



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Ângelo Jorge da Silva Pereira

Conceção de uma Central Fotovoltaica

UMinho | 2022

maio de 2022

Conceção de uma Central Fotovoltaica

Ângelo Jorge da Silva Pereira



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Ângelo Jorge da Silva Pereira

Conceção de uma Central Fotovoltaica

Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias do
Ambiente

Ramo de especialização - Energia

Trabalho realizado sob orientação de

Professor Paulo José Gomes Coutinho

Engenheira Vânia Cristina Cardoso Salgado

maio de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Com a finalização desta dissertação final de Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente não posso deixar de agradecer a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me ajudaram a concluir esta etapa importante na minha vida pessoal e académica.

À Prime Energy Solar Systems, um grande obrigado por me ter dado esta oportunidade importante de estágio, permitindo aumentar o meu conhecimento geral sobre a área da energia fotovoltaica.

Ao meu orientador e diretor de mestrado na Universidade do Minho, professor Paulo José Gomes Coutinho, agradeço pela sua disponibilidade, entreatajuda, preocupação, simpatia e dedicação.

À minha orientadora de empresa, Vânia Salgado, agradeço por toda a disponibilidade, simpatia, entreatajuda, dedicação e por todo o conhecimento que me forneceu.

À Engenheira Marisa Novais, agradeço por toda a disponibilidade, simpatia, por todo o esclarecimento técnico no que toca ao dimensionamento do projeto fotovoltaico e por todo o conhecimento que me forneceu.

Quero deixar também um grande agradecimento a todos os meus colegas de curso e amigos, principalmente ao José Araújo, Guilherme Antunes, Joana Kuski e Bruna Nogueira pelos momentos partilhados e pelo apoio que demonstraram.

Um agradecimento final e especial à minha namorada Irene Fontes e à minha família, particularmente aos meus pais, por serem um pilar do meu lado, por sempre demonstrarem um apoio incondicional em todos os momentos nesta etapa da minha vida.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Conceção de uma Central Fotovoltaica

O recurso a energias renováveis é cada vez mais frequente nos dias de hoje, tal justifica-se pela procura de alternativas que permitam a redução da emissão de gases poluentes, objetivo muito abordado pelos países integrados no Acordo de Paris (COP 21) pela sua importância para a melhoria da qualidade de vida e sustentabilidade do planeta Terra.

A presente dissertação realizou-se no âmbito do Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente, no ramo de Energias e foi desenvolvida no contexto de estágio curricular na empresa Prime Energy Solar Systems, especializada na prestação de serviços na área de engenharia solar. O principal objetivo passou pelo dimensionamento de um sistema fotovoltaico e pela verificação da sua rentabilidade e eficiência. Assim, foi realizado um dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede, implementado na cobertura da indústria alimentar MEPS, localizada em Fafe. O sistema fotovoltaico tem uma potência total instalada de 105,84 kWp e o seu propósito passa pelo autoconsumo. É composto por 340 painéis fotovoltaicos, 2 inversores, estrutura de suporte e por equipamentos de comando, corte, proteção e de contagem.

Primeiramente, efetuou-se uma estimativa da produção anual do sistema fotovoltaico, com o ângulo de inclinação 10°, recorrendo ao PVSol e PVGIS. O software PVSol é o que apresenta a maior previsão de produção anual de energia com um valor de 141586 kWh, sendo superior ao que foi registado verdadeiramente pelo sistema fotovoltaico (79263 kWh). Em relação aos fatores de desempenho também determinados pelo software PVSol, observou-se uma performance rating média de 85,1%, durante um ano, nos inversores e, no que diz respeito aos módulos, foi verificada uma queda de potência de 19% ao longo dos 25 anos. De seguida procedeu-se à comparação dos resultados estimados do PVGIS e PVSol com os resultados reais da obra e chegou-se à conclusão de que o sistema apresentou uma autossuficiência de 43,07%, significando que o sistema fotovoltaico é eficiente, cobrindo quase metade dos consumos da indústria. Por fim, fez-se uma análise de viabilidade financeira ao sistema fotovoltaico, utilizando os dados do PVSol e concluiu-se que o sistema irá ser rentável e economicamente viável, uma vez que apresenta um valor atual líquido positivo (72000€), um payback de 4,3 anos (dentro do tempo de vida do sistema) e uma taxa interna de retorno de 23%, superior à taxa mínima de atratividade (10%).

PALAVRAS-CHAVE

Dimensionamento; Energia; Energia Solar; Inversor; PVSol; Rentabilidade; Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

Design of a Photovoltaic Plant

The use of renewable energies is increasingly frequent today, this is justified by the search for alternatives that allow the reduction of the emission of polluting gases, a goal much addressed by the countries integrated in the Paris Agreement (COP 21) for its importance for improving the quality of life and sustainability of planet Earth.

This dissertation was carried out in the scope of the Master's degree in Environmental Sciences and Technologies, in the field of Energies and was developed in the context of curricular internship at Prime Energy Solar Systems, specialized in the provision of services in the area of solar engineering. The main objective was the design of a photovoltaic system and the verification of its profitability and efficiency. Thus, a photovoltaic system connected to the network was dimensioned, implemented in the coverage of the MEPS food industry, located in Fafe. The photovoltaic system has a total installed power of 105.84 kWp and its purpose is self-consumption. It consists of 340 photovoltaic panels, 2 inverters, support structure and command, cutting, protection and counting equipment.

First, an estimate of the annual production of the photovoltaic system was made, with the inclination angle 10°, using PVSol and PVGIS. The PVSol software has the highest forecast of annual energy production with a value of 141586 kWh, being higher than that actually recorded by the photovoltaic system (79263 kWh). Regarding the performance factors also determined by the PVSol software, an average performance rating of 85.1% was observed during one year in the inverters and, with regard to the modules, a power drop of 19% was observed over the 25 years. Next, the estimated results of PVGIS and PVSol were compared with the actual results of the work and it was concluded that the system presented a self-sufficiency of 43.07%, meaning that the photovoltaic system is efficient, covering almost half of the industry's consumption. Finally, a financial feasibility analysis was made to the photovoltaic system, using PVSol data and it was concluded that the system will be profitable and economically viable, since it has a positive net current value (72000€), a payback of 4.3 years (within the lifetime of the system) and an internal rate of return of 23%, higher than the minimum rate of attractiveness (10%).

KEYWORDS

Energy; Inverter; Photovoltaic system; Profitability; PVSol; Sizing; Solar Energy.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Palavras-Chave.....	vi
Abstract.....	vii
Keywords.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas.....	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
2. Panorama Energético em Portugal.....	5
3. Fundamentação Teórica.....	10
3.1 Recurso Solar.....	10
3.1.1 Componentes da Radiação Solar.....	11
3.2 Geometria Terra-Sol.....	11
3.2.1 Declinação Solar.....	12
3.2.2 Elevação solar e Azimute solar.....	14
3.2.3 Ângulo Horário.....	16
3.3 Sistema Fotovoltaico.....	17
3.3.1 Tecnologia das Células Fotovoltaicas.....	17
3.3.2 Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.....	18
4. Caso de estudo.....	23
4.1 A Organização.....	23
4.2 Organograma da Empresa.....	24
4.3 Descrição do Processo Produtivo.....	25

4.4 Dimensionamento Fotovoltaico	26
4.4.1 Caracterização do Projeto	26
4.4.2 Caracterização do local	27
4.4.3 Caracterização da instalação fotovoltaica.....	28
4.5 Componentes do Sistema Fotovoltaico	29
4.5.1 Módulos Fotovoltaicos.....	30
4.5.2 Inversores	30
4.5.3 Cablagem	30
4.5.4 Estruturas de Suporte	30
4.5.5 Quadro Elétrico.....	31
4.5.6 Contador	31
4.5.7 Sistema de Monitorização	31
5. Estimativas.....	32
5.1 Dados do Software PVSol.....	32
5.2 Dados do Software PVGIS.....	38
6. Resultados	38
6.1 Resultados da simulação do PVSol.....	38
6.2 Resultados da simulação do PVGIS.....	40
6.3 Comparação dos resultados simulados com resultados reais	41
6.4 Análise da Viabilidade Financeira	44
7. Conclusão	49
6. Referências.....	51
Anexos	54
Anexo A – Datasheet do Módulo	55
Anexo B – Datasheet do Inversor	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Adições líquidas de capacidade renovável entre 2011 e 2022 (Internacional Energy Agency, 2021).....	2
Figura 2- Adição de capacidade renovável de energia nos vários tipos de energia (Internacional Energy Agency, 2021).....	3
Figura 3- Dependência energética de Portugal face ao exterior nos últimos anos (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).....	6
Figura 4- Relação entre o PIB, emissões totais de CO ₂ e consumo de energia primária ao longo dos anos (2000=100 (ano base)) (Comissão Europeia, 2019).	7
Figura 5 - Progresso do Saldo importador em Portugal nos últimos anos (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).....	8
Figura 6- Representação da energia gerada pelas diversas fontes de energia no mês de março e no primeiro trimestre de 2021 (APREN, 2021).	9
Figura 7 - Representação dos equinócios e dos solstícios com a variação da declinação solar ao longo do ano.	13
Figura 8- Posicionamento do planeta Terra em relação ao plano da elíptica, na Esfera Celeste (McClure, 2017).....	14
Figura 9 - Ângulos relevantes para definir a geometria Sol-Terra: Ângulo do azimute solar (A), Ângulo de elevação solar (h), Zénite (Φ), Inclinação da superfície (β) e Orientação (α) (Martinez-Gracia, Arauzo e Uche, 2019).....	15
Figura 10 - Representação de uma célula fotovoltaica, das duas camadas do tipo N e P e da zona de depleção ao redor da junção entre as camadas (American Chemical Society, 2020).....	19
Figura 11 - Célula solar monocristalina (Solarquotes, 2018).....	20
Figura 12 - Célula solar policristalina com anti-reflexão (Solarquotes, 2018).	21
Figura 13 - Células solares de silício amorfo (Alves Freitas, 2008).	22
Figura 14 - Células solares de película fina (Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).	22
Figura 15 - Organograma da Empresa.	24
Figura 16 - Processo produtivo da empresa.	25
Figura 17 - Indústria onde se procede a instalação do sistema fotovoltaico (Fonte: Google Earth).	28
Figura 18 - Tipo de Sistema, Dados climáticos e Rede de simulação (Fonte: PVSol).	32
Figura 19 - Consumos da simulação (Fonte: PVSol).....	34

Figura 20 - Ilustração da montagem para a água Sudoeste (Fonte: PVSol).....	35
Figura 21 - Ilustração da montagem para a água Nordeste (Fonte: PVSol).....	35
Figura 22 - Degradação do módulo (Fonte: PVSol).....	36
Figura 23- Desempenho do sistema por inversor (Fonte: PVSol).....	36
Figura 24 - Ilustração das strings suportadas apenas por 1 inversor (Fonte: PVSol).....	37
Figura 25 - Cobertura do consumo (Fonte: PVSol).....	39
Figura 26 - Utilização da energia fotovoltaica (Fonte: PVSol).....	39
Figura 27 - Energia solar incidente no plano dos módulos (Fonte: PVGIS).....	40
Figura 28- Estimativas da produção mensal do sistema fotovoltaico (Fonte: PVGIS).....	41
Figura 29 - Comparação da produção estimada (PVGis) com a produção real em 2021.....	43
Figura 30 - Fluxo de caixa acumulado (Fonte: PVSol).....	47
Figura 31 - Evolução dos custos de energia antes e após a instalação fotovoltaica (Fonte: PVSol).....	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Características da instalação (Fonte: PVSol).	33
Tabela 2 - Dados da Área 1, referentes à água Sudoeste (Fonte: PVSol).....	34
Tabela 3 - Dados Área 2, referentes à água Nordeste (Fonte: PVSol).....	35
Tabela 4 - Configuração das Strings por Inversor (Fonte: PVSol).	37
Tabela 5 - Características da instalação (Fonte: PVGIS).	38
Tabela 6 - Produção Real x Produção Estimada (PVGis) do sistema fotovoltaico.	42
Tabela 7 - Consumo total das instalações no ano de 2020 e 2021.	43
Tabela 8 - Autossuficiência da indústria.....	44
Tabela 9 - Valor Atual Líquido.....	46
Tabela 10 - Resultados provenientes da simulação do software PVSOL para a análise financeira.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
COP 21	Paris Climate Conference
GEE	Gases de Efeito de Estufa
IRENA	International Agency for Renewable Energies
IEA	Internacional Energy Agency
UPAC	Unidade de Produção para Autoconsumo
PNEC	Plano Nacional de Energia e Clima
FER	Fontes de Energia Renováveis
APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
δ	Declinação Solar
φ	Latitude
HR	Ângulo Horário
Φ	Ângulo Zenital
α_s	Azimute Solar
AST	Tempo Solar Aparente
ω_s	Ângulo de nascimento e do pôr do Sol
γ	Altura Solar
a-Si	Silício Amorfo
CIS	Disseleneto de cobre e índio
FV	Fotovoltaico
R.T.I.E.B.T	Regras Técnicas de Instalações Elétricas em Baixa Tensão
DC	Corrente Contínua
XLPE	Polietileno reticulado

EPR	Etileno Propileno
MEPS	Maria Emília Pereira Soares & Filhos
ROI	Retorno do Investimento
TIR	Taxa Interna de Retorno
VAL	Valor Atual Líquido
CF	Fluxo de Caixa
TMA	Taxa Mínima de Atratividade

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Ao longo dos anos, o aumento do crescimento populacional e do desenvolvimento económico causou um declínio bastante acentuado das fontes de energia convencionais, desde os combustíveis fósseis até aos combustíveis de biomassa. Houve normalmente uma ação permanente do ser humano em tirar proveito de recursos existentes no Planeta Terra para suprimir as suas necessidades, no entanto, a tendência da procura neste tipo de recursos não renováveis com elevado potencial energético provocou impactos negativos a nível mundial como a crise energética, a escassez de recursos e a poluição ambiental, tendo sido por isso essencial a implementação de medidas e soluções para mitigar estes problemas (Zhou *et al.*, 2021).

Em 2015, foi adotado o Acordo de Paris, um tratado internacional no âmbito da UNFCCC juridicamente vinculativo sobre mudanças climáticas, onde países inseridos na COP21 reuniram e assumiram compromissos relativamente ao controlo de respetivos limites de emissão dos GEE, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a níveis abaixo dos 2°C. Nestas emissões de GEE destaca-se o setor energético, representando cerca de dois terços das emissões antropogénicas para a atmosfera. Os países da COP 21, visto que o setor energético é o maior emissor de gases de efeito de estufa, assumiram compromissos para ocorrer uma transformação no sistema energético mundial, alertando a comunidade energética para realizar investimentos que visem o crescimento sustentável da economia mundial e que contribuam para o reforço da segurança energética ao redor do mundo (Delbeke *et al.*, 2019; International Energy Agency, 2021).

Neste contexto, a aposta em fontes de energias renováveis tem vindo a ganhar uma maior preponderância com o decorrer do tempo, de maneira a fazer frente aos desafios políticos, económicos e ambientais que abrangem a geração de eletricidade. Os governos tiveram em consideração vários incentivos económicos com o intuito de promover e contribuir para o desenvolvimento de tecnologias capazes de obter um maior proveito dos recursos naturais (João, 2016; Sampaio e González, 2017).

Em 2021, a Agência Internacional de Energia (IEA) elaborou um relatório, “Renewable Energy Market Update”, no qual realizou uma retrospectiva de 2020 sobre o mercado da energia renovável e ainda uma previsão para os anos de 2021 e 2022. Segundo este relatório, não obstante a pandemia, as energias

renováveis foram a única fonte de energia onde se registou um aumento na procura em 2020. No que toca a previsões para os anos 2021 e 2022, com os desenvolvimentos recentes dos mercados e de políticas, é expectável que ocorram novas adições de capacidade global de energia renovável.

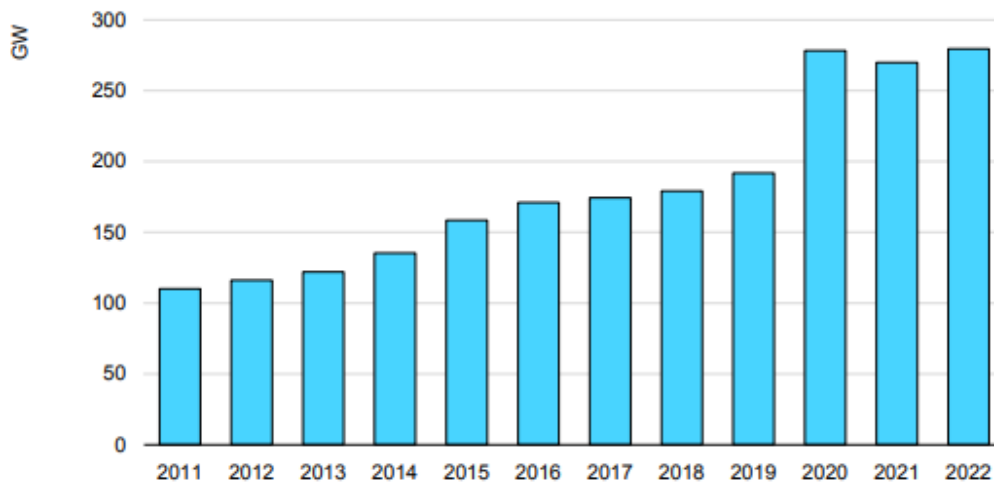


Figura 1- Adições líquidas de capacidade renovável entre 2011 e 2022 (Internacional Energy Agency, 2021).

Observando o gráfico da Figura 1, de 2019 para 2020 ocorreu o maior crescimento na adição de capacidade renovável, 190 GW para 280 GW respetivamente. Esta expansão ultrapassa o nível recorde de 2017-2019 em mais de 50%, de tal modo que já se espera 90% do total de aumentos na adição de capacidade global da energia numa perspetiva futura (Internacional Energy Agency, 2021).

A energia renovável que proporcionou este crescimento e que é considerada a mais promissora a satisfazer as necessidades globais da energia é a energia solar fotovoltaica, tendo sido impulsionada por políticas, investimentos em investigação e desenvolvimento no assunto e apoios (como financiamento na pesquisa) de várias organizações governamentais e não governamentais, que contribuíram a elaborar uma base sólida para a exploração deste sistema de energia renovável. Juntamente a isto, este tipo de energia tem muitas características atrativas sob o ponto de vista dos problemas ambientais atuais, sendo uma energia limpa, ilimitada e de fácil acesso (Kabir *et al.*, 2018).

No gráfico da Figura 2 está presente o impacto dos vários tipos de energia ao longo dos últimos anos e até previsões para o que possa ser o crescimento de cada uma.

