício original.



Figura 6: Painel Fotovoltaico Instalado no Telhado de um Edifício [8]

Por essa razão, a indústria tem evoluído no sentido de criar produtos que estejam incorporados na íntegra na estrutura do edifício, tornando as construções mais harmoniosas esteticamente e funcionalmente. Uma das tecnologias mais aliciantes existentes actualmente é o *Solar Roof* da Tesla, uma vez que as próprias telhas são células solares que convertem a energia luminosa em energia eléctrica (Figura 7). Alguns dos aspectos mais positivos desta tecnologia são, por exemplo, o aumento da resistência das telhas em comparação com as telhas convencionais e a evidente melhoria do estilo arquitectónico. No entanto, a capacidade de escala deste produto é limitada.



Figura 7: *Solar Roof* da Tesla (Telhas Solares) [9]

Outra forma de integração que se encontra em rápido crescimento é a introdução de células solares directamente na fachada do próprio edifício (Figura 8). Deste modo, é possível alcançar grandes áreas de produção comparativamente à instalação de painéis solares convencionais. Como existem células solares em todo o redor do edifício e devido à movimentação do Sol ao longo do dia, tem-se sempre um certo número de células que terão exposição solar reduzida. Naturalmente, os custos são extremamente elevados, no entanto, mesmo em edifícios de grande dimensão, será possível alimentar praticamente todo o consumo energético.



Figura 8: Fachada de um Edifício Composta por Células Solares [10]

Um produto que ainda se encontra na sua fase inicial de implementação são as *Solar Gaps* ou Persianas Solares, as quais são claramente um novo passo em termos de integração fotovoltaica em edifícios, uma vez que essa integração não é feita na construção física do próprio edifício, mas sim no interior do mesmo (Figura 9). A fácil acessibilidade que a instalação desta tecnologia requer é uma das suas principais vantagens, tal como a sua harmonia em termos estéticos. Adicionalmente, podem ser instaladas em qualquer momento. Por outro lado, apresenta limitações no que diz respeito à capacidade total de produção eléctrica, uma vez que a área total de células solares é reduzida, o que se deve à própria fisionomia das persianas.



Figura 9: Solar Gaps [11]

2.4.2 Desajuste entre Geração e Consumo

Uma das características mais desvantajosas da tecnologia solar fotovoltaica é o facto de a energia solar ser uma fonte de energia intermitente. Isto é, uma vez que existe uma dependência de factores meteorológicos, os quais não podem ser controlados e portanto sofrem variações ao longo do tempo, a produção energética não é contínua e sofre abaiçamentos e interrupções. Por estas razões, devido à variação da exposição solar ao longo de um dia inteiro, os painéis fotovoltaicos apresentam uma produção eléctrica: elevada a meio do dia; reduzida nos períodos da manhã e ao final da tarde; e, naturalmente, nula durante a noite. Sendo que, num edifício residencial típico, os períodos da manhã e do início da noite são aqueles que registam um maior consumo energético e existindo um consumo mais reduzido a meio do dia, isto causa um desajuste entre a geração e o consumo de electricidade.

Isto pode ser combatido principalmente de dois modos. Em primeiro lugar, uma das formas de fazer frente a este desajuste é através de uma utilização inteligente da energia eléctrica, nomeadamente através da utilização programada (em termos horários) de determinados equipamentos que apresentem um consumo energético elevado e que não tenham de funcionar de forma contínua, como máquinas de lavar louça, máquinas de lavar roupa e máquinas de secagem. Se, durante o dia, há uma elevada produção eléctrica e o consumo de energia é reduzido, causando um desajuste, este método consiste em aumentar o consumo de electricidade neste período de forma a aproximá-lo o mais possível dos valores de geração existentes, impedindo o desperdício energético.

Outro método existente é a utilização de baterias de armazenamento de energia. De modo sucinto, a energia em excesso que é produzida durante o dia e para a qual não há consumo correspondente, é armazenada em baterias de forma a poder ser consumida durante o período nocturno, no qual já não existe produção eléctrica e quando o consumo de electricidade é bastante mais elevado. Esta opção que requer um investimento económico adicional.

Importa então perceber quais as implicações que a introdução de sistemas de produção fotovoltaica pode causar. Como se sabe, a produção *PV* está dependente das condições meteorológicas existentes em cada momento, como já foi referido anteriormente. Assim, à medida que a capacidade fotovoltaica aumenta, a necessidade de ter em funcionamento unidades de produção convencionais durante o dia vai diminuindo progressivamente, uma vez que já existe produção de energia suficiente capaz de responder às necessidades energéticas de todo o restante sistema.

O principal problema que decorre desta situação tem que ver com uma possível sobre-geração de energia eléctrica durante as horas de sol, dando origem à conhecida *Duck Curve* (Figura 10).

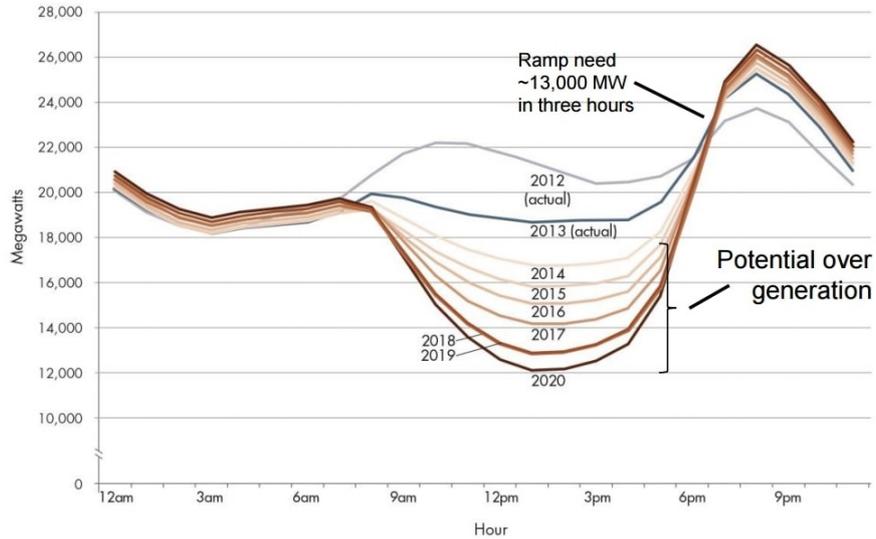


Figura 10: *Duck Curve* ou “Curva do Pato” [12]

Por conseguinte, à medida que se aproxima do período nocturno e a produção do solar fotovoltaico decresce progressivamente, será necessário adicionar uma quantidade enorme de fontes de produção eléctrica alternativas de modo a responder ao consumo existente, situação a qual coloca a rede sobre elevada pressão.

3 Legislação e Licenciamento

Neste capítulo são analisadas as regras a que a aplicação e utilização de sistemas de painéis fotovoltaicos estão sujeitas, verificando de que modo é que estas influenciam o seu desenvolvimento e alteram o paradigma energético dos mesmos.

3.1 Legislação Anterior

O primeiro elemento de legislação relativo aos sistemas fotovoltaicos em Portugal foi publicado no ano de 2007, o Decreto-Lei (DL) n^o 363/2007 de 2 de Novembro [13], o qual tinha como objectivo regulamentar as centrais de microprodução. Foi a partir deste mesmo ano que o sector fotovoltaico se começou a desenvolver de forma considerável em Portugal. Quatro anos mais tarde, em 2011, foi publicado o DL n^o 34/2011 de 8 de Março [14], que por sua vez era responsável por regulamentar as centrais de miniprodução.

De forma a promover o aumento a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos em Portugal, foi adoptado, entre 2007 e 2014, um mecanismo denominado de *feed-in*. Este, resumidamente, consistia numa tarifa que visava fomentar a injeção na rede de toda a energia eléctrica gerada em sistemas de micro e miniprodução, sendo esta remunerada, inicialmente, a preços bastante elevados [15].

Todavia, devido à disseminação desta tecnologia, os preços associados à aquisição e instalação dos sistemas fotovoltaicos foram, naturalmente, diminuindo com o passar dos anos. Assim, as tarifas pagas no sector fotovoltaico foram decrescendo rapidamente, não apenas pelas razões enunciadas mas também porque estas apenas protegiam os consumidores produtores, isto é, aqueles que injectavam toda a energia na rede eléctrica.

3.2 Legislação Actual

Numa tentativa de alterar o paradigma energético vigente, foi publicado no ano de 2014 o DL n^o153/2014 de 20 de Outubro [16]. Este, para além de oferecer protecção aos consumidores não produtores, pretendia também promover a instalação de sistemas fotovoltaicos para autoconsumo que garantissem as necessidades em termos energéticos do consumidor produtor. Assim sendo, este novo cenário jurídico aplica-se a ambos os regimes de produção distribuída, sejam estas destinadas ao autoconsumo na própria instalação que está associada à respectiva unidade produtora (com ou sem ligação à rede pública) e à venda da totalidade da energia eléctrica à Rede Eléctrica de Serviço Público (RESP), por intermédio de instalações de pequena potência.

Esta nova legislação implementa a chamada tarifa de facturação líquida (*net-billing*), a qual permite que o consumidor/produtor injecte energia na RESP a uma taxa de remuneração flutuante. O objectivo da aplicação desta tarifa é incentivar a instalação de sistemas fotovoltaicos para autoconsumo que garantam as necessidades energéticas do consumidor/produtor e não o “fazer negócio” com a venda de energia com o único objectivo de ser financiado e subsidiado [17].

