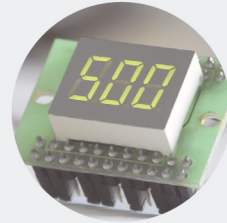




CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO: OPERAÇÃO E VIABILIDADE ECONÓMICA

MARCO ANTÓNIO TORRES LIMA

novembro de 2020



CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO: OPERAÇÃO E VIABILIDADE ECONÓMICA

MARCO ANTÓNIO TORRES LIMA

Outubro de 2020

CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS ATRAVÉS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO: OPERAÇÃO E VIABILIDADE ECONÓMICA

Marco António Torres Lima



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Marco António Torres Lima, Nº 1151350, 1151350@isep.ipp.pt

Orientação científica: Teresa Alexandra Nogueira, tan@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Quero dedicar este trabalho à minha família que tanto me apoiou ao longo destes anos.

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, à minha orientadora de tese, a engenheira Teresa Nogueira, por todo o apoio dado, pela sua disponibilidade e pela sua paciência.

Agradecer, também, aos meus colegas e amigos que me apoiaram nesta longa etapa.

Por fim, quero agradecer à minha família pelos conselhos e pelo apoio que me deram.

Resumo

Os combustíveis fósseis encontram-se cada vez mais limitados no mundo atual e, tendo em conta a inevitável adesão em massa aos veículos elétricos/ híbridos, é necessário procurar soluções nas energias limpas para abastecer estes veículos. Neste contexto, este trabalho estudou a viabilidade técnico-económica de sistemas de produção de energias limpas para abastecimento dos veículos elétricos.

São analisados vários cenários que representam os quilómetros realizados diariamente pelo(s) veículo(s) elétrico(s). Para além do estudo técnico é realizado o estudo da viabilidade económica de cada cenário. A realização deste trabalho exigiu compreender os conceitos e tecnologias associadas à energia solar fotovoltaica e ao armazenamento de energia.

A seleção do veículo elétrico é feita consoante o cenário, a sua autonomia e a sua eficiência, não sendo escolhido nem o mais eficiente nem o menos eficiente, para tornar este estudo o mais próximo possível da realidade. São calculadas as necessidades energéticas para cada cenário consoante o veículo elétrico selecionado.

Após o levantamento das necessidades energéticas, é elaborado o estudo técnico, nomeadamente, a produção de energia pelos módulos fotovoltaicos. A análise efetuada para os diversos casos de estudo contou com o apoio do software PVGIS.

Feita a seleção dos equipamentos, segue-se o estudo da viabilidade económica para cada cenário, sendo que os *cash flows* são calculados consoante a energia armazenada pela bateria em cada dia (representam o capital poupado em energia elétrica em relação ao carregamento doméstico do veículo elétrico sem a existência de um sistema fotovoltaico), a manutenção dos painéis fotovoltaicos e a manutenção da bateria.

Palavras Chave: Sistemas Fotovoltaicos, Carregamento de Veículos elétricos, Simulação de cenários, Viabilidade Económica, Acordo de Paris

Abstract

Fossil fuels are increasingly limited in today's world and, considering the inevitable mass adherence to electric / hybrid vehicles, it is necessary to seek solutions in clean energy to fuel these vehicles. In this context, this document studies the technical and economic viability of clean energy production systems for fuel electric vehicles.

Several scenarios that represent the kilometers traveled daily by the electric vehicle (s) are analyzed. In addition to the technical study, the study of the economic viability of each scenario is carried out. The realization of this document required understanding the concepts and technologies associated with solar photovoltaic energy and energy storage.

The selection of the electric vehicle is made according to the scenario, its autonomy and its efficiency, neither the most efficient nor the least efficient being chosen to make this study as close to reality as possible. The energy requirements for each scenario are calculated depending on the electric vehicle selected.

After collect the energy needs, the technical study is prepared, namely, the energy production by the PV modules. The analysis carried out for the different case studies had the support of the PVGIS software.

Once the equipment is selected, the economic feasibility study for each scenario follows, with cash flows being calculated according to the energy stored by the battery on each day (they represent the capital saved in electricity in relation to the domestic charging of the electric vehicle without the existence of a photovoltaic system), the maintenance of photovoltaic panels and the maintenance of the battery.

Key Words: Photovoltaic Systems, Electric Vehicle Charging, Scenario Simulation, Economic Viability, Paris Agreement

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
ACRÓNIMOS	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	2
2. CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA FOTOVOLTAICA	5
2.1.ENERGIA FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA	5
2.1.1.DEPENDÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	5
2.1.2.EFEITOS DAS EMISSÕES DE CO ₂ NO MEIO AMBIENTE	7
2.1.3.ACORDO DE PARIS	8
2.1.4.MIX DE PRODUÇÃO MUNDIAL DE ELETRICIDADE	9
2.2.TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	10
2.2.1.SEMICONDUTORES E JUNÇÃO PN.....	10
2.2.1.1.SEMICONDUTOR DO TIPO P.....	11
2.2.1.2.SEMICONDUTOR DO TIPO N	12
2.2.1.3.JUNÇÃO PN	13
2.2.2.CÉLULA FOTOVOLTAICA	14
2.2.2.1CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA	14
2.2.2.2MODELOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	16
2.2.2.3EFEITO DO MEIO AMBIENTE À SAÍDA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	17
2.2.3.MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	18
2.2.4.DÍODO	19
2.2.5.DÍODO BY-PASS.....	22
2.2.6.DÍODO DE ISOLAMENTO.....	26

2.3.COMERCIALIZAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	27
2.3.1. EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	27
2.3.2. PREÇO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	28
2.3.3. TERMINOLOGIAS DA BATERIA E CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO.....	28
2.3.4. CONTROLADOR DE CARGA	31
2.3.5. INVERSOR.....	32
2.3.6. CONDIÇÕES PARA UM MELHOR APROVEITAMENTO SOLAR	32
2.3.7. SISTEMAS DE SEGUIDOR SOLAR	34
2.4. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	35
2.5. CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	36
2.5.1. ADESÃO AO VEÍCULO ELÉTRICO	36
2.5.2. REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A UTILIZAÇÃO DE UM POSTO DE CARREGAMENTO INSTALADO EM LOCAL PRIVADO	39
2.5.3. MODOS DE CARREGAMENTO DO VEÍCULO ELÉTRICO	39
2.5.3.1. CARREGAMENTO LENTO.....	39
2.5.3.2. CARREGAMENTO SEMI-RÁPIDO	40
2.5.3.3. CARREGAMENTO RÁPIDO.....	41
3. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA CARREGAMENTO DO VE 43	
3.1. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO	43
3.2. ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO SOL E IRRADIAÇÃO SOLAR NO LOCAL DA INSTALAÇÃO	44
3.3. SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	46
3.3.1 SELEÇÃO DO INVERSOR	46
3.3.2 SELEÇÃO DO CONTROLADOR DE CARGA	47
3.3.3 SELEÇÃO DOS PAINÉIS SOLARES	47
3.3.4 SELEÇÃO DA BATERIA	47
3.4. VARIÁVEIS ECONÓMICAS	48
4. CASOS DE ESTUDO – SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS..... 49	
4.1. SOFTWARE UTILIZADO.....	49
4.2. CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE FUNCIONAMENTO	50
4.2.1. CENÁRIO 1	51
4.2.2. CENÁRIO 2.....	54
4.2.3. CENÁRIO 3.....	56
4.2.4. CENÁRIO 4.....	59
4.2.5. CENÁRIO 5.....	62
4.2.6. CENÁRIO 6.....	64
4.3. ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÓMICA DE CADA CENÁRIO	67
4.3.1. CASH FLOWS	68

4.3.2.VAL	69
4.3.3.PAYBACK.....	70
4.3.4.TIR	70
4.4.INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	72
5. CONCLUSÕES.....	74
5.1.ANÁLISE CONCLUSIVA	74
5.2.PERSPETIVAS FUTURAS.....	74
REFERÊNCIAS	76

Índice de Figuras

Figura 1 - Emissões de CO ₂ no planeta	6
Figura 2 - Repartição do consumo dos combustíveis fósseis	7
Figura 3 - Consumo de Energias Renováveis versus Consumo de Combustíveis Fósseis	8
Figura 4 - Mix de produção de eletricidade	9
Figura 5 - Estrutura cristalina de um material semicondutor	10
Figura 6 - Semicondutor do tipo p	11
Figura 7 - Semicondutor do tipo n	12
Figura 8 - Junção pn	13
Figura 9 - Curva característica de uma célula fotovoltaica	14
Figura 10 - Modelo ideal de uma célula fotovoltaica	16
Figura 11 - Modelo real de uma célula fotovoltaica	17
Figura 12 - Curva IV típica de um módulo fotovoltaico	19
Figura 13 - Corrente de fuga inversa que percorre o módulo fotovoltaico	20
Figura 14 - Módulo ligado à bateria sem diodo	21
Figura 15 - Módulo ligado à bateria com diodo	21
Figura 16 - Efeito de uma célula sombreada	22
Figura 17 - Efeito de três células sombreadas	23
Figura 18 - Efeito do sombreamento parcial das células	24
Figura 19 - Funcionamento do diodo By-pass	25
Figura 20 - Diodos By-pass inseridos num módulo fotovoltaico	26

Figura 21 - Eficiência dos Painéis Fotovoltaicos	27
Figura 22 - Evolução do preço dos painéis fotovoltaicos	28
Figura 23 - Capacidade da bateria em função da temperatura	29
Figura 24 - Movimento aparente do sol	33
Figura 25 - Tipos de seguidores solares	34
Figura 26 - Utilização da energia fotovoltaica no carregamento do veículo elétrico	36
Figura 27 - Vendas de veículos elétricos a nível Global	37
Figura 28 - Adesão ao veículo elétrico em Portugal por trimestre	38
Figura 29 - Progresso na adesão ao veículo elétrico	38
Figura 30 - Modo de carregamento lento	40
Figura 31 - Modo de carregamento Semi-Rápido	41
Figura 32 - Modo de carregamento Rápido	42
Figura 33 - Irradiação solar no local da instalação	46
Figura 34 - Localização geográfica do sistema fotovoltaico	49
Figura 35 - Dados para a simulação	50
Figura 36 - Simulação da produção para o Cenário 1	52
Figura 37 - Simulação da produção para o Cenário 1	55
Figura 38 - Simulação da produção para o Cenário 3	57
Figura 39 - Simulação da produção para o Cenário 4	60
Figura 40 - Simulação da produção para o Cenário 5	63
Figura 41 - Simulação da produção para o Cenário 6	65

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Irradiação solar no local da instalação	45
Tabela 2 - Paine Solar a utilizar	47
Tabela 3 - Cenários simulados	51
Tabela 4 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 1)	51
Tabela 5 - Cenário 1	53
Tabela 6 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 2)	54
Tabela 7 - Cenário 2	55
Tabela 8 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 3)	57
Tabela 9 - Cenário 3	58
Tabela 10 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 4)	59
Tabela 11 - Cenário 4	61
Tabela 12 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 5)	62
Tabela 13 - Cenário 5	64
Tabela 14 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 6)	65
Tabela 15 - Cenário 6	66
Tabela 16 - Investimento em cada cenário	67
Tabela 17 - Cash flows para cada cenário.	68
Tabela 18 - Resultados obtidos	72

Acrónimos

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CO₂ – Dióxido de Carbono

FF – Fator de forma

I – Corrente

IES – Informação empresarial simplificada

Imp – Corrente para a potência máxima

Iph – Fotocorrente

IRENA – Arena Internacional de Energia Renovável

IS – Corrente de saturação inversa

Isc – Corrente de curto circuito

m – Fator de idealidade

Pmax – Potência máxima

PPm – Ponto de potência máxima

PV – Fotovoltaico

Rp – Resistência em paralelo

Rs – Resistência em série

TIR – Taxa interna de retorno

v – Queda de tensão no díodo

V – Tensão

VA – Tensão térmica

Vmp – Tensão para a potência máxima

Voc – Tensão em circuito aberto

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Devido ao aumento da população e desenvolvimento da indústria, a necessidade da queima de combustíveis fósseis para a obtenção de energia elétrica aumentou, levando a um drástico incremento dos níveis de poluição da Terra, causando os efeitos devastadores a que temos vindo a assistir.

Com o passar dos anos, o desenvolvimento da tecnologia permite, cada vez mais, obter alternativas às energias poluidoras. A obtenção de energia elétrica através da energia solar, contribui, não só para a “poupança” ambiental, como também, em alguns casos, para a poupança de capital por parte de quem opta por estas alternativas. Visto isto, é necessário acabar com as “desculpas” para a não utilização destas tecnologias.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz solar em energia elétrica, designado de efeito fotovoltaico. Este tipo de energia pode ser considerado a única forma de obtenção de energia elétrica gerada a qualquer momento e em qualquer lugar desde que haja radiação solar.

A quantidade total estimada de energia solar incidente na superfície da Terra anualmente é cerca de 795×10^{12} MWh, o que equivale a 4725 vezes mais do que a energia consumida a nível mundial no ano de 2018. Visto isto, era necessário apenas, aproveitar 0,03% da energia solar incidente na superfície da terra para abastecer todo o planeta.

Tendo em vista o Acordo de Paris, que tem como objetivo a neutralidade carbónica, é evidente que irá ocorrer a substituição da maioria dos veículos a combustão por veículos elétricos num futuro próximo. Visto isto, a possibilidade de poder abastecer o veículo sem sair de casa, será uma grande vantagem em relação aos veículos a combustão. Visto esta possibilidade, é necessário estudar a viabilidade, tanto técnica como económica da utilização de um sistema fotovoltaico residencial no carregamento do veículo elétrico.

1.2. OBJETIVOS

Nesta dissertação é estudada a viabilidade técnico-económica de sistemas de produção de energias limpas para abastecimento dos veículos elétricos

Tem como objetivos criar e analisar cenários que representam os quilómetros realizados diariamente pelo(s) veículo(s) elétrico(s), fazendo simulações de cada cenário de modo a obter a energia produzida pelo sistema fotovoltaico e, ainda, realizar a análise económica referente aos resultados de cada cenário.

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar uma solução de energia limpa para utilizar no abastecimento de veículos elétricos, tendo em conta que se espera uma adesão em massa aos veículos elétricos num futuro próximo.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação é constituída por 5 capítulos. O primeiro capítulo, referente à introdução, estabelece o enquadramento do tema bem como os objetivos que se pretendem alcançar e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, é caracterizada a indústria fotovoltaica, apresentando vários conceitos sobre os temas abordados, como o sistema fotovoltaico, energia fotovoltaica, veículos elétricos, etc.

No terceiro capítulo são apresentadas as metodologias de cálculo necessárias ao dimensionamento de um sistema fotovoltaico para o carregamento do veículo elétrico, bem

como a metodologia de cálculo das variáveis económicas necessárias para o estudo da viabilidade económica.

No quarto capítulo são apresentados os casos de estudo, bem como os resultados da simulação de cada cenário. São calculados os índices necessários para avaliação da análise económica e é feita uma interpretação dos resultados.

No quinto capítulo são feitas todas as análises conclusivas, bem como uma perspetiva futura em relação ao tema abordado.

2. CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA FOTOVOLTAICA

A energia solar pode ser considerada como um conjunto de partículas de luz chamadas fótons. Na incidência do fluxo de fótons na célula fotovoltaica, os elétrons são liberados e ficam livres. Os elétrons recém-libertados com maior nível de energia tornam-se uma fonte de energia elétrica. Uma vez que esses elétrons passam pela carga, libertam a energia adicional adquirida durante a colisão e voltam à sua posição atômica original, prontos para o próximo ciclo de geração de eletricidade. Esse processo de liberação de elétrons livres (geração) e regresso à posição atômica original (recombinação) é um processo contínuo enquanto houver fluxo de fótons (energia solar) até à superfície da célula fotovoltaica. [1]

A tecnologia fotovoltaica é um processo de geração de energia elétrica a partir da energia da radiação solar. A energia solar é uma energia proveniente de uma estrela chamada Sol e uma vez que é uma energia renovável e gratuita, é necessário o ser humano tirar o máximo proveito deste recurso, substituindo os combustíveis poluentes [2]. A terra recebe mais energia do sol em apenas uma hora do que o mundo utiliza em um ano inteiro [1].

2.1. ENERGIA FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA

Neste subcapítulo é analisada a dependência dos combustíveis fósseis a nível global e o efeito das emissões de CO₂ no meio ambiente. Também é apresentado o Acordo de Paris e o *mix* de produção mundial de eletricidade.

2.1.1. DEPENDÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

O mundo atual depende bastante dos combustíveis fósseis e, devido à limitação desses recursos e ao impacto no meio ambiente provocado pela sua utilização, era necessário pensar em soluções que adotassem outro rumo. A energia fotovoltaica é parte dessas soluções pois

é uma energia limpa capaz de substituir os combustíveis fósseis contribuindo para a redução significativa das emissões de CO₂ [3].

A queima de combustíveis fósseis tem vindo a aumentar de ano para ano e não dá sinais de abrandamento. Na Figura 1 pode-se verificar que em quase 30 anos apenas no ano de 2009 o consumo global de combustíveis fósseis diminuiu, nos restantes anos o seu consumo apresentou um aumento progressivo.

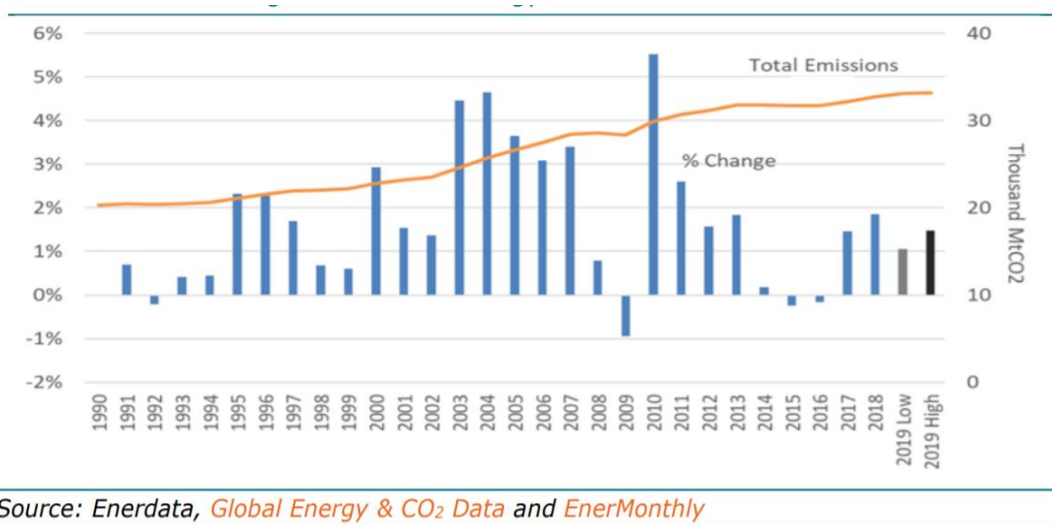


Figura 1 - Emissões de CO₂ no planeta [4]

Estes dados mostram a situação preocupante em que se encontra o nosso planeta e que mesmo com as várias iniciativas a que temos vindo a assistir na aposta nas energias renováveis, as emissões de CO₂ continuam a aumentar.

A aposta no veículo elétrico é vista como uma maneira de mudar esta situação em que o planeta se encontra. No entanto, como podemos ver na Figura 2, os veículos elétricos não vêm substituir o principal combustível poluente.



Figura 2 - Repartição do consumo dos combustíveis fósseis [4]

A Figura 2 mostra que o carvão continua a ser o combustível fóssil mais utilizado. Visto isto, o veículo elétrico não vem diminuir a maior fatia na repartição dos combustíveis fósseis mais consumidos, deixando a dúvida se a aposta nos veículos elétricos será suficiente para que as emissões de CO₂ comecem a diminuir.

2.1.2. EFEITOS DAS EMISSÕES DE CO₂ NO MEIO AMBIENTE

A concentração elevada de Dióxido de Carbono na atmosfera tem efeitos prejudiciais no meio ambiente como o aquecimento global, o degelo e, por consequência, o aumento do nível médio dos oceanos e ainda afeta a composição dos solos prejudicando a agricultura.

As energias renováveis estão a contribuir bastante para reduzir o aumento das emissões de CO₂, no entanto, é necessária uma maior adesão por parte da população.

% in electricity production (2018)



Figura 3 - Consumo de Energias Renováveis versus Consumo de Combustíveis Fósseis [4]

Tal como se pode verificar na Figura 3, a adesão às energias renováveis no ano de 2018 ronda os 25% da produção total, o que reflete a elevada concentração de CO₂ na atmosfera. Visto isto, pode-se afirmar que a descarbonização dos setores de produção de eletricidade ainda se encontra numa situação precoce.