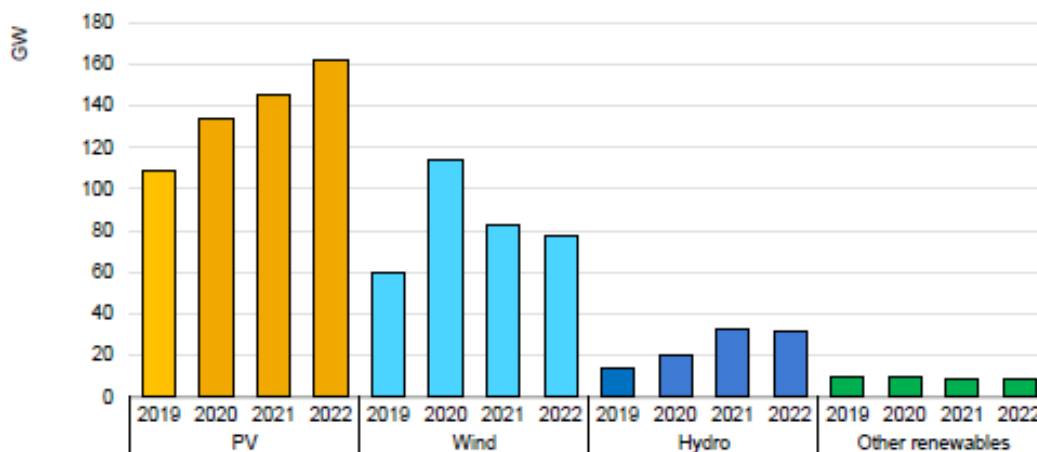


Figura 2- Adição de capacidade renovável de energia nos vários tipos de energia (Internacional Energy Agency, 2021).

Destaca-se uma vez mais a energia solar fotovoltaica, verificando-se um dos maiores crescimentos de utilização desta tecnologia para geração de eletricidade na área das energias renováveis. No ano de 2020 apresenta mais de 134 GW em novos projetos de energia solar instalados globalmente e prevê-se que passe os 160 GW em 2022, representando assim mais de 50% da capacidade de geração total das renováveis. É expectável que essa tendência expansionista se verifique nos próximos anos (Internacional Energy Agency, 2021).

A energia solar, nestes últimos anos, tem sido responsável pela implementação de várias centrais de produção de energia elétrica ao redor do mundo, além do que, mediante a legislação criada, Decreto-lei n° 162/2019, o Governo aprovou um novo regime jurídico aplicável ao autoconsumo de energia renovável, principalmente relacionado à produção de energia solar, promovendo o investimento em instalações fotovoltaicas por parte de pequenos agregados de consumidores (Mendes, 2016; Presidência do Conselho de Ministros, 2019).

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo fazer o dimensionamento e verificar a rentabilidade e eficiência de um sistema fotovoltaico para produção de energia elétrica destinada ao autoconsumo, na modalidade de Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC), definido nos termos do Decreto-Lei n° 153/2014, 20 de Outubro.

Numa primeira fase, faz-se a introdução à empresa, indicando o seu organograma e o seu processo produtivo. De seguida, procedeu-se aos softwares PVSol e PVGIS para se efetuarem simulações que

possibilitaram não só estimar valores de produções/consumos mensais e anuais, como também determinar fatores de desempenho que caracterizam o sistema. No final, com os valores das simulações, houve uma comparação com dados reais do sistema.

Por fim, analisa-se a viabilidade energética e financeira do sistema fotovoltaico, no qual é provado que o sistema é rentável e eficiente.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos. No capítulo 1 é feita a introdução.

No capítulo 2 desenvolve-se todo o estudo e pesquisa relativamente ao estado de arte relacionado com o panorama energético em Portugal.

No capítulo 3 procede-se à continuação do estudo e pesquisa, no entanto, desta vez focado na área de energia solar e tudo o que abrange.

No capítulo 4 procede-se à apresentação e caracterização do caso de estudo, neste caso o sistema fotovoltaico.

No capítulo 5 apresentam-se as estimativas teóricas de produção, consumo e de outros fatores de desempenho que caracterizam o sistema, recorrendo aos softwares PVSol e PVGIS.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados das simulações, é feita uma análise comparativa entre os resultados estimados e os resultados reais do sistema fotovoltaico e, de seguida, faz-se uma análise de viabilidade financeira.

No final, capítulo 7, é realizada a conclusão do trabalho.

2. PANORAMA ENERGÉTICO EM PORTUGAL

No panorama energético, Portugal ambiciona uma transição dos combustíveis fósseis para novas formas de produção e de consumo de energia, com a finalidade de atingir uma economia neutra em carbono. O sistema energético em Portugal baseava-se sobretudo na importação de combustíveis fósseis devido à escassez de matérias-primas nacionais, no entanto, com uma maior aposta nas fontes de energia renováveis houve uma transição energética, sendo agora o caminho maximizar o potencial endógeno renovável existente neste país, adotando padrões de consumo mais exigentes e apostando em tecnologias emergentes limpas (Comissão Europeia, 2019; Enel Green Power, 2020).

Portugal, com influência das suas características climáticas como a altitude, latitude e relevo, é reconhecido como um país ambicioso em relação ao desenvolvimento de fontes renováveis e à descarbonização do mix de geração de energia elétrica. As áreas com maior relevo e, por consequência, com maior altitude nas regiões do Norte e do Centro são propícias ao aproveitamento do vento por parte das turbinas eólicas, já nas regiões a Sul do Tejo, devido aos fatores climáticos mais favoráveis durante o ano, há um maior aproveitamento fotovoltaico. Para além destes fatores, o país possui vários resíduos agrícolas e florestais que contribuem para a geração de energia renovável através da biomassa, e também vários recursos geotérmicos, existentes sobretudo no arquipélago dos Açores e em zonas de baixas temperaturas em Portugal Continental, provenientes de falhas tectónicas, vulcanismo ativo, afloramento de água quente em fontes termais, entre outros (Pêgas *et al.*, 2017; Enel Green Power, 2020).

Até recentemente, Portugal tem mantido uma posição de destaque no contexto internacional no que se refere à redução das emissões de GEE e à aposta nas fontes de energias renováveis, apresentando resultados bastante positivos. No que respeita às emissões de GEE, de 2005 para 2019 verificou-se um decréscimo de 30% no setor energético e 26% no total de emissões, tendo o país consolidado uma trajetória de descarbonização da economia nacional ao longo do tempo. Para além disso, Portugal tem caminhado para o desenvolvimento das suas políticas energéticas, nomeadamente da incorporação renovável na geração de eletricidade nos vários setores. Em 2019, as fontes de energia renovável geraram 27,8 TWh, representando 55% do total de geração de eletricidade em Portugal. O setor elétrico tem sido dos mais relevantes para esta trajetória do país, sendo que, de 2005 a 2019, teve um crescimento de 27,6% (APREN, 2020; Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

Esta mudança de paradigma, ao longo do tempo, permitiu a Portugal reduzir a sua dependência energética face ao exterior, cerca de 14,6% de 2005 para 2019, estando fixada nos 74,2% como demonstra a Figura 3. Isto permitiu ao país estar mais perto de cumprir com um dos principais objetivos da política nacional, estabelecidos no PNEC 2030, em alcançar um valor de 65% até 2030 (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).



Figura 3- Dependência energética de Portugal face ao exterior nos últimos anos (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

Esta redução da dependência energética em Portugal, nos últimos anos, possibilitou uma diminuição de 18% no consumo de energia primária (27,1 Mtep para 22,3 Mtep), um aumento de 15,9% na produção doméstica de energia e conseqüente crescimento na incorporação das FER no consumo final bruto de energia, situando-se nos 30,6%. Estes fatores ajudaram a garantir um maior nível de segurança de abastecimento (Comissão Europeia, 2019; Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

Embora tenha havido uma redução na taxa de dependência energética, Portugal ainda se encontra na 8ª posição entre os países da UE-28 mais dependentes de terceiros, derivado sobretudo à falta de produção de combustíveis fósseis, nomeadamente o carvão, petróleo ou gás natural, que têm um grande impacto no consumo total de energia primária (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

A redução do consumo de energia primária e do número total de emissões de CO₂ não impediram a Portugal de gerar riqueza (Figura 4), pelo contrário, Portugal tem vindo a atingir uma recuperação económica e caminha a passos largos para uma economia baseada em fontes renováveis, com utilização de práticas sustentáveis, aprimoramento de processos e produção e adoção tecnologias limpas.

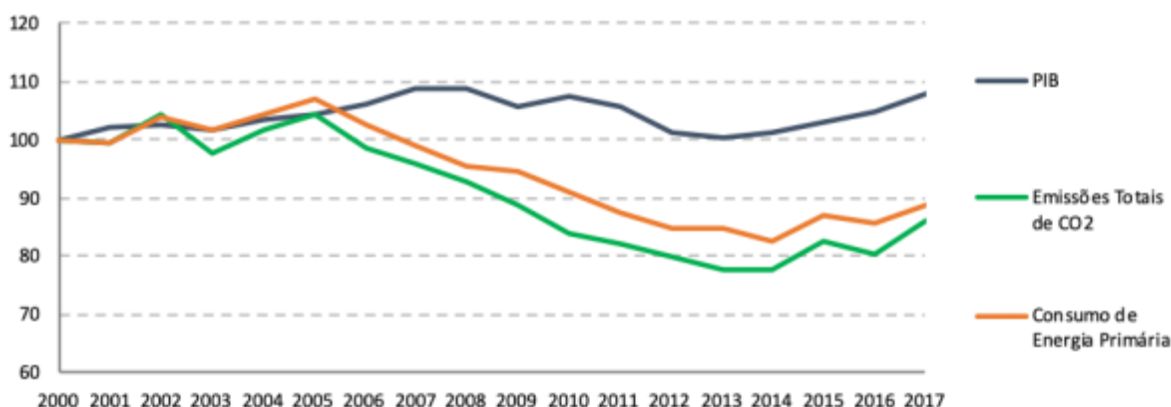


Figura 4- Relação entre o PIB, emissões totais de CO2 e consumo de energia primária ao longo dos anos (2000=100 (ano base)) (Comissão Europeia, 2019).

Os registos relativos aos preços de importação, exportação, dos produtos derivados do petróleo, carvão, gás natural, eletricidade e biomassa são indicados no saldo importador, presente na Fatura Energética Portuguesa, publicação anual que recolhe e trata dos dados mensalmente. O saldo importador de energia é um indicador que traz impactos positivos no que toca à dependência energética e à fatura energética.

Analisando o saldo importador em quantidade monetária, em 2020, o valor foi de 2914 milhões de euros, reduzindo 38,6% em euros face a 2019 devido a mudanças dos mercados pelo impacto da pandemia COVID-19 que reduziu os consumos, à inexistência de importações de carvão e à conjuntura internacional referente à diminuição generalizada dos preços médios das importações (Comissão Europeia, 2019; DGEG, 2020, 2021).

No que toca a quantidade de energia, como podemos observar pela figura 5, de 1999 a 2019, houve uma redução considerável no saldo importador em Portugal, cerca de 18,5%.

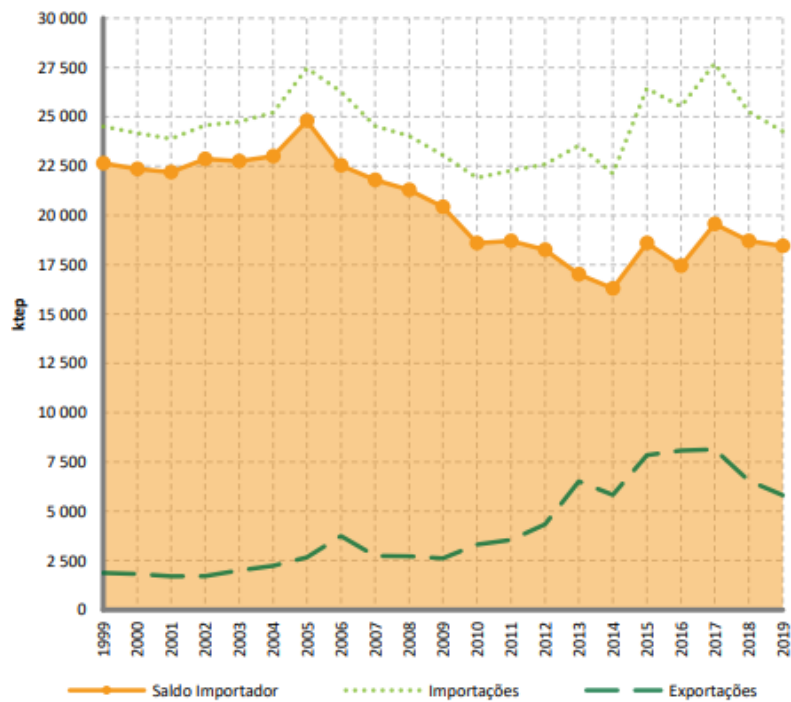


Figura 5 - Progresso do Saldo importador em Portugal nos últimos anos (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

Em termos acumulados até ao final do ano de 2019, Portugal importou 7,0 TWh de eletricidade e exportou 3,6 TWh, resultando num saldo importador de 3,4 TWh. Esta redução foi determinada pelo aumento da produção doméstica de energia, essencialmente por fontes de energia renováveis, que levaram a uma diminuição das importações de carvão e de gás natural para a produção de eletricidade. A biomassa foi recurso que mais contribuiu para a produção doméstica, cerca de 50%, seguindo-se a hidroeletricidade e eólica representando 32% em conjunto (Comissão Europeia, 2019; Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

Em termos de potência total instalada, em 2020, Portugal obteve 22,4 GW para a produção de eletricidade, tendo subido 0,7% face a 2019 e 14,2% face a 2010. As fontes de energia renováveis representaram 65% do valor acima referido à potência total instalada, tendo sido a fotovoltaica a fonte que representou um maior crescimento, cerca de 7,1%, apresentando 1,03 GW de potência instalada (Observatório da Energia, DGEG e ADENE, 2021).

Estabelecendo uma breve comparação com a atualidade, de acordo com os dados mais recentes da APREN, baseados apenas em trimestres, de janeiro a março de 2021, a eletricidade gerada pelas fontes de energia renovável chegou aos 11,3 TWh, ou seja, um total de 79,5% de toda a eletricidade gerada

(um aumento significativo comparativamente aos 58,5% (6,9 TWh) e 69,9% (9,6 TWh) de eletricidade gerada no primeiro trimestre de 2019 e 2020, sucessivamente). O sistema elétrico de Portugal Continental registou importações equivalentes a 1308 GWh e exportações a 1897 GWh, continuando a ser um país exportador com um saldo de -589 GWh (APREN, 2019, 2021).

A figura 6 demonstra que, em 2021, no território português, tem se verificado um crescimento na utilização de energia hídrica, eólica, biomassa e fotovoltaica (Ovelha, 2017; APREN, 2021).

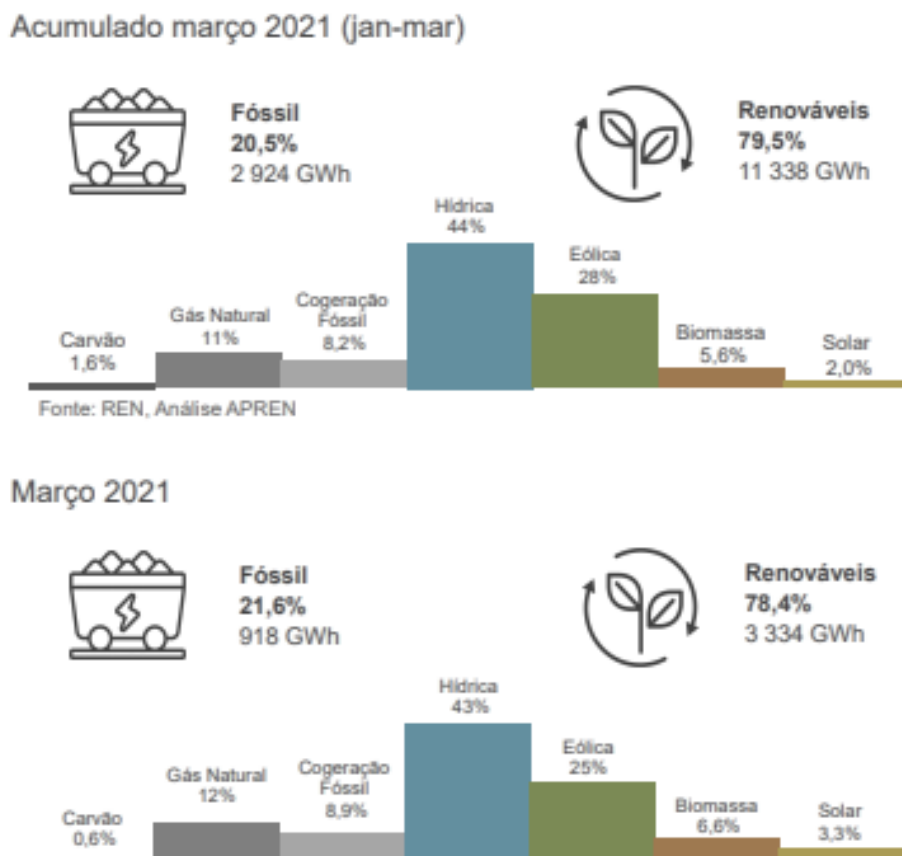


Figura 6- Representação da energia gerada pelas diversas fontes de energia no mês de março e no primeiro trimestre de 2021 (APREN, 2021).

A energia solar fotovoltaica fez um total de 2% da eletricidade gerada em Portugal, tendo esta um papel fundamental na produção descentralizada de eletricidade, envolvendo o próprio consumidor na produção de energia (Ovelha, 2017; APREN, 2021).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma vez que a presente dissertação tem como foco a concepção de uma instalação fotovoltaica, ou seja, a utilização de um recurso solar como fonte energética para o funcionamento de um sistema, esta divisão apresenta aspetos teóricos a ter em conta.

3.1 Recurso Solar

A energia solar é a energia fornecida pelo Sol na forma de radiação solar, podendo ser capturada e transformada em formas úteis de energia, como o calor e a eletricidade, usando uma variedade de tecnologias. Ela é vital para a vida na Terra, uma vez que regula e determina a temperatura da superfície terrestre e disponibiliza a maior parte da energia que acompanha os ciclos e os sistemas globais naturais, como o controlo dos movimentos dos oceanos e dos ventos, sobrevivência da vida vegetal e animal, formação de combustíveis fósseis, entre outros (Alves Freitas, 2008; Moreira, M., Delmar, 2014; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019; SEIA, 2021).

O Sol como estrela, é composto por 71% de hidrogénio, 27% de hélio e 2% de outros elementos, onde a cada segundo, liberta uma quantidade significativa de energia para o sistema solar. A produção desta energia é gerada no Sol por meio de uma fusão nuclear, onde quatro núcleos de átomos de hidrogénio vão combinar e gerar um núcleo de átomos de hélio, havendo durante o processo a libertação de energia em forma de radiação (Solar Schools, 2020).

Derivado à grande distância entre o Sol e a Terra, a energia solar disponível à superfície da Terra durante um ano é cerca de 1.12×10^{25} J, sendo que dessa porção, 70% incide nos oceanos e 30% incide no solo. Este valor de energia solar, comparando por exemplo aos consumos de energia primária durante o ano de 2019 (6.24×10^{20} J), é 18000 vezes superior, maior que as necessidades de energia de toda a humanidade. A radiação, contudo, não é distribuída com homogeneidade pelo globo terrestre, uma vez que as zonas próximas ao equador recebem mais radiação do que qualquer outra parte da Terra, e varia com fatores como a época do ano, condições climáticas desfavoráveis e poluição atmosférica. São estimados aproximadamente 12 minutos para que haja uma quantidade de energia solar equivalente ao consumo energético mundial anual (Ovelha, 2017; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019; Ritchie, Roser e Rosado, 2020).