Assim sendo, os dois regimes de produção distribuída estabelecidos pela nova legislação são os seguintes:

- UPAC – Unidades de Produção para Autoconsumo,
- UPP – Unidades de Pequena Produção.

No contexto desta dissertação, pelo facto de se tratar de um edifício residencial com geração de energia a partir de um sistema fotovoltaico, focar-nos-emos unicamente no regime de produção distribuída com base em UPACs. As principais características de um regime deste tipo são as seguintes [18]:

- Produção de energia eléctrica (com ou sem ligação à RESP);
- Injecção, preferencialmente, da energia eléctrica produzida na instalação;
- Potência de ligação até 100% da potência contratada e potência de instalação limitada a 200% da potência de ligação ou inferior a 1 MVA;
- Produção de energia eléctrica pode ser baseada em várias tecnologias;
- Possibilidade de armazenar a energia eléctrica excedente.

3.2.1 Pagamento da Energia Proveniente das UPAC

Tal como estabelecido no *Artigo 24.º - Remuneração da energia proveniente das unidades de produção para autoconsumo* no DL n.º153/2014 de 20 de Outubro [16], o valor, em euros (€), da energia eléctrica que é fornecida à RESP pela UPAC, isto é, a remuneração da energia excedente, é calculada de acordo com a Equação 1:

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} * OMIE_m * 0,9$$

Equação 1: Remuneração da Energia Proveniente das UPAC

Onde:

- $R_{UPAC,m}$: Remuneração da electricidade fornecida à RESP no mês m , em €;
- $E_{fornecida,m}$: Energia fornecida no mês m , em kWh;
- $OMIE_m$: Valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês m , em €/kWh;
- m : Mês a que se refere a contagem da electricidade fornecida à RESP.

Esta remuneração é assim reduzida em 10% face aos preços do mercado, daí o factor multiplicativo de 0,9 existente na equação anterior. Esta tem como objectivo compensar os custos de injecção na RESP de energia eléctrica [19]. Adicionalmente, é importante referir que, à base anual, toda a energia eléctrica excedente acima do total de energia eléctrica consumida não é remunerada.

Torna-se importante perceber qual das opções é a mais vantajosa, se o autoconsumo ou a injeção de energia na RESP. Na Tabela 2 é feita uma análise dos valores dos preços médios mensais do OMIE para Portugal em 2018 e os respectivos valores associados à remuneração a partir da energia injectada na RESP (valores correspondentes a 90% do valor total).

Tabela 2: Valores Resultantes da Média Aritmética Simples dos Preços de Fecho do Mercado do OMIE para Portugal e Respectiva Remuneração da Energia Injectada na RESP em 2018 (em c€/kWh) [20]

Meses	Valor OMIE	90% do Valor OMIE
Janeiro 2018	5,163	4,647
Fevereiro 2018	5,498	4,948
Março 2018	3,975	3,578
Abril 2018	4,266	3,839
Mai 2018	5,508	4,957
Junho 2018	5,848	5,263
Julho 2018	6,184	5,566
Agosto 2018	6,429	5,786
Setembro 2018	7,130	6,417
Outubro 2018	6,538	5,884
Novembro 2018	6,201	5,581
Dezembro 2018	6,187	5,568
Ano	5,745	5,171

Pode-se constatar que, apesar de a remuneração da energia injectada na rede ser uma vantagem, os preços praticados actualmente tornam o autoconsumo uma opção bastante mais viável. O valor da remuneração é muito inferior face ao preço pago pela energia consumida. Por exemplo, em 2018, o preço médio anual de remuneração da energia injectada na RESP ficou ligeiramente acima dos 0,05€/kWh, enquanto que, em 2019, o valor pago pela energia em períodos Fora de Vazio, isto é, aqueles durante os quais existe produção solar, ultrapassa os 0,18€/kWh (EDP, Opção Bi-Horária, 10,35 kVA), ou seja, é quase quatro vezes superior [21]. Em conclusão, o autoconsumo permite principalmente diminuir os custos com energia, uma vez que reduz a compra de energia eléctrica ao comercializador.

3.2.2 Outros Artigos Importantes

Para além da legislação já apresentada, existem ainda outros artigos que podem ter relevância para o nosso caso de estudo, os quais são apresentados de seguida. Estes estão relacionados com processos jurídicos que devem ser tidos em conta aquando da instalação de uma UPAC, tais como comunicações legais ou o pagamento de certas taxas.

- Em primeiro lugar, o *Artigo 21.º - Mera comunicação prévia* do DL n.º153/2014 de 20 de Outubro [16], o qual estabelece que os titulares de UPACs com uma potência instalada superior a 200 W e igual ou inferior a 1,5 kW e das unidades de produção sem ligação à RESP “devem simplesmente apresentar uma mera comunicação prévia de exploração, dirigida à DGEG, estando dispensados de efectuar o registo”. Nestes casos, o processo burocrático torna-se portanto bastante simples..

- Relativamente ao *Artigo 22.º - Contagem e disponibilização de dados nas unidades de produção para autoconsumo* pertencente ao mesmo DL [16], estabelece-se que nas UPACs com potência instalada superior a 1,5 kW e cuja respectiva instalação de utilização se encontre conectada à RESP, “é obrigatória a contagem da electricidade total produzida”. Contudo, tal como expresso na alínea *b)* do *Artigo 8º - Deveres do produtor*, compete ao produtor “suportar o custo associado aos contadores que medem o total da electricidade produzida pela UPAC”, pelo que isto exige um maior investimento por parte destes produtores.
- No que diz respeito ao *Artigo 25.º - Compensação devida pelas unidades de produção para autoconsumo* ainda do mesmo DL [16], encontra-se expresso que, no caso das UPACs cuja potência instalada é superior a 1,5 kW e em que a respectiva instalação eléctrica de utilização se encontra ligada à RESP, os produtores estão sujeitos, nos primeiros 10 anos após a obtenção do certificado de exploração, “ao pagamento de uma compensação mensal fixa”.
- Por último, relativamente ao *Artigo 19.º - Taxas*, da Portaria n.º 14/2015 de 23 de janeiro [22], encontra-se estabelecido o pagamento de determinadas taxas de registo para as UPACs, que variam consoante o valor da potência instalada e se esta se encontra ligada ou não à RESP. Em jeito de exemplo, uma UPAC, com injeção de potência na rede, com uma potência instalada de até 1,5 kW, pagaria uma taxa de registo de 30€. Caso a sua potência instalada fosse de 1,5 kW a 5 kW, a taxa a ser paga seria de 100€.

Assim, do ponto de vista financeiro, aquando do dimensionamento de uma UPAC, ao estimar o custo do investimento inicial, não devem ser esquecidos todos os contornos legislativos a ele associados, uma vez que o impacto que o pagamento de certas taxas e deveres tem pode ser superior ao retorno energético que um sistema de maiores dimensões proporcionaria.

Nota: Do ponto de vista da legislação, é importante referir que a “potência instalada” se refere, não à totalidade da soma dos valores das potências de pico de todos os módulos fotovoltaicos, mas sim à potência máxima do inversor utilizado.

4 Estudo de Caso

Neste capítulo é realizado um estudo completo do local para o qual foi desenvolvido este projecto, passando, entre outros aspectos, por um reconhecimento das características constructivas do edifício, pela análise do diagrama de carga do mesmo, traçando o seu perfil de utilização, e por uma avaliação da facturação energética.

4.1 O Edifício

O objecto de estudo deste trabalho é o edifício da República da Praça, visível na Figura 11. Apesar de ser um edifício já com alguns anos de idade, este tem sido alvo de constantes remodelações ao longo dos últimos três anos, altura em que este passou a ser denominado como República da Praça, encontrando-se portanto em boas condições de habitabilidade. Anteriormente, era utilizado como clínica médica, pelo que já se apresentava em relativas boas condições aquando da sua aquisição. Relativamente às remodelações efectuadas, a única com pertinência para este estudo foi a substituição de toda a iluminação anteriormente existente por tecnologia LED, o que contribuiu consideravelmente para a diminuição do consumo energético total.



Figura 11: Edifício da República da Praça

O edifício está localizado no n.º4 da Rua João de Deus, na cidade de Coimbra. Encontra-se numa zona histórica e, portanto, central da cidade, com bastante proximidade a locais emblemáticos como o Jardim da Sereia e a Praça da República, local onde se encontrava o edifício original. Actualmente, é habitado por sete estudantes portugueses, os quais são denominados Repúblicas, existindo também o mesmo número de estudantes comensais que, apesar de não viverem ali, partilham as refeições diárias.

No que diz respeito ao interior da casa, esta é constituída por três diferentes pisos. O primeiro, no qual se situam divisões como a cozinha, a dispensa e a lavandaria, é onde se concentra a maioria do consumo energético, devido à presença de diversos electrodomésticos de elevada potência, como frigoríficos, arcas congeladoras, máquinas de lavar roupa/louça, forno e fogão eléctricos. Do ponto de vista energético, este é sem dúvida o piso com maior relevância para o trabalho desenvolvido.