2.1.3. ACORDO DE PARIS

Em 2016, Portugal ratificou o Acordo de Paris que tem como objetivo alcançar a neutralidade carbónica até 2050. Tendo como principais objetivos descarbonizar o setor de produção de eletricidade e descarbonizar o setor de transportes (substituindo gradualmente a frota nacional para veículos elétricos, ou outra tecnologia que não emita CO₂) [5].

Esta ação por parte de Portugal implica um grande compromisso com as políticas energéticas, contrariamente ao que se tem passado até agora.

Os incentivos por parte do estado perante a aquisição bem como perante utilização dos veículos elétricos é/foi um grande passo para a concretização deste objetivo [6].

2.1.4. MIX DE PRODUÇÃO MUNDIAL DE ELETRICIDADE

Na Figura 4 mostra o *mix* de produção das principais potências mundiais. Pode-se verificar que na União Europeia a matéria mais utilizada para produção de energia é o petróleo, sendo que as energias renováveis junto com a nuclear (*Primary electricity*) representam uma pequena parte (perto dos 20%).

Nos Estados Unidos, o a situação ainda é pior. O petróleo também é o recurso mais utilizado para a produção de energia elétrica, no entanto as energias renováveis nem se quer chegam aos 10 %

Na China, em relação à utilização das energias renováveis, é semelhante aos Estados Unidos (menos de 10 %), no entanto o recurso mais utilizado é o carvão.

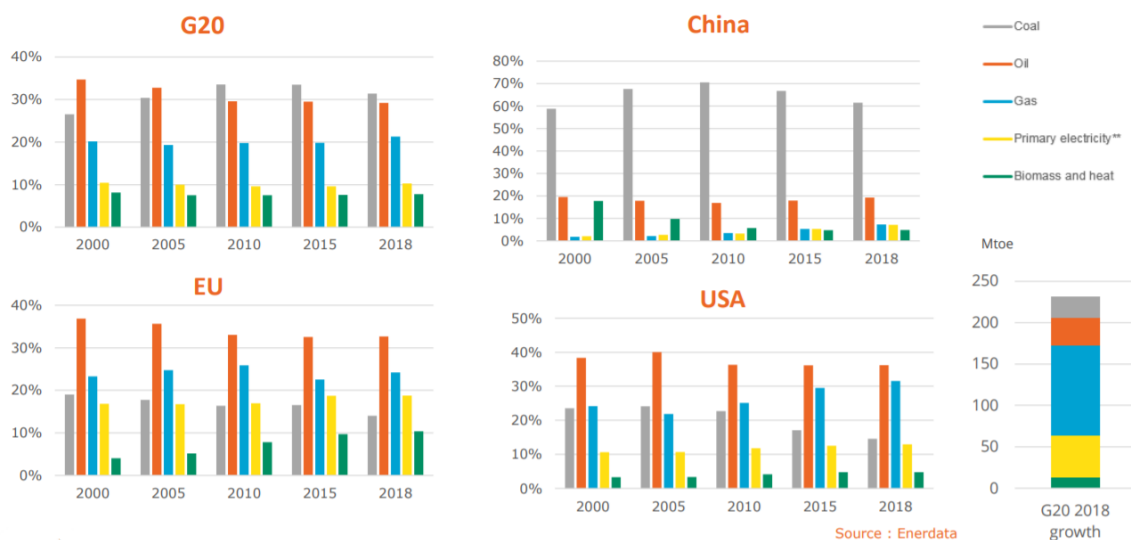


Figura 4 - Mix de produção de eletricidade [4]

2.2. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas são dispositivos que convertem diretamente energia solar em energia elétrica. O funcionamento destas células é baseado no efeito fotovoltaico (PV), no qual a luz que atinge estas células de duas camadas produz uma diferença de potencial entre estas mesmas camadas [7].

Para uma compreensão mais profunda do efeito fotovoltaico, é essencial ter um mínimo de conhecimento dos princípios de construção e operação de um dispositivo semiconductor de duas camadas conhecido popularmente como junção PN.

2.2.1. SEMICONDUTORES E JUNÇÃO PN

Há um grupo de materiais cuja resistividade se situa entre a de condutores e isoladores. Este grupo de materiais designa-se por semiconductor. Esses semicondutores são componentes básicos de todos os componentes eletrônicos incluindo as células fotovoltaicas [1].

Na Figura 5 é possível observar a estrutura cristalina de um material semiconductor.

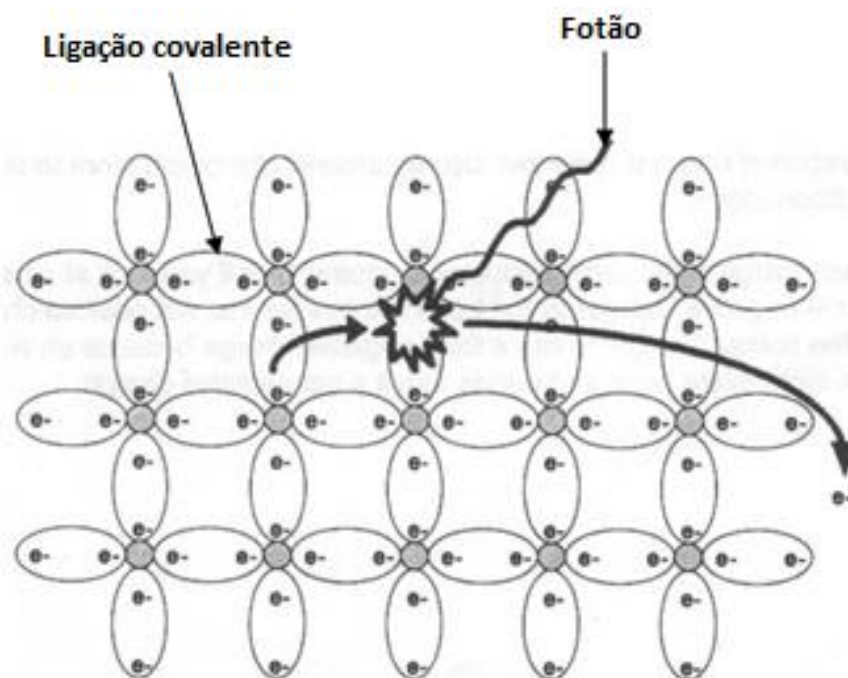


Figura 5 - Estrutura cristalina de um material semiconductor [1]

O silício cristalino consiste na ligação ordenada de cada átomo de silício com 4 átomos de silício vizinhos. Tal como se pode verificar na [Figura 5](#), um átomo de silício possui quatro elétrons externos. Cada um dos quatro elétrons externos de cada átomo é compartilhado ao redor de quatro átomos para formar um efeito de 8 elétrons externos (a condição mais estável) para cada átomo. A ligação que une cada elétron externo é designada por ligação covalente. No nível atômico, a luz atua como um fluxo de partículas discretas chamadas fótons. Os fótons carregam energia, mas são eletricamente neutros [8].

Quando o material semicondutor é iluminado pela luz, os fótons penetram no material, atravessando as partes sólidas. Os fótons com energia suficiente podem colidir com os elétrons ligados e removê-los das suas posições originais. Durante a colisão, o fóton desaparece e a sua energia é transferida para o elétron livre. O elétron recém-desalojado agora fica livre e pode vagar pelo material semicondutor como um elétron de condução. Esse elétron livre carrega uma carga negativa e energia utilizável. É neste momento de libertação do elétron que a energia da luz solar é convertida em energia elétrica. E esse efeito de converter energia luminosa em energia elétrica é chamado efeito fotovoltaico [1].

2.2.1.1. SEMICONDUTOR DO TIPO P

O boro é um tipo de material semicondutor com apenas três elétrons de valência. Se adicionarmos boro a um semicondutor puro, cada átomo de boro ligar-se-á a três átomos de silício, deixando uma ligação covalente de silício pela metade, tal como se pode verificar na [Figura 6](#). Duas regiões equivalentes, mas com carga oposta, crescem nos dois lados da junção PN, criando um campo elétrico [9].

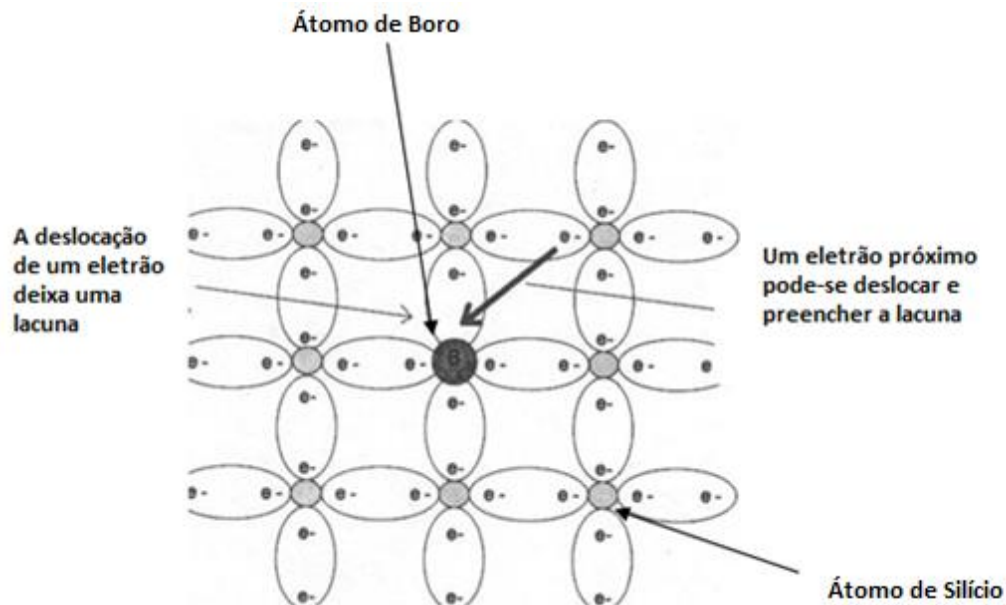


Figura 6 - Semicondutor do tipo p [1]

A Figura 6 mostra que a ligação semi-completa representa uma lacuna. Para compensar essa lacuna um elétron próximo pode vibrar e deslocar-se para essa lacuna, no entanto, deixará uma lacuna na sua posição original. Portanto, existe na estrutura semicondutora uma ausência de um elétron. São designados semicondutores do tipo P (positivo), referindo-se à falta de um elétron.

2.2.1.2. SEMICONDUTOR DO TIPO N

Se um átomo pentavalente for adicionado a um semicondutor puro, quatro elétrons do átomo pentavalente irão fazer uma ligação covalente com quatro átomos de silício. No entanto fica um elétron livre, tal como mostra a Figura 7.

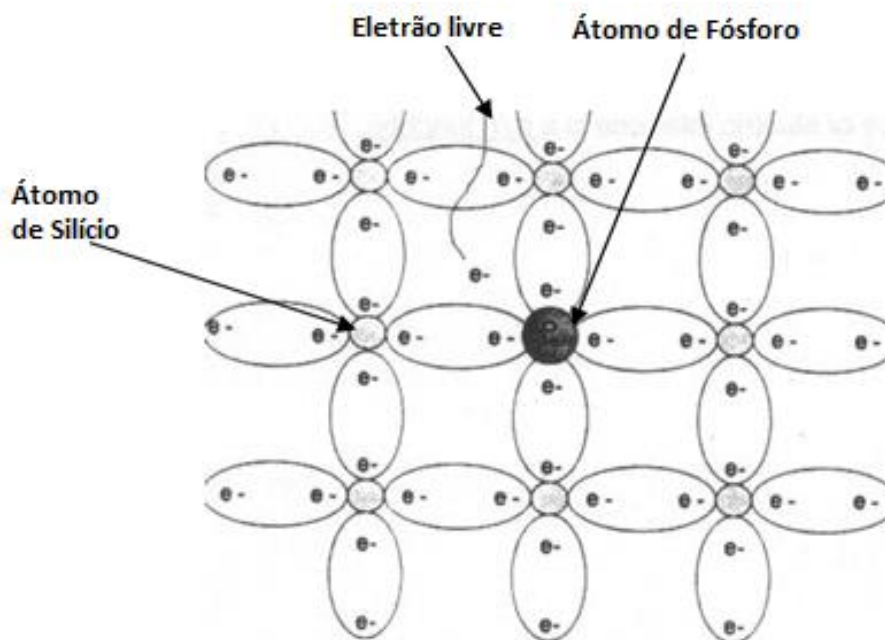


Figura 7 - Semicondutor do tipo n [1]

A Figura 7 mostra que existe um elétron livre do átomo pentavalente. Este elétron rompe-se facilmente pois não existe uma ligação para segurá-lo. Este elétron move-se pelo material carregando uma carga negativa. Como existe excesso de carga negativa este semicondutor é denominado de semicondutor do tipo N (negativo) [1].

2.2.1.3. JUNÇÃO PN

Ao unir um semicondutor do tipo P com um semicondutor do tipo N, forma-se no meio uma zona espacial designada por zona de transição. Imediatamente após a formação da zona de transição, os elétrons livres do semicondutor do tipo N atravessam a junção e caem permanentemente nas lacunas do semicondutor do tipo P.

À medida que essa transição continua, todos os átomos de boro que apresentavam lacunas ficarão permanentemente carregados negativamente [10].

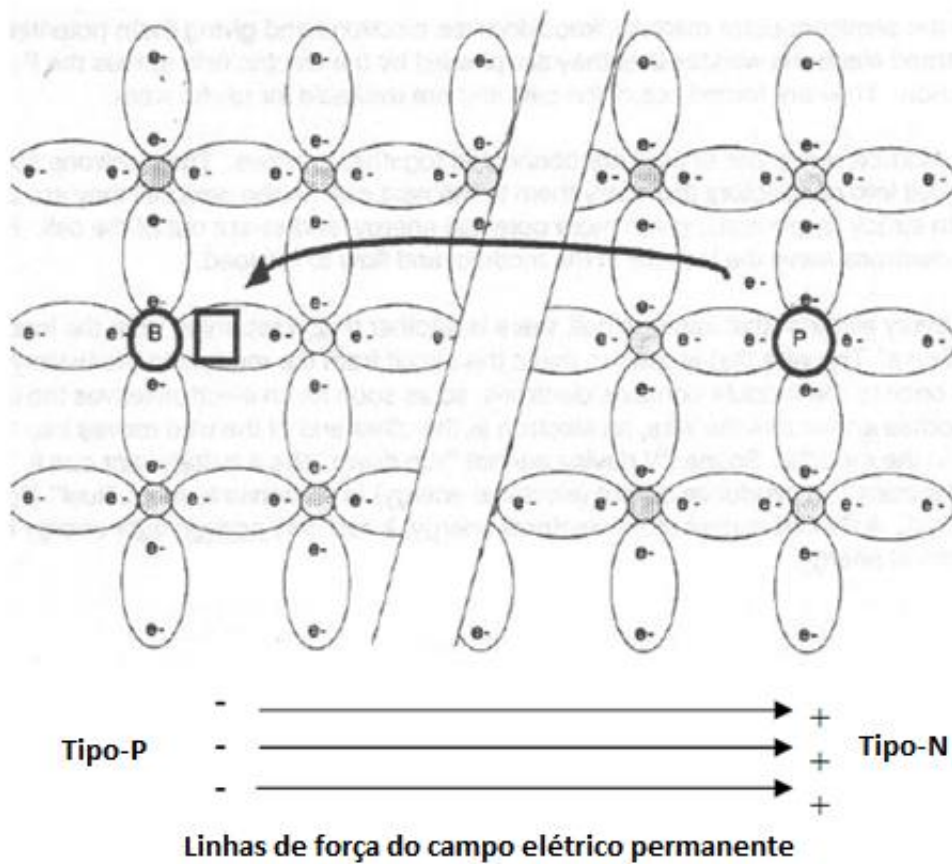


Figura 8 - Junção pn [1]

Na Figura 8 pode-se observar uma junção PN. Verifica-se a zona de transição entre as zonas P e N, bem como as linhas de força do campo elétrico permanente.

2.2.2. CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula solar fotovoltaica é apenas uma junção PN constituída por uma grande área. É o campo elétrico interno da junção PN que transfere os elétrons para fora da célula. Quando a luz penetra no material semiconductor, libertando elétrons e fornecendo energia potencial, os elétrons libertados vagueiam até serem conduzidos pelo campo elétrico através da junção PN [11].

2.2.2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A representação gráfica da relação entre a corrente e a tensão produzida por uma célula fotovoltaica é a forma padrão de representar a saída da célula (tal como se pode verificar na Figura 9). Essa representação gráfica é chamada curva característica (curva I-V). A curva I-V representa o instante de todas as combinações potenciais de corrente e tensão possíveis de uma célula sob condições ambientais especificadas, como irradiação solar, massa de ar e temperatura ambiente [1].

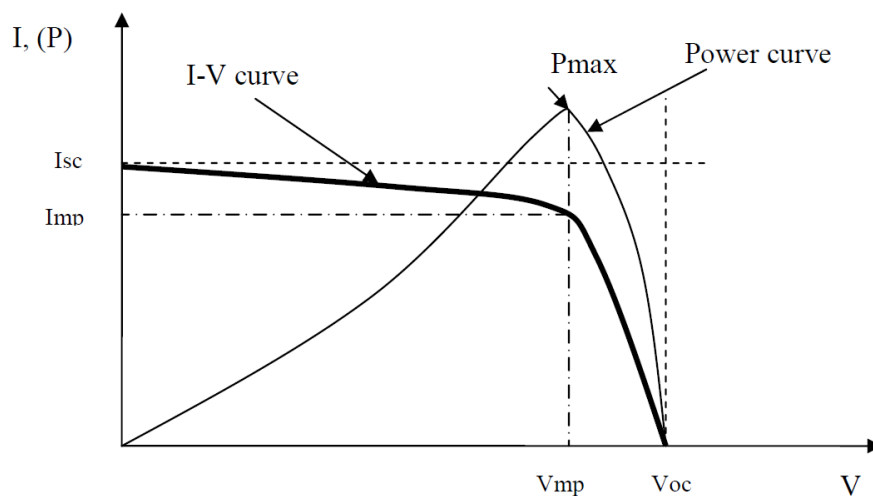


Figura 9 - Curva característica de uma célula fotovoltaica [1]

As principais terminologias utilizadas na Figura 9 são:

- **Corrente de curto circuito (I_{sc}):** é a corrente máxima produzida por uma célula sob determinadas condições de irradiação e temperatura ambiente. I_{sc} é a corrente

quando a carga se encontra em curto-circuito, ou seja, a tensão à saída é zero. A potência de saída nesse momento é exatamente zero.

- **Tensão em circuito aberto (Voc):** É a tensão máxima gerada pela célula sob determinadas condições de luz e temperatura. Voc é a tensão quando a carga se encontra em circuito aberto, ou seja, a corrente de saída é zero. A potência de saída neste momento é novamente zero.
- **Potência máxima (Pmax):** É a potência máxima que pode ser fornecida pela célula sob condições ambientais específicas. O ponto na curva I-V no qual a potência máxima é atingível é chamado de ponto de potência máxima (PPM).
- **Corrente para a potência máxima (Imp):** é a corrente que resulta na potência máxima.
- **Tensão para a potência máxima (Vmp):** é a tensão que resulta na saída máxima de energia.
- **Fator de Forma (FF):** é a razão entre a potência máxima e a potência ideal, que resultaria da operação em Isc e Voc.
- **Eficiência total da área:** é a razão entre a saída de energia elétrica (normalmente o Pmax) e a energia luminosa total incidente em toda a área da célula, incluindo interligações e linhas de padrão na superfície.

A tensão no ponto de potência máxima (PPM) de uma única célula solar é de aproximadamente 0,5 V sob a luz do sol. Essa tensão varia com os materiais semicondutores utilizados e é levemente afetada pela temperatura. O facto mais importante é que essa tensão não depende da área da célula.

Por outro lado, a corrente produzida por uma célula é obtida em função da área da mesma, intensidade da luz, material semicondutor utilizado e temperatura ambiente. Quanto maior a área da superfície, mais luz entrará na célula e mais corrente será produzida pela célula. O valor típico de Imp para uma célula monocristalina é de cerca de 30 mA/cm² [1].

2.2.2.2 MODELOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O modelo mais simples de uma célula fotovoltaica consiste na ligação de um díodo com uma fonte de corrente em paralelo, tal como se pode verificar na Figura 10.