3.1.1 Componentes da Radiação Solar

No planeta Terra, devido à existência da atmosfera, precisamos de ter em consideração diferentes processos que podem afetar os diferentes comprimentos de onda da radiação solar incidente, tais como a dispersão e a absorção da luz nos gases e partículas atmosféricas. A atmosfera provoca uma alteração do ângulo de incidência de uma fração dos raios solares, e assim sendo, divide a radiação solar em vários componentes (Magarreiro, Freitas e Brito, 2016; Ovelha, 2017).

- Radiação Direta, representa toda a luz solar recebida pelo recetor, através de raios solares, quando em linha reta com o sol, ou seja, a que incide diretamente na superfície;
- Radiação Difusa, refere-se a toda a luz solar recebida de forma indireta, ou seja, que é sobretudo fruto da difração nas nuvens, nevoeiro, poeiras suspensas na atmosfera, bem como de outros obstáculos atmosféricos;
- Radiação Refletida, refere-se à fração da luz solar que é proveniente do solo e de outros fatores, com origem na reflexão da radiação incidente em nuvens e na superfície terrestre. Neste contexto, o termo albedo ou coeficiente de reflexão diz respeito à razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela;

Para além destas componentes, ainda temos outras formas para definir radiação num local:

- Radiação Global, corresponde à radiação solar que atinge qualquer superfície em estudo, sendo igual à soma entre as radiações direta e difusa;
- Radiação Total, corresponde à soma da radiação global juntamente com a radiação refletida no albedo;

3.2 Geometria Terra-Sol

A quantidade de radiação solar intercetada pela Terra varia ao longo do ano, uma vez que a distância entre a Terra e o Sol também varia. Isto deve-se ao movimento de translação terrestre, onde o planeta Terra vai se movimentar ao redor do Sol, realizando uma órbita elíptica. Este movimento é considerado um fator importante no que diz respeito ao cálculo da radiação solar incidente num painel fotovoltaico, pois permite determinar a posição exata do Sol perante o referencial terrestre pretendido (Ovelha, 2017).

No processo de seleção de um local que vise a instalação de um sistema para aproveitamento de energia solar é necessário assegurar a máxima capacidade de produção do sistema. A capacidade de produção

de energia elétrica a partir de um sistema fotovoltaico varia consoante os níveis de radiação solar, e dada esta variabilidade, para se calcular a radiação solar incidente em qualquer superfície, é necessário estimar e definir uma localização exata do sol relativamente a essa mesma superfície para a implantação, sendo importante considerar fatores como a declinação solar e os ângulos solares (Carneiro e Passos, 2020).

Neste contexto, o entendimento acerca do modo pelo qual o movimento da Terra se processa em torno do Sol permite identificar o conjunto de parâmetros que devem ser utilizados quando se pretende efetuar a estimativa do nível de radiação solar incidente na superfície terrestre e que determina subsequente dimensionamento do sistema fotovoltaico (Carneiro e Passos, 2020).

3.2.1 Declinação Solar

O planeta Terra está refém de dois movimentos essenciais, sendo eles o movimento de translação e de rotação. O movimento de rotação diz respeito ao movimento que a Terra realiza em torno do seu próprio eixo, tendo por consequência uma alternância nos períodos de insolação direta nas regiões do planeta. O movimento de translação, tal como já foi referido anteriormente, é o movimento que a Terra realiza em torno do Sol, realizando uma órbita elíptica, num plano que é inclinado em relação ao plano do equador terrestre.

Estes dois movimentos ditam a posição da Terra relativamente ao Sol e o início das estações do ano, apresentando por consequência quatro posições características, sendo elas o equinócio de Outono, equinócio de Primavera, solstício de Verão e o solstício de Inverno.

Como é possível observar na figura 7, existem apenas duas épocas do ano em que o eixo da Terra não está inclinado nem para perto nem para longe do Sol, permitindo que haja uma duração idêntica de dia e de noite para cada latitude.

No equador, o Sol está diretamente acima ao meio-dia nos dois equinócios. É nestas alturas que os dias se tornam um pouco mais longos nas latitudes mais altas, visto que há uma maior duração entre o nascer e o pôr do Sol. Relativamente aos solstícios, o solstício de Verão ocorre quando há uma declinação constante da Terra em direção ao Sol, ou seja, quando o Sol está diretamente sobre o Trópico de Câncer, localizado na latitude $23,5^{\circ}$ N. O solstício de Inverno apresenta os dias mais curtos e as noites mais longas do ano e no hemisfério Norte, ocorre quando o Sol está sobre o Trópico de Capricórnio, localizado na latitude $23,5^{\circ}$ S (Cleveland, 2020).

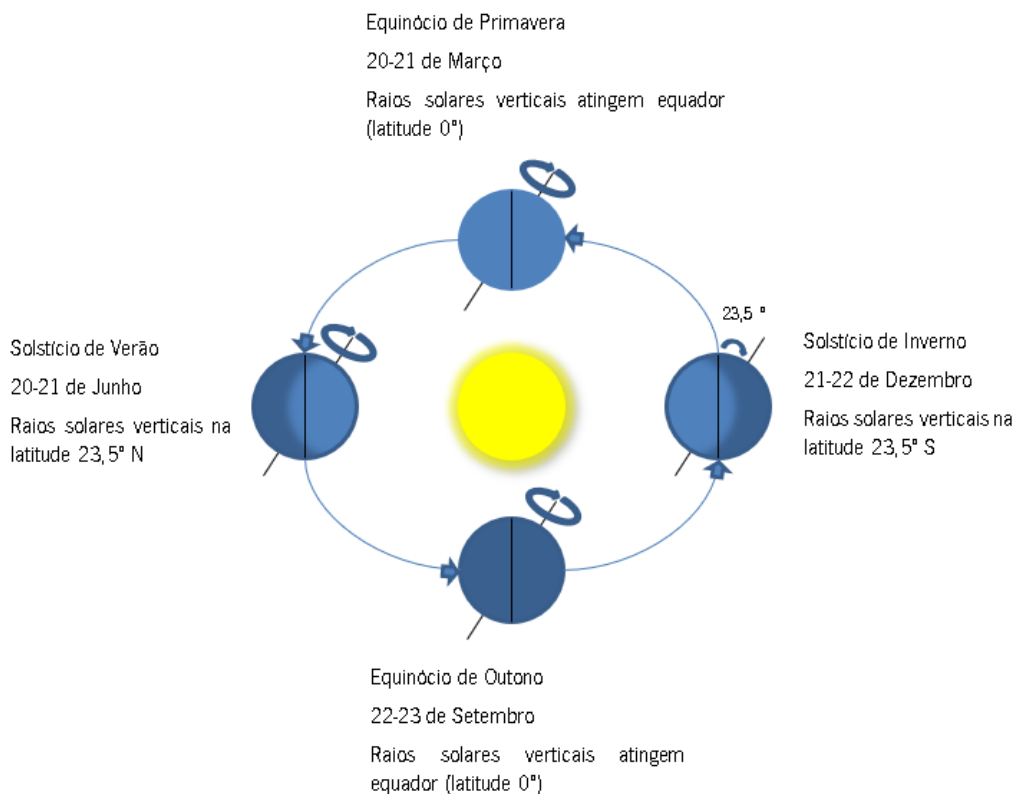


Figura 7 - Representação dos equinócios e dos solstícios com a variação da declinação solar ao longo do ano.

A inclinação do eixo polar é sempre constante e igual a $23,5^\circ$ e, sendo assim, o mesmo se pode dizer se considerarmos um plano equatorial. No entanto, a posição angular do Sol em relação ao plano equatorial varia de dia para dia, ou seja, o ângulo formado entre o plano equatorial terrestre e o “plano do equador” do Sol (plano da eclíptica), designando por declinação solar (Ribeiro, 2006).

O plano que representa a trajetória da Terra em torno do Sol é o plano da eclíptica, sendo que a linha que o delimita é denominada eclíptica. A eclíptica é um círculo imaginário na esfera celeste, onde o Sol se movimenta durante o ano. A interseção entre a esfera celeste e o plano do equador resulta num círculo imaginário chamado de equador celeste, sendo uma projeção do equador terrestre para o espaço. O plano equatorial demora um ano a ser percorrido pelo Sol, sendo que com isso podemos reparar que a cada dia que passa, o ângulo formado entre a linha do centro da Terra ao centro do Sol e a linha do equador celeste ao centro da Terra varia ao longo do ano (Ribeiro, 2006).

Observando a figura 8, a declinação solar pode apresentar uma variação entre $-23,5^\circ$ no solstício de Inverno e $23,5^\circ$ no solstício de Verão, valores angulares que se associam à inclinação do eixo vertical da Terra e às consequentes rotações diárias. Em suma este é o fator que faz variar a duração do dia e da

noite ao longo do ano. Em contrapartida dos solstícios, nos equinócios de primavera e de outono, 21 de março e 21 de outubro respetivamente, considera-se a declinação solar de 0° (Ovelha, 2017).

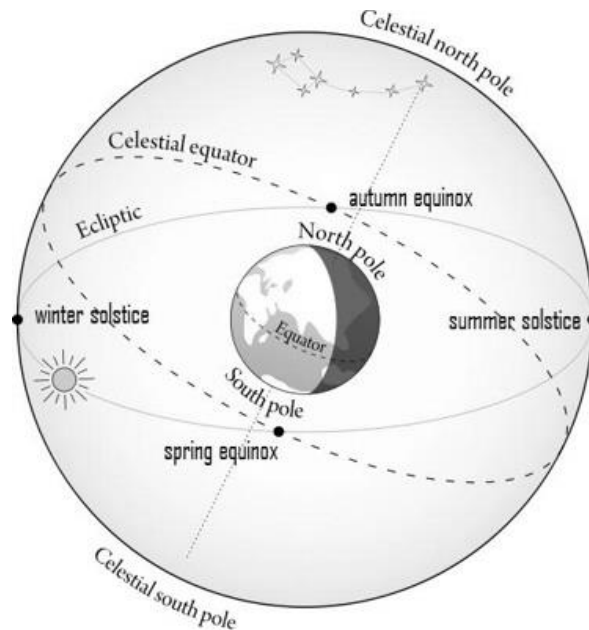


Figura 8- Posicionamento do planeta Terra em relação ao plano da eclíptica, na Esfera Celeste (McClure, 2017).

A declinação solar, variando ao longo do ano, pode ser calculada pela seguinte expressão (Pereira, 2017):

$$\delta = 23.5 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (2.1)$$

Onde N corresponde ao dia juliano, ou seja, a um dia pretendido tendo em conta uma contabilização contínua de dias desde o início do ano. Por exemplo, N=1 irá representar o primeiro dia de Janeiro (Carneiro e Passos, 2020).

De forma a determinar a radiação e a produção de energia associada a instalações solares em dada localização, é necessário definir a posição exata do Sol em relação a esse local, assumindo que o planeta Terra se encontra fixo (Ovelha, 2017).

3.2.2 Elevação solar e Azimute solar

Da posição do Sol na esfera celeste, não só depende da distância angular como também da irradiância solar, ou seja, da densidade de energia solar que incide sobre uma superfície, podendo ser determinada a partir de dois ângulos: ângulo de azimute solar (A) e ângulo de elevação solar (h) (Deceased e Beckman, 1982). Na figura 9 são demonstrados os ângulos que definem a posição do Sol.

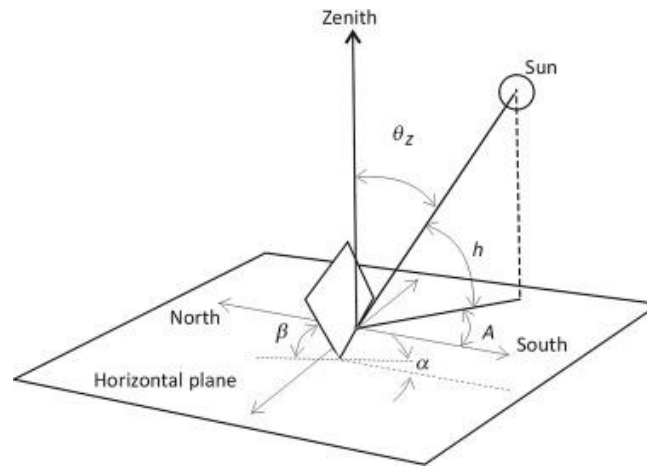


Figura 9 - Ângulos relevantes para definir a geometria Sol-Terra: Ângulo do azimute solar (A), Ângulo de elevação solar (h), Zênite (Φ), Inclinação da superfície (β) e Orientação (α) (Martinez-Gracia, Arauzo e Uche, 2019).

O ângulo de elevação solar é definido como a distância angular entre os raios do Sol e o plano horizontal, demonstrado na seguinte equação (Carneiro e Passos, 2020).

$$\sin h = \cos \Phi = [(\sin \delta \times \sin \varphi) + (\cos \delta \times \cos \varphi \times \cos HR)] \quad (2.2)$$

Onde se pode calcular com variáveis como a declinação solar (δ), latitude (φ) e ângulo horário (HR). O ângulo de elevação solar está compreendido entre $-23,5^\circ$ e $23,5^\circ$ relativamente aos dias de equinócio. Além deste ângulo, é possível se calcular pela mesma expressão o ângulo zenital (Φ) (Golovca, 2016).

O azimute solar, A, é definido como a distância angular entre a direção Sul e a projeção da linha Sol-Terra sobre a horizontal e é dada pela equação (2.3). Tal como o ângulo da elevação solar, é um ângulo que dá auxílio no que toca à localização do Sol a qualquer hora do dia. Por convenção, o ângulo azimute assume valores de deslocamento angular negativos a Este da direção Sul e valores positivos a Oeste, ou seja: $\beta=0$ quando o Sol está orientado para Sul e varia entre os valores -90° e $+90^\circ$ entre o este e oeste, respetivamente (Ovelha, 2017; Carneiro e Passos, 2020).

$$A = -180^\circ + \frac{\cos^{-1}[\sin \delta \times \cos \varphi - \cos \delta \times \sin \varphi \times \cos(HR)]}{\cos h} \quad (2.3)$$

Como podemos observar pelas equações, tanto o azimute solar como a elevação solar podem ser expressos em função dos ângulos fundamentais: a latitude (φ), a declinação solar (δ) e o ângulo horário (HR) (Ovelha, 2017; Sarbu e Sebarchievici, 2017).

3.2.3 Ângulo Horário

O planeta Terra está dividido em 24 meridianos, com origem no meridiano Greenwich. O conjunto dos meridianos dão origem aos fusos horários existentes na Terra. O ângulo horário é efetuado entre o meridiano da hora local e a posição do observador (Ribeiro, 2006).

Para o cálculo deste ângulo é necessário saber o deslocamento angular do sol a este ou oeste do meridiano local devido à rotação do planeta Terra no seu eixo, sendo que ao meio dia solar local é considerado 0° e a cada $360/24$ varia 15° de longitude por hora. É um ângulo negativo de manhã e positivo à tarde, podendo ser expresso por:

$$HR = (AST - 12) \times 15^\circ \quad (2.4)$$

onde HR representa o ângulo horário, podendo ser obtido através do tempo solar aparente (AST), sendo que ao meio dia solar local, $AST = 12$ e $HR = 0^\circ$ (Golovca, 2016; Ovelha, 2017).

Além do ângulo horário, é também importante referir outra grandeza solar como é o caso do ângulo do nascimento e do pôr do Sol (ω_s) que ocorre, por definição, quando a altura solar é nula ($h=0$), ou seja, quando o Sol surge ou desaparece no horizonte (Costa, 2011; Carneiro e Passos, 2020). Resolvendo a equação (2.2) em ordem ao ângulo horário para um ângulo de elevação solar nulo, podemos obter a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \sin h &= 0 \\ &= [(\sin \delta \times \sin \varphi) + (\cos \delta \times \cos \varphi \times \cos \omega_s)] \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \cos \omega_s = -\frac{\sin \delta \times \sin \varphi}{\cos \delta \times \cos \varphi} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \times \tan \varphi) \end{aligned} \quad (2.5)$$

A equação (2.5) permite determinar de igual forma o ângulo horário do nascer do sol e do pôr do Sol, excetuando o sinal, sendo negativo ao pôr do Sol. Com isto, já sabendo do valor dos respetivos ângulos, aplicamos a equação (2.4), resolvendo em ordem ao tempo solar aparente com a finalidade de se obter a hora solar do nascer e pôr do Sol (Carneiro e Passos, 2020).

$$\begin{aligned} \omega_s &= (12 - h_s) \times 15^\circ = \cos^{-1}(-\tan \delta \times \tan \varphi) \\ &\Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow h_s &= 12 - \frac{\cos^{-1}(-\tan \delta \times \tan \varphi)}{15^\circ} \end{aligned} \quad (2.6)$$

3.3 Sistema Fotovoltaico

As previsões de crescimento do mercado vão ao encontro daquele que é o enorme potencial da tecnologia. Em Portugal, assim como no caso de estudo, a tecnologia fotovoltaica aparenta ser fortemente viável fornecendo energia limpa e sustentável em larga escala, sendo o dimensionamento de um sistema fotovoltaico o principal foco do presente estudo.

Os sistemas solares fotovoltaicos constituem uma tecnologia de aproveitamento dos recursos endógenos para a produção de energia elétrica de forma descentralizada. A produção de energia surge da conversão da energia solar em materiais semicondutores através do efeito fotoelétrico nas células fotovoltaicas.

Neste capítulo serão descritos aspetos fundamentais acerca da tecnologia solar fotovoltaica, assim como algumas particularidades relevantes para o caso de estudo.

3.3.1 Tecnologia das Células Fotovoltaicas

As células solares, também chamadas de células fotovoltaicas, convertem a energia da luz solar diretamente em eletricidade pelo uso do efeito fotovoltaico. Neste processo são utilizados materiais semicondutores, sendo que “semi” significa que pode conduzir eletricidade melhor do que um isolador, mas não tão bem como um bom condutor como um metal (Solar Energy Technologies Office, 2021).

Embora promissoras, as células fotovoltaicas sofrem de uma baixa eficiência e alto custo de produção, o que as impede de uso em larga escala. Ao contrário das baterias ou células a combustível, as células solares não utilizam reações químicas ou requerem combustível para produzir a energia elétrica. A

eficiência de uma célula fotovoltaica é simplesmente a quantidade de energia elétrica que sai da célula em comparação com a energia da luz que incide sobre ela, o que indica a eficácia da célula na conversão de energia de uma forma para outra. A quantidade de eletricidade produzida a partir das células fotovoltaicas depende das características (como intensidade e comprimentos de onda) da luz disponível e dos múltiplos atributos de desempenho da célula (Portal Energia - Energias Renováveis, 2019; Solar Energy Technologies Office, 2021)

3.3.2 Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica

O processo que converte a luz solar em eletricidade requer, em primeiro lugar, um material semicondutor que quando é exposto à luz, absorve a energia da luz (fotões) e transfere-a para partículas carregadas negativamente nos materiais chamados de elétrons e, em segundo lugar, o movimento desses mesmos elétrons, como uma corrente elétrica, da célula solar para o circuito externo. Essa corrente é extraída por meio de contatos de metal condutores e pode então ser usada para fornecer energia, ou seja, os elétrons dissipam a energia no meio externo e retornam à célula solar (Honsberg e Bowden, 2019; Solar Energy Technologies Office, 2021).