No segundo piso, o maior em área, encontra-se a sala de estar, um par de quartos, uma sala de estudo e mesmo um barracão, exterior à vida quotidiana. Em termos energéticos,

apresenta um consumo moderado, pois é aqui que se encontram alguns equipamentos de lazer comunitário, como televisores, aparelhagens sonoras e computadores portáteis. Existe ainda um terraço com utilização sazonal mas sem impacto energético relevante.

Por último, no piso superior, estão situados os restantes quartos de habitação e uma casa de banho. Neste piso, os consumos energéticos são relativamente baixos, limitando-se ao carregamento de telemóveis e iluminação portátil. Para o caso de estudo, este andar do edifício é aquele com o menor impacto.

De forma a demonstrar toda esta informação com valores numéricos, é apresentada na Tabela 3 uma estimativa de desagregação do consumo por espaços, através da potência instalada existente em cada um dos três pisos do edifício.

Tabela 3: Desagregação da Potência Instalada pelos Três Pisos do Edifício

Tipo de Equipamento	1º Piso	2º Piso	3º Piso
Frigorífico	0	0	0
Arca Frigorífica	0	0	0
Forno Eléctrico	0	0	0
Máquina de Lavar Roupa	0	0	0
Tostadeira	0	0	0
Televisor	0	0	0
Aparelhagem Sonora	0	0	0
Computador Portátil	0	0	0
Telemóvel	0	0	0
Total	0	0	0

Nota: Não foi considerada a iluminação do edifício, pois é transversal a todos os pisos.

4.2 Diagrama de Carga

Um dos componentes mais importantes para perceber qual o perfil energético de um determinado edifício passa pela análise do diagrama de carga do mesmo, de modo a identificar quais os hábitos e as necessidades energéticas do edifício e de que modo esses vão variando ao longo do dia e da semana. Os dados recolhidos ao longo desta fase assumem um papel fundamental no que diz respeito ao Dimensionamento do Sistema PV, etapa na qual se foca o capítulo seguinte (Capítulo 5).

De forma a monitorizar o consumo energético do edifício, foi necessário realizar a instalação de um equipamento adequado junto do quadro de distribuição da casa (Figura 12). O equipamento em causa foi o Analisador de Energia da marca Fluke, modelo 434 Série II. A instalação deste dispositivo foi efectuada com a ajuda do Engenheiro Luís Gama, Sócio-gerente da GPS-Energia, empresa envolvida no desenvolvimento deste projecto.



Figura 12: Instalação do Monitor de Consumo Energético

Este equipamento ficou instalado no local referido durante o período de, aproximadamente, duas semanas do mês de Fevereiro, incluindo dias úteis e dias de fim-de-semana. Deste modo, tentou-se que os valores recolhidos fossem o mais fidedignos possível, evitando, assim, possíveis variações extemporâneas que eventualmente pudessem acontecer num determinado dia específico e que não fossem uma representação real dos hábitos energéticos dos estudantes. A janela temporal escolhida foi esta devido ao facto de ser um período do calendário académico em que os alunos se encontram em aulas, ao contrário, por exemplo, dos meses de Janeiro e Agosto, período o qual corresponde à maior parte do consumo existente. Há que ter em atenção, todavia, que neste período o clima se encontra numa das suas fases mais frias e, portanto, os consumos energéticos são mais elevados que a média anual, devendo evitar-se sobredimensionar o sistema.

Após a análise dos dados recolhidos, foi finalmente possível traçar o diagrama de carga do edifício:

FALTA DIAGRAMA DE CARGA

(A aguardar o envio dos dados recolhidos por parte da empresa)

Talvez seja importante ter mais do que 1, para mostrar pelo menos 1 dia útil e 1 fim-de-semana. E depois os diagramas devem ser analisados relativamente à sua variabilidade, consumo noturno/diurno, etc

4.2.1 Perfil de Utilização

Tipicamente, quando se trata de um edifício residencial, é possível prever qual será o seu diagrama de carga mesmo antes de efectuar uma monitorização dos consumos existentes. Isto deve-se ao facto de os hábitos energéticos serem bastante semelhantes de edifício para edifício desde que estes sejam utilizados para a mesma função, permitindo assim fazer uma previsão padrão para edifícios de determinadas funcionalidades. No caso dos edifícios residenciais, são de esperar consumos mais elevados ao início da manhã e ao início da noite, enquanto que durante o dia existem apenas consumos reduzidos (de base), como é o caso dos frigoríficos. Num edifício comercial, é de esperar exactamente o oposto, uma vez que é durante o dia que este é utilizado.

No caso do edifício da República da Praça, verifica-se que o perfil de utilização existente é um misto entre o perfil Residencial e o perfil Comercial, pois a casa é habitada e frequentada por um relativamente elevado número de estudantes, de diversas áreas de estudo e com horários diferentes. Assim, ao contrário do que acontece num perfil tipicamente residencial, o consumo energético ao longo do dia é considerável. Deste modo, o eventual desajuste entre a geração fotovoltaica e o consumo de electricidade nos períodos em que existe radiação solar incidente seria menor do que aquele que seria de esperar numa casa de habitação.

4.3 Facturação Energética

Para além da análise dos diagramas de carga, de modo a fazer um estudo completo das características energéticas do edifício e perceber de que forma é que o consumo de electricidade varia ao longo do ano, é fundamental realizar um estudo do histórico de valores correspondentes à facturação energética da casa. Nesse sentido, foram recolhidos os dados possíveis relacionados com o consumo energético e correspondentes custos durante os 12 meses anteriores ao início da realização deste trabalho (Tabela 3).

Tabela 4: Dados de Facturação, em Termos de Consumo e Valor Pago, Relativos aos 12 Meses Imediatamente Anteriores ao Início do Projecto.

Meses	Nov 2017	Dez 2017	Jan 2018	Fev 2018	Mar 2018	Abr 2018
Consumo (kWh)	652	974	897	983	534	574
Valor Pago (€)	168.23	220.45	200.79	222.00	129.57	138.82
Meses	Mai 2018	Jun 2018	Jul 2018	Ago 2018	Set 2018	Out 2018
Consumo (kWh)	N.D.	N.D.	N.D.	493	583	643
Valor Pago (€)	138.76	139.79	118.32	123.02	141.09	151.57

Notas Importantes: 1. Todos os valores apresentados são relativos a consumos reais medidos, à excepção dos meses de Novembro e Dezembro de 2017, os quais são apenas estimativas. Os contadores inteligentes foram somente introduzidos no início do ano 2018. 2. N.D. - Não Disponível, isto é, não foi possível ter acesso aos respectivos valores.

Relativamente ao período temporal ao qual esta análise de facturação diz respeito (Novembro de 2017 a Outubro de 2018), o comercializador de energia a quem esta foi comprada é a EDP, estando estabelecido no contrato um tarifário simples e uma potência contratada de 10,35 kVA.

Em 2018, ano com maior influência no que diz respeito a esta análise, para este tipo de tarifário, os preços praticados eram de 0,162€/kWh (sem IVA) para o consumo de energia e de 0,5321€/dia (sem IVA) relativamente à potência contratada

Contudo, em Dezembro de 2018, aquando desta mesma análise, foi detectado um elevado e frequente número de interrupções de energia. Nesse sentido, foi sugerido que o valor da potência contratada fosse aumentado para os 13,8 kVA, o que acabou por acontecer pouco tempo depois. Esta alteração contratual foi, portanto, uma consequência directa deste estudo, tendo deixado de existir qualquer tipo de anomalia após a tomada desta medida.

Os meses em que se registaram os valores pagos mais elevado e mais reduzido foram, respectivamente, Fevereiro e Julho, sendo o primeiro praticamente o dobro do segundo. Tal era expectável, uma vez que o consumo energético é por norma superior nos meses de Inverno, devido, não apenas, à utilização de equipamentos de aquecimento para combater as temperaturas mais reduzidas, mas também à utilização mais prolongada da iluminação, uma vez que o número de horas de luz natural é também menor. De um modo geral, há uma tendência para os consumos de electricidade serem progressivamente superiores após o Verão e consumos cada vez menores após o Inverno. Adicionalmente, este contraste pode também ser explicado pela ausência da maioria dos estudantes no período de férias lectivas de Verão. Estas variações são visíveis na Figura 13.

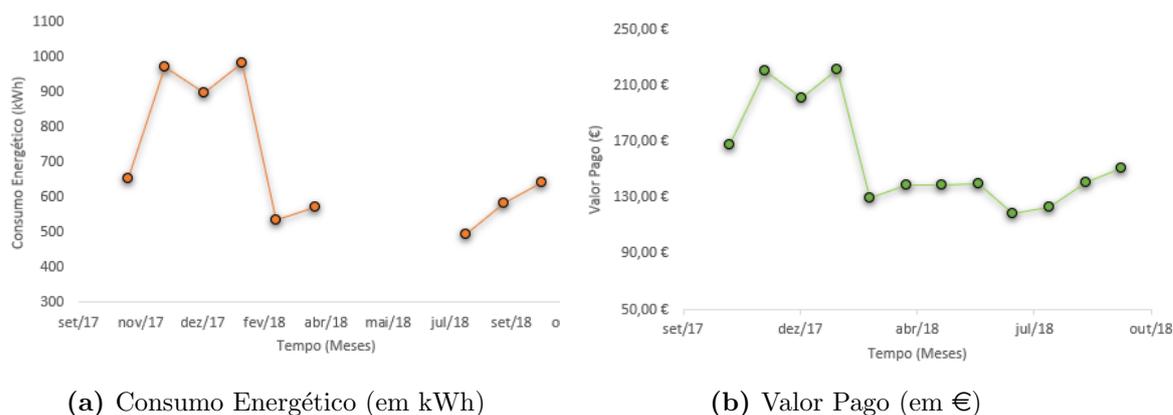


Figura 13: Variação do Consumo Energético (e Respeitivo Valor Pago) do Edifício ao Longo de 12 Meses.