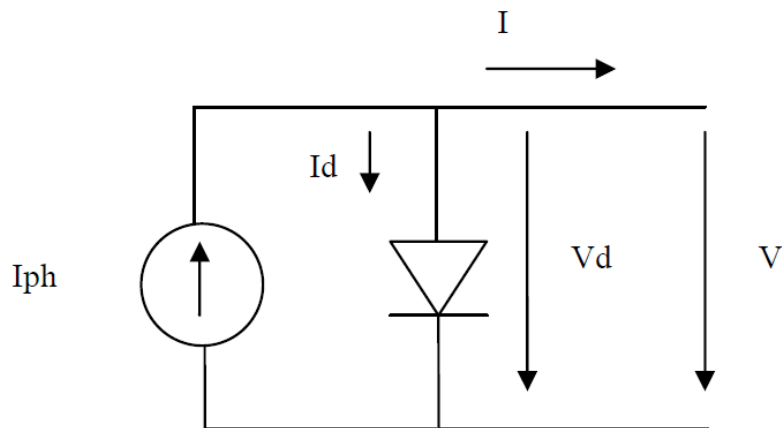


Figura 10 - Modelo ideal de uma célula fotovoltaica [1]

A magnitude da fonte atual é diretamente proporcional à radiação solar. O díodo representa a junção PN de uma célula solar. A equação de uma célula solar ideal, que representa o modelo ideal de célula solar, é representada pela seguinte expressão:

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \left[\exp \left(\frac{v}{m \times V_t} \right) \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

Em que:

- I_{ph} – Representa a fotocorrente (A);
- I_s – Representa a corrente de saturação inversa (A);
- v – Queda de tensão no díodo (V);

- V_t – Representa a tensão térmica (V) que toma o valor de 25,7 mV a 25°C;
- m – Representa o fator de idealidade ($m=1 \rightarrow$ díodo ideal; $m > 1 \rightarrow$ díodo real).

O modelo real de uma célula fotovoltaica consiste numa resistência em paralelo (R_p) com o modelo ideal (Figura 10) e uma resistência em série (R_s), para refletir as quedas de tensão e as correntes de fuga e determinar o ponto de funcionamento na curva I-V. A Figura 11 demonstra esse mesmo modelo ideal de uma célula fotovoltaica [12].

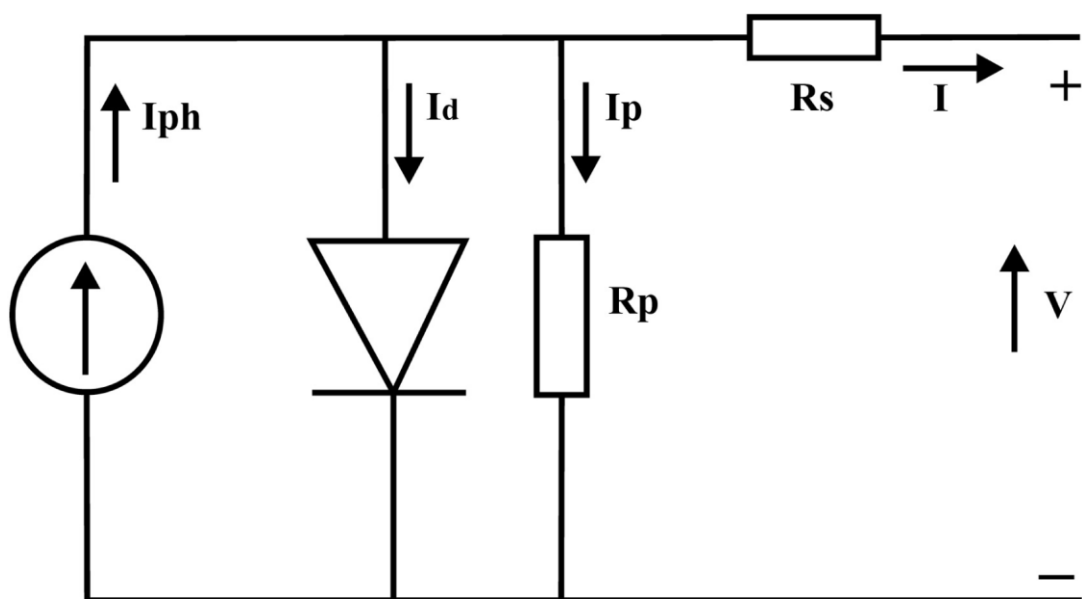


Figura 11 - Modelo real de uma célula fotovoltaica [12]

2.2.2.3 EFEITO DO MEIO AMBIENTE À SAÍDA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A tensão e corrente à saída de uma célula fotovoltaica dependem do meio ambiente onde se encontram (radiação solar e temperatura). Se estas condições mudarem, os valores de tensão e corrente à saída da célula fotovoltaica também irão mudar. Visto isto os valores de tensão e corrente à saída da célula fotovoltaica serão diferentes nas várias estações do ano [1].

À medida que a intensidade da luz muda, o número de elétrons também muda. Por isso uma variação na intensidade da luz é uma alteração na corrente de saída para todos os níveis de tensão.

A corrente de curto-circuito de uma célula fotovoltaica é diretamente proporcional à intensidade de luz. No entanto, a tensão em circuito aberto varia mais lentamente numa relação logarítmica com a intensidade de luz [1].

2.2.3. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Uma única célula fotovoltaica monocristalina produzirá cerca de 3,0 A de corrente para a potência máxima e 3,3 A de corrente de curto circuito. Supondo que a tensão para a potência máxima seja 0,5 V, a potência máxima gerada pela célula não excederá 1,5 Wp (Watt pico). Esta energia é muito baixa para qualquer aplicação prática. Para isso, as células fotovoltaicas são ligadas em série e em paralelo para aumentar a corrente e a tensão, aumentando assim a potência de saída [1].

Quando as células são ligadas em série, a tensão total é o produto da tensão de cada célula individual. Mas a corrente através das células ligadas em série será igual à corrente produzida por uma única célula.

Quando as células são ligadas em paralelo, a tensão total de saída não será alterada, mas a corrente total será igual ao produto da corrente produzida por cada célula com o número total de células ligadas em paralelo.

Pode-se concluir que a potência total se dá pela multiplicação da potência de uma célula pelo número total de células, independentemente de como elas estão ligadas.

Um módulo solar não passa de um conjunto de células ligadas em série ou em paralelo (na maior parte das vezes em série). Por outras palavras, um módulo solar é um conjunto de células ligadas em série e às vezes em paralelo para produzir um componente básico com tensão suficiente para realizar um trabalho útil.

Os parâmetros de um módulo são os mesmos de uma célula, a tensão em circuito aberto (V_{oc}), que agora depende do número de células ligadas em série, a corrente de curto-circuito (I_{sc}), que é igual à corrente de curto-circuito de uma única célula, Tensão para potência máxima (V_{mp}), Corrente para potência máxima (I_{mp}) e Potência máxima (P_{max}). Na [Figura 12](#) é apresentada uma curva I-V típica de um módulo solar.

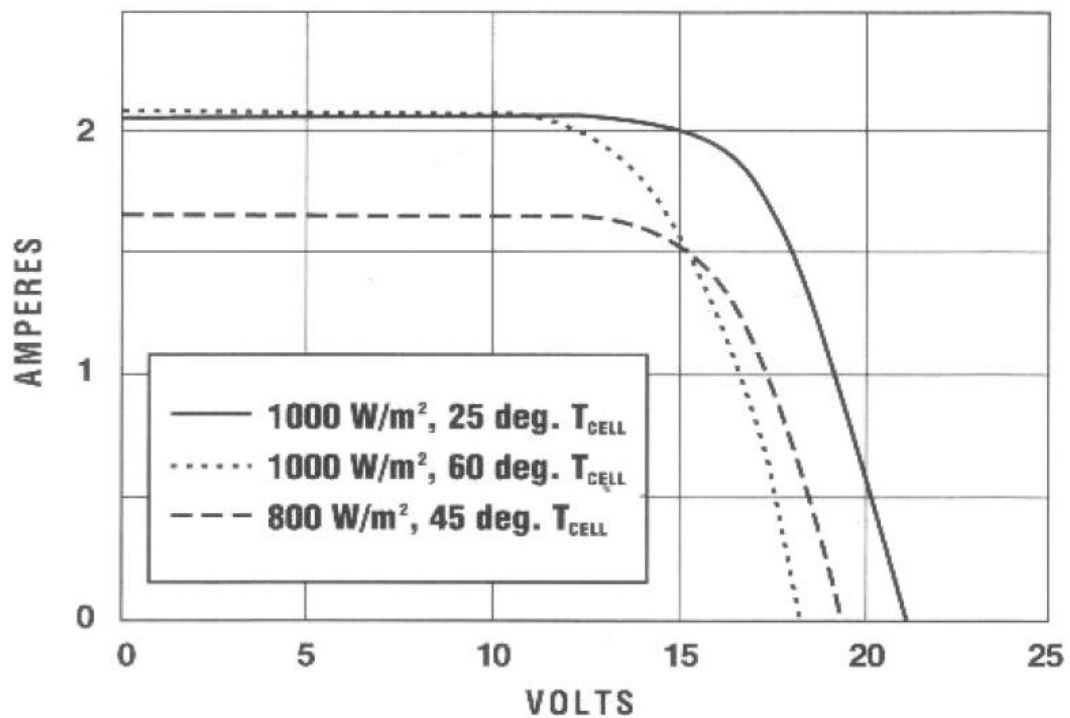


Figura 12 - Curva IV típica de um módulo fotovoltaico

2.2.4. DÍODO

O díodo é um dispositivo semicondutor que bloqueia o fluxo de corrente na direção contrária. Durante o dia em que há luz solar suficiente, o módulo fotovoltaico atua como um gerador de eletricidade. Significa que durante o dia a direção do fluxo de corrente será do módulo para a bateria de armazenamento. Mas durante as noites a curva do módulo é deslocada para baixo do nível zero de corrente, tal como se pode verificar na Figura 13 [1].

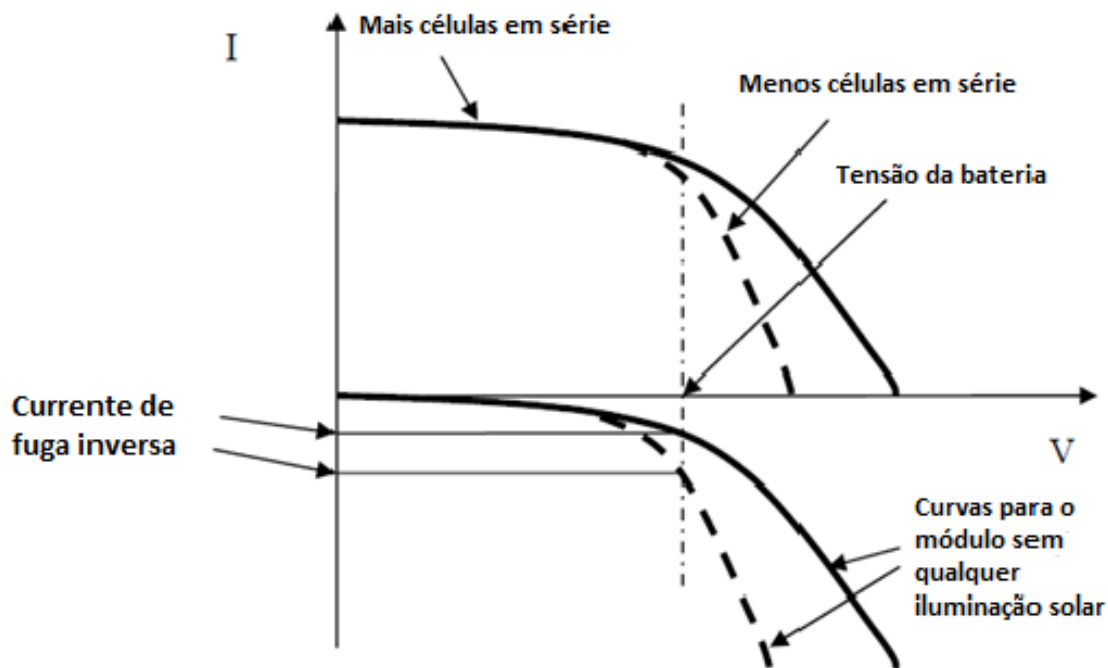


Figura 13 - Corrente de fuga inversa que percorre o módulo fotovoltaico

Neste momento, a tensão da bateria verá o módulo como uma carga e a corrente começará a fluir da bateria para o módulo, perdendo, assim, a energia adquirida durante o dia. A quantidade de corrente de fuga inversa dependerá da tensão da bateria e do formato da curva IV (Figura 13). Quanto mais fraca a curva IV (ou seja, a corrente cai rapidamente para um nível de tensão menor e este é o caso em que menos células se encontram ligadas em série), maior será a corrente de fuga inversa. Embora a corrente de fuga não danifique o módulo, se não forem tomadas precauções, a corrente armazenada na bateria começará a fluir para o módulo e será convertida em calor durante as horas sem irradiação solar. Portanto, para reduzir a corrente de fuga, é ligado um diodo no caminho entre o módulo e a bateria de forma a que durante o dia seja diretamente polarizado do ponto de vista do módulo e durante a noite permaneça inversamente polarizado do ponto de vista da bateria [1]. As figuras 14 e 15 demonstram a função do diodo.

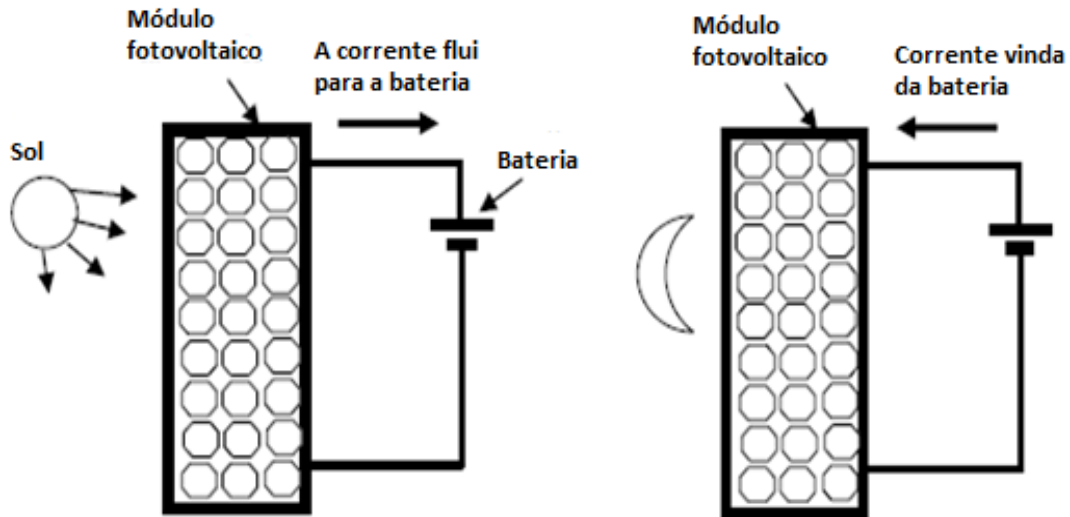


Figura 14 - Módulo ligado à bateria sem diodo

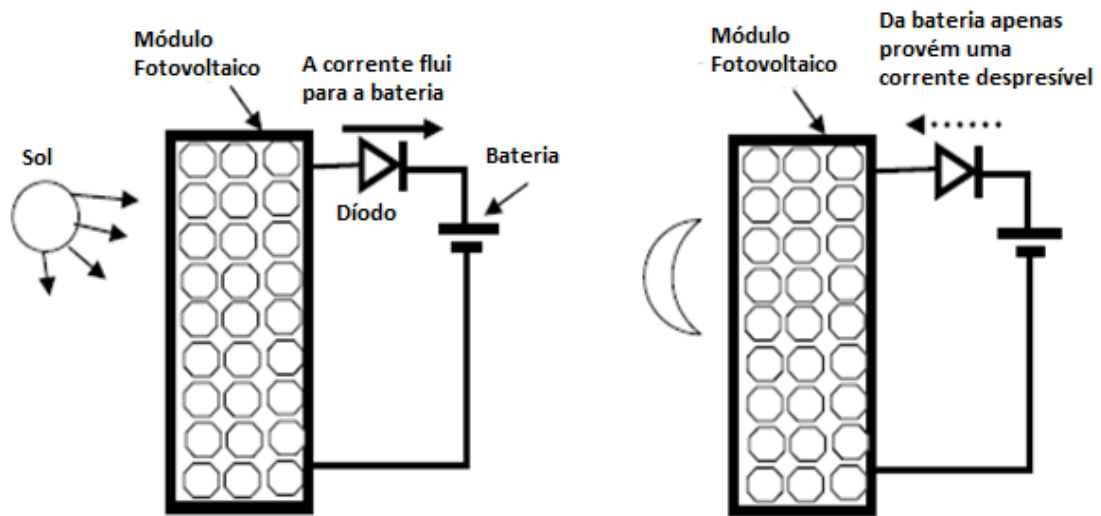


Figura 15 - Módulo ligado à bateria com diodo

Com o diodo, a corrente de fuga é limitada à corrente de saturação inversa do diodo. A desvantagem no uso do diodo é a queda de tensão direta durante o carregamento diurno da bateria. Mesmo que o módulo não incorpore um diodo, na maioria dos casos, um controlador

de carga possui um diodo. Se a carga de um módulo fotovoltaico não for uma bateria de armazenamento, o diodo poderá ser omitido [1].

2.2.5. DÍODO BY-PASS

Outro componente crítico de um módulo fotovoltaico é o diodo *by-pass*. Quando parte de um módulo fotovoltaico estiver sombreada, a célula sombreada não poderá produzir tanta corrente quanto as células não sombreadas. Como todas as células estão ligadas em série, deve fluir a mesma quantidade de corrente por todas as células. As células não sombreadas forçarão as células sombreadas a passar mais corrente do que seu novo I_{sc} . A única maneira de as células sombreadas poderem operar com uma corrente maior que a sua I_{sc} é operar numa região de tensão negativa. Os momentos de tensão negativa fornecem a potência negativa produzida pelas células sombreadas [13]. Por outras palavras, as células sombreadas dissiparão a energia em forma de calor e causarão "*hot spots*". As células sombreadas causarão o abaixamento da curva IV geral do módulo. As Figuras 16 e 17 explicam o efeito das células sombreadas para todas as curvas IV do módulo.

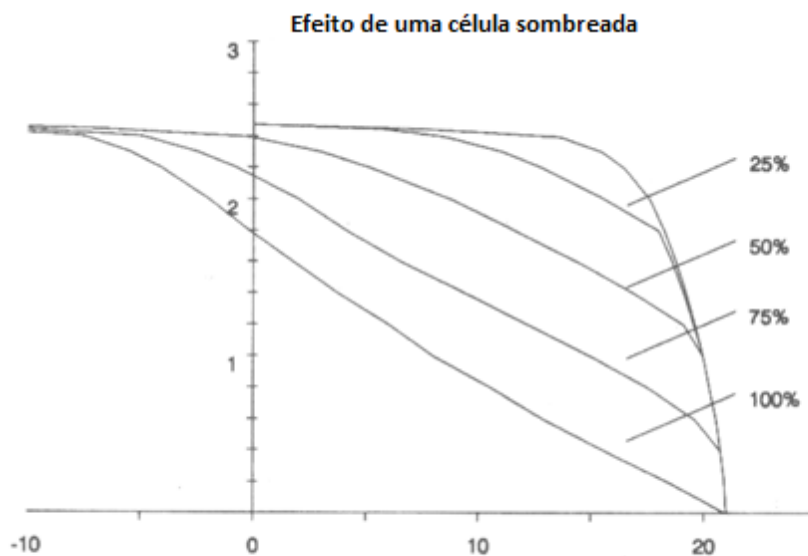


Figura 16 - Efeito de uma célula sombreada [1]

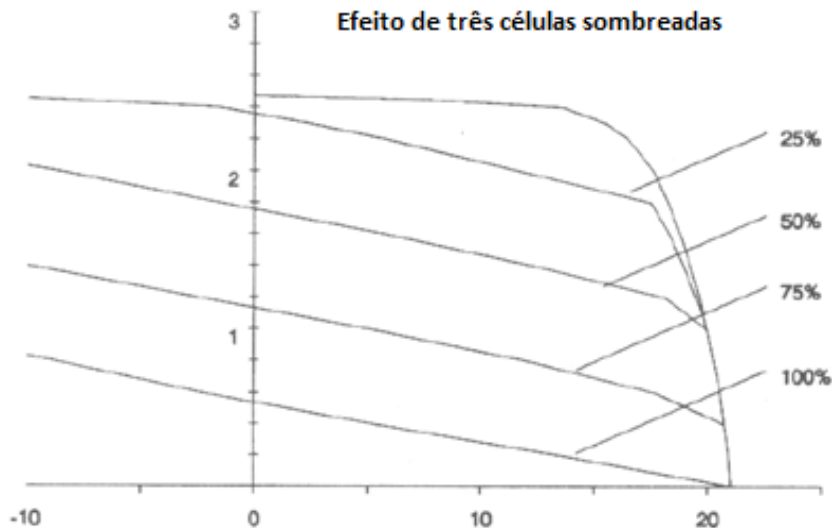


Figura 17 - Efeito de três células sombreadas [1]

Como visto no primeiro gráfico, mesmo com apenas uma célula sombreada a 50%, há uma queda significativa da corrente, no carregamento da bateria. Uma célula completamente sombreada é ainda pior. No entanto, verifica-se que o módulo não é completamente “desligado” por uma célula completamente sombreada. Para um módulo com três células sombreadas, o impacto é obviamente ainda pior. Mas vale a pena notar que o efeito de 25% de sombreamento nas três células não é tão prejudicial quanto 75% de sombreamento de uma célula, a mesma área total de sombreamento. Ter o sombreamento espalhado por muitas células não é tão grave quanto ter todo o sombreamento localizado em uma ou poucas células. É por isso que devem ser tomadas medidas especiais ao selecionar o local para a instalação do módulo. Além disso, é necessária uma limpeza frequente do módulo para evitar o sombreamento das células por fezes de pássaro.