Há uma variedade de materiais e processos no qual podem satisfazer potencialmente os requisitos de conversão de energia fotovoltaica, no entanto, na prática são utilizados materiais semicondutores na forma de uma junção pn, sendo o silício o material mais comum e economicamente viável por se tratar de um elemento abundante na crosta terrestre. (Honsberg e Bowden, 2019)

As células de silício cristalino são feitas de átomos de silício conectados uns aos outros para formar uma rede cristalina. Essa rede fornece uma estrutura organizada que torna a conversão de luz em eletricidade mais eficiente. Para haver corrente elétrica é necessário que exista um campo elétrico, isto é, uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. A introdução de elementos adicionais de forma a alterar as propriedades elétricas designa-se como dopagem do silício onde é possível criar duas camadas na célula: silício do tipo P e do tipo N. As impurezas atômicas causam defeitos no interior da rede cristalina uma vez que possuem um elétron a mais (fósforo) ou um elétron a menos (boro) em relação ao silício na camada externa de valência (Alves Freitas, 2008; Wang e Lu, 2016; Fonash, Fonash e Ashok, 2020).

Se ao retículo for adicionado fósforo, dopante usado para criar a região do tipo n, fica um elétron em excesso por cada átomo de fósforo introduzido, uma vez que possui cinco elétrons na sua banda de valência, criando quatro ligações covalentes com o silício e deixando um elétron livre, podendo este

elétrão mover-se livremente dentro do cristal e transportar a carga elétrica (Alves Freitas, 2008; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

O boro é o dopante normalmente usado para criar a região tipo p, onde fica disponível uma lacuna (elétrão de coesão em falta) por cada átomo de boro introduzido, uma vez que um átomo de boro forma quatro ligações covalentes com quatro átomos de silício, havendo apenas uma ligação com um elétron, enquanto as outras três ligações possuem dois elétrons (Alves Freitas, 2008; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

A junção das duas camadas dos semicondutores extrínsecos forma-se uma região de transição p-n, criando um campo elétrico designado de barreira de potencial, a qual permite a separação das cargas originadas pela luz solar. A célula fotovoltaica quando é exposta à luz, ocorre a absorção dos fótons através dos elétrons. Os fótons quando apresentam energia suficiente, permitem o movimento dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, sendo conduzidos através do campo elétrico da camada de tipo N. As lacunas criadas seguem para a camada de tipo P (Alves Freitas, 2008; Wang e Lu, 2016; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

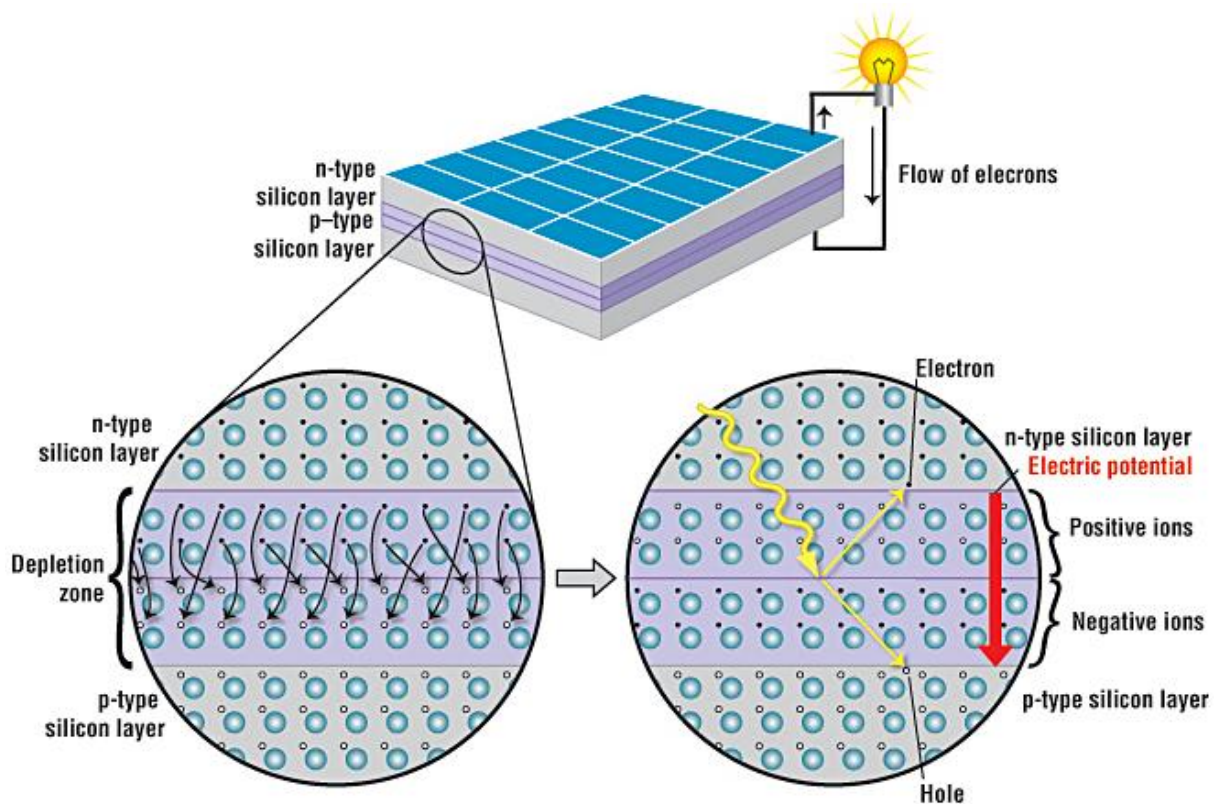


Figura 10 - Representação de uma célula fotovoltaica, das duas camadas do tipo N e P e da zona de depleção ao redor da junção entre as camadas (American Chemical Society, 2020).

Quando se ligam os terminais da célula a um circuito exterior e se fecha através de uma carga irá circular corrente elétrica. Se a célula não estiver ligada a nenhuma carga, é obtida a tensão em circuito aberto da célula solar. Um conjunto de células solares conectadas eletricamente e colocadas em uma estrutura é chamado de módulo fotovoltaico, que pode então ser agrupado em grupos maiores de módulos para formar um painel solar (Alves Freitas, 2008).

As células solares fotovoltaicas podem ser classificadas em células monocristalinas, policristalinas, amorfas e as células de película fina.

- Células monocristalinas

O silício monocristalino é o material do mercado mais antigo e o mais utilizado na composição das células solares. As células são fabricadas usando o método Czachralski, no qual um núcleo do cristal é colocado num banho de silício puro fundido em alta temperatura. Este processo forma um único cristal de silício que é fatiado em finas pastilhas de silício que são usadas nos módulos fotovoltaicos. A sua forma pode ser redonda, quadrada ou semi-quadrada, dependendo da quantidade que é estriada do cristal único, e a sua cor geralmente é de azul escuro a preto (com anti-reflexão) e cinza (sem anti-reflexão). A eficiência das células varia entre 15% a 18% e são utilizadas em quaisquer aplicações de média a alta potência (Proença, 2007; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).



Figura 11 - Célula solar monocristalina (Solarquotes, 2018).

- Células Policristalinas

O silício policristalino ou multicristalino, constituído por um grande número de pequenos cristais, é uma alternativa com um processo de fabricação mais barato, mas apresenta um menor desempenho. O processo de produção mais utilizado é o de fundição de lingotes, onde o silício é aquecido no vácuo a alta temperatura e depois arrefecido na direção da base do cadinho com uma

temperatura mais baixa. São produzidas em células quadradas e a eficiência varia entre os 13% e os 15%, já com camada de anti reflexão. Apresentam uma cor azul (com anti-reflexão) e cinza prateada (sem anti-reflexão) (Proença, 2007; Alves Freitas, 2008; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

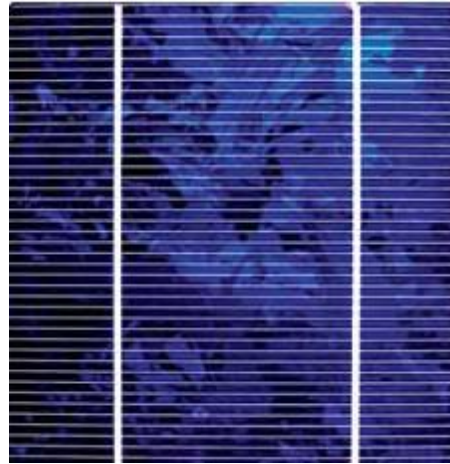


Figura 12 - Célula solar policristalina com anti-reflexão (Solarquotes, 2018).

- Células amorfas

O silício amorfo (a-Si) é a forma não cristalina de silício usada para células solares. Este semicondutor apresenta uma rede irregular, ou seja, possui átomos com ligações pendentes que porventura representam defeitos na rede aleatória contínua, causando comportamento elétrico irregular. A solução passa pela adição de hidrogénio às ligações livres, atenuando as ligações pendentes (HISOUR Arte Cultura e Exposição, 2018).

As células de silício amorfo apesar de terem uma baixa eficiência (5-8%), contribuem de forma positiva para o meio ambiente uma vez que não há a utilização de metais tóxicos como o cádmio ou chumbo (HISOUR Arte Cultura e Exposição, 2018; Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

O silício amorfo é colocado em filmes finos sobre substratos flexíveis, sobretudo o vidro, plástico e metal, e é usado como material semicondutor tanto para células solares amorfas como para células de película fina. Era expectável que o silício amorfo se tornasse num dos principais contribuintes no mercado fotovoltaico, no entanto, ao longo do tempo perderam território devido à forte competição das células de silício cristalino convencionais. Este material semicondutor tem sido utilizado para dispositivos que exigem pouca energia tais como calculadoras, relógios, podendo ser também

utilizado em instalações solares. A cor é predominantemente de castanho avermelhado a preto como demonstra a figura 13. (HISOUR Arte Cultura e Exposição, 2018).



Figura 13 - Células solares de silício amorfo (Alves Freitas, 2008).

- Células de película fina

Consideradas como a segunda geração de células, as células de película fina embora apresentem baixas eficiências, apresentam-se como alternativa promissora do silício devido à resistência aos efeitos de sombreamento e a temperaturas elevadas. Têm tido um desenvolvimento ao longo dos anos e tornaram-se cada vez mais importantes. Os processos utilizados para este tipo de células são a deposição por vaporização, deposição catódica e banhos eletrolíticos, onde os semicondutores como o CIS (disseleneto de cobre e índio) e CdTe (telureto de cádmio) são aplicados em finas camadas num substrato, maioritariamente vidro (Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

Estas células requerem temperaturas mais baixas comparativamente às células de silício (200 a 500°C) e apresentam eficiências mais baixas. Os painéis solares de CIS e CdTe têm rendimentos inferiores ao do silício, no entanto, oferecem aplicações arquitetónicas diversas devido às vantagens da utilização de tecnologias de películas finas e possibilitarem a passagem parcial de luz (Alves Freitas, 2008).



Figura 14 - Células solares de película fina (Portal Energia - Energias Renováveis, 2019).

4. CASO DE ESTUDO

4.1 A Organização

A empresa que serviu de base para a elaboração deste trabalho denomina-se Prime Energy Solar Systems, e trata-se de uma pequena e média empresa, presente no mercado nacional desde o ano de 2015, composta atualmente por 20 colaboradores, sendo especializada na prestação de serviços na área da engenharia solar, através da conceção, instalação e manutenção de centrais fotovoltaicas. Na empresa, os dimensionamentos dos sistemas fotovoltaicos aplicam-se tanto no setor industrial como no setor residencial. No setor industrial e residencial, a empresa possui materiais de alta qualidade, capazes de elaborar sistemas fotovoltaicos de longa duração e sem grandes intervenções no que diz respeito à manutenção, de forma a obter a melhor relação de produtividade/necessidade sem comprometer com o meio ambiente. Por outro lado, reforçando o setor residencial, são desenvolvidos sistemas personalizados como centrais solares, armazenamento de energia, carregadores de veículos elétricos, em que, atendendo às necessidades dos clientes, permitem aumentar a eficiência e independência energética, reduzindo as faturas mensais.

O grupo Prime Energy, para além de se situar em Portugal, é multinacional, com sede na Suíça desde o ano de 2005, apresentando várias filiais ao longo da Europa e Ásia como por exemplo Alemanha, Espanha, França, Itália, Marrocos, Tunísia, Omã, Luxemburgo e República Checa. É um grupo produtor de energias verdes e especializado no setor das energias renováveis, mais precisamente na construção e exploração de centrais solares fotovoltaicas, apresentando 74 parques solares em toda a Europa.

A empresa apresenta uma política de qualidade e é certificada pela NP EN ISO 9001:2015, Sistemas de Gestão da Qualidade.

A confiança é um sentimento que está presente em contexto de trabalho na empresa, nomeadamente na forma de se relacionarem com todos os que direta ou indiretamente estão ligados aos colaboradores e aos seus projetos, havendo uma total sintonia quanto aos processos e à cultura organizacional. Com isto, é importante realçar a missão e a visão da empresa.

- Missão

Criar valor para quem deseja produzir a sua própria eletricidade através da conceção, construção e manutenção de centrais solares fotovoltaicas.

- Visão

Reconhecimento da experiência, flexibilidade, empenho e confiança dos nossos serviços, através da aquisição de equipamentos de topo, visando surpreender e conquistar os nossos clientes.

4.2 Organograma da Empresa

A empresa em estudo é composta por 20 colaboradores divididos essencialmente em três grandes grupos, sendo eles, a Gerência que está sobre a alçada da Direção e contém os Departamentos, Comercial, Produção, Administrativo Financeiro e de Qualidade. Para o Departamento Administrativo Financeiro e de Qualidade fazem parte os Recursos Humanos, Qualidade e Controlo, Apoio ao Departamento Admin. Financeiro e Qualidade e Secretariado-Geral. O Departamento Comercial compreende a Prospecção de mercado, a Gestão de clientes, a Mediação de Propostas e a Pós-Venda. Por fim, o Departamento de Produção inclui a Orçamentação, o Projeto, a Direção de Obra, as Compras e a Instalação e Manutenção (figura 15).

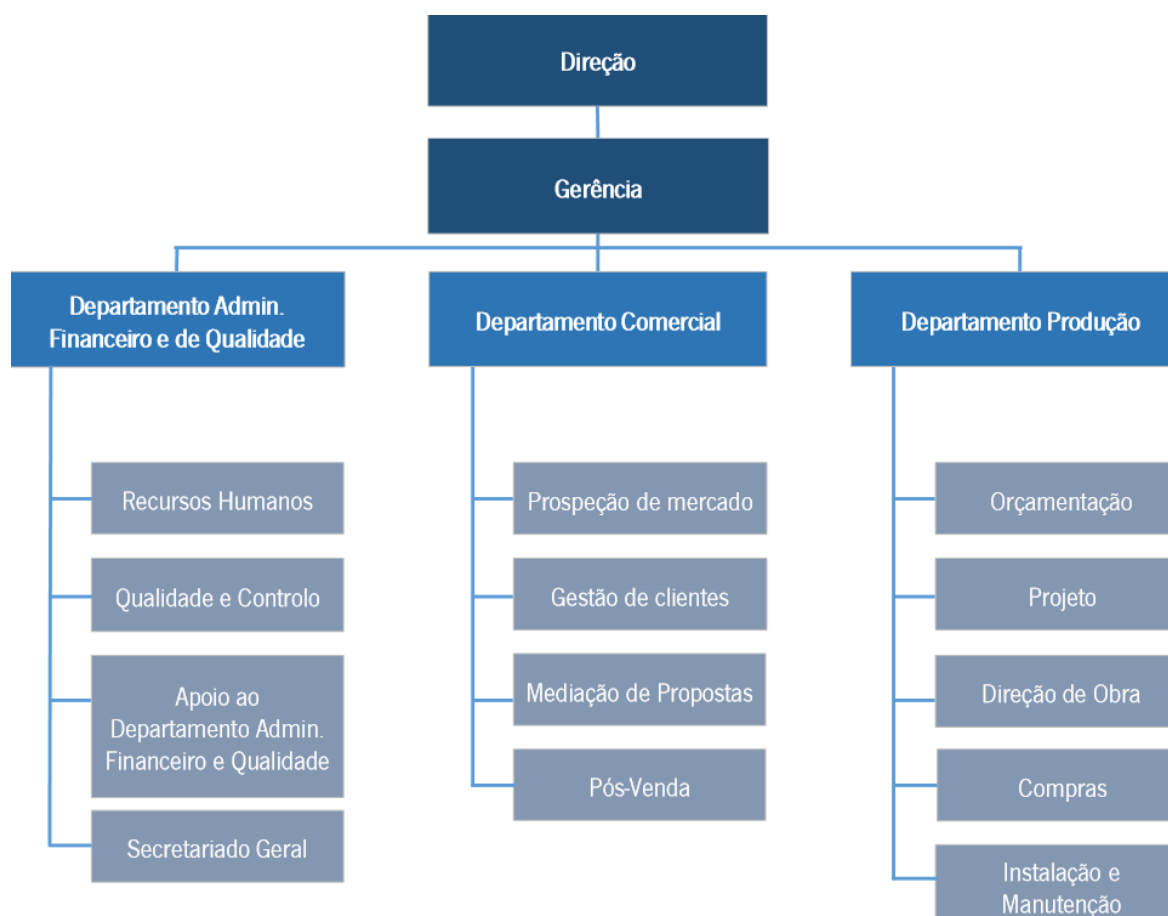


Figura 15 - Organograma da Empresa.

4.3 Descrição do Processo Produtivo

O presente capítulo pretende efetuar uma descrição geral dos processos inerentes ao dimensionamento de um sistema fotovoltaico, para posterior análise.

O processo produtivo inicia com um primeiro contacto com o cliente onde é feito um pedido de orçamento. Assim, é realizada uma primeira visita ao local, onde são avaliadas todas as necessidades, e assim, proceder-se com a realização do orçamento. Em simultâneo, é organizado um processo por cliente, permitindo haver um maior controlo no que está registado e prevenir erros.

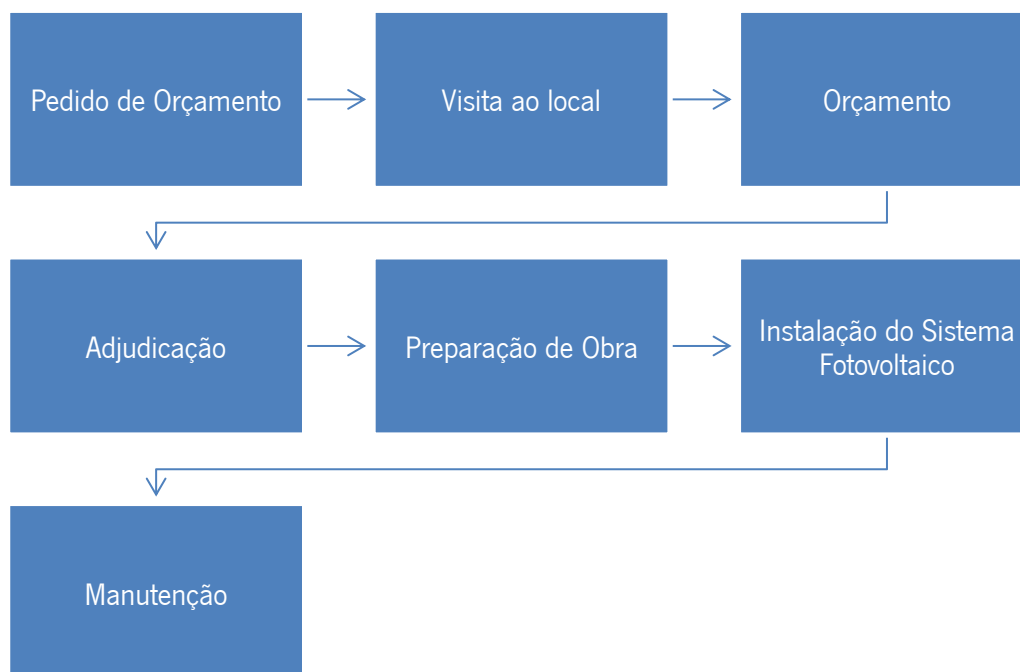


Figura 16 - Processo produtivo da empresa.