Numa fase posterior, estes dados serão também importantes para realizar estimativas de qual a poupança económica que a instalação dos painéis fotovoltaicos irá permitir ou até no cálculo de qual a poupança real existente através da comparação directa com os valores presentes em futuras facturas energéticas.

4.3.1 Escolha do Tarifário

O tipo de tarifário existente, o tarifário simples, não diferencia se os consumos existem durante os períodos de Ponta, Cheias ou Vazio, sendo assim todos os consumos facturados com a mesma e única tarifa, 0,162€/kWh (sem IVA) no ano de 2018. Contudo, dependendo dos hábitos energéticos dos habitantes de um edifício, este pode não ser aquele que mais se adequa ao caso de estudo e que permite a maior poupança económica. Deste modo, torna-se interessante efectuar uma análise relativa à desagregação de consumos para os diversos períodos horários.

Para esta análise, considera-se a actual potência contratada de 13,8 kVA e as tarifas praticadas pela EDP em 2019 [21]. Os tarifários existentes são o Simples, Bi-Horário e

Tri-Horário e, entre estes, varia não apenas o custo da energia (€/kWh), mas também o custo da potência (€/dia).

Na Tabela 5 são apresentados os preços praticados actualmente e que serão tidos em conta na nesta análise.

Tabela 5: Custo dos Diferentes Tarifários da EDP em 2019 (sem IVA) [21]

Tarifário	Simples	Bi-Horário	Tri-Horário
Ponta (€/kWh)	0.1559	0.1871	0.2738
Cheias (€/kWh)	0.1559	0.1871	0.1572
Vazio (€/kWh)	0.1559	0.1100	0.1039
Potência (€/dia)	0.6917	0.6930	0.6779

Nota: Para uma potência contratada de 13,8 kVA.

Importa agora perceber qual a desagregação do consumo em termos horários ao longo do ano no que diz respeito ao caso de estudo (Tabela 6).

Tabela 6: Desagregação Mensal do Consumo por Período Horário (em kWh)

Meses	Ponta	Cheias	Vazio
Nov 2017	119	252	281
Dez 2017	173	325	476
Jan 2018	169	313	415
Fev 2018	203	363	417
Mar 2018	123	203	208
Abr 2018	112	242	220
Mai 2018	N.D.	N.D.	N.D.
Jun 2018	N.D.	N.D.	N.D.
Jul 2018	N.D.	N.D.	N.D.
Ago 2018	80	200	213
Set 2018	112	236	235
Out 2018	140	272	231

Notas Importantes: 1. Todos os valores apresentados são relativos a consumos reais medidos, à excepção dos meses de Novembro e Dezembro de 2017, os quais são apenas estimativas. Os contadores inteligentes foram somente introduzidos no início do ano 2018. 2. N.D. - Não Disponível, isto é, não foi possível ter acesso aos respectivos valores.

O facto de não se ter acesso aos valores de três meses não tem grande impacto, uma vez que o foco não está em ter valores completamente reais, mas sim em perceber a relação em termos de consumo entre os diferentes períodos horários. Assim, o consumo médio mensal de Ponta é de 137 kWh, de Cheias de 267 kWh e de Vazio de 300 kWh. Considera-se ainda que um mês é composto por 30 dias. O custo médio mensal (sem IVA) de cada um dos tarifários é apresentado de seguida:

- **Simples:** $(137 * 0.1559) + (267 * 0.1559) + (300 * 0.1559) + (30 * 0.6917) = \mathbf{130,50 \text{ €}}$
- **Bi-Horário:** $(137 * 0.1871) + (267 * 0.1871) + (300 * 0.1100) + (30 * 0.6930) = \mathbf{129,38 \text{ €}}$
- **Tri-Horário:** $(137 * 0.2738) + (267 * 0.1572) + (300 * 0.1039) + (30 * 0.6779) = \mathbf{130,99 \text{ €}}$

A partir destes valores, percebe-se então que, tendo em conta o perfil de consumo existente, o tarifário que permitiria uma maior poupança económica seria o Tarifário Bi-Horário.

Todavia, essa mesma poupança não seria muito significativa relativamente ao valor pago actualmente com o tarifário simples, uma vez que, mensalmente, seria de apenas 1,12€, correspondendo a uma redução de custos de 0,86%. Ou seja, ao fim de um ano inteiro, poupar-se-iam pouco mais de 13€. Assim sendo, não é possível afirmar que uma alteração de tarifário energético é fundamental e recomendada.

4.4 Localização dos Painéis

Resta apenas avaliar as condições que o edifício em estudo apresenta no que à colocação dos painéis fotovoltaicos diz respeito, analisando os possíveis locais para a instalação dos mesmos.

Em primeiro lugar, o telhado do edifício encontra-se a uma altura que varia entre, aproximadamente, os 4 e os 5 metros, variação esta causada pelo facto de ser um telhado com uma inclinação, de cerca de 25°. Relativamente às construções existentes ao redor do edifício, estas apresentam alturas semelhantes, pelo que grande parte não aparenta provocar sombreamentos impeditivos. Contudo, existe um edifício situado a noroeste que é ligeiramente mais alto, pelo que se os painéis forem colocados próximos deste, há a possibilidade de haver sombreamento ao final da tarde. Adicionalmente, não há presença de árvores ou vegetação nas proximidades significativa que possa interferir com a passagem de radiação solar. As duas faces do telhado encontram-se orientadas em direcções totalmente opostas, sendo que uma está virada a Sudoeste, enquanto que a outra está orientada para Nordeste.

Na Figura 14 é possível observar uma imagem aérea do edifício onde se podem verificar os aspectos já referidos. Esta imagem foi obtida com recurso à utilização da ferramenta *Google Maps*.

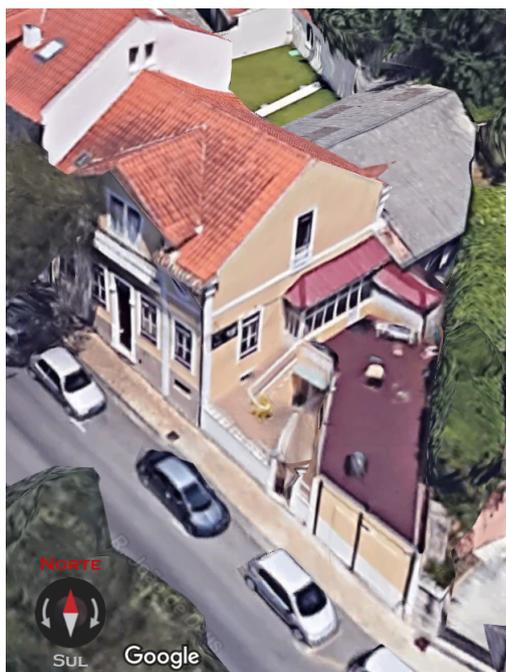


Figura 14: Vista Aérea do Edifício (Direcção Sul-Norte) [23]

No caso de Portugal, por estar situado no Hemisfério Norte, os painéis fotovoltaicos devem ser instalados voltados para Sul, de modo a maximizar a radiação incidente. Por esta razão, a Figura 14 tem um ponto de vista de Sul para Norte de forma a perceber mais facilmente quais as zonas do edifício que apresentam uma maior exposição solar. Exclui-se, portanto, a face voltada para Nordeste. Em termos da inclinação ideal, esta está dependente da latitude do local de instalação. No caso de Portugal Continental, o ângulo óptimo é de aproximadamente 35° , sendo que este varia de Norte para Sul ($33,66^\circ$ no caso de Coimbra), aumentando em cerca de 15% o nível de irradiação solar relativamente a uma área horizontal [7].

Resta-nos apenas a face do telhado voltada para Sudoeste. Contudo, devido às especificidades da construção do telhado, a área total que esta parcela de telhado possui em condições de receber a instalação de painéis fotovoltaicos é limitada, pelo que as suas dimensões poderão não ser suficientes para a colocação da quantidade de painéis que poderá vir a ser necessária. Por estas razões, uma das hipóteses a ser estudada e que permitiria uma colocação ideal, dentro das condições a que o edifício está sujeito, dos painéis fotovoltaicos, seria a construção de uma estrutura metálica que permitisse a instalação dos mesmos com orientação, inclinação e área disponível favoráveis. Esta questão será aprofundada no Capítulo 5.

5 Dimensionamento do Sistema PV

Este capítulo é aquele que diz respeito ao desenvolvimento técnico do projecto. É o principal capítulo no que diz respeito à aplicação de engenharia *per se*.

5.1 Critérios de Dimensionamento

Em primeiro lugar, há que definir quais os principais critérios a ter em conta aquando da escolha de um sistema fotovoltaico e de que forma estes se influenciam internamente e, conseqüentemente, à própria escolha final.