A Figura 18 demonstra a perda de potência e o efeito do aquecimento devido ao sombreamento das células.

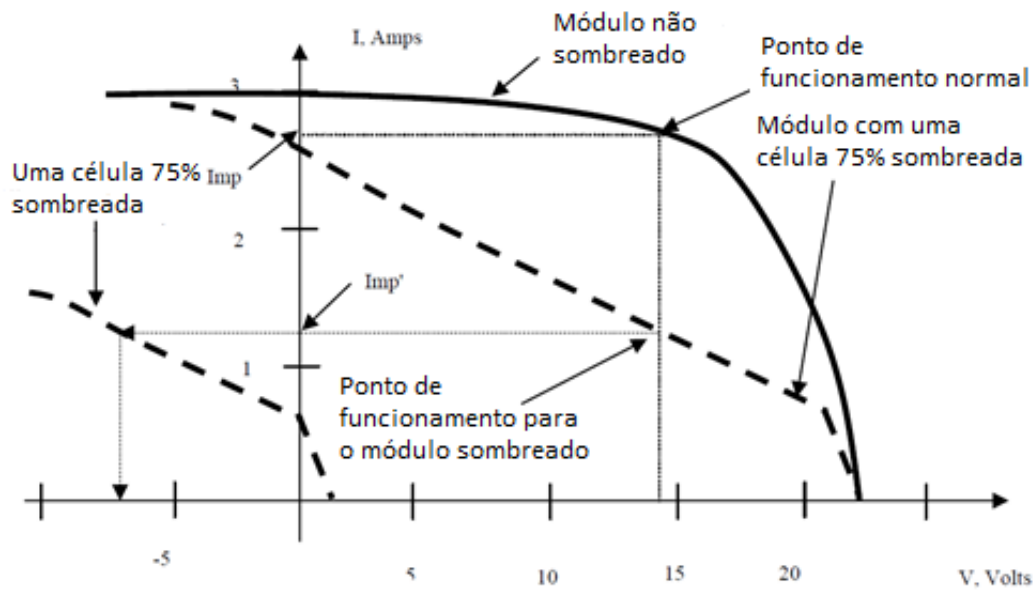


Figura 18 - Efeito do sombreamento parcial das células [1]

Na Figura 18 verifica-se que na tensão normal de carga da bateria (cerca de 14 V), a corrente de saída do módulo sombreado é de cerca de 1,2 A, contra a corrente operacional nominal de 2,6 A do módulo não sombreado. Sem sombreamento, o módulo produziria $2,6 \times 14 = 36,4$ W. Com uma célula a 75% sombreada, a potência de saída é de apenas $1,2 \times 14 = 16,8$ W. A célula sombreada (assim como outras células do módulo) deve funcionar para uma corrente de 1,2 A de corrente, mas para fazer isso, deve operar na sua faixa de tensão inversa a uma queda de tensão de cerca de -7 V [1].

Isso significa que a célula está a dissipar energia na forma de calor na taxa de $-7\text{V} \times 1,2\text{A} = -8,4$ W. Se uma única célula padrão produzia 2 W de potência em condições normais, a célula sombreada está a absorver e a desperdiçar mais de 3 vezes a sua potência de saída nominal. A redução na corrente de saída do módulo com uma célula sombreada resultará em menos energia fornecida à bateria e talvez, eventualmente, resultar numa falha do sistema devido ao carregamento inadequado da bateria. O efeito do sombreamento será mais severo, se a tensão operacional for menor (a célula será forçada a operar para uma elevada tensão negativa).

O melhor seria retirar as células sombreadas temporariamente para limitar a quantidade de aquecimento local e evitar danos nas células. Isso pode ser feito instalando díodos em

paralelo com o grupo de células no módulo. Esses díodos são chamados de díodos by-pass. Como se pode verificar na Figura 18, para as correntes maiores que o novo I_{mp}' da célula sombreada, a célula está em polaridade inversa (isto é, está a consumir energia). Para uma corrente menor ou igual a I_{mp}' , a célula sombreada, juntamente com outras células não sombreadas, estão na polaridade normal (estão a gerar energia). Agora, se um díodo estiver ligado em paralelo com a célula, pode ser observado um efeito de desviar a diferença de corrente (diferença entre I_{mp} normal e a célula sombreada I_{mp}') pelo díodo para outras células não sombreadas tal como se pode verificar na Figura 19. O I_{mp}' é transferido pela própria célula sombreada para outras células [1].

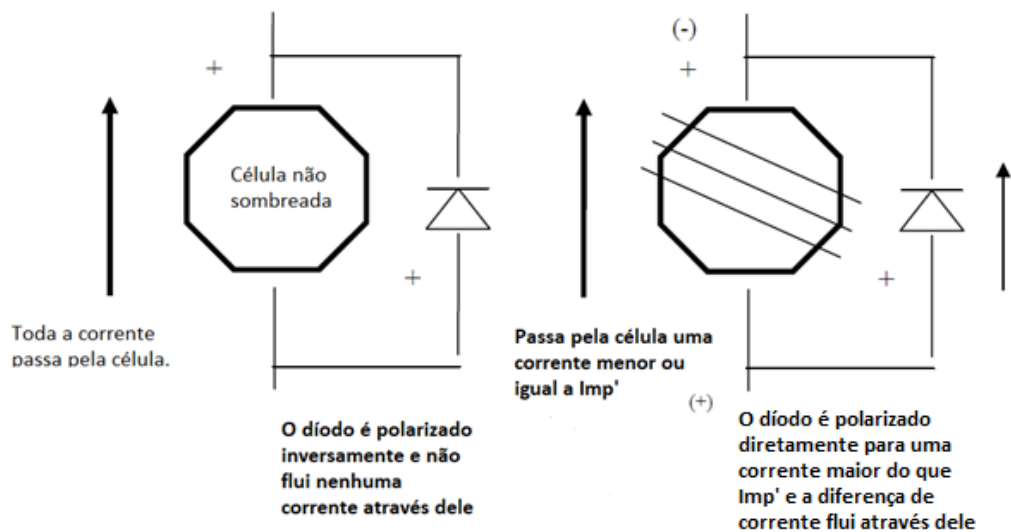


Figura 19 - Funcionamento do díodo By-pass [1]

O díodo *By-pass* torna-se polarizado diretamente para uma corrente maior do que I_{mp}' (à medida que a polaridade da célula inverte para uma corrente acima do I_{mp}'). Nesse caso, o díodo passará a diferença de corrente para outras células, reduzindo assim o efeito de aquecimento para a célula sombreada e aumentando a potência do módulo mesmo com a célula sombreada em série com outras células. Em condições normais (célula não sombreada), a célula está na sua polaridade normal e, portanto, o díodo é polarizado inversamente. Toda a corrente da célula passa pela própria célula. O preço pago pela adição de um díodo de derivação é a queda de tensão direta de cerca de 0,7 V nele [1].

Não é prático adicionar um diodo a cada célula. Em vez disso, as células no módulo são divididas em três cadeias de células iguais e os diodos *By-pass* são inseridos entre cada cadeia. A Figura 20 mostra um exemplo de diodos *By-pass* inseridos num módulo fotovoltaico.

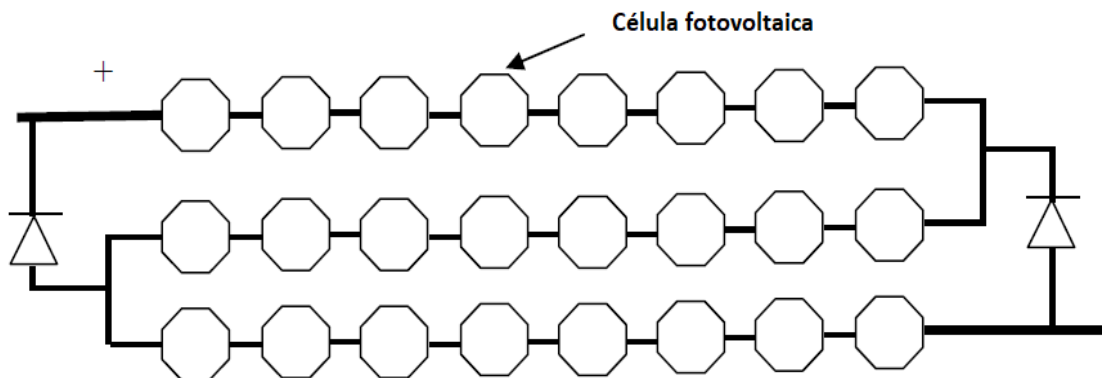


Figura 20 - Diodos *By-pass* inseridos num módulo fotovoltaico [1]

Na Figura 20, cada conjunto de células é considerado uma célula única, tornando o equivalente a três células ligadas em série. Os diodos *By-pass* operam da maneira explicada anteriormente. A maioria dos módulos grandes incorpora *By-pass* substituível em campo na caixa de junção. Os módulos menores sem caixa de junção podem não conter os diodos *By-pass*.

2.2.6. DÍODO DE ISOLAMENTO

Se uma linha de células ficar totalmente sombreada, ou se houver um curto-circuito num dos módulos, o diodo ligado em série com cada linha de células impede que as outras linhas de células percam a corrente de trás para baixo da linha sombreada ou danificada. Com o uso desses diodos, a linha sombreada ou danificada é "isolada" das outras e mais corrente é fornecida para a carga. Esses diodos desempenham a mesma função que os diodos convencionais, mas como isolam a linha danificada ou sombreada, também são denominados

de díodos de isolamento. Verifica-se que, no caso de uma ligação em série ou em paralelo de módulos, apenas é usado um díodo na extremidade da saída como díodo de bloqueio [1].

2.3. COMERCIALIZAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para a comercialização de sistemas fotovoltaicos tem-se de considerar a eficiência dos painéis, o preço dos painéis, as características de desempenho da bateria de armazenamento, o rendimento do inversor, o controlador de carga e o sistema de seguidor solar.

2.3.1. EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Desde a invenção do primeiro painel fotovoltaico até aos tempos atuais, assistiu-se a uma evolução enorme na eficiência dos painéis solares. Em 1955 foram introduzidos no mercado painéis fotovoltaicos com apenas 2% de eficiência. Dois anos depois, houve um aumento para 8%, tendo a mesma empresa (*Hoffman Eletronics*), conseguido introduzir no mercado painéis com 9% e 10%, respetivamente nos seguintes 2 anos. Em 1960 houve um aumento para os 14%, tendo chegado aos 20% em 1992. Atualmente há painéis com 22% de eficiência e prevê-se que este ano se chegue aos 25% [14].

A Figura 21 mostra a evolução da eficiência dos painéis. Tal como se pode verificar. O aumento da eficiência é cada vez menor, no entanto, todos os progressos são bem-vindos, tornando, cada vez mais, a aposta dos painéis viável economicamente.

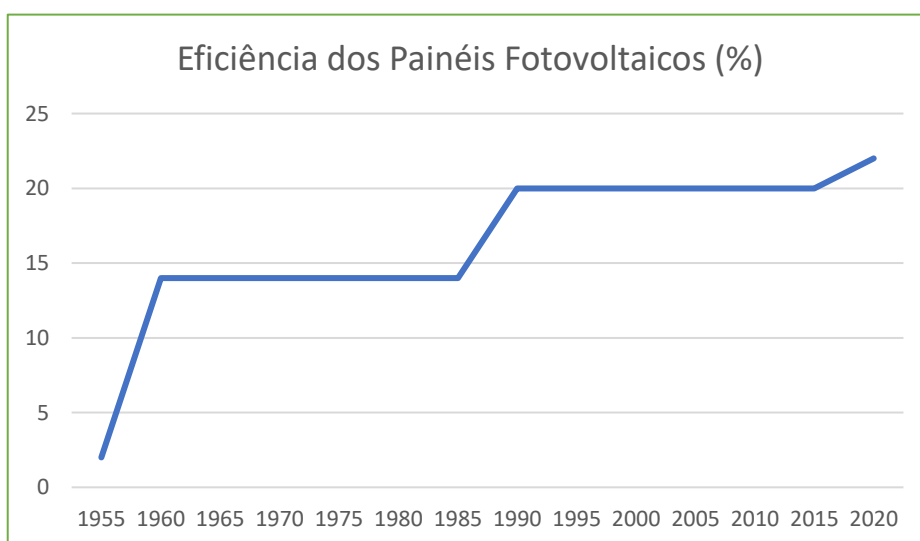


Figura 21 - Eficiência dos Painéis Fotovoltaicos

2.3.2. PREÇO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Ao longo do tempo, para além de se ter verificado um grande progresso ao nível da eficiência dos painéis fotovoltaicos, também se verificou uma elevada redução no preço por kW dos painéis.

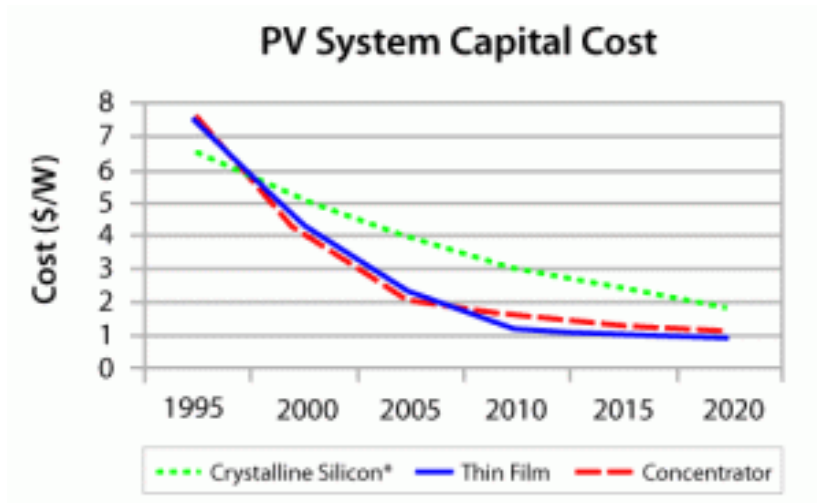


Figura 22 - Evolução do preço dos painéis fotovoltaicos [14]

Ao analisar a Figura 22 verifica-se que o preço dos painéis fotovoltaicos sofreu uma redução de mais de 7 vezes desde o ano em que começaram a ser comercializados os primeiros painéis (1995). Entre 2010 e 2020 os preços começaram a estabilizar ou, pelo menos, com uma menor redução em relação aos anos anteriores.

Estes dados mostram que os painéis fotovoltaicos se tornam cada vez mais viáveis uma vez que os painéis encontram-se cada vez mais baratos e com um maior rendimento [14].

2.3.3. TERMINOLOGIAS DA BATERIA E CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO

Em relação às unidades utilizadas para as baterias, utiliza-se bastante o Ampere-Hora. Um Ampere-hora é igual à transferência de 1 A durante um período de 1 hora e é igual a 3.600 Coulombs de carga. Por exemplo, diz-se que uma bateria que fornece 7 A durante um período de 10 horas produziu 70 A por hora.

Em relação à capacidade de uma bateria, esta refere-se à capacidade de uma bateria armazenar ou fornecer energia elétrica. É normalmente expresso em Ampere-hora. Normalmente, a capacidade de uma bateria em Ah é fornecida para uma taxa de descarga específica. Quanto mais lenta a taxa de descarga, maior será a capacidade da bateria.

A capacidade de uma bateria depende dos seguintes fatores:

- Fatores de design, como a quantidade de partes ativas, as dimensões físicas das placas; a gravidade específica do eletrólito, etc.
- Fatores operacionais, como a taxa de descarga, poder de corte, temperatura, idade, histórico de ciclo da bateria, etc.

Uma temperatura de funcionamento mais baixa geralmente reduz a capacidade nominal da bateria [15].

Na Figura 23 pode-se verificar o efeito da temperatura de funcionamento na capacidade de uma bateria de lítio.

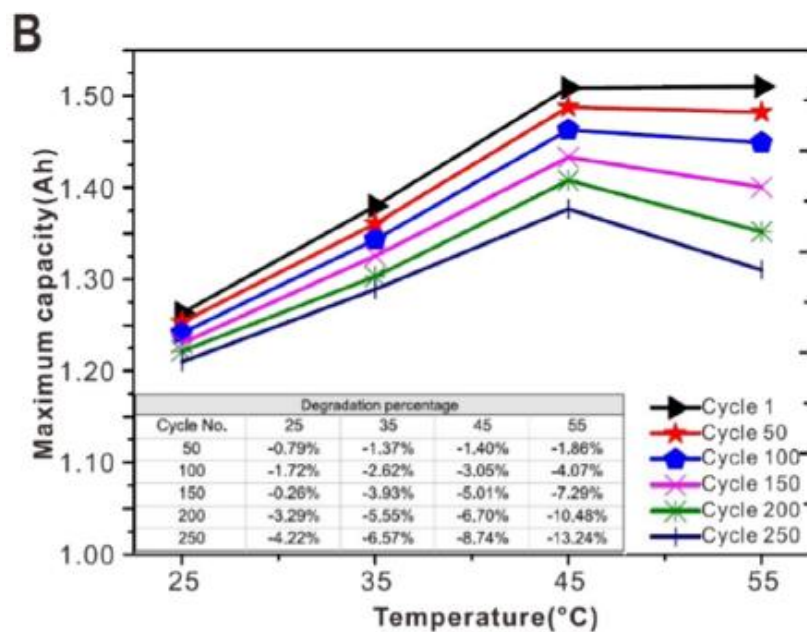


Figura 23 - Capacidade da bateria em função da temperatura [15]

- **Tensão em circuito aberto** – Tensão em circuito aberto é a tensão da bateria em repouso ou em estado estacionário e que não está no ciclo de carga ou descarga.

- **Tensão de corte** – A tensão de corte é a tensão mais baixa de funcionamento de uma bateria, permitida pelo fabricante. Os fabricantes geralmente classificam a capacidade da bateria para uma tensão de corte a uma taxa de descarga definida.
- **Tensão aos terminais** – Tensão entre os terminais de uma bateria durante o seu ciclo de carga e descarga.
- **Ciclo** - Ciclo refere-se a uma grande profundidade de descarga seguida de um carregamento completo. A vida de uma bateria é medida através do número de ciclos.
- **Taxa de carga/descarga** - A taxa de carga ou descarga de uma bateria é expressa como uma razão entre a capacidade nominal da bateria e o período de carga / descarga em horas.
- **Estado de carga** - O estado de carga refere-se à quantidade de energia numa bateria expressa como uma percentagem da energia total armazenada numa bateria totalmente carregada. Diz-se que uma bateria que foi descarregada 60% está no estado de carga de 40%.
- **Profundidade de descarga** – A profundidade de descarga é a percentagem da capacidade que foi retirada de uma bateria em comparação com a sua capacidade total totalmente carregada. Por definição, a profundidade da descarga e o estado de carga de uma bateria totalizam 100%.
- **Profundidade de descarga admissível** – A percentagem máxima da capacidade nominal total de uma bateria é conhecida como profundidade de descarga permitida. A profundidade de descarga permitida depende da tensão de corte e da taxa de descarga. Em sistemas fotovoltaicos independentes, o ponto de ajuste de desconexão da carga de baixa tensão do controlador de carga da bateria determina o limite permitido da profundidade de descarga a uma determinada taxa de descarga. Dependendo do tipo de bateria usada num sistema fotovoltaico, a taxa de descarga permitida pode ser de até 80% para baterias de ciclo profundo. A profundidade de descarga permitida também depende da autonomia do banco de baterias, ou seja, da capacidade necessária para operar as cargas do sistema por um determinado número de dias sem a entrada de energia dos módulos fotovoltaicos. Quanto maior a taxa de descarga menor é a capacidade que pode ser retirada de uma bateria para uma profundidade de descarga permitida específica ou tensão de corte. Taxas de descarga mais altas também resultam na tensão aos terminais mais baixa do que com taxas de descarga mais baixas.