Os processos estão divididos em portfólios onde estão contemplados documentos como a ficha de levantamento, ficha da obra, ficha de projeto, check list e mais informações do cliente. A ficha de levantamento diz respeito ao documento onde os consultores de energias renováveis (comerciais) registam informação base tal como os dados do cliente, a empresa, a morada do projeto, o número a contactar, email e observações feitas na obra. Primeiramente recorre-se a um pedido de Orçamento para se poder fazer um dimensionamento no PVSol e PVGIS, e assim, obter estimativas e resultados da

simulação que porventura vão ajudar na elaboração do projeto. A fatura energética é fornecida pelo cliente à empresa de forma a se poder fazer um melhor dimensionamento da proposta, de forma a não permitir percas quando a instalação estiver concluída.

De seguida, uma vez já tratados os dados, faz-se uma visita à obra para verificar em que condições é que irá ser feita a instalação, uma vez que pode haver condicionantes por exemplo na cobertura do telhado. É feita uma análise breve a ver se está conforme ou não, caso não estiver conforme é necessário adotar algumas medidas de segurança.

Uma vez aprovada, ocorre a adjudicação e a preparação da obra para a instalação do sistema fotovoltaico. É realizada uma imagem 3D para o cliente saber qual é a área estudada e onde se inserem os painéis. O portfolio fica a conter também algumas informações sobre a estrutura do local (quantidade de módulos, estrutura dos módulos, local onde vão ser inseridos, inversor, OWL (transformação da energia corrente para energia solar, possibilitando a compreensão do que se está a produzir e a poupar).

São efetuadas a ficha de obra, a ficha de projeto, uma check-list que é realizada quando vão verificar se a obra está pronta para receber o material e por fim a folha de manutenção, sendo que quando a central faz 1 ano é feita a manutenção ao cliente. Na manutenção é efetuada uma lavagem da central, mais concretamente dos módulos fotovoltaicos, dos dispositivos de proteção e dos filtros dos inversores, visto que se ganha algum tipo de sujidade não produz bem. Para além disso são verificadas as tensões das strings, a produção anual, os quadros elétricos, o sistema de monitorização e há uma inspeção visual ao caminho de cabos entre as bancadas para ver se as ligações estão corretas.

Ao fim de cada obra é entregue um manual de utilizador, que visa apoiar o cliente, esclarecendo-o sobre todos os processos do sistema de geração fotovoltaica.

4.4 Dimensionamento Fotovoltaico

4.4.1 Caracterização do Projeto

Este projeto tem como principal objetivo a implementação de um sistema de painéis solares numa indústria localizada em Quinchães (fig. 15), concelho de Fafe, no qual permita apoiar a transição para uma economia com baixas emissões de carbono, proteger o ambiente e promover a eficiência na utilização dos recursos.

Este estudo decorre da necessidade de identificar fontes alternativas de produção de energia que permitam fazer face aos elevados consumos. Neste contexto, este investimento promove a eficiência energética, através da utilização de energias renováveis.

Para a realização deste estudo recorre-se ao software PVSOL, sendo este um simulador com o objetivo de obter os resultados relativamente à produção da central fotovoltaica nos 25 anos, bem como a análise financeira da mesma. Deste software vai resultar o orçamento com os resultados obtidos que posteriormente é entregue ao Diretor comercial ou ao Conselheiro de energias renováveis para expor ao cliente.

Pretende-se dimensionar um sistema fotovoltaico (PV) para autoconsumo (UPAC), permitindo produzir localmente a sua própria energia e contribuir diretamente para o abatimento da fatura de eletricidade, no entanto, é necessário identificar as características do local em termos de recurso solar e descrever a instalação fotovoltaica, nomeadamente a seleção dos módulos FV, do inversor e da potência da unidade de autoconsumo.

Para que seja realizado o melhor dimensionamento fotovoltaico possível, é importante, ainda, analisar diferentes capacidades produtivas, estimar os custos da instalação, o valor da tarifa de eletricidade e consumos exercidos na indústria de forma a projetar o sistema fotovoltaico apropriado aos critérios do consumidor.

4.4.2 Caracterização do local

As características do local de instalação, em termos de recurso solar, constituem um dos fatores determinantes do sistema a implementar.

Para a instalação do sistema fotovoltaico, um aspeto importante a considerar é a inclinação dos painéis solares. O ângulo ótimo (inclinação intermédia anual) permite obter produção anuais uniformes, isto é, inclinações adequadas permitem produções mais significativas, quer ao Verão, quer no Inverno. A inclinação mais adequada para os painéis é de 10° com orientação a sul (azimute de 0°) segundo as especificações técnicas do fornecedor.



Figura 17 - Indústria onde se procede a instalação do sistema fotovoltaico (Fonte: Google Earth).

4.4.3 Caracterização da instalação fotovoltaica

O sistema fotovoltaico foi instalado, dia 11 de Fevereiro de 2020, no telhado de uma indústria composta por painéis sandwich com isolamento térmico.

A instalação é industrial e a potência contratada (potência total instalada) foi de 105,40 kWp, sendo o principal objetivo a produção de energia para autoconsumo. A instalação será constituída no total por 340 painéis fotovoltaicos instalados em estrutura coplanar na cobertura de uma indústria. Os equipamentos elétricos de conversão da energia fotovoltaica constituídos por 2 inversores e 1 quadro elétrico para equipamentos de comando, corte, proteção e de contagem.

Os módulos fotovoltaicos captam a energia solar para produzir a energia elétrica em corrente contínua (DC). Os inversores transformam a energia em corrente contínua produzida pelos módulos fotovoltaicos em energia em corrente alternada (AC), de modo a ser compatível com a energia proveniente das redes elétricas públicas. A cablagem que permite o transporte de energia elétrica. A estrutura de suporte que permite fixar os módulos fotovoltaicos. Os contadores que permitem contabilizar o consumo elétrico. As proteções que garantem a segurança contra contactos diretos e indiretos.

A ligação à rede é realizada segundo o Decreto-Lei nº 153/2014, de 20 de outubro que regula a atividade de produção de energia elétrica destinada ao autoconsumo. Os quadros e a instalação elétrica dizem respeito às Regras Técnicas de Instalações Elétricas em Baixa Tensão (R.T.I.E.B.T.).

A fatura energética contempla, ao nível de preços, uma tarifa tetra-horária, com quatro períodos de tempo: super vazio, vazio, cheio e ponta. As horas de super-vazio e vazio coincidem, essencialmente, com o período noturno e fins de semana.

4.5 Componentes do Sistema Fotovoltaico

Esta subsecção faz uma breve descrição dos equipamentos e dos dados necessários ao dimensionamento do sistema fotovoltaico com recurso ao programa PVSol.

Antes de se usufruir do software, foi necessário recorrer à fatura energética do cliente para se poder saber ao certo o número total de painéis necessários para a instalação. Como tal, essa operação foi feita da seguinte forma:

- Foi efetuada uma soma dos consumos médios mensais em ponta e cheia.

$$5619 + 13994 = 19613 \text{ kWh/mês}$$

- De seguida, procedeu-se à divisão desse valor pelo número de dias e consumo.

$$19613 / 22 = 891,5 \text{ kWh/dia}$$

- A esse valor foi realizada uma divisão com as horas de atividade por dia.

$$891,5 / 10 = 89,15 \text{ kW}$$

- Posteriormente, é multiplicado o valor anterior pela margem de dimensionamento.

$$89,15 \times 1,25 = 111,44 \text{ kW}$$

- Por fim, ocorre a divisão com a potência nominal do painel fotovoltaico (anexo A).

$111,4375 / 0,31 = 359,4758 \rightarrow$ Número total de painéis necessários, valor que posteriormente foi corrigido no software devido ao sombreamento nos telhados, ar condicionados, claraboias, chaminés e tubos de exaustão.

Após se ter escolhido a potência ideal a instalar é necessário que seja escolhido o material a instalar, os principais componentes a escolher são, neste caso, os módulos a instalar e o tipo de inversor. Existem várias opções nas quais existe a variação de qualidade e de preço, como tal, após a empresa apresentar as possibilidades mais fiáveis cabe ao consumidor decidir qual a melhor opção para o seu investimento.

4.5.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos solares fotovoltaicos JÁ Solar JAM60S09 315W, presentes no Anexo A juntamente com as suas características, são compostos por um conjunto de 60 células e 3 díodos de desvio, que permitem converter a radiação solar em energia elétrica na forma de corrente contínua. Estes módulos são monocristalinos, apresentando uma eficiência de 19,3% e um coeficiente de temperatura da potência nominal de -0,38%/K.

Mecanicamente é um módulo com um peso unitário de 18,2 Kg e com dimensões 1650x991x35 mm. Apresenta 12 anos de garantia de materiais e defeito de fabrico e 25 anos de garantia de produção.

4.5.2 Inversores

Os inversores escolhidos para este projeto foram da marca SMA Sunny Tripower CORE1 STP50, presente no Anexo B juntamente com as suas características. Estes garantem um produto de qualidade e de alto rendimento e daí a escolha pela instalação dos mesmos, porque para além de fazerem a conversão da energia elétrica em DC proveniente dos módulos fotovoltaicos em energia elétrica em AC, estes permitem garantir que as perdas sejam mínimas e que a energia transformada tenha qualidade.

4.5.3 Cablagem

No que diz respeito à Cablagem, para o seu dimensionamento foram tidos em conta 3 critérios, sendo eles o cumprimento dos limites fixados pela tensão nominal, o cumprimento dos limites fixados pela intensidade de corrente máxima admissível do cabo e a minimização das perdas da linha. Foram utilizados Cabos DC e AC.

Os cabos DC são adequados para a conexão entre painéis fotovoltaicos e inversores, sendo cabos flexíveis, com boa resistência à abrasão e ao ozono e propriedades retardadoras da chama.

Os cabos AC são compostos por cobre, adequados para o transporte e distribuição da energia, com uma tensão de 0,6/1kV. O transporte de energia é assegurado por cabos VX 5G25 do inversor ao quadro de proteção e por 1 cabo XV 3X50+2G25 entre o quadro de proteção e o quadro elétrico de entrada.

4.5.4 Estruturas de Suporte

A conceção, a instalação da estrutura e todo sistema de fixação dos módulos foi concebida de modo a permitir as necessárias dilatações térmicas, para assim garantir a integridade de toda a estrutura.

A estrutura da K2 Systems (empresa líder de mercado na produção de estruturas fotovoltaicas), não só é leve, visto que é construída por uma liga de alumínio 6063 T66 e por aço inoxidável A2, esta assegura segurança, grande resistência à corrosão e de resistência às condições climatéricas.

4.5.5 Quadro Elétrico

O quadro de proteção AC da marca Hager, foi concebido e instalado, de modo a garantir a proteção do quadro de entrada da instalação e da restante instalação elétrica. Este é composto por:

- Equipamentos de corte, proteção e comando da marca HAGER;
- Armário metálico IP55;
- Contador de energia da marca ITRON;
- Sistema de marcação e etiquetagem.

4.5.6 Contador

Em relação ao contador, a Prime Energy Solar Systems propôs a marca ITRON, modelo ACE SL 7000, visto que é um contador adequado para instalações industriais e comerciais. É um contador avançado e fiável.

4.5.7 Sistema de Monitorização

O sistema de monitorização aplicado nas instalações do cliente, proposto pela Prime Energy Portugal, foi o sistema de monitorização SMA – Sunny Portal. Este permite aceder aos principais dados do sistema a qualquer hora e em qualquer lugar. É possível também analisar os valores medidos e visualizar e comparar rendimentos, sendo que pequenos desvios são facilmente detetáveis e resolvidos.

5. ESTIMATIVAS

5.1 Dados do Software PVSol


Para implementar o projeto, foi utilizado o software alemão PVSOL. Mundialmente conhecido, este programa permite realizar a elaboração do projeto de um sistema fotovoltaico utilizando cenários 3D criados em maquete, a partir de mapas de satélite ou importados de drones. O PVSOL permite também fazer uma análise do sombreamento detalhado em sistemas FV conectados à rede com horizonte, prédios, vegetação, antenas etc. É um programa com um grau de confiança elevado e muito assertivo, uma vez que a simulação utiliza dados climáticos precisos e detalhados.

Primeiramente, indicou-se precisamente o tipo de sistema fotovoltaico e a localidade a ser implementado, como mostra a Figura 18 e a Tabela 1.

Tipo de sistema, clima e rede

Tipo de sistema

3D, Sistema fv conectado à rede com consumo



Tipo de modelagem

Modelar sistema em 3D

Intervalo da simulação

1 hora (simulação mais rápida)
 1 minuto (simulação mais precisa)

Dados climáticos

País		Local	
Portugal		Eafe (1991-2010)	
Latitude	41° 27' 15" (41,45°)	Soma anual da irradiação global	1577 kWh/m²
Longitude	-8° 10' 4" (-8,17°)	Média anual da temperatura	13,6 °C
Fuso horário	UTC+1		
Período	1991 - 2010		

[Parâmetros da simulação](#)

Rede c.a.

Inserir

Tensão (N-L1)	230 V
Quantidade de fases	3-fásico
cos φ	1
Limitação da potência de injeção	Não

Figura 18 - Tipo de Sistema, Dados climáticos e Rede de simulação (Fonte: PVSol).

Tabela 1- Características da instalação (Fonte: PVSol).

Localização do sistema	Quinchães, Fafe
Módulos Fotovoltaicos	336
Inversores	2
Área total da instalação fotovoltaica	554,5 m ²
Potência do gerador fotovoltaico	105,84 kWp
Azimute	0°
Inclinação	10°
Modo de exploração do sistema	Autoconsumo

Após a inserção de parâmetros básicos, pode-se especificar o consumo a ser compensado pelo gerador. O software tem vários consumos de carga, no entanto, como se trata de uma indústria só vai interessar analisar a curva de carga. Esta curva tem várias categorias, denominadas G, correspondendo a indústrias diferentes onde são abordados certos parâmetros como os dias ativos, horários, consumo de energia e os diferentes tipos de indústrias (escritórios, estabelecimentos comerciais, ginásios, restaurantes etc). Posto isto, a curva mais próxima da indústria estudada foi a G1, descrevendo uma indústria alimentar, funcional em dias úteis das 8h as 18h.

Neste caso, foram detalhados 12 meses de faturas de energia elétrica na indústria MEPS, conforme ilustra a Figura 19. Assim, durante os 12 meses previu-se um consumo total anual de 250092 kWh e uma carga máxima de 119,1 kW. O mês com uma maior evidência de consumo foi o mês de Janeiro (25854 kWh).

Consumo

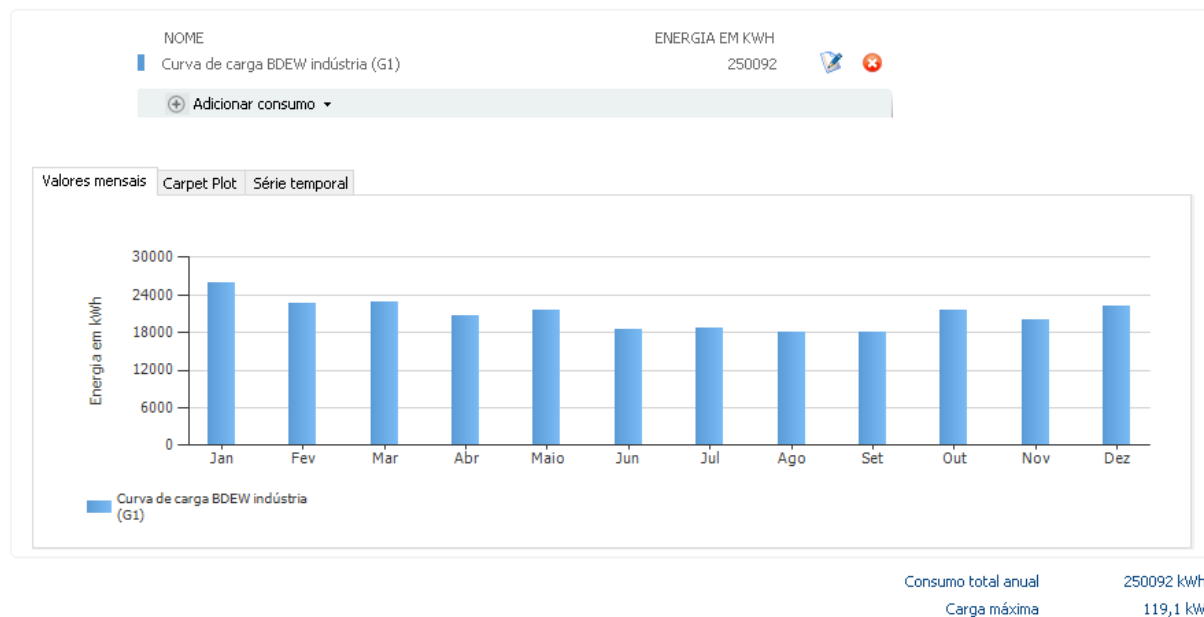


Figura 19 - Consumos da simulação (Fonte: PVSol).

O programa contém uma vasta base de dados de módulos e inversores. De acordo com a Figura 20 e 21 é possível ver o posicionamento dos módulos na cobertura da empresa. O módulo selecionado está incluso no Anexo A, sendo o JAM60S09 315/PR, do fabricante JA Solar Holdings, tanto para a água Sudoeste como na água Nordeste. Além disto, nas tabelas 2 e 3 foram especificadas as condições de instalação como número de módulos, situação de montagem, ângulo de inclinação e orientação dos painéis.

Tabela 2 - Dados da Área 1, referentes à água Sudoeste (Fonte: PVSol).

Nome	Edifício 03 – água Sudoeste
Módulos fotovoltaicos	210
Potência total	66,15 kWp
Montagem do módulo	Vertical (0,020 m)
Área	346,6 m ²
Inclinação	7°
Orientação	219° Sudoeste
Situação de montagem	Paralelo ao telhado – boa ventilação traseira



Figura 20 - Ilustração da montagem para a água Sudoeste (Fonte: PVSol).

Tabela 3 - Dados Área 2, referentes à água Nordeste (Fonte: PVSol).