Desde logo, tem-se um critério do foro energético, o qual determina que um sistema fotovoltaico para autoconsumo deve ser capaz de produzir e fornecer uma quantidade considerável de energia eléctrica à instalação à qual este está associado. Assim sendo, a instalação torna-se mais autosuficiente, isto é, menos dependente da rede eléctrica e, portanto, menos sujeita a variações que esta possa sofrer. Caso a quantidade de energia produzida pelo sistema PV represente uma percentagem muito reduzida de toda a energia consumida na instalação, o sistema torna-se pouco rentável.

Em seguida, tem-se em conta um critério económico-financeiro. Apesar de exigirem um investimento inicial elevado, os sistemas PV devem permitir, a médio prazo, uma poupança económica significativa, decorrente das menores quantidades de energia eléctrica adquiridas ao operador comercial. Tipicamente, o investimento de um sistema deste tipo apresenta um período de amortização de 5 a 8 anos, sendo que, posteriormente, toda e qualquer poupança representa um lucro económico (até ao fim do período de vida de um sistema PV, que ronda os 25 anos).

Por último, tem-se um critério que não é possível controlar, pois trata-se de um critério físico, o critério espacial. Em muitos casos, apesar de ser rentável a instalação de um número relativamente elevado de painéis fotovoltaicos e de existir capital inicial para tal, o dimensionamento do sistema é limitado pelo espaço disponível para a aplicação dos mesmos, sendo este, portanto, um critério limitador.

5.1.1 Dilemas entre Critérios

Todavia, na maioria das situações, não é possível “maximizar” a escolha tendo em conta dois critérios distintos simultaneamente, uma vez que a maior ponderação de um deles significa necessariamente um efeito negativo num dos outros. Pode-se dizer que os critérios energético e económico são “inversamente proporcionais”. Dois exemplos relativos a esta situação são apresentados de seguida.

Primeiramente, existe o clássico caso do sobredimensionamento, onde, tal como o nome indica, o sistema fotovoltaico apresenta proporções de dimensão exagerada. Apesar de haver um número elevado de painéis que garante, em qualquer momento em que exista exposição solar, a produção e o fornecimento da totalidade da energia necessária à instalação, há que ter em conta que estas situações exigem investimentos iniciais ainda mais elevados que o normal, aumentando o tempo de retorno financeiro e a rentabilidade de todo o sistema PV. Adicionalmente, há também a possibilidade de muita da energia produzida ser “desperdiçada”, ao ser injectada na rede (onde a remuneração é bastante mais baixo, como já foi demonstrado).

A outra situação tem que ver com o pagamento de determinadas taxas e rendas fixas tal como estabelecido pela legislação actual (tal também já foi abordado). Por vezes, um dimensionamento que corresponda a uma determinada potência instalada, que, à partida, aparente ser a adequada, pode ser menos rentável do que optar por uma potência instalada ligeiramente menor. Apesar de o sistema produzir mais energia no primeiro caso, o valor acumulado de todas as taxas a serem pagas pode diminuir a rentabilidade financeira de todo o sistema PV.

Neste sentido, a melhor solução passa por encontrar um equilíbrio entre os diversos critérios, maximizando a rentabilidade financeira e a produção de energia como um todo.

5.2 Dimensionamento

Ao longo desta secção, far-se-á uso do *software* de simulação *Sunny Design* da SMA Solar [23]. A utilização de programas informáticos no desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos é de grande importância, pois permite perceber de que forma é que certas variáveis, tais como, a quantidade de painéis, a orientação e inclinação dos mesmos e o tipo de inversor utilizado, entre outros, afectam a rentabilidade dos mesmos. A escolha recaiu neste *software* em específico por ser uma ferramenta de fácil e livre utilização e por oferecer todas as funcionalidades necessárias. Foi, de resto, recomendada pelo Professor Orientador e pelo Orientador de Estágio.

5.2.1 Consumo Anual

No dimensionamento de um sistema fotovoltaico, o primeiro passo passa sempre por perceber quais as necessidades energéticas da instalação à qual o sistema estará associado. Assim, torna-se fundamental fazer um estudo da facturação energética no sentido de conhecer o consumo energético do local. Esse mesmo estudo está representado na **Tabela 6**, a qual foi já mencionada no Capítulo 4.

Contudo, ao contrário do que acontecia no capítulo anterior, neste caso não se pode ignorar o facto de não existirem dados relativos ao consumo existente em 3 dos 12 meses do ano, uma vez que interessa saber qual o consumo absoluto total e não simplesmente valores médios. No entanto, cada factura mensal apresenta informação relativa a qual o consumo acumulado até ao respectivo mês, inclusive. Deste modo, para obter a informação que diz respeito ao consumo energético dos meses em falta, Maio, Junho e Julho de 2018, basta calcular a diferença existente entre os valores que constam nas facturas dos meses de Abril e Agosto, subtraindo depois o consumo apresentado neste último. A apresentação desses mesmos cálculos é feita de seguida:

$$(Ponta_{Agosto,total} - Ponta_{Abril,total}) - Ponta_{Agosto} = 1882 - 1457 - 80 = 345kWh$$

$$(Cheias_{Agosto,total} - Cheias_{Abril,total}) - Cheias_{Agosto} = 3870 - 2974 - 200 = 696kWh$$

$$(Vazio_{Agosto,total} - Vazio_{Abril,total}) - Vazio_{Agosto} = 4312 - 3507 - 213 = 592kWh$$

Apesar de o mais importante ser conhecer o valor absoluto e não a forma como este se distribui por estes 3 meses, de modo a apresentar um versão completa da **Tabela 6**, é possível estimar de forma consistente uma distribuição desse valor por esses mesmos meses, tendo em conta qual o valor pago em cada uma das respectivas facturas energéticas mensais. Recorrendo à informação da **Tabela 4**, verifica-se que esses valores foram, por ordem temporal, 138.76€, 139.79€ e 118.32€. Interessa então saber qual o peso relativo de cada um desses valores em relação ao valor total pago nesses 3 meses, os quais são calculados de seguida:

$$138.76 + 139.79 + 118.32 = 396.87\text{€}$$

- Maio 2018: $138.76/396.87 * 100 \approx 35\%$
- Junho 2018: $139.79/396.87 * 100 \approx 35.2\%$
- Julho 2018: $118.32/396.87 * 100 \approx 29.8\%$

Resta-nos calcular, multiplicando os valores dos consumos respeitantes a cada período horário pelos pesos relativos de cada mês, os valores em falta na **Tabela 6**:

- Maio 2018: $0.35 * 345 \approx 121\text{kWh}$, $0.35 * 696 \approx 244\text{kWh}$, $0.35 * 592 \approx 207\text{kWh}$.
- Junho 2018: $0.352 * 345 \approx 121\text{kWh}$, $0.352 * 696 \approx 245\text{kWh}$, $0.352 * 592 \approx 208\text{kWh}$.
- Julho 2018: $0.298 * 345 \approx 103\text{kWh}$, $0.298 * 696 \approx 207\text{kWh}$, $0.298 * 592 \approx 176\text{kWh}$.

Assim, é agora possível obter uma versão completa da tabela anterior, na qual constam todos os dados necessários para calcular o consumo total anual existente, os quais se encontram presentes na Tabela 7.

Tabela 7: Desagregação Mensal do Consumo por Período Horário (em kWh)

Meses	Ponta	Cheias	Vazio
Nov 2017	119	252	281
Dez 2017	173	325	476
Jan 2018	169	313	415
Fev 2018	203	363	417
Mar 2018	123	203	208
Abr 2018	112	242	220
Mai 2018	121	244	207
Jun 2018	121	245	208
Jul 2018	103	207	176
Ago 2018	80	200	213
Set 2018	112	236	235
Out 2018	140	272	231

Nota: Todos os valores apresentados são relativos a consumos reais medidos, à excepção dos meses de Novembro e Dezembro de 2017, os quais são estimativas, pois os contadores inteligentes foram somente introduzidos no início do ano 2018. O somatório dos valores relativos aos meses de Maio, Junho e Julho de 2018 é um valor real medido, contudo a sua repartição foi feita em proporcionalidade com o valor pago nas facturas energéticas mensais.

Finalmente, é possível obter o valor do consumo total anual, fazendo o somatório do consumo energético dos três períodos horários de todos os meses do ano:

$$\sum_{m=1}^{12} E_{Ponta,m} + \sum_{m=1}^{12} E_{Cheias,m} + \sum_{m=1}^{12} E_{Vazio,m} = 7965 kWh$$

m: Mês.

Assim, no que diz respeito ao período de 12 meses respeitante às facturas energéticas analisadas, o consumo anual do edifício foi de **7965 kWh**.

5.2.2 Local de Aplicação

Um dos principais aspectos a ter em conta aquando da instalação de um sistema de painéis fotovoltaicos tem que ver com a localização dos mesmos. Um mau posicionamento dos painéis contribui, em larga medida, para uma redução drástica do seu rendimento energético, devido ao facto de esta estar directamente dependente da radiação solar que nestes incide. Assim sendo, tendo em conta as opções disponíveis, deve-se fazer um estudo das mesmas e actuar no sentido de maximizar esta mesma exposição solar.

No Capítulo anterior, mais precisamente na secção 4.4, fez-se uma análise genérica destas condições e percebeu-se que existiam duas hipóteses plausíveis para a colocação dos painéis. Uma delas era o próprio telhado do edifício, o local mais comum de aplicação, enquanto que a outra tinha que ver com a construção de uma estrutura metálica com a única função de servir de suporte à instalação do sistema PV. Em seguida, analisar-se-ão mais em detalhe as condições que cada uma das opções apresenta tendo em conta diversos parâmetros.