- **Autonomia** – Num sistema fotovoltaico independente, autonomia refere-se ao tempo em que uma bateria totalmente carregada pode fornecer a energia necessária às cargas do sistema quando não há energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos.
- **Taxa de auto-descarga** – mesmo em circuito aberto, as baterias sofrem redução no seu estado de carga devido a mecanismos internos e perdas internas. Estas taxas são diferentes para cada tipo de bateria. Normalmente a temperatura alta contribui para taxas de auto-descarga mais altas.
- **Efeitos da temperatura** – Temperaturas de funcionamento mais altas aceleram a corrosão das grades das placas da bateria, causando maior perda de gases e eletrólitos na bateria. Temperaturas de funcionamento mais baixas geralmente aumentam a vida útil da bateria.
- **Corrosão** – A imersão de dois metais diferentes num eletrólito faz com que o material sofra oxidação (ou perca elétrons) e, ao mesmo tempo, faz com que o outro material ganhe elétrons. A corrosão das grades que suportam o material ativo é um processo contínuo e pode ditar a vida útil da bateria. Os terminais da bateria também sofrem corrosão devido à ação de gases eletrolíticos.

2.3.4. CONTROLADOR DE CARGA

Os controladores de carga são os dispositivos eletrônicos usados para proteger as baterias de armazenamento contra sobrecarga ou descargas excessivas. A função básica do controlador de carga é desconectar o módulo da bateria quando esta estiver carregada a um nível predefinido e desconectar a carga quando esta estiver descarregada até um nível predefinido. O controlador de carga avançado também deteta a temperatura da bateria e ajusta a corrente de carregamento de acordo com isso [16].

À medida que os custos das células fotovoltaicas continuam a baixar, a bateria torna-se uma parte cada vez maior do custo de um sistema fotovoltaico. A vida útil da bateria agora tem um maior impacto na viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico. O controlador de carga em pequenos sistemas fotovoltaicos é o principal fator de fiabilidade do sistema e da vida útil da bateria. Um bom controlador afetará o desempenho do sistema mais do que qualquer outro componente, e um controlador aprimorado pode potencialmente reduzir os

custos do sistema de 20 em 20 anos a 40%, porque a bateria precisa de ser substituída com menos frequência [16].

2.3.5. INVERSOR

O inversor é um dispositivo eletrônico que converte a tensão contínua em tensão alternada. Nos sistemas solares fotovoltaicos, os inversores são usados para alimentar os equipamentos que operam em CA, por isso é necessária a conversão de CC para CA pois o sistema fotovoltaico solar gera e armazena energia somente na forma de CC. Os inversores também são denominados de conversores CC-CA [1].

2.3.6. CONDIÇÕES PARA UM MELHOR APROVEITAMENTO SOLAR

Num sistema fotovoltaico é muito importante colocar os módulos dos painéis numa tal posição que maximize o seu tempo de exposição solar bem como a intensidade solar.

O ângulo de inclinação do sol é a posição angular do sol no seu ponto mais alto do céu em relação ao plano do equador, depende da posição momentânea da terra na sua rotação em torno do sol. Mudanças no ângulo de inclinação são causadas por um facto simples: a inclinação axial da Terra de $23,34^\circ$ permanece constante e na mesma direção durante toda a órbita da Terra ao redor do sol. No hemisfério norte atinge o seu pico mais positivo, $23,45^\circ$, no dia 21 de junho e atinge o seu pico mais negativo a sul, $23,45^\circ$, no dia 21 de dezembro.

Na [Figura 24](#) é apresentado o movimento aparente do sol para um observador com latitude 28° a norte.

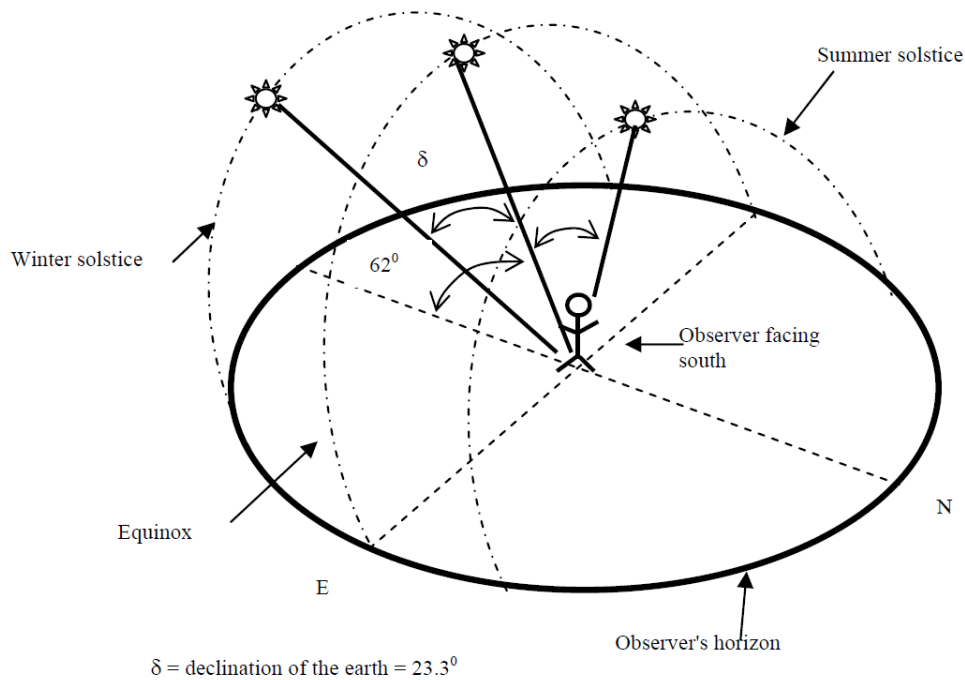


Figura 24 - Movimento aparente do sol [1]

Podemos concluir que o sol apresenta movimentos diferentes no verão e no inverno. Visto isto o tempo de exposição solar, bem como a intensidade solar são diferentes nas várias estações do ano.

Uma área orientada para sul com um ângulo de inclinação igual à latitude obteria uma ótima quantidade média de radiação direta durante o ano inteiro. No entanto, se o objetivo do projetista for maximizar a energia solar recebida durante o inverno, a superfície deve ser aproximadamente igual ao ângulo de latitude mais 11° e se o objetivo do projetista for maximizar a energia solar recebida durante o verão, a superfície deve ser igual ao ângulo de latitude menos 11° [1].

Através da equação 5, presente na metodologia de cálculo, pode-se determinar o ângulo de inclinação ideal para qualquer dia do ano, podendo ajustar a inclinação do painel para maximizar a energia solar recebida.

2.3.7. SISTEMAS DE SEGUIDOR SOLAR

Embora as estruturas fixas de montagem do módulo orientadas para norte e inclinadas com um ângulo fixo sejam simples e sem preocupações, os módulos não obtêm boa exposição solar no início da manhã e no fim do dia. Ao montar os módulos numa estrutura de rastreamento do sol, é possível obter ganhos na produção diária total de energia de no mínimo 30%, porque os módulos estão sempre orientados na direção do sol, durante todas as horas possíveis. Os seguidores solares podem ser movidos a motor (alimentado pela bateria) ou alimentados por energia solar. Este tipo de seguidores solares tem um funcionamento baseado num líquido do tipo *Freon* presente no interior dos tubos onde se encontram acoplados os painéis solares [17].

À medida que o sol se move, um tubo fica mais exposto do que o outro. O *Freon* expande-se e empurra um pistão para o outro lado que faz com que a estrutura se mova e siga o sol.

Os seguidores solares acionados por motor também usam dois sensores de luz em ambos os lados do módulo. Dependendo da diferença nas saídas dos dois sensores, o motor aciona o movimento da estrutura em qualquer direção para seguir o sol.

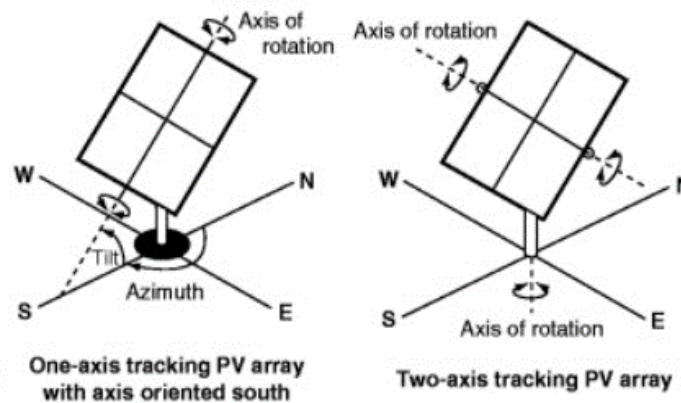


Figura 25 - Tipos de seguidores solares

Tal como se pode verificar na Figura 25, os seguidores solares podem seguir o sol ao longo de apenas um eixo (este-oeste) ou podem ter eixo duplo (este-oeste e ângulo de inclinação) para acompanharem o sol quer na trajetória de verão quer na trajetória de inverno, no entanto,

também deve ser feito o ajuste manual do ângulo de inclinação, para a mudança de trajetória do sol. A [Figura 25](#) apresenta um seguidor solar de eixo único do lado esquerdo e, no lado direito encontra-se um seguidor solar de eixo duplo.

Fazer o rastreamento do sol manualmente seria muito pouco prático, uma vez que era necessário mudar a orientação dos painéis manualmente. Visto isto, utilizam-se tipos de rastreamento automático. Os ajustes do ângulo de inclinação para compensar as mudanças da trajetória do sol podem ser realizados manualmente a cada três meses.

Os sistemas fotovoltaicos de grande porte têm os módulos montados em seguidores solares de eixo duplo, para maximizar a produção de energia e minimizar os custos médios. Mas, para módulos de pequena escala, o uso de seguidores solares é uma questão econômica, uma vez que nem sempre é viável economicamente a utilização de seguidores solares.

2.4. UTILIZAÇÃO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

A utilização de energia fotovoltaica no carregamento do veículo elétrico é um método ainda pouco utilizado em Portugal, no entanto, noutros países é um pouco mais aderido, mais concretamente em todos os mercados em que a Tesla já opera com soluções de energia [18].

Este método consiste na conversão direta de energia solar em energia elétrica por parte dos painéis fotovoltaicos, que é armazenada através de um sistema de armazenamento de energia, sendo utilizada para o carregamento do veículo elétrico.

A [Figura 26](#) mostra um esquema de um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia ligado a um veículo elétrico, sendo esta uma maneira de poder carregar o veículo elétrico através de energia limpa.

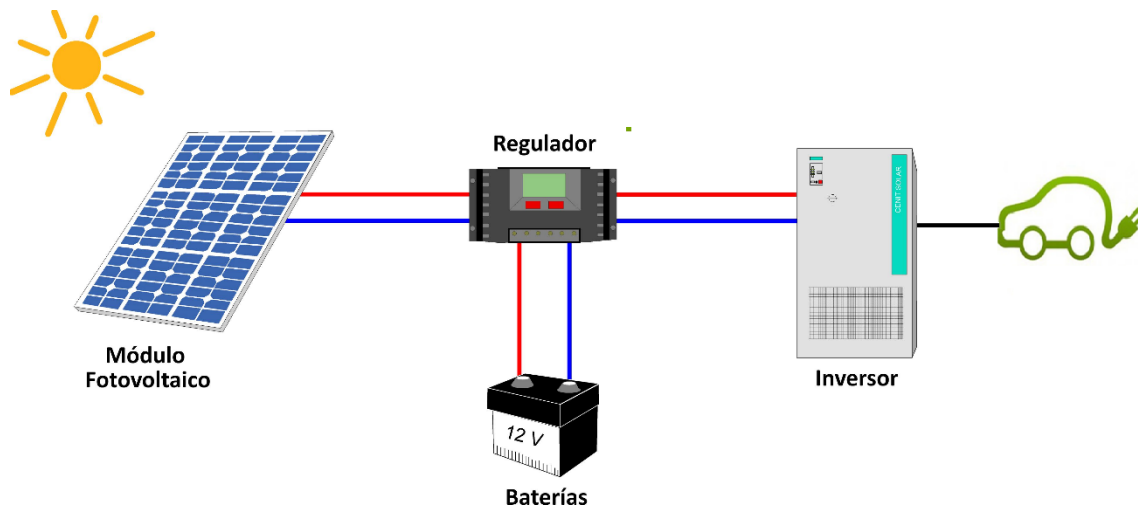


Figura 26 - Utilização da energia fotovoltaica no carregamento do veículo elétrico [19]

Tendo em conta o crescimento exponencial da adesão dos veículos elétricos e, a diminuição dos preços dos sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, este método será uma mais valia para a poupança de capital no carregamento do veículo elétrico, bem como uma maneira de carregar o veículo elétrico através de energia limpa.

2.5. CARREGAMENTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Neste capítulo é analisada a adesão ao veículo elétrico, tanto a nível global como em Portugal. Também são apresentados os requisitos necessários para a utilização de um posto de carregamento em local privado bem como os modos de carregamento de um veículo elétrico

2.5.1. ADESÃO AO VEÍCULO ELÉTRICO

A adesão ao veículo elétrico tem sido cada vez maior por parte da população ao longo dos anos, tal como se tem vindo a esperar. A Figura 27 mostra o quanto as vendas de veículos elétricos têm vindo a aumentar.

A possibilidade de ter em casa o combustível necessário para alimentar o veículo sem qualquer esforço ou transtorno atrai cada vez mais pessoas à sua adesão. Para além disso, esta solução é vista como “amiga” do ambiente o que atrai grande parte dos ambientalistas.

A Figura 27 mostra a evolução das vendas de veículos elétricos ao longo dos anos em alguns dos principais países do mundo.

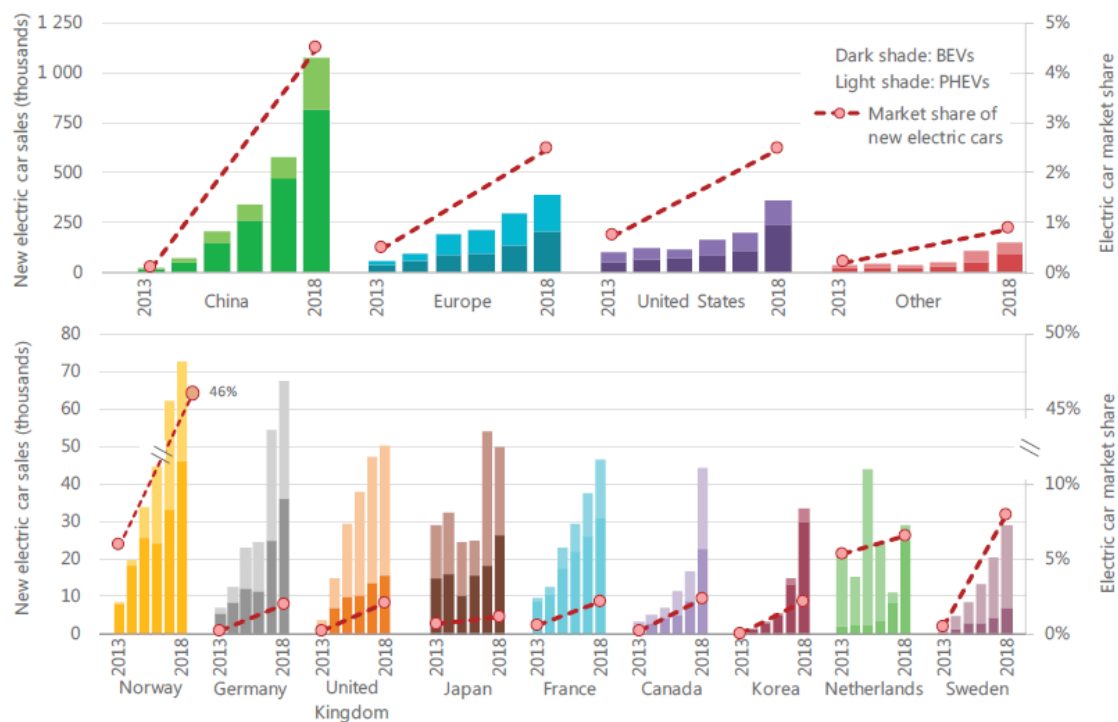


Figura 27 - Vendas de veículos elétricos a nível Global [20]

Tal como se pode verificar na Figura 27, em alguns países o aumento das vendas é cada vez maior de ano para ano. Na china as vendas atingiram o milhão no ano de 2018. Estes valores permitem perceber que o carro elétrico não está só de passagem, mas sim para se afirmar como o veículo mais utilizado a nível mundial.

Em Portugal, a adesão ao veículo elétrico não foge à regra. Tem-se vindo a assistir a um aumento progressivo das vendas, tal como acontece nos principais países a nível mundial como China e Alemanha, entre outros.

A Figura 28 comprova mesmo isso. A figura mostra as vendas de veículos elétricos divididas em trimestres desde o ano de 2016. Verifica-se que de ano para ano as vendas de veículos elétricos aumentam. Também se pode concluir que é no último trimestre do ano que se verificam mais vendas de veículos elétricos.

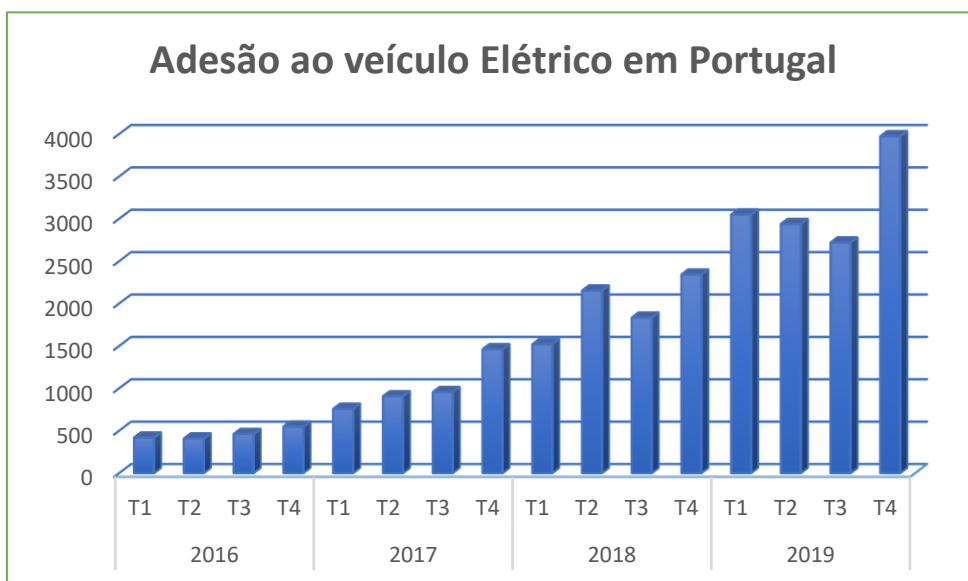


Figura 28 - Adesão ao veículo elétrico em Portugal por trimestre [21]

Para se obter uma ideia mais clara deste aumento progressivo, a Figura 29 mostra o histórico de vendas totais de veículos elétricos por ano, em Portugal, desde 2016.