Nome	Edifício 03 – água Nordeste
Módulos fotovoltaicos	126
Potência total	39,69 kWp
Montagem do módulo	Vertical (0,020 m)
Área	207,9 m ²
Inclinação	7°
Orientação	39° Nordeste
Situação de montagem	Paralelo ao telhado – boa ventilação traseira

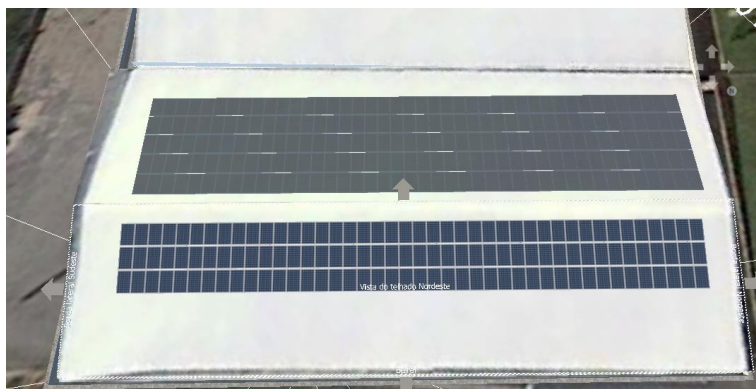


Figura 21 - Ilustração da montagem para a água Nordeste (Fonte: PVSol).

Para dar mais veracidade à simulação, foi detalhada, na figura 22, a degradação do módulo. Como podemos observar pela figura, para a água Sudoeste e Nordeste há uma queda de potência de 19% em 25 anos.

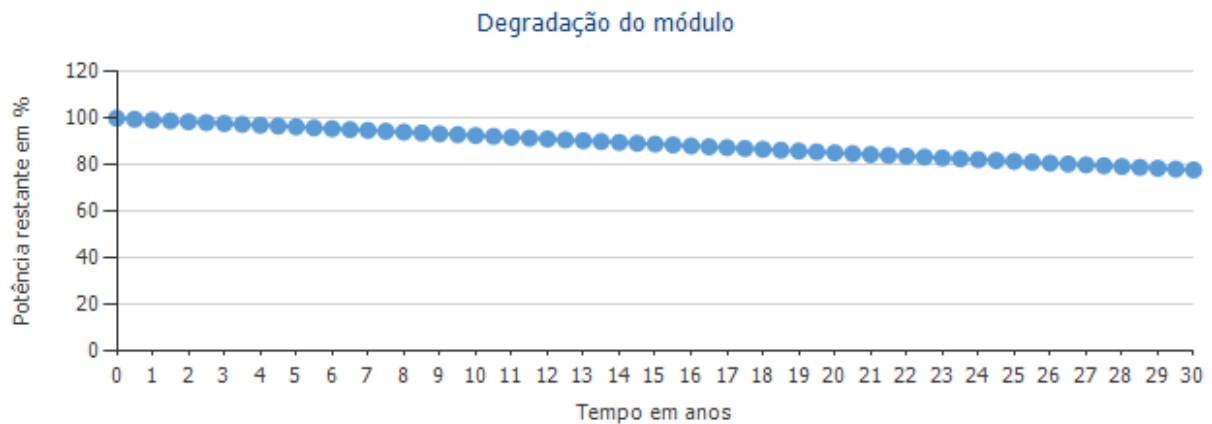


Figura 22 - Degradação do módulo (Fonte: PVSol).

A escolha do inversor também foi feita através da base de dados do PVSOL. O inversor escolhido está presente no Anexo B, sendo o SMA Sunny Tripower Corel STP50. A figura 23 ilustra o desempenho do sistema por inversor.

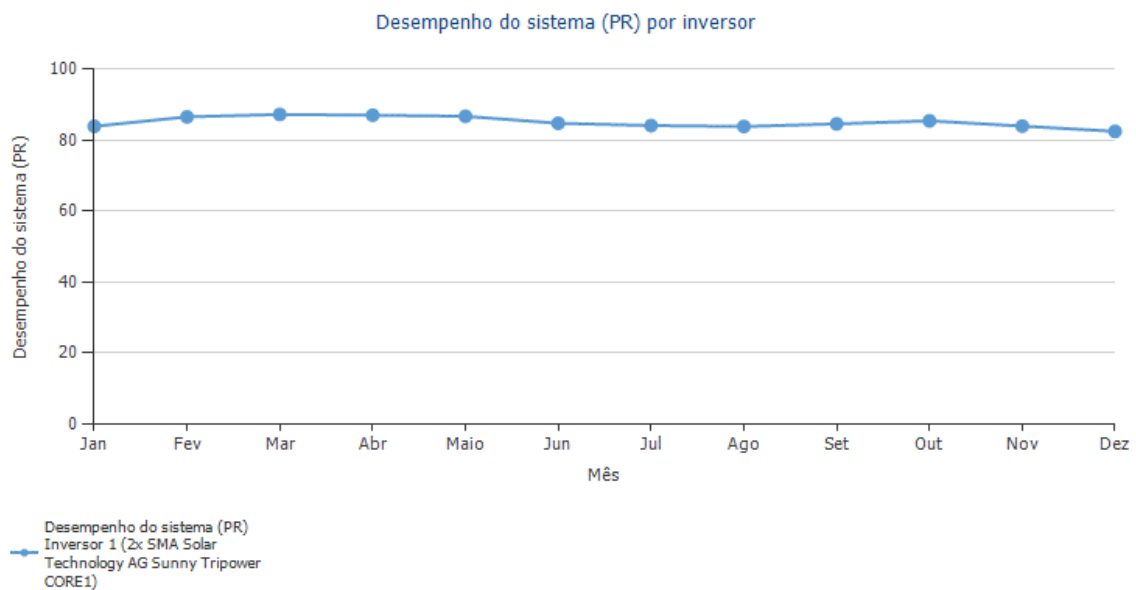


Figura 23- Desempenho do sistema por inversor (Fonte: PVSol).

O gráfico da figura 23 ilustra a *performance rating*, ou seja, a eficiência percentual que o inversor tem consoante o mês, sendo que neste caso aborda a junção dos dois inversores, dois SMA Solar. As strings

representam as fileiras de painéis que estão conectadas ao sistema fotovoltaico e a sua performance irá ser a mesma se os dois inversores estiverem bem divididos por string. A performance média de ambos os inversores ao longo do ano foi de 85,1%, sendo que a altura em que registou uma maior performance foi no mês de Março (87,3%).

Os painéis fotovoltaicos podem ser ligados em série ou em paralelo, sendo que o que vai determinar essas ligações é a tensão máxima de entrada nos inversores e a quantidade de módulos fotovoltaicos, para que o sistema consiga gerir a potência pela qual foi projetado. Neste caso os painéis fotovoltaicos estão ligados em série e as strings em paralelo. A figura 24 ilustra a divisão das strings pelos 2 inversores, sendo que 1 inversor suportou as strings coloridas e o outro inversor as strings restantes.

Na tabela 4 é possível observar a configuração das strings aos 2 inversores SMA Sunny Tripower Core 1 STP 50kW.

Tabela 4 - Configuração das Strings por Inversor (Fonte: PVSol).

Inversor	Nº de strings	Nº de módulos por string
2x SMA Sunny Tripower Core 1 STP – 50kW	2	20
	2	20
	2	18
	1	18
	1	18
	1	18

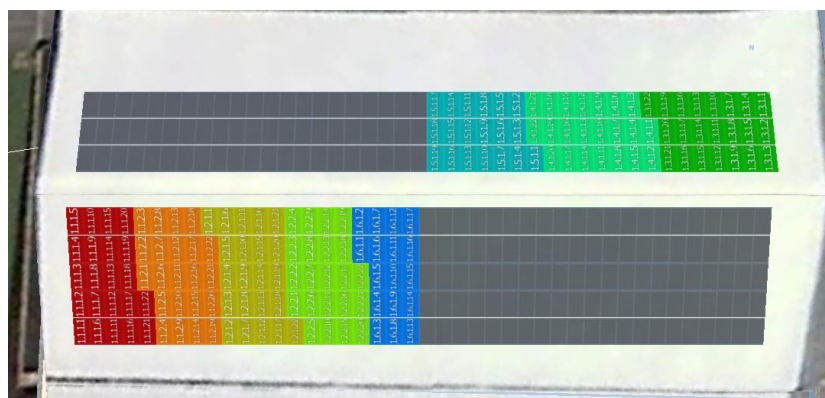


Figura 24 - Ilustração das strings suportadas apenas por 1 inversor (Fonte: PVSol).

5.2 Dados do Software PVGIS

Este software foi utilizado para se obter uma estimativa da produção anual, sendo que com estes dados vamos poder fazer uma comparação com dados reais da obra. Primeiramente, indicou-se a localização do sistema fotovoltaico, a potência fotovoltaica de pico instalada (kWp) e a inclinação dos módulos fotovoltaicos (°). Na tabela 5 podemos visualizar as características.

Tabela 5 - Características da instalação (Fonte: PVGIS).

Potência de pico instalada [kWp]	105,84
Produção anual de energia fotovoltaica [kWh]	135786
Irradiação anual no plano [kWh/m ²]	1666,49
Inclinação [°]	10
Azimute [°]	0

6. RESULTADOS

6.1 Resultados da simulação do PVSol

Após a realização das simulações foi possível obter os gráficos da cobertura de consumo (Figura 25), bem como o gráfico da utilização da energia fotovoltaica (Figura 26).

O gráfico da cobertura de consumo apresenta o consumo mensal de energia e as parcelas cobertas pelo sistema fotovoltaico e pela rede. No gráfico, as cores cinzentas dizem respeito à energia do consumo do inversor e aos consumos que o cliente tinha antes de ter produção. O inversor, mesmo não estando a produzir, está a consumir energia (um valor muito baixo) durante todos os meses.

Observando o gráfico, entre os meses de Maio e Setembro houve uma grande diferença quanto à cobertura do consumo, uma vez que é uma época mais quente e o consumo é suportado sobretudo pelo sistema fotovoltaico ao invés da rede elétrica. A altura onde se registou uma maior cobertura por parte do sistema fotovoltaico foi em Julho, abatendo 12529.1 kWh dos 18628 kWh do consumo total da empresa, apresentado uma taxa de cobertura de 67%. Por outro lado, o mês de Dezembro abateu apenas

3535 kWh dos 22129,1 kWh, registrando a pior cobertura do ano (16%). Estes dados vieram provar que a altura ideal para se apostar neste tipo de sistemas é entre os meses de Maio e Setembro.

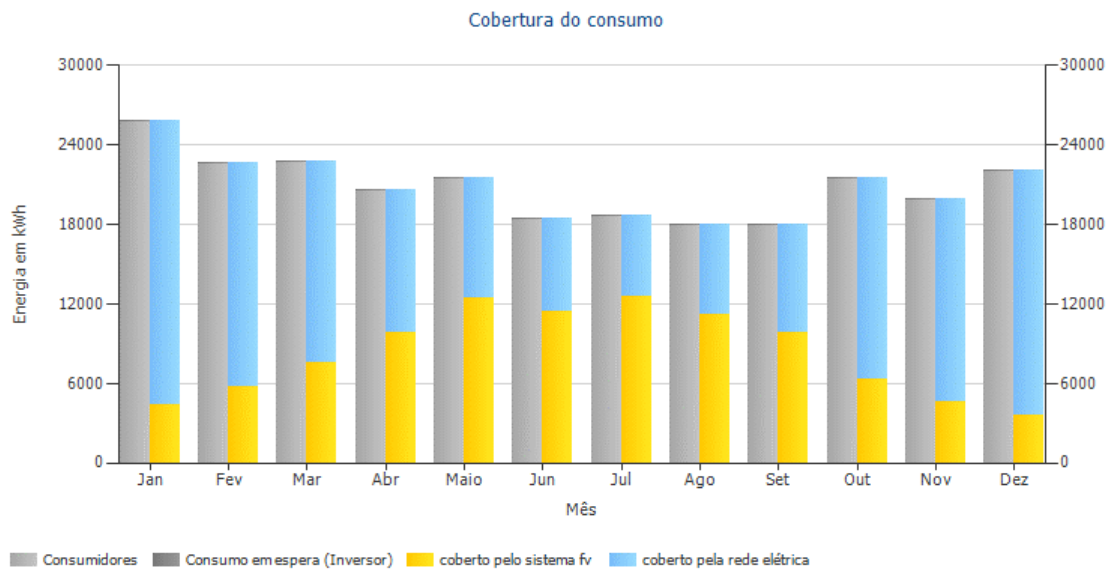


Figura 25 - Cobertura do consumo (Fonte: PVSol).

O gráfico da utilização da energia fotovoltaica é semelhante ao gráfico da cobertura de consumo, uma vez que a barra amarela significa a energia que o gerador produz, a cinzenta corresponde sempre ao consumo direto do cliente na indústria (a energia que vai buscar ao fotovoltaico) e a barra azul à injeção na rede, mas poderá também corresponder ao que a rede dá ao cliente (a energia que sobra, a indústria tem vários consumos nessas horas e o sistema fotovoltaico injeta o restante na rede).

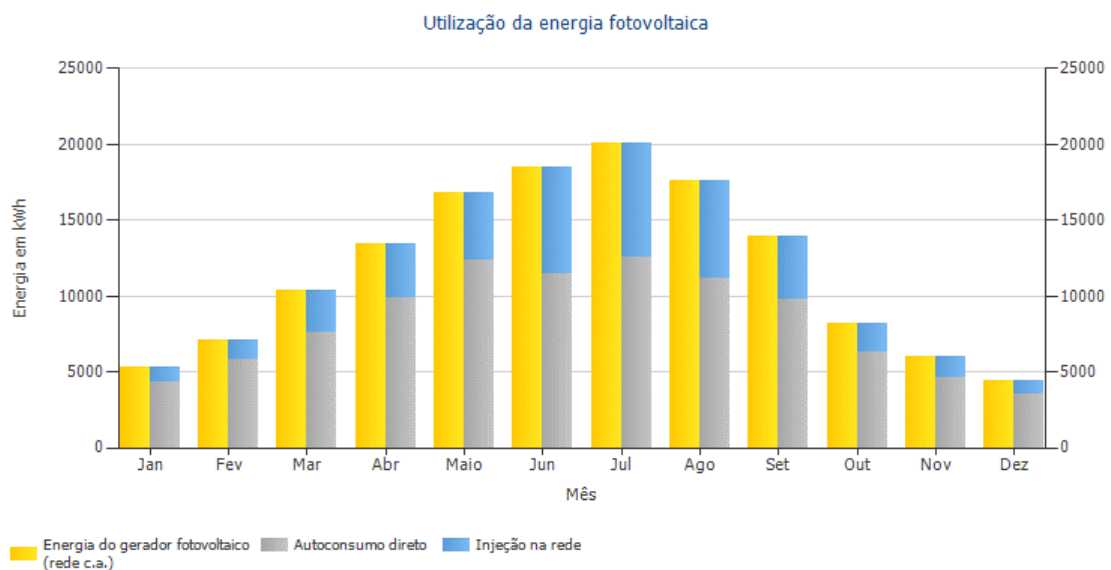


Figura 26 - Utilização da energia fotovoltaica (Fonte: PVSol).

Tal como o gráfico anterior, o mês de Dezembro registou a menor utilização de energia fotovoltaica, produzindo apenas 4379 kWh e consumindo 3535 kWh, sobrando apenas 844 kWh para a rede. Pelo contrário, o mês de Julho foi o mês mais produtivo (20032,1 kWh), onde foram consumidos 12529,1 kWh, e na qual se registou a maior injeção na rede (7503 kWh). A energia proveniente do gerador fotovoltaico ao longo dos 12 meses foi de 141586 kWh/ano.

Em relação ao valor injetado na rede, o cliente está a gerar, no entanto não está a consumir e assim sendo, ele perde automaticamente. Há duas partes de interpretar o valor injetado na rede, no caso de o cliente estar a injetar muito na rede, a entidade pela qual ele está ligado, irá propor um valor X para lhe fornecer ou um desconto. No entanto, a entidade pode não comprar nem descontar o excedente energético e assim sendo, o cliente pode estar a dar à rede e não estar a receber nada com isso. Este fator influencia a tarifa de injeção, sendo que se não houver retorno é um prejuízo a mais na análise financeira.

6.2 Resultados da simulação do PVGIS

No que concerne à estimativa da produção e de energia incidente do sistema fotovoltaico, apresenta-se na Figura 27 os valores de energia solar incidente no plano dos módulos, para a área total do sistema fotovoltaico.

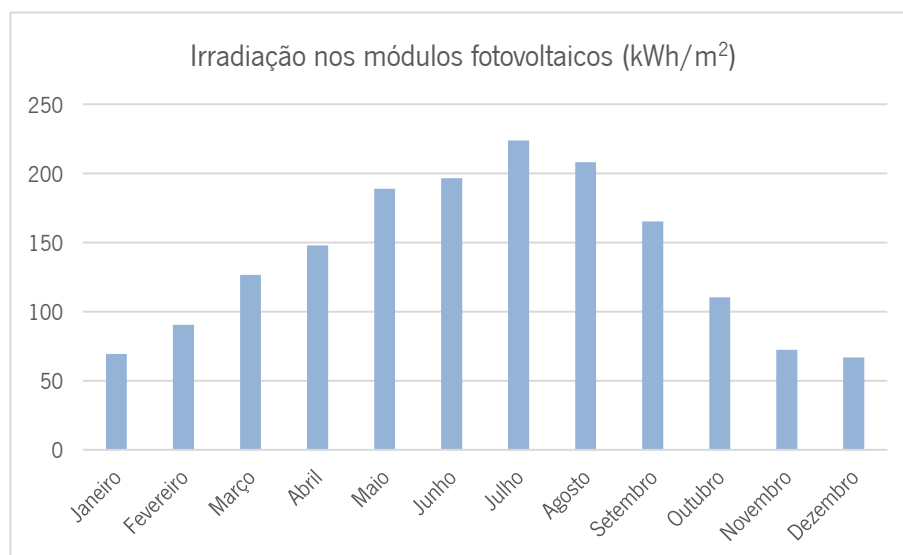


Figura 27 - Energia solar incidente no plano dos módulos (Fonte: PVGIS).

O período onde se previu haver uma maior irradiação foi entre Julho e Agosto, registando uma irradiação superior a 200 kWh/m². Pelo contrário, o mês de Dezembro apresentou apenas 66,76 kWh/m².

Se analisarmos o rácio entre o valor da produção anual de energia (135786 kWh) e a quantidade de energia solar incidente no plano dos módulos (1666 kWh/m² com uma área total de painéis de 561 m²) verifica-se que se obtém um valor de 15%, um valor abaixo do valor do rendimento dos módulos fotovoltaicos. A diferença entre os valores pode-se explicar sobretudo a perdas devido à temperatura nos módulos.

A figura 28 apresenta os valores da produção mensal do sistema.