- **Inclinação:** Em termos da inclinação ideal, como já foi visto, esta tem uma dependência directa da localização geográfica do local de instalação, mais concretamente da latitude, e, tendo em conta que o edifício se situa na cidade de Coimbra, esse valor é de aproximadamente 33°. No caso do telhado, este possui uma inclinação de 25°. Este valor, apesar de não ser o valor óptimo, encontra-se relativamente próximo deste, pelo que não se apresenta como uma má opção. No que diz respeito à estrutura metálica, uma vez que esta será construída de raiz e com o propósito de suportar os painéis fotovoltaicos, esta poderá ser moldada à medida que se desejar, pelo que será concebida com o ângulo desejado. Assim sendo, neste aspecto, a estrutura metálica apresenta-se como uma opção ligeiramente mais viável.
- **Sombreamento:** Outro parâmetro que não deve ser negligenciado prende-se com o possível sombreamento dos painéis, seja este total ou apenas parcial. Há que ter em conta não apenas a estrutura do próprio edifício, mas também outras construções que se encontrem ao seu redor. Um outro possível factor de sombreamento é a própria vegetação, que, mesmo que no momento da instalação possa não representar uma ameaça ao rendimento do sistema, pode vi-lo a ser posteriormente devido ao seu crescimento natural, pelo que o controlo do seu crescimento deve constar nos procedimentos de manutenção. Analisando as opções existentes, verifica-se que no caso do telhado este apresenta a possibilidade de haver sombreamento ao final da tarde, devido à proximidade de um edifício com uma altura superior àquele em que se foca este estudo. No que diz respeito à hipotética estrutura produzida, esta apresenta o mesmo problema, uma vez que estaria sustentada numa parede que está orientada na direcção Sul-Sudeste. Relativamente a este parâmetro, pode-se afirmar que nenhuma das duas opções é mais vantajosa que a outra.

- **Orientação:** Um dos parâmetros mais decisivos aquando da aplicação de painéis fotovoltaicos tem que ver com a orientação dos mesmos, isto é, a direcção para a qual estes se encontram voltados. Como já foi referido anteriormente, no caso do Hemisfério Norte, a direcção ideal é a direcção Sul, o que matematicamente corresponde a um azimute de 0° , isto é, quanto menor o ângulo que a direcção para o qual o sistema PV aponta faz com o Sul, maior será o rendimento energético do mesmo. De modo a calcular quais os azimutes que as duas instalações apresentariam, utilizaram-se duas ferramentas tecnológicas. Primeiramente, obteve-se uma imagem de satélite utilizando o *Google Maps* do edifício, na qual, de forma a facilitar a identificação da direcção de interesse (neste caso o Sul), o Norte se situava a 90° (na direcção dos ponteiros do relógio) e o Sul a 270° . Posteriormente, fez-se uso de uma ferramenta denominada *Online Protractor* ou Transferidor *Online*, a qual foi utilizada para medir os ângulos que, quer o telhado, quer a hipotética estrutura metálica, fazem com a direcção da Sul. A utilização dessa mesma ferramenta é ilustrada na Figura 15. A direcção da imagem de satélite foi invertida para Norte-Sul de forma a facilitar a utilização do Transferidor.

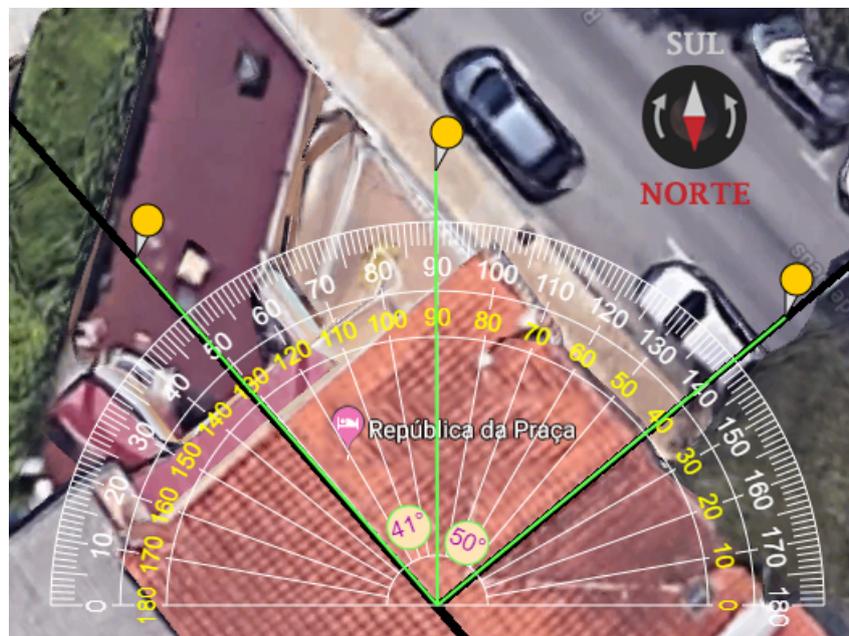


Figura 15: Vista de Satélite do Edifício (Direcção Norte-Sul) com a Utilização da Ferramenta *Online Protractor* [24] [25]

Tal como se pode observar na figura, no caso do telhado, o ângulo entre a direcção para a qual este está orientado em relação à direcção Sul é de 50° . Por outro lado, para a estrutura metálica, esse mesmo ângulo é menor, agora de 41° . Por conseguinte, a estrutura metálica apresenta-se mais uma vez com uma ligeira vantagem no que diz respeito a ser uma melhor escolha relativamente ao local de instalação do sistema PV.

- **Área Disponível:** Por último temos um parâmetro que diz respeito à área que existe disponível para a aplicação do próprio sistema PV. Por norma, quanto maior for, melhor, pois oferece maior liberdade a quem dimensiona o sistema de escolher a quantidade de painéis que mais se adequa a cada caso. Contudo, quando essa área é reduzida, isso pode ser uma desvantagem clara. No caso de estudo, verificamos que o telhado, apesar de apresentar uma área total considerável, é algo irregular

devido à sua própria fisionomia, possuindo zonas praticamente trapezoidais, o que dificulta a colocação de vários painéis em série, uma vez que estes possuem uma forma rectangular. No caso da estrutura metálica, tendo em conta o espaço disponível para a construção da mesma, tratar-se-ia de uma área rectangular contínua, ideal para a colocação de vários painéis fotovoltaicos, sendo claramente a melhor opção disponível neste aspecto.

Em jeito de conclusão, tendo em conta todos os parâmetros analisados, a opção que se apresenta claramente como a mais viável para a instalação dos painéis fotovoltaicos é a criação de uma **estrutura metálica** criada para o efeito. Uma medição realizada no local permitiu concluir que, tendo em conta o espaço disponível, as dimensões máximas que esta estrutura pode atingir são 9 metros de comprimento por 2 metros de largura. De forma a ter uma representação visual e genérica de onde vai ser construída e quais as suas dimensões relativamente ao resto do edifício e com recurso a uma ferramenta de edição gráfica básica [26], um esboço desta mesma estrutura é apresentado na Figura 16.

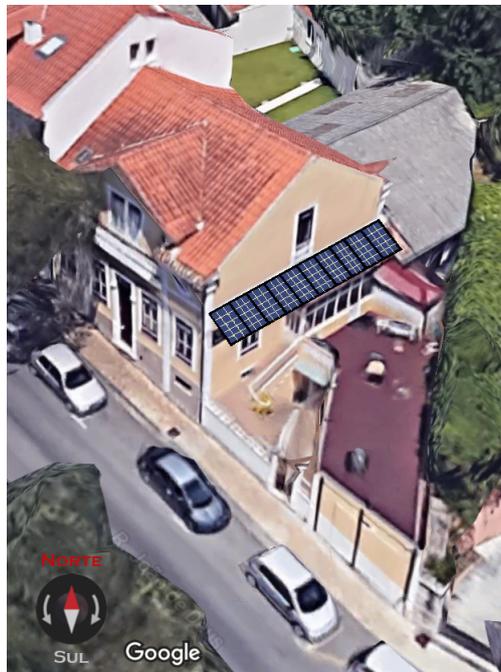


Figura 16: Esboço da Estrutura Metálica a Partir de Vista de Satélite [24] [26]

5.2.3 Módulos Fotovoltaicos

Quando se trata de projectar um qualquer sistema PV, o elemento de toda a instalação que possui maior preponderância naquela que será a rentabilidade de todo o sistema são, indiscutivelmente, os painéis fotovoltaicos. Destes, dependem directamente alguns factores essenciais a todo o sistema, tais como, por exemplo, a forma como estes estão expostos à radiação solar e a capacidade destes de converterem essa mesma radiação em energia eléctrica. Para além disso, como já foi visto anteriormente de forma parcial, existem outros aspectos que influenciam o rendimento do sistema, sejam eles a orientação e inclinação dos painéis, o número e tipo de painéis utilizados, a existência de baterias para armazenamento energia, entre outros. De modo a poder estimar com elevada precisão a verdadeira influência de todos estes aspectos no sistema e com o objectivo de perceber quais as opções que maximizam a viabilidade do mesmo, torna-se fundamental a utilização de um *software* de simulação, neste caso do *Sunny Design* da SMA [23].