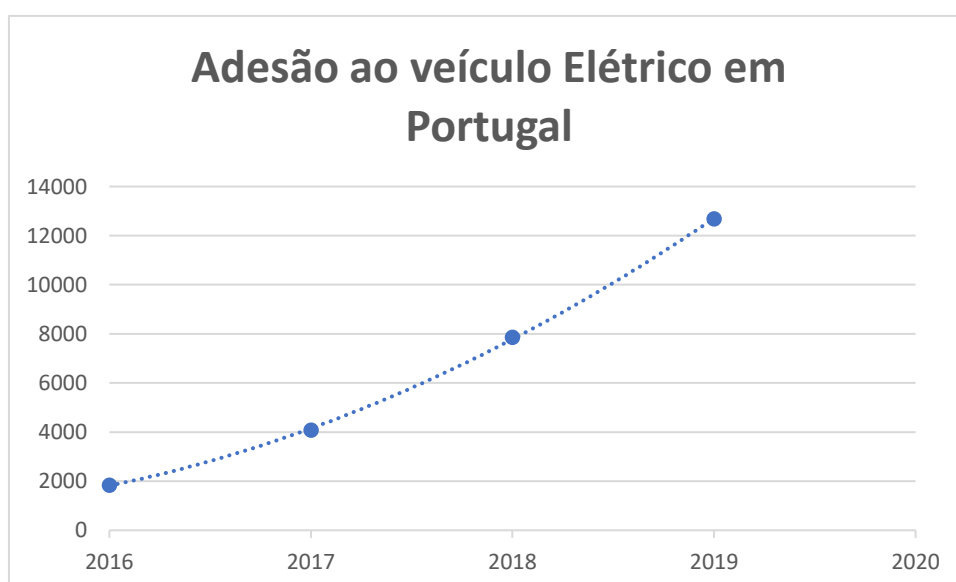


Figura 29 - Progresso na adesão ao veículo elétrico

Ao analisar este gráfico, verifica-se um aumento progressivo das vendas de veículos elétricos. Em relação ao comportamento do gráfico ainda não se pode concluir um comportamento exponencial, no entanto, prevê-se um crescimento exponencial das vendas de veículos elétricos para o futuro. Prevê-se um aumento de 40 vezes até 2030 [22].

Através destes dados, pode-se concluir que o número de pessoas a querer carregar o seu veículo elétrico será bastante considerável e, a possibilidade de implementar um serviço residencial de carregamento, que permita carregar o veículo sem qualquer custo (ou pelo menos com uma redução de custos considerável), a longo prazo, é algo aliciante.

2.5.2. REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A UTILIZAÇÃO DE UM POSTO DE CARREGAMENTO INSTALADO EM LOCAL PRIVADO

Para um utilizador começar a usufruir dos postos de carregamento públicos necessita de:

- Aderir à rede Mobi.e. Para isso necessita de analisar as propostas de cada Comercializador de Eletricidade para Mobilidade Elétrica.
- Estabelecer um contrato com um Comercializador de Eletricidade para Mobilidade Elétrica. Depois de estabelecido o contrato, o utilizador irá receber um cartão para acesso à rede Mobi.e, dando acesso a todos os postos de carregamento, incluindo os postos de carregamento rápido. Este cartão é indispensável para usufruir dos postos de carregamento [23].

2.5.3. MODOS DE CARREGAMENTO DO VEÍCULO ELÉTRICO

Existem 3 modos para carregar o veículo elétrico, são eles o Carregamento Lento, o Carregamento Semi-Rápido e o Carregamento Rápido. O modo mais adequado para cada veículo depende das características da sua bateria.

2.5.3.1. CARREGAMENTO LENTO

Este tipo de carregamento utiliza um sistema elétrico monofásico e é executada com uma potência inferior a 3,7kW. Este modo de carregamento consiste na instalação de uma caixa

com uma tomada do tipo *Schuko*, normalmente exclusiva para carregamento do veículo elétrico, tal como se pode verificar na Figura 30 [24].



Figura 30 - Modo de carregamento lento [24]

Esta caixa deve ser ligada aos sistemas de proteção adequados para a rede elétrica. Este tipo de carregamento pode ser interessante para veículos híbridos ou veículos elétricos com uma bateria de menor capacidade.

Em termos de duração, este carregamento pode demorar até 8 horas para um carregamento total da bateria [24].

2.5.3.2. CARREGAMENTO SEMI-RÁPIDO

Este tipo de carregamento é indicado para todo o tipo de veículos elétricos, no entanto, este modo necessita de um posto de carregamento (*Wallbox*), que apresenta várias proteções para a segurança tanto do sistema rede elétrica como do veículo. O veículo elétrico é alimentado por uma corrente alternada através de uma *Wallbox* tal como se pode verificar na Figura 31 [24].



Figura 31 - Modo de carregamento Semi-Rápido [24]

Este carregamento tem a duração de 3 a 4 horas dependendo das características da bateria do veículo elétrico.

Alguns veículos elétricos permitem carregamento exclusivamente em monofásico, enquanto outros permitem o carregamento tanto em trifásico como em monofásico.

Para este modo de carregamento é necessário um conector específico. Ou o SAE J1772, ou o IEC 62196-2, dependendo da origem e modelo do veículo elétrico.

O conector SAE J1772 é padrão no norte da América bem como no Japão, enquanto que o IEC 62196-2 é padrão na Europa.

Devido ao avanço tecnológico em termos de transmissão de energia, maior segurança, confiabilidade, rapidez de carregamento e ao aumento das capacidades dos veículos elétricos, o carregamento Semi-Rápido tem vindo a substituir o Carregamento Lento [24].

2.5.3.3. CARREGAMENTO RÁPIDO

Este modo de carregamento é diferente dos apresentados anteriormente uma vez que é realizado em corrente contínua, enquanto que os outros se realizam em corrente alternada. Normalmente é encontrado em autoestradas, permitindo o carregamento de até 80% em 30 minutos, sendo fornecidos no mínimo 50 kW de energia ao veículo elétrico. No entanto, este modo não fornece apenas vantagens. A obtenção deste modo de carregamento traduz um

investimento bastante elevado, tanto em equipamentos como na sua instalação e, o uso frequente deste modo de carregamento reduz drasticamente a vida útil da bateria do veículo elétrico.

Os conectores mais utilizados são o *CHADEMO* (padrão Japonês) e o *Combined Charging System* (padrão norte americano e europeu), tal como se pode verificar na Figura 32 [24].



Figura 32 - Modo de carregamento Rápido [24]

3. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA CARREGAMENTO DO VE

3.1. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO

A Potência máxima (P_{max}), definida no ponto 2.3.1 (Características elétricas de uma célula fotovoltaica) pode ser expressa matematicamente da seguinte forma:

$$P_{max} = I_{mp} \times V_{mp} \quad (2)$$

O fator de forma (FF), definido no ponto 2.3.1 (características elétricas de uma célula fotovoltaica) pode ser expresso matematicamente da seguinte forma:

$$FF = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3)$$

A tensão térmica V_t para uma determinada temperatura, definida no ponto 2.3.2 (Modelos de células fotovoltaicas) pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$V_t = \frac{kT}{e} \quad (4)$$

Em que:

- **k** – Representa a constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;
- **T** – Representa a temperatura (K);
- **e** – Representa a carga de um eletrão = $1,6 \times 10^{-19}$ Columbus.

3.2. ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO SOL E IRRADIAÇÃO SOLAR NO LOCAL DA INSTALAÇÃO

O ângulo de inclinação do sol muda ao longo do ano, podendo ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{Ângulo de inclinação do sol} = 23,45 \times \sin \left[360 \times \frac{284 + N}{365} \right] \quad (5)$$

Em que:

- N representa o dia do ano.

Para o local da instalação foi escolhida uma residência situada na Póvoa de Varzim.

Este local tem como coordenadas (41,384285, -8,732564).

A irradiação solar no local da instalação é similar à irradiação solar no resto do país. No entanto, para obter resultados mais exatos, recorreu-se ao programa PVGIS.

Na [Tabela 1](#) são apresentados os valores da irradiação solar no local da instalação (com as coordenadas apresentadas anteriormente).

Tabela 1 - Irradiação solar no local da instalação

Mês	Irradiação (kW/m2)
Jan	134,73
Fev	168,81
Mar	219,98
Abr	248,11
Mai	290,35
Jun	309,76
Jul	332,08
Ago	308,55
Set	252,41
Out	187,95
Nov	141,77
Dez	138,92
Total	2733,42
Variabilidade	337,3

A Figura 33 mostra mais ao pormenor a diferença de irradiação solar em cada mês, dando para perceber a falta de irradiação solar em alguns meses do ano e, por consequência, uma menor energia produzida pelos painéis.

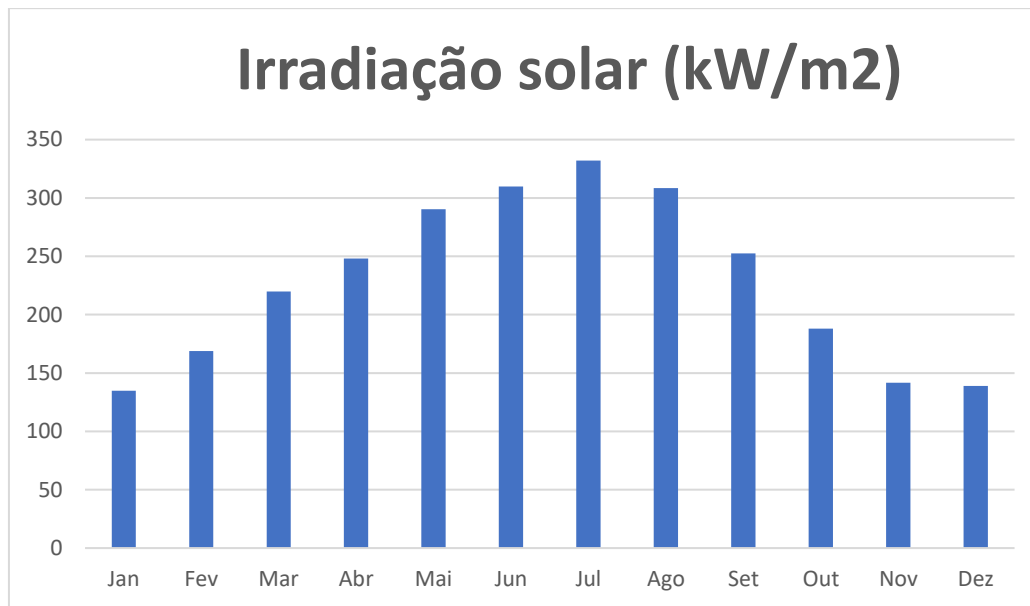


Figura 33 - Irradiação solar no local da instalação

Tal como se pode verificar, a irradiação solar é maior nos meses de verão, principalmente no mês de julho. Por outro lado, os meses de Inverno são os meses mais preocupantes, uma vez que os valores de irradiação solar são significativamente mais baixos do que nos restantes meses do ano.

3.3. SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Neste subcapítulo são apresentadas as formas de selecionar os equipamentos de um sistema fotovoltaico.

3.3.1 SELEÇÃO DO INVERSOR

Para poder selecionar o inversor é necessário primeiro calcular a sua potência para maximizar o rendimento do sistema fotovoltaico. Utilizando a potência de pico do conjunto de painéis, o inversor é selecionado analisando a seguinte expressão matemática:

$$0,7 \times Pot_{pico_painéis} < Pot_{inversor} < 1,2 * Pot_{pico_painéis} \quad (6)$$

3.3.2 SELEÇÃO DO CONTROLADOR DE CARGA

Para poder selecionar o controlador de carga basta analisar a potência de pico do módulo de painéis solares, selecionando um controlador de carga com uma potência de pico superior à potência de pico desse mesmo módulo de modo a proteger as baterias de armazenamento contra sobrecargas ou descargas excessivas.

3.3.3 SELEÇÃO DOS PAINÉIS SOLARES

Para a seleção dos painéis solares é necessário analisar e avaliar o seu rendimento e a sua potência de pico, não perdendo de vista o seu preço de modo a maximizar o rendimento do sistema fotovoltaico, não só em termos técnicos como também em termos económicos. Visto isto, para a simulação do sistema fotovoltaico foram utilizados os painéis fotovoltaicos da *SunPower*. Na [Tabela 2](#) são apresentadas as características destes painéis solares.

Tabela 2 - Painel Solar a utilizar

Painel Fotovoltaico:	<i>SunPower</i>
Potência de pico (Wp)	345
Rendimento (%)	22,2
Potencia/m2 (Wp)	214
Área de 1 painel (m2)	1,6274714
Potência de pico total (kW)	0,34827888

3.3.4 SELEÇÃO DA BATERIA

Para a seleção da bateria de armazenamento é necessário analisar e avaliar a sua capacidade e o seu rendimento e, tal como na seleção dos painéis, deve-se ter também em conta o seu preço de modo a maximizar o rendimento do projeto em termos técnicos e económicos.

3.4. VARIÁVEIS ECONÓMICAS

Os *Cash Flows* representam nada mais nada menos do que as entradas e saídas de dinheiro durante a vida útil do projeto, excluindo os investimentos, mais concretamente representam a rentabilidade do projeto subtraindo os custos associados ao projeto.

O VAL (Valor Atualizado Líquido) pode ser calculado pela seguinte forma:

$$VAL_{Cenário_x} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1+0,1)^n} - Inv_{Cenário_x} \quad (7)$$

O PAYBACK representa o ano em que ocorre o retorno de investimento e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Payback_{Cenário_x} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+0,1)^t}}{\frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+0,1)^t}}{n}} \quad (8)$$

A TIR (taxa interna de retorno) pode ser calculada através da seguinte equação:

$$VAL = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1+TIR)^n} - Inv \quad (9)$$

4. CASOS DE ESTUDO – SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Neste capítulo são apresentados os casos de estudo bem como a simulação de cada um deles no software utilizado. Primeiramente é apresentado o software utilizado, bem como o seu funcionamento.

4.1. SOFTWARE UTILIZADO

Para a simulação dos cenários foi utilizado o software PVGIS. Este programa simula as produções dos painéis fotovoltaicos, bem como as perdas totais do sistema, com base na localização geográfica, tal como se pode verificar na Figura 34, tecnologia fotovoltaica, Potência de pico instalada, perdas dos painéis fotovoltaicos, tipo de instalação (*Grid connected, Tracking PV, Off-Grid, etc*), tal como se pode verificar na Figura 35.

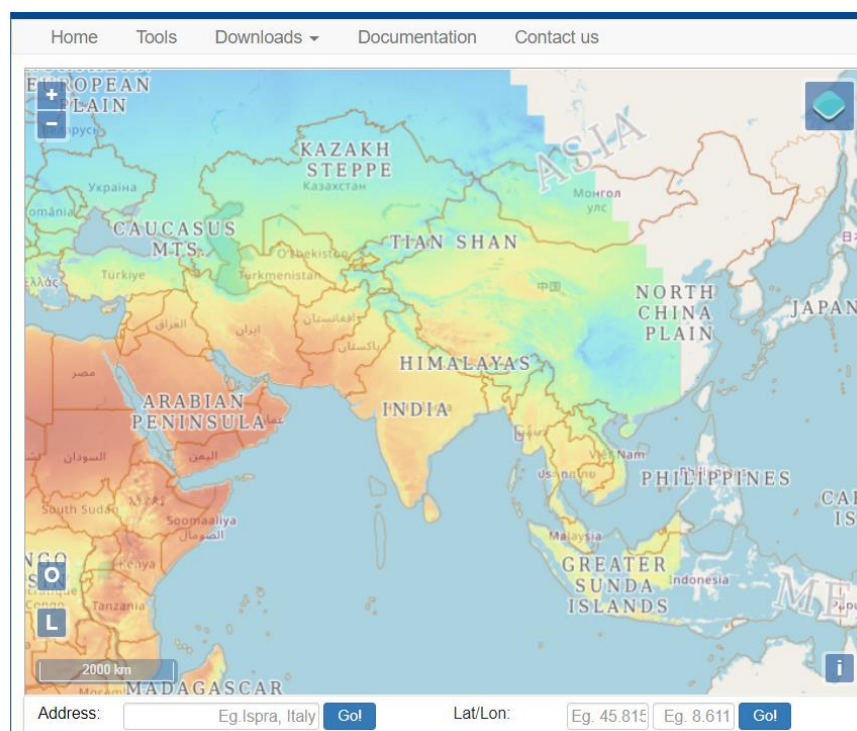


Figura 34 - Localização geográfica do sistema fotovoltaico

Na Figura 35, já são necessárias características mais técnicas, dependendo do tipo de instalação. Se o tipo de instalação fosse *Grid Connected* era necessário utilizar um ângulo de inclinação, no entanto, como será utilizado um seguidor solar de duplo eixo, apenas são necessários alguns dados.

The screenshot shows a web-based configuration interface for tracking PV performance. The main title is 'PERFORMANCE OF TRACKING PV'. The interface is divided into a sidebar on the left and a main configuration area. The sidebar includes options for 'TRACKING PV', 'OFF-GRID', 'MONTHLY DATA', 'DAILY DATA', 'HOURLY DATA', and 'TMY'. The main area is titled 'PERFORMANCE OF TRACKING PV' and includes a 'GRID CONNECTED' status indicator. The configuration fields are: 'Solar radiation database*' (dropdown menu), 'PV technology*' (dropdown menu with 'Crystalline silicon' selected), 'Installed peak PV power [kWp]*' (input field with value '1'), and 'System loss [%]*' (input field with value '14'). Below these is the 'Tracking mounting options' section, which includes three radio buttons: 'Vertical axis' (selected), 'Inclined axis', and 'Two-axis'. Each radio button is associated with a 'Slope [°]' label and a '(0-9)' input field. To the right of each radio button is an 'Optimize' checkbox. At the bottom of the interface, there are three buttons: 'Visualize results', 'csv', and 'json'.

Figura 35 - Dados para a simulação

No anexo A é possível observar com maior pormenor os dados necessários para realizar a simulação no software.

4.2. CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE FUNCIONAMENTO

Na Tabela 3 são apresentados os cenários simulados de acordo com os quilómetros a percorrer.

Tabela 3 - Cenários simulados

Cenário	km/dia	km/mês
1	10	290/300/310
2	20	580/600/620
3	40	1160/1200/1240
4	80	2320/2400/2480
5	120	3480/3600/3720
6	150	4350/4500/4650

4.2.1. CENÁRIO 1

Para o cenário 1, o número de quilômetros a realizar é de 10 km diários, ou seja, 290 km para o mês de fevereiro (29 dias), 300 km para os meses com 30 dias e 310 km para os meses com 31 dias. Para este cenário o veículo elétrico escolhido foi o *Citroen C-Zero*, uma vez que tem uma autonomia mais do que suficiente (90 km de autonomia real e um mínimo de 60 km nos meses de inverno) e, em termos de eficiência, não é o melhor nem o pior (16,1 kWh/100 km). Para realizar 10 km diários com este veículo são necessários 1,61kWh de energia.

A Tabela 4 mostra as necessidades energéticas para cada mês em função da eficiência do veículo a utilizar e dependendo do número de dias.

Tabela 4 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 1)

Nº de dias	Total de km	Energia necessária (kWh)
29	290	46,69
30	300	48,3
31	310	49,91

Tendo em conta as necessidades energéticas, seriam necessários 3 painéis solares que correspondem a 1,04692 kWp com uma dimensão total de 4,89213 m².

A Figura 36 mostra os resultados da simulação para este cenário.

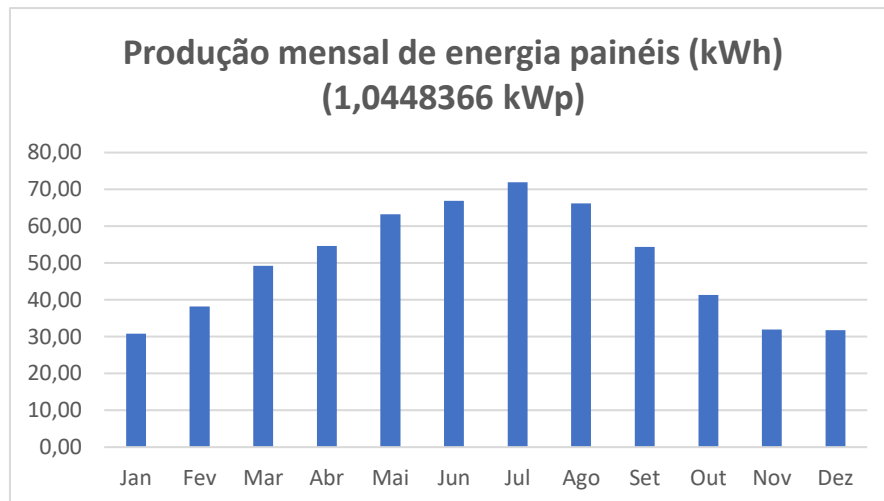


Figura 36 - Simulação da produção para o Cenário 1

Como se pode verificar na Figura 36, nos meses de verão a produção por parte dos painéis solares é muito mais do que suficiente para satisfazer as necessidades energéticas, no entanto nos meses de inverno encontra-se bastante abaixo do necessário.