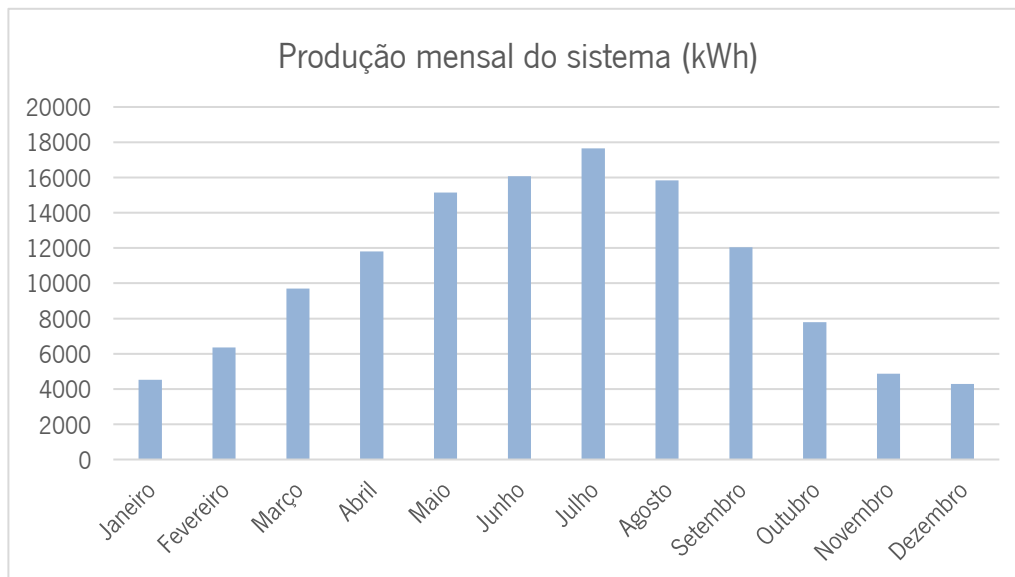


Figura 28- Estimativas da produção mensal do sistema fotovoltaico (Fonte: PVGIS).

Tal como demonstrado no gráfico da Figura 28, o mês onde houve uma maior produção por parte do sistema fotovoltaico foi o mês de Julho, apresentando um valor de 17645 kWh, e o mês onde houve menos rendimento por parte do sistema foi o mês de Dezembro com apenas 4286 kWh.

6.3 Comparação dos resultados simulados com resultados reais

De modo a realizar uma correta avaliação da produção do sistema fotovoltaico ao longo do tempo tem de haver uma comparação com a produção estimada e com a produção que realmente ocorreu. Os dados da produção estimada são provenientes do software PVGIS e os dados reais foram retirados da plataforma online Sunny Portal, que nos diz ao certo a produção da central fotovoltaica.

A manutenção do sistema fotovoltaico é feita de ano a ano, sendo que a última visita feita à obra foi no dia 3 de Março de 2021, logo só foi possível estimar valores até essa data. Podemos observar esses dados na Tabela 6.

Tabela 6 - Produção Real x Produção Estimada (PVGis) do sistema fotovoltaico.

	Produção Real (kWh)		Produção Estimada (kWh)	
	2020	2021	2020	2021
Janeiro	-	3472	-	4523
Fevereiro	-	3350	-	6348
Março	7022	276	9705	9705
Abril	1660	-	11807	-
Mai	11558	-	15146	-
Junho	10652	-	16078	-
Julho	13580	-	17645	-
Agosto	6578	-	15844	-
Setembro	9451	-	12043	-
Outubro	5645	-	7783	-
Novembro	3956	-	4873	-
Dezembro	2063	-	4286	-
TOTAL	72165	7098	115210	20576

Observando a Tabela 6, podemos verificar que existem variações ao longo do ano entre a produção real e a produção estimada. Durante o ano de 2021 foram produzidos 7098 kWh contra os estimados 20576 kWh, representando uma diferença negativa, em termos percentuais, de 66% entre a produção real e a produção estimada. A produção real ao longo de um ano registou 79263 kWh, um valor que se encontra também longe dos 135786 kWh expressos na produção estimada, no entanto, como se vai explicar posteriormente, há fatores que podem ter tido interferência em alguns valores expressos na tabela 6.

Tanto a produção como o consumo são duas variáveis que estão em constante oscilação durante todo o ano. Neste contexto, mencionando só a produção fotovoltaica, podemos justificar estes resultados principalmente devido às alterações climáticas que surgem consoante as estações do ano, à variação do consumo da empresa e por vezes, quando apresentam valores muito baixos, pode ser devido a uma falha técnica ou até à perda de comunicação com o inversor (o inversor pode estar na mesma a produzir, mas a comunicação falhou). O gráfico da figura 29 ilustra a diferença entre a produção real e a produção estimada no ano de 2021.

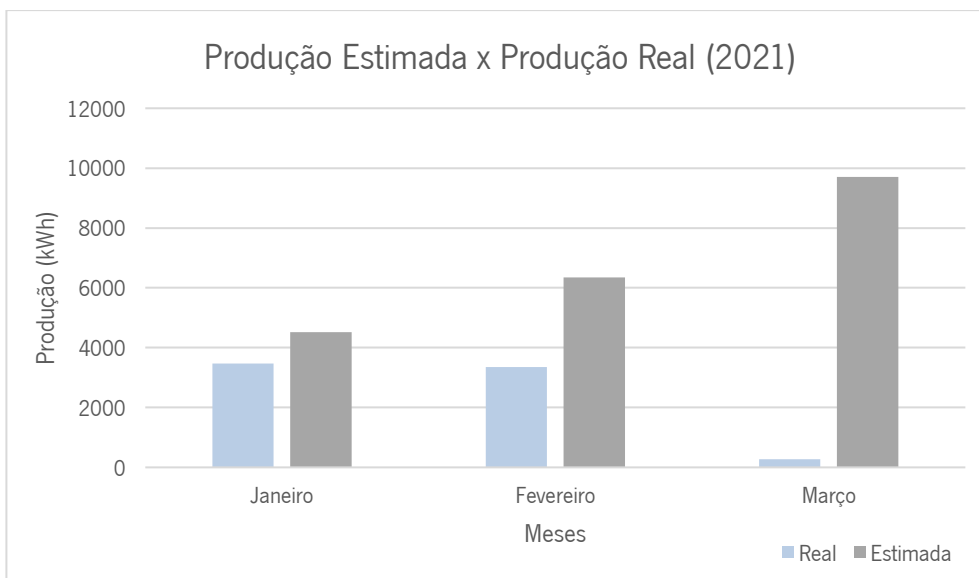


Figura 29 - Comparação da produção estimada (PVGis) com a produção real em 2021.

Observando o gráfico da Figura 29, é possível concluir que a produção real esteve sempre um pouco abaixo da produção estimada devido aos possíveis fatores já referidos anteriormente. Em Março de 2021, a produção real registou um valor muito baixo por apenas se ter contabilizado 3 dias nesse mês.

Uma vez já analisada a produção há outra variável a ter em conta, sendo ela o consumo. Os valores do consumo foram registados por um contador bidirecional instalado na central fotovoltaica. Na tabela 7, é possível visualizar o consumo total das instalações da empresa MEPS no ano 2020 e 2021.

Tabela 7 - Consumo total das instalações no ano de 2020 e 2021.

	Consumos Reais (kWh)	
	2020	2021
Janeiro	-	17973
Fevereiro	-	21398
Março	7051	2401
Abril	9994	-
Maio	20848	-
Junho	21635	-
Julho	25166	-
Agosto	13748	-
Setembro	23638	-
Outubro	19393	-
Novembro	16289	-
Dezembro	14118	-
TOTAL	171880	41772

Na tabela 8, podemos verificar que da energia fotovoltaica consumida diretamente na instalação, foi possível alcançar uma autossuficiência anual de 43.07%, significando que o sistema fotovoltaico cobriu quase metade dos consumos da empresa, um valor considerado normal tendo em conta a potência instalada e os perfis de consumo da indústria.

Tabela 8 - Autossuficiência da indústria.

	Produção 2020 (kWh)	Consumo 2020 (kWh)	Autossuficiência 2020 (%)
Janeiro	-	-	-
Fevereiro	-	-	-
Março	7022	7051	100%
Abril	1660	9994	17%
Maio	11558	20848	55%
Junho	10652	21635	49%
Julho	13580	25166	54%
Agosto	6578	13748	48%
Setembro	9451	23638	40%
Outubro	5645	19393	29%
Novembro	3956	16289	24%
Dezembro	2063	14118	15%
TOTAL	72165	171880	43%

6.4 Análise da Viabilidade Financeira

Para avaliar corretamente a viabilidade deste projeto devem ser consideradas todas as variáveis, na qual o sucesso do projeto em causa depende. As variáveis consideradas relativas ao projeto em causa são:

- Custo de investimento: Valor investido para a realização da obra.
- Rendimento do sistema fotovoltaico: Os módulos estão expostos a condições climáticas extremas durante o seu tempo de vida útil, o que leva ao decaimento da eficiência dos mesmos com o tempo. Neste caso, foi considerado um período de 25 anos.
- Tarifa de Injeção: O valor que irá ser cobrado ao cliente consoante injeta na rede. Este valor vai variar consoante a hora do dia, visto que a tarifa de energia é Tetra horária, existindo as horas Ponta, Cheias, Vazio e Super Vazio. A remuneração da eletricidade em venda direta foi de 0,05 €/kWh.

- Economia da Energia: O valor que o cliente irá poupar de acordo com o que é produzido pelo sistema fotovoltaico, ou seja, o valor que começou a ser rentável a partir de um determinado ano.
- Fluxo de caixa anual: O valor que o cliente vai conseguir angariar através do consumo de energia solar e do que injeta na rede.
- Fluxo de caixa acumulado: O valor acumulado ao fim de 26 anos.
- Payback e Retorno do Investimento (ROI): Índices comparativos referentes ao retorno sobre o investimento, no entanto, o payback é medido em tempo e o ROI é medido em percentagem. Para o cálculo de ambos:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de caixa por ano}} = 3,9 \text{ anos}$$

Tendo em consideração que o sistema terá uma vida útil de, no mínimo, 25 anos, o cliente teria aproximadamente 21 anos de lucro com o sistema fotovoltaico, visto que só houve recuperação do investimento 4 anos depois.

Para se calcular o ROI, tivemos antes que calcular o ganho obtido, dado pelo produto dos anos de lucro com o fluxo de caixa. O fluxo de caixa apresenta um valor a rondar os 14000€/ano segundo a simulação do software PVSol.

$$\text{Ganho obtido} = 14000 \times 21 = 294000\text{€}$$

$$\begin{aligned} \text{Retorno do Investimento} &= \frac{\text{Ganho obtido} - \text{Investimento Inicial}}{\text{Investimento Inicial}} \\ &= \frac{294000 - 55000}{55000} = 4,3 \text{ anos} \times 100 = 430\% \end{aligned}$$

- Taxa Interna de Retorno (TIR): Prevê a taxa que o investidor obtém, em média, ao ano, sobre o capital investido. O valor dado pela simulação do PVSol foi de 23%.
- Valor Atual Líquido (VAL): Indicador utilizado na avaliação da rentabilidade de projetos de investimento.

$$\text{VAL} = \sum_{i=0}^n \frac{\text{CF}_i}{(1+t)^i}$$

Onde, CF corresponde ao fluxo de caixa gerado a cada ano, t é o período de tempo, n é o número de períodos e i é o custo do capital. Ao realizar os cálculos no Excel, resultou a tabela seguinte:

Tabela 9 - Valor Atual Líquido.

Ano	Fluxo
0	- 55 000,00 €
1	14 000,00 €
2	14 000,00 €
3	14 000,00 €
4	14 000,00 €
5	14 000,00 €
6	14 000,00 €
7	14 000,00 €
8	14 000,00 €
9	14 000,00 €
10	14 000,00 €
11	14 000,00 €
12	14 000,00 €
13	14 000,00 €
14	14 000,00 €
15	14 000,00 €
16	14 000,00 €
17	14 000,00 €
18	14 000,00 €
19	14 000,00 €
20	14 000,00 €
21	14 000,00 €
22	14 000,00 €
23	14 000,00 €
24	14 000,00 €
25	14 000,00 €
TMA	10%
VPL	72 078,56 €

- Taxa mínima de atratividade (TMA): Percentual mínimo que um investidor está disposto a ganhar a partir de uma aplicação financeira, ou seja, a margem de dimensionamento.

Na tabela seguinte, podemos ver ao pormenor os dados relativos à simulação e a cálculos realizados anteriormente.

Tabela 10 - Resultados provenientes da simulação do software PVSOL para a análise financeira.

Investimento (€)	55000
Prazo do Projeto (anos)	25
Payback (anos)	3,9
Retorno do Investimento (%)	430
Fluxo de caixa por ano (€/Ano)	14000
Preço da energia (€/kWh)	0,05
Taxa Interna de Retorno (%)	23
Valor Atual Líquido (€)	72000
Taxa Mínima de Atratividade (%)	10

A Figura 30 diz respeito ao fluxo de caixa acumulado e mostra o lucro gerado pela empresa ao fim de 26 anos.

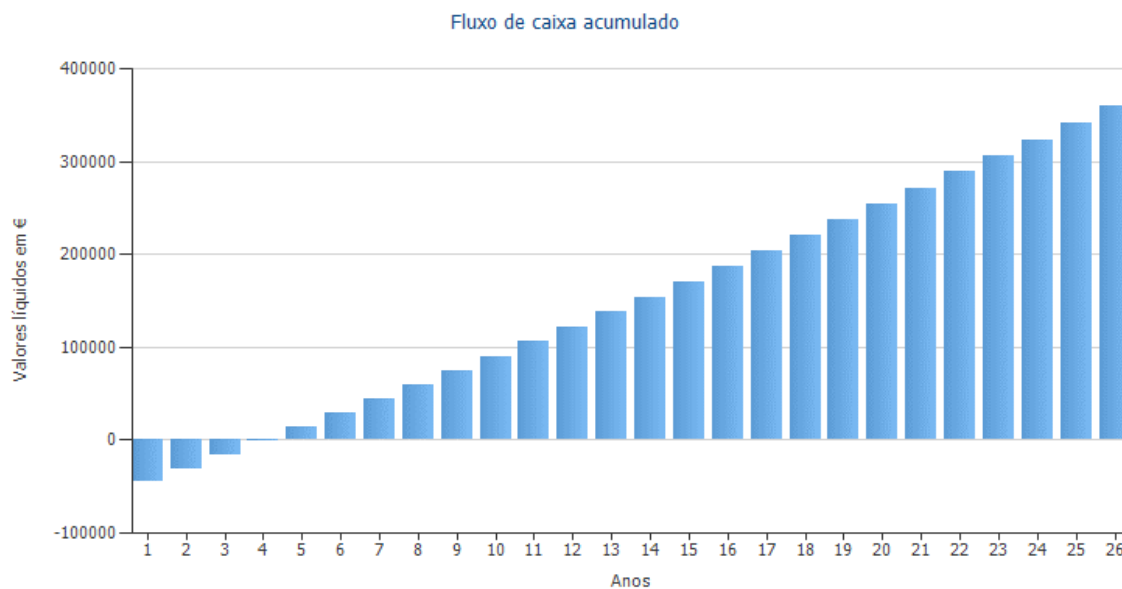


Figura 30 - Fluxo de caixa acumulado (Fonte: PVSol).

O gráfico da Figura 30 corresponde ao investimento feito pelo cliente no primeiro ano (ano 0) e, consoante o sistema fotovoltaico vai produzindo, verifica-se quando é que o sistema se torna rentável. Neste caso, o investimento inicial rondou os 55000€ e, analisando o fluxo de caixa acumulado, prevê-se

que o payback seja de 3,9 anos de operação, isto é, é expectável que o sistema passe a gerar um lucro crescente para o consumidor a partir desse período de tempo.

Considerando tudo o que foi referido anteriormente, o projeto apresenta um VAL positivo de 72000€ e uma TIR de 23%, ou seja, um valor superior à TMA (10%), o que significa que o projeto é economicamente viável.

A Figura 31 representa a diferença dos custos de energia antes e após a instalação do sistema fotovoltaico.

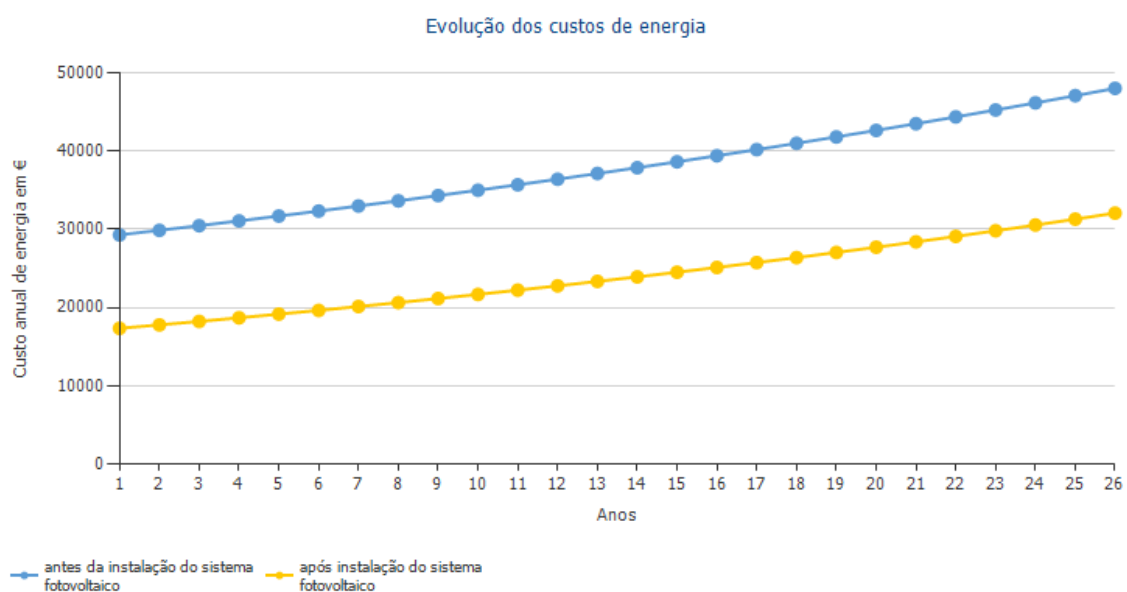


Figura 31 - Evolução dos custos de energia antes e após a instalação fotovoltaica (Fonte: PVSol).

Como podemos observar, há uma grande disparidade quanto aos custos anuais de energia antes e após a instalação do sistema fotovoltaico, sendo que, realizando uma média dos 26 anos, a indústria despendia de cerca de 80000€ caso não apostasse no sistema fotovoltaico. Pelo contrário, com esse investimento a indústria passaria a despendar cerca de 50000€, apresentando uma economia de energia de 30000€.

7. CONCLUSÃO

Um dos maiores desafios no mundo atual está relacionado com a utilização dos diferentes tipos de energia de forma sustentável e eficiente. Compreender os cenários envolvidos na matriz energética no mundo pode ser um fator determinante para o futuro das gerações. Neste contexto, essa percepção contribui para o desenvolvimento expressivo de fontes renováveis e consequente substituição das energias prejudiciais para o ambiente, provenientes de combustíveis fósseis.

O desenvolvimento deste estudo possibilitou a compreensão das diferentes etapas do dimensionamento e implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede com consumo, referente à indústria MEPS.

Este trabalho teve como objetivo o dimensionamento do sistema fotovoltaico e a análise da sua rentabilidade e eficiência. Primeiramente foram analisados e tratados os dados estimativos do software PVSol e PVGIS, sendo que estas simulações possibilitaram não só estimar valores de produções/consumos mensais e anuais, como também determinar fatores de desempenho que caracterizam o sistema. Neste contexto, a partir do tratamento de dados, foi possível realizar uma comparação entre resultados estimativos provenientes da simulação com os resultados que realmente se obtiveram na instalação fotovoltaica.