Primeiramente, é necessário introduzir no programa os valores relativos à localização geográfica do edifício, uma vez que estes, tal como já foi visto no Capítulo 2, estes influenciam a quantidade de radiação solar existente e também a própria temperatura ambiente. Apesar de, no caso de Portugal, o programa apenas possuir na sua base de dados os valores relativos às cidades de Porto, Lisboa e Faro, existe a possibilidade de importar dados meteorológicos personalizados. Assim, fez-se a importação dos mesmos valores que tinham sido utilizados em projectos de âmbitos semelhantes, também realizados na cidade de Coimbra, tal como o projecto fotovoltaico do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (DEEC). No que diz respeito à cidade de Coimbra, esses dados indicam que o valor da soma anual da radiação global é de 1570,79 kWh/m²a [27]. Toda a informação importada que foi utilizada é apresentada na Figuras 17.

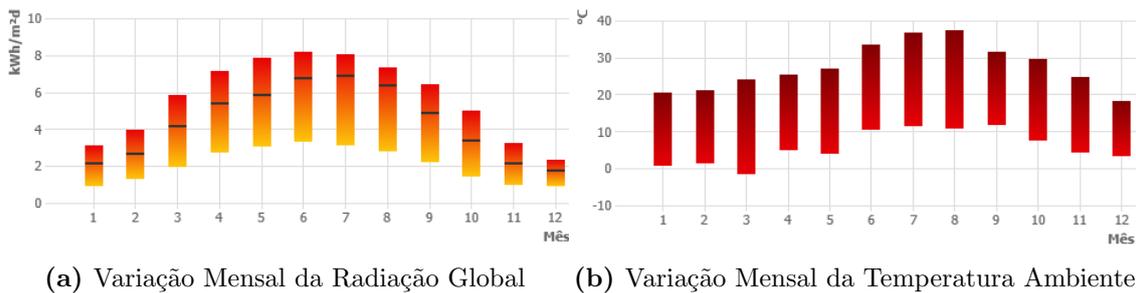


Figura 17: Dados Meteorológicos Importados Relativos à Cidade de Coimbra [27]

Em seguida, é necessário introduzir não apenas o valor do consumo anual de energia (já calculado), mas também os dados relativos ao perfil de carga do edifício. Isto torna-se importante uma vez que, para uma estimativa de elevada precisão, há que ter em conta de que forma é que o consumo varia em diferentes planos. Estes podem ser, por exemplo, entre os períodos diurno e nocturno, entre os dias úteis e os dias de descanso e entre as diferentes estações do ano (mais concretamente no Verão e no Inverno). Relativamente ao caso de estudo, essas análises já foram efectuadas no Capítulo 4.

Posteriormente, é necessário configurar o sistema fotovoltaico propriamente dito, isto é, fazer não apenas a selecção do modelo e do número dos módulos fotovoltaicos a serem utilizados e do respectivo inversor, mas também definir o tipo de montagem pretendida. Relativamente à montagem e ao alinhamento dos módulos, tal como já foi visto, estes serão montados numa estrutura adjacente à fachada do edifício orientada a Sul-Sudeste e, portanto, com um ângulo de orientação em relação ao Sul de 41°. Em relação ao ângulo de inclinação, este é praticamente o ideal, que ronda os 34°. O menu que possibilita a introdução dos valores respeitantes a todas estas variáveis está ilustrado na Figura 18.

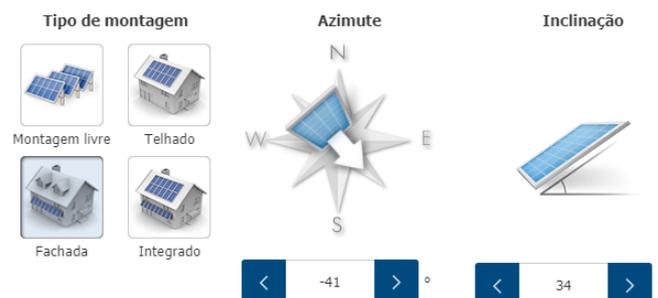


Figura 18: Variáveis Respeitantes à Montagem e Alinhamento do Sistema PV [23]

No que diz respeito ao modelo dos módulos fotovoltaicos, caso este estudo fosse totalmente independente, o processo de escolha passaria por realizar um estudo de mercado tendo em conta, quer as necessidades energéticas do caso de estudo, quer o orçamento inicial disponível. Após avaliar e analisar comparativamente todas as opções disponíveis, seria escolhida a hipótese que, no cômputo geral, se apresentaria como a mais vantajosa. Contudo, pelo facto de este estudo ser realizado em parceria com uma empresa privada, a escolha do modelo desses mesmos módulos fotovoltaicos está sujeita, desde logo, ao leque de marcas com que a empresa trabalha e aos módulos que esta tem disponíveis para instalação. Assim sendo, após contactos com a GPS-Energia, Lda, a informação recolhida junto da mesma aponta para que os painéis fotovoltaicos a instalar no caso de estudo sejam do fabricante alemão Axitec Energy GmbH & Co. KG, modelo AC-280P/156-60S (AXIpower).

Relativamente à quantidade de painéis a instalar, há que ter em conta, primeiro que tudo, a dimensão dos próprios painéis em relação a toda a estrutura, de forma a perceber qual o limite máximo de módulos fotovoltaicos que é possível eventualmente instalar. Ao consultar a ficha técnica respeitante aos módulos indicados [28], foi possível constatar que os painéis apresentam como dimensões 1.64 metros de comprimento e 0.992 metros de largura. Uma vez que se pretende instalar os módulos fotovoltaicos em paralelo e ao longo da estrutura metálica e que esta possui 9 metros de comprimento, seria possível, no limite máximo, instalar 9 painéis fotovoltaicos deste tipo. Contudo, devido a normas de segurança e a determinados requisitos funcionais necessários à instalação do sistema, o local onde os módulos se encontram instalados deve possuir algumas áreas “livres”, pelo que, na realidade, esse limite é de apenas 8 módulos.

Com o objectivo de tornar este estudo o mais completo possível, faz todo o sentido analisar diversos cenários, de forma a perceber qual é a opção que mais se adequa este caso. No que diz respeito ao número de módulos fotovoltaicos a aplicar, far-se-á uma comparação entre dois cenários distintos, ambos sem armazenamento, tentando perceber quais as vantagens e desvantagens de cada um. Tal como recomendado pela empresa, ambos os cenários serão sem ligação à RESP, de forma a tornar o processo burocrático o mais simples possível, sendo apenas necessária uma comunicação prévia para aplicação dos módulos [16] e evitando o pagamento de determinados custos e taxas extraordinárias.

A primeira das hipóteses a analisar, o Cenário A, passa pelo estudo de uma opção cuja potência instalada seja igual ou inferior a 1,5 kW, o que corresponde à potência máxima do inversor. Tendo em conta os módulos escolhidos e uma vez que a potência destes é dada em Watt-pico (Wp), potência a qual só se verifica durante o período de maior radiação solar (geralmente ao meio-dia), a potência total dos módulos deve ultrapassar ligeiramente este valor de potência instalada, pelo que o número de módulos a escolher recai nos 6 módulos fotovoltaicos, perfazendo uma potência acumulada de 1,68 kWp. Os valores, para uma configuração deste género, obtidos através da simulação do *Sunny Design* podem ser observados na Figura 19.

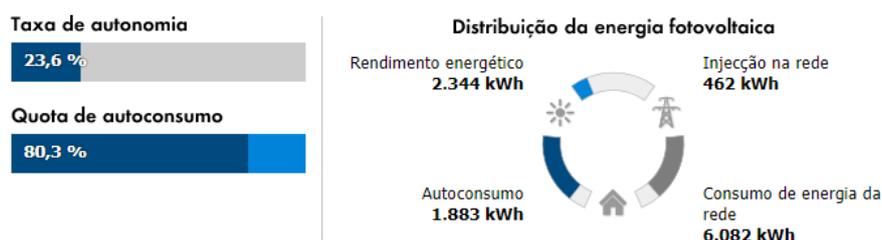


Figura 19: Cenário A: 6 Módulos Fotovoltaicos (1,68 kWp) e Inversor de 1,5 kW

Antes de mais, o primeiro valor a ter em conta é a taxa de autonomia. Este parâmetro mede qual a percentagem da energia total consumida anualmente que provém do sistema fotovoltaico. A partir dos dados apresentados, podemos observar que esta se encontra fixada nos 23,6%, ou seja, menos de uma quarta parte desse consumo tem origem na energia solar. Este é um valor baixo, que decorre do relativamente reduzido número de painéis existentes neste cenário. Relativamente à quota de autoconsumo, isto é, a percentagem de energia proveniente dos módulos fotovoltaicos que é, de facto, consumida, esse valor situa-se nos 80,3%. Isto indica que a quantidade de energia produzida que é, posteriormente, injectada na rede, é relativamente reduzida, o que é um bom indicador, uma vez que esta análise é feita para um caso em que não há ligação à RESP e correspondente remuneração por injeção de energia. No que diz respeito ao consumo de energia da rede, esta representa claramente a grande fatia do consumo energético, o que não é o ideal, devido aos elevados preços praticados.