A Tabela 5 mostra mais ao pormenor o cenário 1 bem como os valores de produção por parte dos painéis.

A bateria selecionada para armazenar a energia necessária para percorrer os 10 quilómetros diários foi a *Soltaro 2* de 2kWh (1,8kWh utilizáveis) e, uma vez que no verão os painéis acabariam por carregar completamente esta bateria, a energia em excesso acabaria por compensar uma parte do primeiro dia de Outubro.

Em relação ao controlador de carga, para este cenário seria o *Sunpal 1,08 kWp Mppt* uma vez que funciona até uma potência de 1,08 kWp.

Tabela 5 - Cenário 1

Número de Painéis	Mês	Produção mensal de energia painéis (kWh)	Produção média diária (kWh)	Max. Produção/dia (kWh)
3	Jan	30,80	0,99	2,32
	Fev	38,21	1,32	
	Mar	49,25	1,59	
	Abr	54,67	1,82	
	Mai	63,27	2,04	
	Jun	66,89	2,23	
	Jul	71,92	2,32	
	Ago	66,21	2,14	
	Set	54,39	1,81	
	Out	41,30	1,33	
	Nov	31,93	1,06	
	Dez	31,74	1,02	
Total		600,58		

O inversor é selecionado analisando a equação 6 presente no ponto 3.3.1 (Seleção do Inversor), originando:

$$0,732844kW < Pot_{inversor} < 1,2563kW \quad (10)$$

Depois da análise da equação 10, o inversor selecionado foi o *SMA Sunny Boy* SB1100 1,1kW de potência.

4.2.2. CENÁRIO 2

Para o cenário 2, o número de quilômetros a realizar é o dobro do Cenário 1, ou seja, 20 km diários, mais concretamente, 580 km para o mês de fevereiro (29 dias), 600 km para os meses com 30 dias e 620 km para os meses com 31 dias. Mais uma vez, para este cenário o veículo elétrico escolhido foi novamente o *Citroen C-Zero*, uma vez que tem uma autonomia mais do que suficiente (90 km de autonomia real e um mínimo de 60 km nos meses de inverno) e, em termos de eficiência, não é o melhor nem o pior (16,1kWh/100km). Para realizar 20 km diários com este veículo são necessários 3,22kWh de energia.

Tal como demonstrado no cenário anterior, a Tabela 6 mostra as necessidades energéticas para cada mês em função da eficiência do veículo a utilizar e dependendo do número de dias.

Tabela 6 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 2)

Nº de dias	Total de km	Energia necessária (kWh)
29	580	93,38
30	600	96,6
31	620	99,82

Tendo em conta as necessidades energéticas, seriam necessários 6 painéis solares que correspondem a 2,09384 kWp com uma dimensão total de 9,78426 m².

A Figura 37 mostra os resultados da simulação para este cenário.

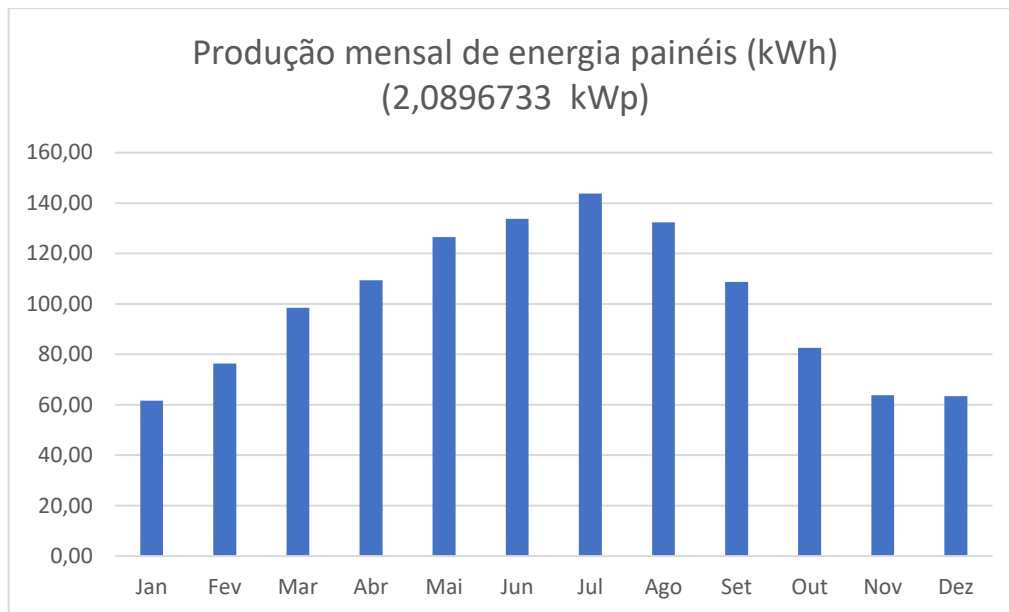


Figura 37 - Simulação da produção para o Cenário 1

O comportamento do gráfico é o mesmo do gráfico do cenário anterior, apresentando valores mais elevados.

A Tabela 7 mostra mais ao pormenor o cenário 2 bem como os valores de produção por parte dos painéis.

A bateria selecionada para armazenar a energia necessária para percorrer os 20 quilómetros diários foi a *BYD – box* de 5kWh (4,9kWh utilizáveis) e, uma vez que no verão os painéis acabariam por carregar completamente esta bateria, a energia em excesso acabaria por compensar o primeiro dia e uma parte do segundo dia de Outubro.

Em relação ao controlador de carga, para este cenário seria o *Sunpal 2,4kWp Mppt* uma vez que funciona até uma potência de 2,4 kWp.

O inversor é selecionado analisando a equação 6, originando:

$$1,46569kW < Pot_{inversor} < 2,51261kW \quad (11)$$

Depois da análise da equação 11, o inversor selecionado foi o *SMA Sunny Boy 1.5 TL* de 1,5 kW de potência.

Tabela 7 - Cenário 2

Número de Painéis	Mês	Produção mensal de energia painéis (kWh)	Produção média diária (kWh)	Max. Produção/dia (kWh)
6	Jan	61,61	1,99	4,64
	Fev	76,42	2,64	
	Mar	98,51	3,18	
	Abr	109,34	3,64	
	Mai	126,54	4,08	
	Jun	133,78	4,46	
	Jul	143,85	4,64	
	Ago	132,42	4,27	
	Set	108,78	3,63	
	Out	82,60	2,66	
	Nov	63,85	2,13	
	Dez	63,48	2,05	
Total		1201,18		

4.2.3. CENÁRIO 3

Para o cenário 3, o número de quilómetros a realizar é o dobro do Cenário 2, ou seja, 40 km diários, mais concretamente, 1160 km para o mês de fevereiro (29 dias), 1200 km para os meses com 30 dias e 1240 km para os meses com 31 dias. Mais uma vez, para este cenário o veículo elétrico escolhido foi novamente o *Citroen C-Zero*, uma vez que tem uma autonomia mais do que suficiente (90 km de autonomia real e um mínimo de 60 km nos meses de inverno) e, em termos de eficiência, não é o melhor nem o pior (16,1kWh/100km). Para realizar 40 km diários com este veículo são necessários 6,44kWh de energia.

Tal como demonstrado nos cenários anteriores, a Tabela 8 mostra as necessidades energéticas para cada mês em função da eficiência do veículo a utilizar e dependendo do número de dias.

Tabela 8 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 3)

Nº de dias	Total de km	Energia necessária (kWh)
29	1160	186,76
30	1200	193,2
31	1240	199,64

Tendo em conta as necessidades energéticas, seriam necessários 12 painéis solares que correspondem a 4,18767 kWp com uma dimensão total de 19,5685 m².

A Figura 38 mostra os resultados da simulação para este cenário.

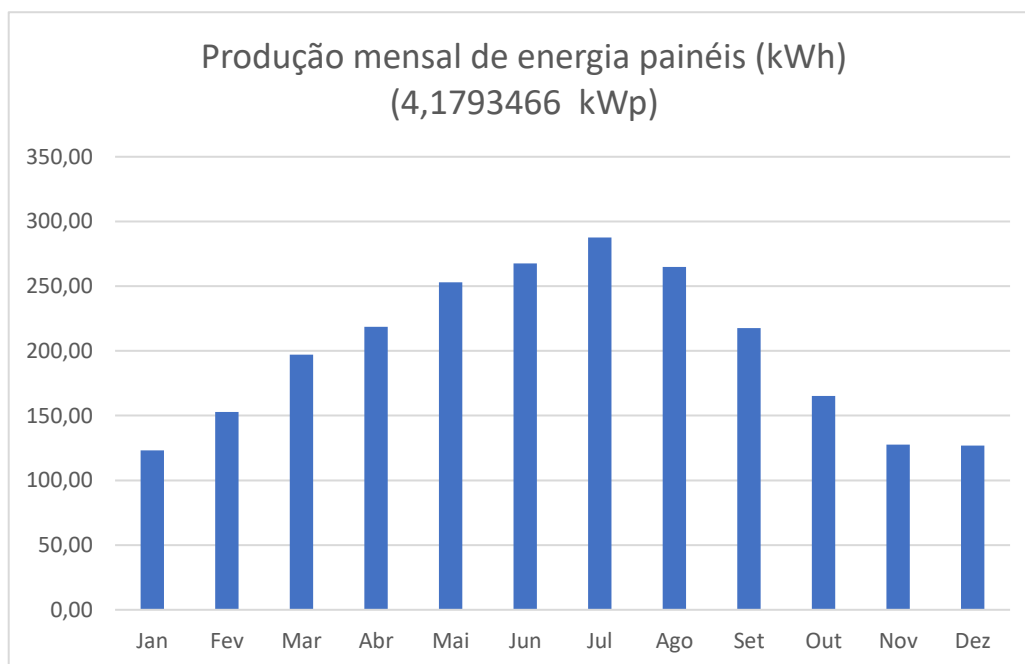


Figura 38 - Simulação da produção para o Cenário 3

Mais uma vez, comportamento do gráfico é o mesmo dos gráficos dos cenários anteriores, apresentando valores mais elevados.

A Tabela 9 mostra mais ao pormenor o cenário 3 bem como os valores de produção por parte dos painéis.

Tabela 9 - Cenário 3

Número de Painéis	Mês	Produção mensal de energia painéis (kWh)	Produção média diária (kWh)	Max. Produção/dia (kWh)
12	Jan	123,21	3,97	9,28
	Fev	152,84	5,27	
	Mar	197,01	6,36	
	Abr	218,67	7,29	
	Mai	253,09	8,16	
	Jun	267,56	8,92	
	Jul	287,70	9,28	
	Ago	264,84	8,54	
	Set	217,56	7,25	
	Out	165,20	5,33	
	Nov	127,70	4,26	
	Dez	126,95	4,10	
Total		2402,33		

A bateria selecionada para armazenar a energia necessária para percorrer os 40 quilómetros diários foi a *BYD Premium* de 7,7kWh (7,68kWh utilizáveis) e, uma vez que no verão os painéis acabariam por carregar completamente esta bateria, a energia em excesso acabaria por compensar o primeiro dia e uma parte do segundo dia de Outubro.

Em relação ao controlador de carga, para este cenário seria o *Sunpal 4,8kWp Mppt*, uma vez que funciona até uma potência de 4,8 kWp.

O inversor é selecionado analisando a equação 6, originando:

$$2,93137kW < Pot_{inversor} < 5,0252kW \quad (12)$$

Depois da análise da equação 12, o inversor selecionado foi o *SMA Sunny Tripower* de 3,0 kW de potência.

4.2.4. CENÁRIO 4

Para o cenário 4, o número de quilômetros a realizar é o dobro do Cenário 3, ou seja, 80 km diários, mais concretamente, 2320 km para o mês de fevereiro (29 dias), 2400 km para os meses com 30 dias e 2480 km para os meses com 31 dias. Para este cenário o veículo elétrico escolhido foi o *SEAT Mii Electric*, uma vez que tem uma autonomia mais do que suficiente (200 km de autonomia real e um mínimo de 140 km nos meses de inverno) e, em termos de eficiência, não é o melhor nem o pior (16,2kWh/100km). Para realizar 80 km diários com este veículo são necessários 12,96kWh de energia.

Tal como demonstrado nos cenários anteriores, a Tabela 10 mostra as necessidades energéticas para cada mês em função da eficiência do veículo a utilizar e dependendo do número de dias.

Tabela 10 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 4)

Nº de dias	Total de km	Energia necessária (kWh)
29	2320	375,84
30	2400	388,8
31	2480	401,76

Tendo em conta as necessidades energéticas, seriam necessários 24 painéis solares que correspondem a 8,37535 kWp com uma dimensão total de 39,137 m².

A Figura 39 mostra os resultados da simulação para este cenário.

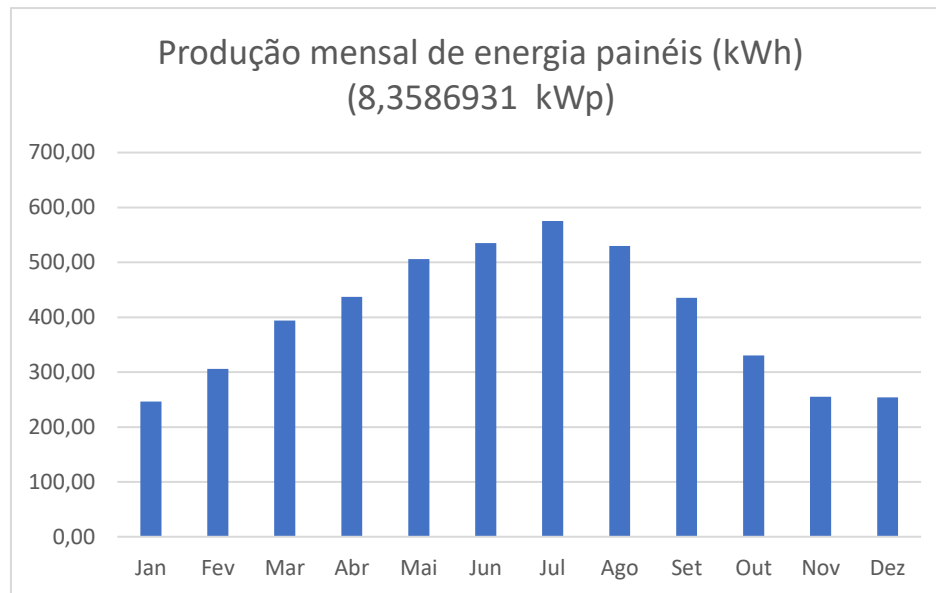


Figura 39 - Simulação da produção para o Cenário 4

Mais uma vez, o comportamento do gráfico é o mesmo dos gráficos dos cenários anteriores, apresentando valores mais elevados.

A Tabela 11 mostra mais ao pormenor o cenário 4 bem como os valores de produção por parte dos painéis.

A bateria selecionada para armazenar a energia necessária para percorrer os 40 quilómetros diários foi a *BYD Premium* de 7,7kWh (7,68kWh utilizáveis), sendo necessárias 2 baterias e, uma vez que no verão os painéis acabariam por carregar completamente estas baterias, a energia em excesso acabaria por compensar o primeiro dia e uma parte do segundo dia de Outubro.

Em relação ao controlador de carga, para este cenário seria o *Sunpal 9,6 kWp Mppt*, uma vez que funciona até uma potência de 9,6 kWp.

O inversor é selecionado analisando a equação 6, originando:

$$5,86275kW < Pot_{inversor} < 10,0504kW \quad (13)$$

Depois da análise da equação 12, o inversor selecionado foi o *SMA Sunny Tripower 6.0* de 6 kW de potência.

Tabela 11 - Cenário 4

Número de Painéis	Mês	Produção mensal de energia painéis (kWh)	Produção média diária (kWh)	Max. Produção/dia (kWh)	Número de baterias
24	Jan	246,43	7,95	18,56	2
	Fev	305,68	10,54		
	Mar	394,02	12,71		
	Abr	437,34	14,58		
	Mai	506,18	16,33		
	Jun	535,12	17,84		
	Jul	575,39	18,56		
	Ago	529,68	17,09		
	Set	435,12	14,50		
	Out	330,40	10,66		
	Nov	255,41	8,51		
	Dez	253,91	8,19		
Total		4804,68			

4.2.5. CENÁRIO 5

Para o cenário 5, o número de quilômetros a realizar é 120 km diários, mais concretamente, 3480 km para o mês de fevereiro (29 dias), 3600 km para os meses com 30 dias e 3720 km para os meses com 31 dias. Para este cenário o veículo elétrico escolhido foi o *SEAT Mii Electric*, tal como no cenário anterior, uma vez que tem uma autonomia mais do que suficiente (200 km de autonomia real e um mínimo de 140 km nos meses de inverno) e, em termos de eficiência, não é o melhor nem o pior (16,2kWh/100km). Para realizar 120 km diários com este veículo são necessários 19,44kWh de energia.

Tal como demonstrado nos cenários anteriores, a [Tabela 12](#) mostra as necessidades energéticas para cada mês em função da eficiência do veículo a utilizar e dependendo do número de dias.

Tabela 12 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 5)

Nº de dias	Total de km	Energia necessária (kWh)
29	3480	563,76
30	3600	583,2
31	3720	602,44

Tendo em conta as necessidades energéticas, seriam necessários 36 painéis solares que correspondem a 12,563 kWp com uma dimensão total de 58,7056 m².

A [Figura 40](#) mostra os resultados da simulação para este cenário.

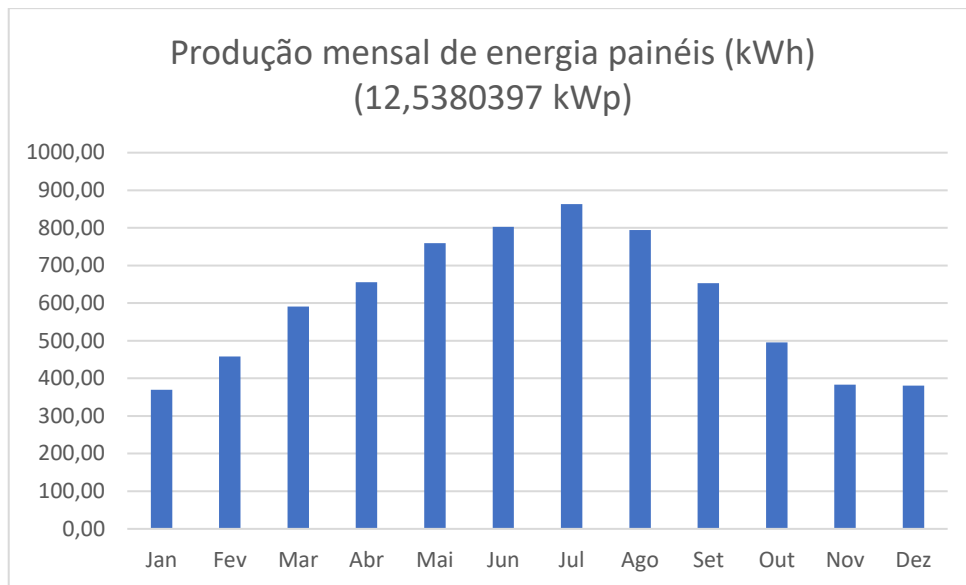


Figura 40 - Simulação da produção para o Cenário 5

Tal como esperado, o comportamento do gráfico é o mesmo dos gráficos dos cenários anteriores, apresentando valores mais elevados.

A Tabela 13 mostra mais ao pormenor o cenário 5 bem como os valores de produção por parte dos painéis.

A bateria selecionada para armazenar a energia necessária para percorrer os 40 quilómetros diários foi a *BYD Premium* de 7,7kWh (7,68kWh utilizáveis), sendo necessárias 3 baterias e, uma vez que no verão os painéis acabariam por carregar completamente estas baterias, a energia em excesso acabaria por compensar o primeiro dia e uma parte do segundo dia de Outubro.

Em relação ao controlador de carga, para este cenário seria o *Sunpal 15kWp Mppt*, uma vez que funciona até uma potência de 15 kWp.

O inversor é selecionado analisando a equação 6, originando:

$$8,7941kW < Pot_{inversor} < 25,0756kW \quad (14)$$

Depois da análise da equação 14, o inversor selecionado foi o *Sunny Tripower 9000 TL-20* 9 kW de potência.