Após a realização destas estimativas e da sua comparação entre elas, verificou-se que o software PVSol é o que apresenta a maior produção anual de energia com um valor de 141586 kWh, sendo superior ao que foi registado no software PVGIS (135786 kWh) e ao que foi registado verdadeiramente (79263 kWh). Em relação aos fatores de desempenho, segundo o software PVSol, observou-se uma performance rating média de 85,1%, durante um ano, nos inversores e, no que diz respeito aos módulos, foi verificada uma queda de potência de 19% ao longo dos 25 anos.

Analisando a viabilidade energética, constata-se que, nos meses de Verão, o consumo foi suportado sobretudo pelo sistema fotovoltaico. Nos meses de Inverno, é visível que existe uma maior percentagem de potência comprada à rede elétrica.

Relativamente aos resultados reais da empresa, chegou-se à conclusão que houve uma diferença negativa de 66% entre a produção real e a produção estimada no PVGIS e da energia fotovoltaica consumida diretamente na instalação, foi possível alcançar uma autossuficiência anual de 43.07%, significando que o sistema fotovoltaico foi eficiente ao cobrir quase metade dos consumos da empresa.

Por fim, à medida que fui desempenhando o projeto, foi perceptível que existem variáveis importantes para os clientes analisarem se um investimento é rentável ou não, que passa mesmo pelo investimento feito, a tarifa de injeção, economia de energia, fluxo de caixa anual, fluxo de caixa acumulado, a taxa interna de retorno e o valor atual líquido. A análise de viabilidade financeira do projeto, conclui que o sistema apresenta um VAL positivo (72000€) e a sua TIR é de 23%, ou seja, superior à taxa mínima de atratividade utilizada (10%), fazendo com que o projeto seja rentável e economicamente viável. O payback é realizado em 3 anos e 11 meses, ou seja, encontra-se dentro do tempo de vida do projeto (25 anos).

Após o estudo realizado, pode-se concluir que a aquisição de um sistema fotovoltaico, destinado ao autoconsumo, para a empresa MEPS, irá ser rentável e eficiente. Além de tornar a empresa sustentável, o capital economizado com a fatura de energia pode ser usufruído para outros projetos futuros.

6. REFERÊNCIAS

- Alves Freitas, S. S. (2008) *Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos*. Instituto Politécnico de Bragança.
- American Chemical Society (2020) *How a Solar Cell Works?* Disponível em: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html> (Acedido: 10 de Novembro de 2021).
- APREN (2019) «Boletim eletricidade renovável 2019», *Apren*, p. 8. Disponível em: <https://www.apren.pt/contents/publicationsreportcarditems/02-boletim-energias-renovaveis-vf.pdf>.
- APREN (2020) «2020 Anuário Yearbook», *Portugal precisa da nossa energia*, p. 27.
- APREN (2021) «Boletim Eletricidade Renovável 2021», *Apren*, p. 17.
- Carneiro, J. e Passos, M. (2020) *Sistemas Fotovoltaicos, Fundamentos sobre Dimensionamento*. Editado por Quântica Editora - Conteúdos Especializados Lda. Porto.
- Cleveland, O. (2020) *The Seasons, the Equinox and the Solstices, National Weather Service*. Disponível em: <https://www.weather.gov/cle/Seasons> (Acedido: 1 de Outubro de 2021).
- Comissão Europeia (2019) «Plano Nacional Energia E», *Plano Nacional Energia E Clima 2021-2030 (Pnec 2030)*, 2030(Pnec 2030), pp. 1–200.
- Costa, R. (2011) *Comparação de Métodos de Seguimento Solar para Sistemas Fotovoltaicos*. Universidade de Lisboa.
- Deceased, J. A. D. e Beckman, W. A. (1982) *Solar engineering of thermal processes, Design Studies*.
- Delbeke, J. et al. (2019) «The paris agreement», *Towards a Climate-Neutral Europe: Curbing the Trend*, pp. 24–45.
- DGEG (2020) «Fatura energética portuguesa».
- DGEG (2021) *Fatura Energética*. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/publicacoes/fatura-energetica/> (Acedido: 11 de Junho de 2021).
- Enel Green Power (2020) *Renewables in Portugal: back to the future*. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/stories/articles/2020/10/portugal-renewables-energy-transition> (Acedido: 4 de Junho de 2021).
- Fonash, S. J., Fonash, R. T. e Ashok, S. (2020) *Solar Cell, Encyclopedia Britannica*. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell> (Acedido: 12 de Novembro de 2021).
- Golovca, D. (2016) *Armazenamento Sazonal de Energia Solar Térmica de Baixa Temperatura para Climatização de Edifícios*. Universidade de Évora.
- HISOUR Arte Cultura e Exposição (2018) *Silício Amorfo*. Disponível em: <https://www.hisour.com/pt/amorphous-silicon-39639/> (Acedido: 16 de Novembro de 2021).
- Honsberg, C. e Bowden, S. (2019) *Photovoltaics Education Website*. Disponível em: <https://www.pveducation.org/> (Acedido: 20 de Novembro de 2021).
- Internacional Energy Agency (2021) «Renewable Energy Market Update», *Renewable Energy Market Update*, p. 26.

- João, E. da S. (2016) *Metodologia de dimensionamento para instalações fotovoltaicas em autoconsumo*. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Kabir, E. *et al.* (2018) «Solar energy: Potential and future prospects», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(August 2017), pp. 894–900.
- Magarreiro, C., Freitas, S. e Brito, M. C. (2016) «Radiação e energia solar», *Gazeta de Física*, 39(1/2), pp. 57–59. Disponível em: www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf.
- Martinez-Gracia, A., Arauzo, I. e Uche, J. (2019) «Solar Energy Availability», *Solar Hydrogen Production*, pp.113–149. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000059>.
- McClure, B. (2017) *Equinox Sun Rises due East, sets due West*. Disponível em: https://earthsky.org/tonight/sun-rises-due-east-and-sets-due-west-on-day-of-equinox/?utm_source=EarthSky+News&utm_campaign=8e1106309e-EarthSky_News&utm_medium=email&utm_term=0_c643945d79-8e1106309e-394123773 (Acedido: 19 de Junho de 2022).
- Mendes, I. M. (2016) *Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para autoconsumo Índice*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Moreira, M., Delmar, J. (2014) *A Microgeração Fotovoltaica No Futuro Do Autoconsumo, Politécnica Revista Científica*. Instituto Superior Politécnico Gaya. Disponível em: <http://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/13630>.
- Observatório da Energia, DGEG e ADENE (2021) «Energia em Números - Edição 2021», p. 135 pp.
- Ovelha, R. M. R. V. de (2017) *Projeto, Dimensionamento e Instalação de Solução Fotovoltaica numa moradia offgrid*. Universidade de Lisboa.
- Pêgas, Á. J. R. *et al.* (2017) *Energia geotérmica*. Universidade do Porto.
- Pereira, S. (2017) *Desenvolvimento de um algoritmo de previsão de radiação solar através do refinamento espacial e temporal de dados de previsão meteorológica*. Universidade de Évora.
- Portal Energia - Energias Renováveis (2019) «Energia Fotovoltaica - Manual e guia técnico sobre tecnologias, projeto e instalação», p. 368.
- Presidência do Conselho de Ministros (2019) «Decreto-Lei nº 162/2019», *Diário da República, 1.ª série N.º*, (N.º 206), pp. 45–62. Disponível em: <https://data.dre.pt/eli/diario/1/206/2019/0/pt/html>.
- Proença, E. D. R. B. (2007) *A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL - Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento*. Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137487931/Tese - A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal.pdf>.
- Ribeiro, H. (2006) *Implementação de um sistema de calculo para sistemas de energia solar*. Universidade do Porto.
- Ritchie, H., Roser, M. e Rosado, P. (2020) *Energy Production and Consumption*. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption#citation> (Acedido: 25 de Junho de 2022).
- Sampaio, P. G. V. e González, M. O. A. (2017) «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(February), pp. 590–601.
- Sarbu, I. e Sebarchievici, C. (2017) *Solar Heating and Cooling Systems: Fundamentals, experiments and*

applications. e-book. Editado por E. Science. San Diego, United States. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-declination>.

SEIA (2021) *Solar Energy*. Disponível em: <https://www.seia.org/initiatives/about-solar-energy> (Acedido: 22 de Junho de 2021).

Solar Energy Technologies Office (2021) *Solar Photovoltaic Cell Basics*. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics> (Acedido: 10 de Novembro de 2021).

Solar Schools (2020) *Solar Energy*. Disponível em: <https://www.solarschools.net/knowledge-bank/renewable-energy/solar/energy> (Acedido: 19 de Julho de 2021).

Solarquotes (2018) *Polycrystalline vs Monocrystalline solar panels*. Disponível em: <https://www.solarquotes.com.au/panels/photovoltaic/monocrystalline-vs-polycrystalline/> (Acedido: 16 de Novembro de 2021).

Wang, C. e Lu, Y. (2016) *Solar Photovoltaic*. Savonia University of Applied Sciences.

Zhou, B. *et al.* (2021) «A review on solar pavement and photovoltaic/thermal (PV/T) system», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93(March), p. 102753. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102753>.

ANEXOS

ANEXO A – DATASHEET DO MÓDULO



Harvest the Sunshine

Mono **330W PERC Module**
JAM60S09 310-330/PR Series

Introduction

Powered by high-efficiency PERCIUM cells, this series of high-performance modules provides the most cost-effective solution for lowering the LCOE of any PV systems large or small.



5 busbar solar cell design



Higher output power



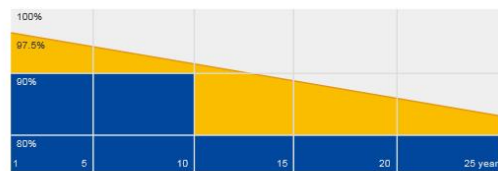
Excellent low-light performance



Lower temperature coefficient

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty



■ JA Linear Power Warranty ■ Industry Warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- OHSAS 18001: 2007 Occupational health and safety management systems
- IEC TS 62941: 2016 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Guidelines for increased confidence in PV module design qualification and type approval



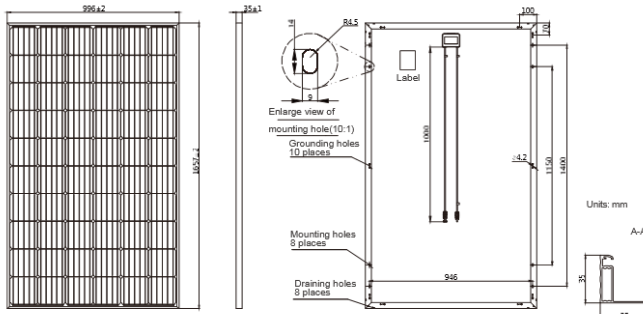
JA SOLAR

www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests.
JA Solar reserves the right of final interpretation.



MECHANICAL DIAGRAMS



SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	18.4kg±3%
Dimensions	1657±2mm×996±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ²
No. of cells	60(6x10)
Junction Box	IP67, 3 diodes
Connector	QC 4.10-35
Packaging Configuration	30 Per Pallet

Remark: customized frame color and cable length available upon request

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM60S09 -310/PR	JAM60S09 -315/PR	JAM60S09 -320/PR	JAM60S09 -325/PR	JAM60S09 -330/PR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	310	315	320	325	330
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	40.30	40.53	40.78	41.04	41.30
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	32.60	32.89	33.17	33.44	33.75
Short Circuit Current(Isc) [A]	10.04	10.11	10.18	10.25	10.32
Maximum Power Current(Imp) [A]	9.51	9.58	9.65	9.72	9.78
Module Efficiency [%]	18.8	19.1	19.4	19.7	20.0
Power Tolerance	0~+5W				
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.060%/°C				
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.300%/°C				
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.370%/°C				
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G				

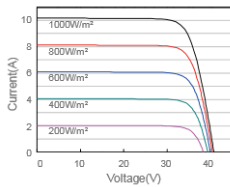
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer.They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

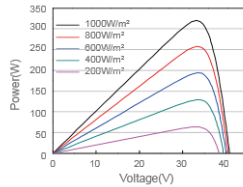
TYPE	JAM60S09 -310/PR	JAM60S09 -315/PR	JAM60S09 -320/PR	JAM60S09 -325/PR	JAM60S09 -330/PR	OPERATING CONDITIONS
Rated Max Power(Pmax) [W]	229	233	237	241	244	Maximum System Voltage 1000V/1500V DC(IEC)
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	37.95	38.25	38.56	38.85	39.16	Operating Temperature -40°C~+85°C
Max Power Voltage(Vmp) [V]	30.67	31.00	31.32	31.64	31.96	Maximum Series Fuse 20A
Short Circuit Current(Isc) [A]	7.93	7.97	8.01	8.05	8.09	Maximum Static Load,Front 5400Pa
Max Power Current(Imp) [A]	7.48	7.52	7.56	7.60	7.64	Maximum Static Load,Back 2400Pa
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					NOCT 45±2°C
						Application Class Class A

CHARACTERISTICS

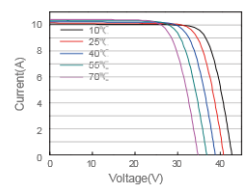
Current-Voltage Curve JAM60S09-320/PR



Power-Voltage Curve JAM60S09-320/PR



Current-Voltage Curve JAM60S09-320/PR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20190523A

SUNNY TRIPOWER CORE1
STP 50-40



STP 50-40



World's first free standing inverter

Up to 60 % faster installation for commercial PV systems

Cost-Effective

- Floor-mounted device easy to install
- No DC fuses required
- Integrated DC disconnect

Highly Integrated

- Integrated Wi-Fi access with any mobile device
- 12 direct string inputs reduce labor and material costs
- AC/DC overvoltage protection (optional)

Fastest Installation

- Fast grid connection due to easy inverter configuration and commissioning
- Completely accessible connection areas

Maximum Yields

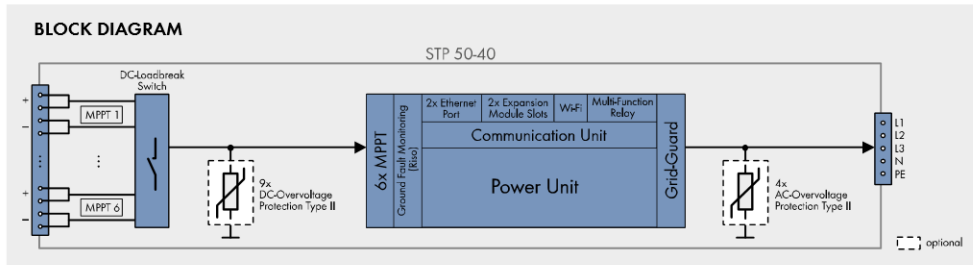
- Up to 150% DC:AC ratio
- Yield increase without installation effort due to integrated shade management SMA ShadeFix

SUNNY TRIPOWER CORE1

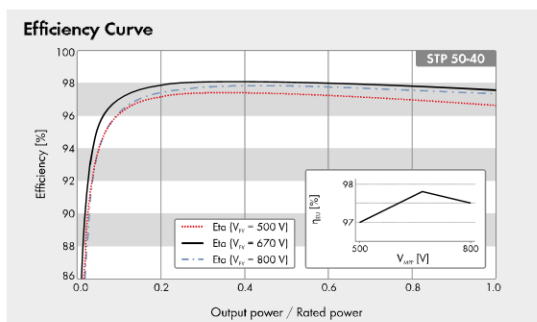
Stands on its own

The Sunny Tripower CORE1 is the world's first free-standing string inverter for decentralized rooftop and ground-based PV systems as well as covered parking spaces. The CORE1 is the third generation in the successful Sunny Tripower product family and is revolutionizing the world of commercial inverters with its innovative design. SMA engineers developed an inverter that combines a unique design with an innovative installation method to significantly reduce installation time and provide all target groups with a maximum return on investment.

From delivery and installation to operation, the Sunny Tripower CORE1 generates widespread savings in logistics, labor, materials and services. Commercial PV installations are now quicker and easier to complete than ever before.



Technical Data	Sunny Tripower CORE1	Technical Data	Sunny Tripower CORE1
Input (DC)		Efficiency	
Max. generator power	75000 Wp STC	Max. efficiency / European efficiency	98.1% / 97.8%
Max. input voltage	1000 V	General data	
MPP voltage range / rated input voltage	500 V to 800 V / 670 V	Dimensions (W/H/D) without feet or DC load break switch	569 mm / 733 mm / 621 mm [22.4 in / 28.8 in / 24.4 in]
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V	Weight	84 kg (185 lb)
Max. operating input current / per MPPT	120 A / 20 A	Operating temperature range	-25°C to +60°C (-13°F to +140°F)
Max. short circuit current per MPPT / per string input	30A / 30A	Noise emission (typical)	< 65 dB(A)
Number of independent MPPT inputs / strings per MPP input	6 / 2	Self-consumption (at night)	4.8 W
Output (AC)		Topology / Cooling concept	Transformerless / OptiCool
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	50000 W	Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65
Max. apparent AC power	50000 VA	Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H
AC nominal voltage	220 V / 380 V 230 V / 400 V 240 V / 415 V	Max. permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%
AC voltage range	202 V to 305 V	Features / functions / accessories	
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz	DC connection / AC connection	SUNCLIX / screw terminal
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V	Mounting feet	●
Max. output current / Rated output current	72.5 A / 72.5 A	LED indicators (status / fault / communication)	●
Output phases / AC connection	3 / 3-(N)-PE	LC display	○
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0.0 leading to 0.0 lagging	Interface: Ethernet / WLAN / RS485	● (2 ports) / ● / ○
THD	< 3%	Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus / Speedwire, Webconnect	● / ● / ●
Protective devices		Multi-Function relay / Expansion Module Slots	● / ● (2 parts)
Input-side disconnection device	●	Shade management SMA ShadeFix / Integrated Plant Control / Q on Demand 24/7	● / ● / ●
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●	Off-grid capable / SMA Fuel Save Controller compatible	● / ●
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / -	Guarantee: 5/10/15/20 years	● / ○ / ○ / ○
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	●	Certificates and permits (more available on request)	ANRE 30, AS 4777, BDEW 2008, C10/11:2012, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, EN 50438 2013*, G59/3, IEC 60068-2-6, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62116, MEA 2016, NBR 16149, NEN EN 50438, NRS 097-2:1, PEA 2016, PPC, RD 1699/413, RD 661/2007, Res. n° 72013, S44777, TOR D4, TR 3:2.2, UTE C15-712-1, VDE 0126-1-1, VDE-ARN 4105, VFR 2014, PO.12.3, NITCO/NITCO-S, GC 8-9H, FR20, DEWA
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)	I / AC: III; DC: II	* Does not apply to all national appendices of EN 50438	
AC/DC surge arrester (type 2, type 1/2)	○	● Standard features ○ Optional - Not available	
		Data at nominal conditions - status: 02/2020	
		Type designation	STP 50-40



Accessories

- SMA Sensor Module MD.SEN-40
- SMA IO-Module MD.IO-40
- SMA RS485 Module MD.485-40
- Universal Mounting System UMS_KIT-10
- AC Surge Protection Module Kit type 2, type 1/2 AC_SPD_Kit1-10, AC_SPD_KIT2_T1T2
- DC Surge Protection Module Kit type 2, type 1/2 DC_SPD_Kit4-10, DC_SPD_KIT5_T1T2

www.SMA-Solar.com

SMA Solar Technology