A segunda hipótese que irá ser analisada, o Cenário B, passa por uma opção em que a potência instalada ultrapassa os 1,5 kW. Neste caso, estudar-se-á aquela que é a hipótese que contempla o número máximo de painéis tendo em conta o espaço disponível. Assim, com a aplicação de 8 módulos fotovoltaicos, a potência acumulada atinge os 2,24 kWp, devendo, portanto, ser utilizado um inversor com uma potência máxima de 2 kW. Os dados relativos à simulação com uma configuração deste tipo encontram-se ilustrados na Figura 20.

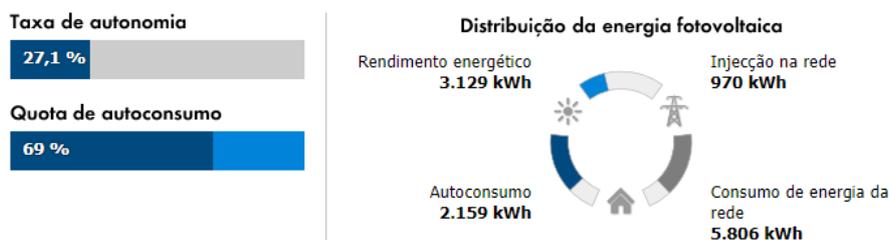


Figura 20: Cenário B: 8 Módulos Fotovoltaicos (2,24 kWp) e Inversor de 2 kW

Primeiramente, verifica-se que há um ligeiro aumento na taxa de autonomia, que se situa agora nos 27,1%, o qual representa uma ligeira melhoria, mais concretamente 3,5%. Contudo, a quota de autonomia é agora mais baixa, estando situada nos 69%, o que representa uma diminuição algo considerável de 11,3%. Ao atentar nos valores absolutos, verifica-se que o rendimento energético aumentou em 785 kWh. Todavia, o valor relativo ao autoconsumo sofreu um aumento de apenas 276 kWh, o que significa que, de toda a energia que é agora produzida a mais relativamente ao primeiro cenário, apenas 35% desta é, de facto, utilizada para autoconsumo, o que é um indicador negativo, uma vez que o autoconsumo, como foi visto, é a opção claramente mais vantajosa. Consequentemente, a quantidade de energia injectada na rede mais que duplicou, ilustrando essa mesma situação. Apesar do consumo de energia da rede ter registado uma diminuição, esta aparenta ser muito ligeira, pelo que os gastos com energia consumida praticamente se mantêm.

5.2.4 Cenário com Armazenamento de Energia

Uma das possibilidades que tem contribuído, ao longo dos últimos anos, para uma aposta cada vez maior na energia solar fotovoltaica, prende-se com a utilização de baterias de armazenamento de energia. Estas tendem a contrariar uma das principais vantagens da tecnologia PV, ou seja, a sua intermitência, uma vez que permitem que uma determinada instalação utilize energia previamente produzida mesmo em situações em que não existe produção fotovoltaica, tais como o período nocturno ou, simplesmente, períodos de sombreamento ou nebulosidade.

De modo a analisar qual o impacto uma bateria de armazenamento de energia teria em termos da rentabilidade energética do sistema, analisa-se agora o Cenário C, que corresponde ao mesmo número de módulos fotovoltaicos utilizados no Cenário A, mas agora com a utilização de um inversor fotovoltaico (SB 3600SE-10) com potência máxima de 5,2 kW, mas com acumulador de iões de lítio integrado, cuja capacidade é de 2 kWh. A simulação de um sistema com esta configuração é ilustrada pela Figura 21.

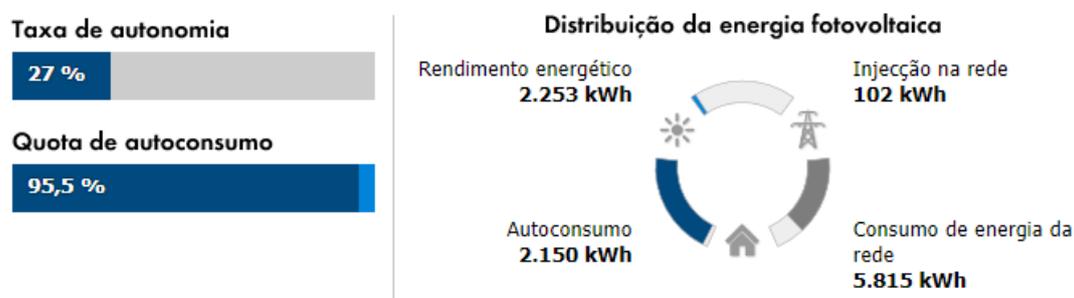


Figura 21: Cenário C: 6 Módulos Fotovoltaicos (2,24 kWp) e Inversor de 5,2 kW com Acumulador de Iões de Lítio Integrado com Capacidade de 2 kWh

Em primeiro lugar, verifica-se a taxa de autonomia é ligeiramente superior, agora situada nos 27%, devido ao facto de a quota de consumo apresentar um valor muito considerável, mais precisamente de 95,5%. Isto seria de esperar, ou seja, como praticamente toda a energia produzida é utilizada para autoconsumo, seja no momento da produção ou posteriormente quando esta se encontra armazenada, o valor da energia injectada na rede é residual. Esta apresenta-se claramente como a grande vantagem no que diz respeito aos sistemas com capacidade de armazenamento, permitindo aumentar ao máximo a capacidade para autoconsumo da instalação. No entanto, mais uma vez, devido ao facto de a potência total dos módulos fotovoltaicos ser relativamente reduzida face ao consumo existente, a necessidade de consumir energia da rede continua a ser muito elevada, continuando este factor a representar grande parte dos custos.

Neste Capítulo, apenas se pretende fazer uma análise do dimensionamento do ponto de vista energético e de engenharia, isto é, comparar de que forma é que a alteração de certas variáveis, tais como o número de módulos fotovoltaicos ou a introdução de um sistema de armazenamento, alteram o panorama e a fiabilidade energética do caso do estudo. Uma análise que inclui uma perspectiva financeira é efectuada no Capítulo seguinte.

Referências Bibliográficas

- [1] Solargis, *Solar resource map* © 2019
<https://solargis.com>
- [2] Boletim de Energias Renováveis, APREN, Edição de Dezembro de 2018.
<https://www.apren.pt/contents/publicationsreportcarditems/12-boletim-energias-renovaveis-2018.pdf>
- [3] <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2018/Apr/Global-Renewable-Generation-Continues-its-Strong-Growth-New-IRENA-Capacity-Data-Shows>
- [4] <https://news.energysage.com/how-much-does-the-average-solar-panel-installation-cost-i>
- [5] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [6] <https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>
- [7] Slides de PPE
- [8] <https://www.zmescience.com/ecology/renewable-energy-ecology/solar-panels-pros-and-cons-056654/>
- [9] <https://www.tesla.com/solarroof>
- [10] <https://www.dezeen.com/2017/08/23/copenhagen-international-school-c-f-moller-architects-12000-solar-panels-denmark/>
- [11] <https://solargaps.com/>
- [12] <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/burnett2/docs/flexible.pdf> What the duck curve tells us about managing a green grid, CAISO
- [13] Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro. *Diário da República, 1.ª série — N.º 211 — 2 de Novembro de 2007*. Ministério da Economia e da Inovação.
- [14] Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de Março. *Diário da República, 1.ª série — N.º 47 — 8 de Março de 2011*. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento.
- [15] J. P. N. Alexandre, "Impacto da Nova Legislação Sobre o Regime de Autoconsumo de Energia," Tese Mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2015
- [16] Decreto-Lei n.º 153/2014 de 20 de outubro. *Diário da República, 1.ª série — N.º 202 — 20 de outubro de 2014*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
- [17] P. Cabral, "O Setor Fotovoltaico em Portugal", ed: Direção Geral de Energia e Geologia, 2013.
- [18] F. Pinto, "Regime Jurídico das Unidades de Produção (UP) Distribuída," ed: Direção Geral de Energia e Geologia, 2015.

- [19] “Ordenamento do Território e Energia: Decreto-Lei n.º 153/2014 de 20 de outubro de 2014,” ed. Diário da República, 1.ª série — N.º 202 Ministério do Ambiente, 2014.
- [20] OMIE, ”Relatório de Preços,” 2018.
- [21] <https://www.edp.pt/particulares/energia/electricidade/>
- [22] Portaria n.º 14/2015 de 23 de janeiro. *Diário da República, 1.ª série — N.º 16 — 23 de janeiro de 2015*. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.
- [23] Programa Informático *Sunny Design* da SMA
<https://www.sunnydesignweb.com/>
- [24] Ferramenta *Google Maps*
<https://goo.gl/maps/2MM9PQ6voDDWLaAK9>
- [25] Ferramenta *Online Protractor*
https://ginifab.com/feeds/angle_measurement/
- [26] Ferramenta *Microsoft Paint*
- [27] Projecto Fotovoltaico DEEC
- [28] https://www.axitecsolar.com/data/solarpanels_documents/DB_60zlg_poly_power_MiA_EN.pdf
- Direcção Geral de Energia e Geologia: <http://www.dgeg.gov.pt>
 - *EuroStat* - Gabinete de Estatísticas da União Europeia: <https://ec.europa.eu/eurostat>
 - *European Commission (Energy)*: <https://ec.europa.eu/energy>
 - *U.S. Energy Information Administration*: <https://www.eia.gov>
 - *U.S. Department of Energy*: <https://www.energy.gov>