Tabela 13 - Cenário 5

Número de Painéis	Mês	Produção mensal de energia painéis (kWh)	Produção média diária (kWh)	Max. Produção/dia (kWh)	Número de baterias
36	Jan	369,64	11,92	27,84	3
	Fev	458,52	15,81		
	Mar	591,04	19,07		
	Abr	656,01	21,87		
	Mai	759,26	24,49		
	Jun	802,69	26,76		
	Jul	863,09	27,84		
	Ago	794,52	25,63		
	Set	652,68	21,76		
	Out	495,61	15,99		
	Nov	383,11	12,77		
	Dez	380,86	12,29		
Total		7207,03			

4.2.6. CENÁRIO 6

Para o cenário 6, o número de quilômetros a realizar é 150 km diários, mais concretamente, 4350 km para o mês de fevereiro (29 dias), 4500 km para os meses com 30 dias e 4650 km para os meses com 31 dias. Para este cenário o veículo elétrico escolhido foi o BMW i3S 120Ah, uma vez que tem uma autonomia mais do que suficiente (230 km de autonomia real e um mínimo de 160 km nos meses de inverno) e, em termos de eficiência, não é o melhor

nem o pior (16,5kWh/100km). Para realizar 150 km diários com este veículo são necessários 19,44kWh de energia.

Tal como demonstrado nos cenários anteriores, a Tabela 14 mostra as necessidades energéticas para cada mês em função da eficiência do veículo a utilizar e dependendo do número de dias.

Tabela 14 - Necessidades energéticas para cada mês (Cenário 6)

Nº de dias	Total de km	Energia necessária (kWh)
29	4350	717,75
30	4500	742,5
31	4650	767,25

Tendo em conta as necessidades energéticas, seriam necessários 46 painéis solares que correspondem a 16,7507 kWp com uma dimensão total de 78,2741 m².

A Figura 41 mostra os resultados da simulação para este cenário.

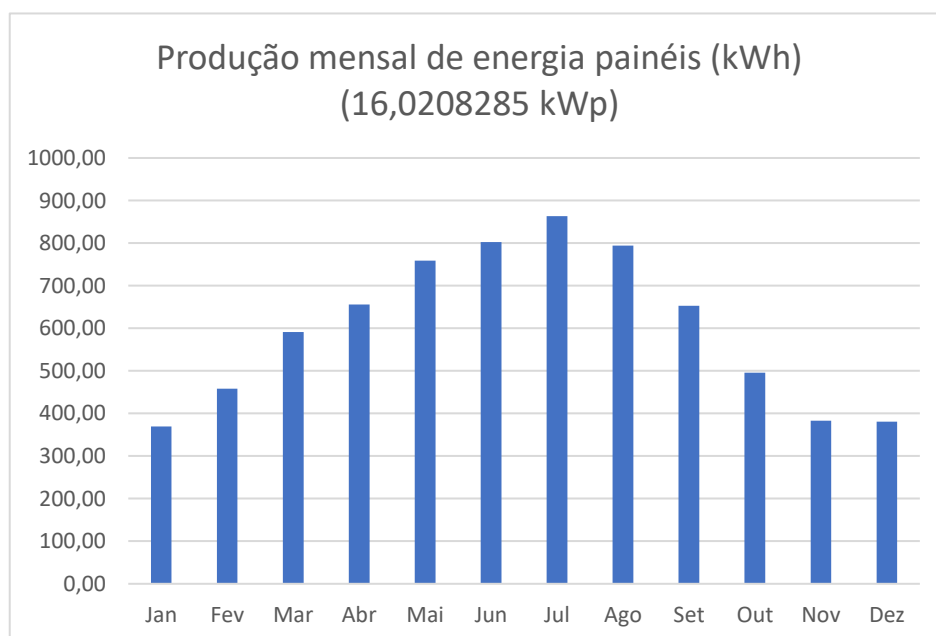


Figura 41 - Simulação da produção para o Cenário 6

Tal como esperado, o comportamento do gráfico é o mesmo dos gráficos dos cenários anteriores, apresentando valores mais elevados.

A Tabela 15 mostra mais ao pormenor o cenário 6 bem como os valores de produção por parte dos painéis.

Tabela 15 - Cenário 6

Número de Painéis	Mês	Produção mensal de energia painéis (kWh)	Produção média diária (kWh)	Max. Produção/dia (kWh)	Número de baterias
46	Jan	369,64	11,92	27,84	3
	Fev	458,52	15,81		
	Mar	591,04	19,07		
	Abr	656,01	21,87		
	Mai	759,26	24,49		
	Jun	802,69	26,76		
	Jul	863,09	27,84		
	Ago	794,52	25,63		
	Set	652,68	21,76		
	Out	495,61	15,99		
	Nov	383,11	12,77		
	Dez	380,86	12,29		
Total		7207,03			

A bateria selecionada para armazenar a energia necessária para percorrer os 40 quilómetros diários foi a LG Chem RESU 10H de 9,8kWh (9,3kWh utilizáveis), sendo necessárias 3 baterias e, uma vez que no verão os painéis acabariam por carregar completamente estas

baterias, a energia em excesso acabaria por compensar o primeiro dia e uma parte do segundo dia de Outubro.

Em relação ao controlador de carga, para este cenário seria o *Sunpal 19,2kWp Mppt*, uma vez que funciona até uma potência de 19,2 kWp.

O inversor é seleccionado analisando a equação 6, originando:

$$11,7255kW < Pot_{inversor} < 20,1008kW \quad (15)$$

Depois da análise da equação 15, o inversor seleccionado foi o SMA *Sunny Tripower STP12000 TL-20* 16 kW de potência.

4.3. ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÓMICA DE CADA CENÁRIO

Para o estudo da viabilidade económica em cada cenário foi utilizada uma taxa de actualização de 10% de acordo com a IES e a IRENA.

Tabela 16 - Investimento em cada cenário

	Investimento total
Cenário 1	3395 €
Cenário 2	5707,79 €
Cenário 3	9095,6 €
Cenário 4	15659,5 €
Cenário 5	21554 €
Cenário 6	28461,8 €

Na Tabela 16 são apresentados os investimentos em cada cenário

O *Cash Flow* de cada ano para cada cenário representa a rentabilidade da energia armazenada (considerando um custo da energia de 0,21€ inc/IVA), o custo de manutenção dos painéis anualmente (1% do custo total dos painéis) e o custo de manutenção das baterias anualmente (1% do custo total das baterias).

4.3.1. CASH FLOWS

Na Tabela 17 são apresentados os *Cash flows* em cada ano para cada cenário.

Tabela 17 - *Cash flows* para cada cenário.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Ano 1	85,36 €	181,03 €	375,56 €	758,58 €	1 144,05 €	1 446,58 €
Ano 2	93,90 €	199,14 €	413,12 €	834,44 €	1 258,46 €	1 591,24 €
Ano 3	103,29 €	219,05 €	454,43 €	917,89 €	1 384,30 €	1 750,36 €
Ano 4	113,62 €	240,96 €	499,87 €	1 009,67 €	1 522,73 €	1 925,40 €
Ano 5	124,98 €	265,05 €	549,86 €	1 110,64 €	1 675,00 €	2 117,94 €
Ano 6	137,48 €	291,56 €	604,85 €	1 221,70 €	1 842,50 €	2 329,73 €
Ano 7	151,22 €	320,71 €	665,33 €	1 343,87 €	2 026,75 €	2 562,70 €
Ano 8	166,35 €	352,78 €	731,86 €	1 478,26 €	2 229,43 €	2 818,98 €
Ano 9	182,98 €	388,05 €	805,05 €	1 626,08 €	2 452,37 €	3 100,87 €
Ano 10	201,28 €	426,86 €	885,56 €	1 788,69 €	2 697,61 €	3 410,96 €
Ano 11	221,41 €	469,55 €	974,11 €	1 967,56 €	2 967,37 €	3 752,06 €
Ano 12	243,55 €	516,50 €	1 071,52 €	2 164,32 €	3 264,11 €	4 127,26 €
Ano 13	267,90 €	568,15 €	1 178,67 €	2 380,75 €	3 590,52 €	4 539,99 €
Ano 14	294,69 €	624,97 €	1 296,53 €	2 618,82 €	3 949,57 €	4 993,99 €
Ano 15	324,16 €	687,47 €	1 426,19 €	2 880,71 €	4 344,53 €	5 493,39 €
Ano 16	356,57 €	756,21 €	1 568,81 €	3 168,78 €	4 778,98 €	6 042,72 €
Ano 17	392,23 €	831,83 €	1 725,69 €	3 485,65 €	5 256,88 €	6 647,00 €
Ano 18	431,45 €	915,02 €	1 898,26 €	3 834,22 €	5 782,57 €	7 311,70 €
Ano 19	474,60 €	1 006,51 €	2 088,08 €	4 217,64 €	6 360,82 €	8 042,87 €
Ano 20	522,06 €	1 107,16 €	2 296,89 €	4 639,41 €	6 996,91 €	8 847,15 €
Ano 21	574,26 €	1 217,88 €	2 526,58 €	5 103,35 €	7 696,60 €	9 731,87 €
Ano 22	631,69 €	1 339,67 €	2 779,24 €	5 613,68 €	8 466,26 €	10 705,10 €
Ano 23	694,86 €	1 473,63 €	3 057,16 €	6 175,05 €	9 312,88 €	11 775,60 €
Ano 24	764,34 €	1 621,00 €	3 362,88 €	6 792,55 €	10 244,20 €	12 953,10 €
Ano 25	840,78 €	1 783,00 €	3 699,17 €	7 471,81 €	11 268,60 €	14 248,40 €

4.3.2. VAL

A análise da equação 7 presente no subcapítulo 3.4 permite calcular o VAL para cada cenário originando:

$$VAL_{Cenário1} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + 0,1)^n} - Inv_{Cenário1} = -1261 \text{ €} \quad (16)$$

$$VAL_{Cenário2} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + 0,1)^n} - Inv_{Cenário2} = -1182,04 \text{ €} \quad (17)$$

$$VAL_{Cenário3} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + 0,1)^n} - Inv_{Cenário3} = 293,4 \text{ €} \quad (18)$$

$$VAL_{Cenário4} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + 0,1)^n} - Inv_{Cenário4} = 3305 \text{ €} \quad (19)$$

$$VAL_{Cenário5} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + 0,1)^n} - Inv_{Cenário5} = 7047,25 \text{ €} \quad (20)$$

$$VAL_{Cenário6} = \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + 0,1)^n} - Inv_{Cenário6} = 7702,7 \text{ €} \quad (21)$$

4.3.3. PAYBACK

Uma vez que o VAL para os cenários 1 e 2 é negativo, não faz sentido calcular o *Payback* para esses mesmos cenários.

Para o cálculo do *Payback* utiliza-se a expressão 8 presente no estudo técnico-económico (3.4) originando:

$$Payback_{Cenário3} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+0,1)^t}}{\frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+0,1)^t}}{n}} = 24,2 \text{ anos} \quad (22)$$

$$Payback_{Cenário4} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+0,1)^t}}{\frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+0,1)^t}}{n}} = 20,6 \text{ anos} \quad (23)$$

$$Payback_{Cenário5} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+0,1)^t}}{\frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+0,1)^t}}{n}} = 18,7 \text{ anos} \quad (24)$$

$$Payback_{Cenário6} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+0,1)^t}}{\frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+0,1)^t}}{n}} = 19,57 \text{ anos} \quad (25)$$

4.3.4. TIR

Tal como no ponto anterior, uma vez que o VAL para os cenários 1 e 2 é negativo, não faz sentido calcular a TIR para esses mesmos cenários.

Para o cálculo da TIR utiliza-se a expressão 9 presente no estudo técnico-económico (3.4) originando:

$$\begin{aligned}
 VAL_{Cenário3} &= \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + TIR_{Cenário3})^n} - Inv \quad (=) \quad TIR_{Cenário3} & (26) \\
 &= 0,1 = 10\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VAL_{Cenário4} &= \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + TIR_{Cenário4})^n} - Inv \quad (=) \quad TIR_{Cenário4} & (27) \\
 &= 0,1 = 10\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VAL_{Cenário5} &= \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + TIR_{Cenário5})^n} - Inv \quad (=) \quad TIR_{Cenário5} & (28) \\
 &= 0,1 = 10\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VAL_{Cenário6} &= \sum_{n=1}^{25} \frac{C_{Fn}}{(1 + TIR_{Cenário6})^n} - Inv \quad (=) \quad TIR_{Cenário6} & (29) \\
 &= 0,1 = 10\%
 \end{aligned}$$

4.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela 18 são apresentados os resultados obtidos do estudo da viabilidade económica de cada cenário.

Tabela 18 - Resultados obtidos

	VAL	Payback	TIR
Cenário 1	-1261		
Cenário 2	-1182,04		
Cenário 3	293,4	24,2 anos	10%
Cenário 4	3305	20,6 anos	10%
Cenário 5	7047,25	18,7 anos	10%
Cenário 6	7702,7	19,57 anos	10%

Para os cenários 1 e 2, uma vez que o VAL é negativo, estes projetos não são rentáveis economicamente, ou seja, o investimento nem se quer é recuperado nos 25 anos de vida útil do projeto.

Para o cenário 3, o VAL é positivo, no entanto são necessários quase os 25 anos de vida do projeto para recuperar o investimento.

Em relação ao cenário 4 o VAL é positivo e são necessários 20,6 anos para recuperar o investimento, o que demonstra que o projeto é rentável economicamente, mas, visto que são necessários mais de 20 anos para recuperar o investimento, torna-se um projeto menos interessante.

Para o cenário 5, o VAL é positivo e são necessários 18,7 anos para recuperar o investimento, sendo o período mais curto de todos os cenários. Visto isto, apesar de não ser o projeto que

apresenta maior VAL, parece ser o projeto mais aliciente uma vez que é o que necessita menos tempo para recuperar o investimento.

O cenário 6, é o cenário que apresenta o VAL mais positivo e são necessários 19,57 anos para recuperar o investimento.

Em relação à TIR, excluindo os cenários 1 e 2 que apresentam um VAL negativo, os restantes apresentam uma TIR de cerca de 10%.

5. CONCLUSÕES

5.1. ANÁLISE CONCLUSIVA

Para concluir, tendo em vista o aspeto ambiental, estes projetos são mais que viáveis, uma vez que origina energia elétrica “limpa” através das suas tecnologias renováveis. Isto demonstra a importância que estes projetos podem ter no cumprimento do acordo de Paris num futuro próximo.

Em relação à viabilidade técnica, estes projetos são viáveis uma vez que permitem o carregamento parcial do veículo elétrico e, em alguns meses do ano o suficiente para percorrer os quilómetros necessários sem qualquer custo em energia elétrica.

Em termos económicos, a maior parte dos cenários são rentáveis, no entanto, ainda não representam investimentos apetecíveis, uma vez que a taxa interna de retorno não é suficientemente alta, ou seja, o investimento é demasiado alto para a rentabilidade do projeto. Para isso era necessário haver ajuda financeira por parte do estado no investimento inicial para tornar estes projetos mais apetecíveis.

5.2. PERSPETIVAS FUTURAS

Tendo em conta o cumprimento do acordo de Paris até 2050, prevê-se um aumento com naturalidade da adesão ao veículo elétrico, sendo que, a minimização dos custos do abastecimento destes veículos será uma prioridade para os consumidores, tornando este estudo cada vez mais importante, com o passar do tempo.

Uma vez que se prevê uma diminuição considerável dos custos dos sistemas de armazenamento de energia elétrica e também uma diminuição do custo dos sistemas fotovoltaicos, acredita-se que estes projetos serão cada vez mais rentáveis num futuro próximo.

Referências

- [1] S. R. Shakya, *Training Manual for Engineers on Solar PV*, p. 259, 23 Março 2020.
- [2] “Life of the sun,” 14 07 2020. [Online]. Available: <https://www.universetoday.com/18847/life-of-the-sun/>. [Acedido em 22 03 2020].
- [3] “Fossil Fuels,” 2019. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>. [Acedido em 24 03 2020].
- [4] “Enerdata,” 2020. [Online]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>. [Acedido em 23 3 2020].
- [5] “Público,” 2018. [Online]. Available: <https://www.publico.pt/2018/08/16/economia/opiniao/politica-energetica-ou-falta-dela-em-portugal-1841161>.
- [6] “zeev,” 2020. [Online]. Available: <https://www.zeev.pt/incentivos-a-compra-de-carros-eletricos-para-2020/>. [Acedido em 25 03 2020].
- [7] “Science Direct,” 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/two-axis-tracking-system>. [Acedido em 07 04 2020].
- [8] M. G. Mauk, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/crystalline-silicon>.
- [9] N. Connor, “Radiation Dosimetry,” 4 12 2019. [Online]. Available: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-n-type-and-p-type-semiconductor-definition/>.
- [10] “Hyperphysics,” 12 03 2020. [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/pnjun.html>.

- [11] W. C. T. Harrison Ka Hin Lee, “Science Direct,” 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/solar-cell>.
- [12] R. Kumar, “Energy Reports,” *Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution*, 11 2018.
- [13] “ScienceDirect,” 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bypass-diode>.
- [14] A. Han, “Efficiency Of Solar PV, Then, Now And Future,” 2014. [Online]. Available: <https://sites.lafayette.edu/egrs352-sp14-pv/technology/history-of-pv-technology/>.
- [15] M. J. P. T. C. S. J. W. J. W. T. D. Shuai Maa, “Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries,” 16 11 2018.
- [16] R. W. Tiantian Zhang, “Charge Controller,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/charge-controller>.
- [17] P. K. S. K. W. H. S. P. S. U. Chaowanan Jamroenab, “A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation,” Fevereiro 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138819307040>.
- [18] A. Lavrador, “Observador,” 12 06 2019. [Online]. Available: <https://observador.pt/2019/06/12/e-se-produzisse-a-sua-energia-para-alimentar-a-casa-e-o-carro/>.
- [19] S. R. S.C.P, “Producción fotovoltaica,” 2020. [Online]. Available: <http://www.suresterefrigeracion.com/services/fotovoltaica-de-autoconsumo/>.
- [20] iea, “Internacional Energy Agency,” 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>. [Acedido em 28 03 2020].
- [21] “eco.sapo,” 2020. [Online]. Available: <https://eco.sapo.pt/2020/03/10/apoio-para-carros-eletricos-chegou-ja-pode-pedir-o-cheque/>. [Acedido em 31 3 2020].

- [22] “Aumento de veículos elétricos,” 30 04 2019. [Online]. Available: <https://www.dn.pt/edicao-do-dia/30-abr-2019/veiculos-eletricos-vao-aumentar-40-vezes-em-portugal-ate-2030-chegam-aos-655-mil-10845132.html>. [Acedido em 31 03 2020].
- [23] O. MINISTÉRIO DO AMBIENTE, “Decreto-Lei n.º 90/2014,” 2014. [Online]. Available: https://www.mobie.pt/assets/mobie/docs/decreto-lei_n_90_2014.pdf. [Acedido em 30 04 2020].
- [24] L. Energy, “Tipos de carregamentos para veículos elétricos,” 2020. [Online]. Available: <https://www.lugenergy.pt/tipos-de-carregamento-4modos/>.

Anexo A. Software PVGIS

Este anexo permite observar mais ao pormenor os dados necessários para a simulação dos cenários no software PVGIS.

The screenshot displays the PVGIS software interface. At the top, there is a navigation menu with options: Casa, Ferramentas, Transferências, Documentação, and Contate-Nos. The main area features a world map with a color-coded elevation scale. The map shows a selected location in the Atlantic Ocean, with coordinates 38,046, -5,003. Below the map, there are input fields for 'Endereço', 'Ex. Ispira, Itália', 'Lat / Lon', and 'Por exemp:'. A scale bar indicates 2000 km. On the right side, there are buttons for 'Brasil' and 'EU'. The bottom panel contains simulation parameters:

- Cursor:** 38,046, -5,003
- Use sombras de terreno:** Horizonte calculado
- Selecionado:** Seleccione a localização! Carregar arquivo horizonte
- Elevação (m):** Escolher ficheiro
- Formato de saída:** Nenhum ficheiro selecionado
- DESEMPENHO DE TRACKING PV**
- TRACKING PV:** Banco de dados de radiação solar *
- OFF-GRID:** Tecnologia PV * Silício cristalino
- DAOS MENSIS:** Potência PV de pico instalada [kWp] * 1
- DAOS DIÁRIOS:** Perda do sistema [%] * 14
- DAOS DA HORA:** Eixo vertical Declive [°] (0-9) Otimize
- Eixo inclinado Declive [°] (0-9) Optimize
- Dois eixos
- TMY

At the bottom, there are buttons for 'Visualize os resultados', 'csv', and 'json'.