



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

**Estudo de um sistema fotovoltaico integrado numa
autocaravana**

Rodrigo Manuel Farinha Vasconcelos

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente:

Doutor Gonçalo Nuno De Oliveira Duarte

Vogais:

Doutor Miguel Centeno Da Costa Ferreira Brito

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

dezembro de 2023



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

**Estudo de um sistema fotovoltaico integrado numa
autocaravana**

Rodrigo Manuel Farinha Vasconcelos

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente:

Doutor Gonçalo Nuno De Oliveira Duarte

Vogais:

Doutor Miguel Centeno Da Costa Ferreira Brito

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

dezembro de 2023

Resumo

As recentes melhorias tecnológicas e a redução de custos nos sistemas de aproveitamento solar fotovoltaico, tornaram estes sistemas vantajosos e alvo de interesse. Diversos estudos têm sido feitos a diversas escalas e para diferentes localizações, mas são essencialmente em locais fixos.

Esta dissertação estudou a viabilidade de equipar uma autocaravana com um sistema fotovoltaico de geração de energia isolado da rede, de maneira a haver uma produção independente da rede de energia elétrica. Durante a realização do estudo foi tida em conta a mudança de coordenadas do sistema, que ao contrário dos habituais sistemas fotovoltaicos, é móvel, e, portanto, a radiação para além de depender da época do ano também dependerá da localização do sistema.

Para comprovar o benefício desta aplicação numa autocaravana, foram definidas duas rotas sujeitas a alterações de condições (radiação e temperatura). Uma rota sendo menos produtiva de sul ao norte da Europa, e outra que permanece a sul da Europa. Ao mesmo tempo foi estabelecido um consumo diário, que com o auxílio dos gráficos apresentados neste trabalho, que mostram a energia armazenada nas baterias, foi possível observar a variação de energia armazenada ao longo do percurso. Na rota que varia do sul a norte da Europa haverá outro estudo, que avaliará se existe vantagens em haver produção durante o percurso entre cidades.

Com os resultados obtidos, pode concluir-se que esta implementação é uma opção viável, uma vez que a produção de energia elétrica conseguida com os painéis fotovoltaicos foi suficiente para colmatar os consumos considerados como referência.

Na análise económica foi feito um estudo partindo do princípio de que quando a caravana não está em utilização o sistema fotovoltaico continua em utilização em um local fixo, de onde se verifica que o retorno do investimento inicial não ocorrerá.

Palavras-chave: Energia solar, Células e módulos fotovoltaicos, Sistemas fotovoltaicos autónomos, Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, Autocaravana.

Abstract

The recent technological improvement and the reduction of costs of the photovoltaic solar systems exploitation made these systems advantageous and target of interest. Many studies have been made at different scales and for different locations but are essentially made at fixed locations.

This work studied the viability of equipping a motorhome with a photovoltaic energy generation system, to have production independent of the electric energy grid. During the realization of the study, the changes of the coordinate system was considered, unlike the habitual photovoltaic systems, that are movable, and therefore the radiation beyond depending on the season of the year, also will depend on the system localization.

To prove the benefit of this application on a motorhome, it was defined two routes subject to alterations of conditions (radiation and temperature). One route being less productive from south to north of Europe, and another that remains in the south of Europe. At the same time, it was established a daily consumption, that with the graphs presented on this work, it was possible to observe the stored energy variation, along the way. In the route that varies from south to north of Europe there will be another study, that evaluates if there are any advantages in having production during the route between cities.

With the obtained results, it is possible to conclude that this implementation is a viable option, since that with the electric energy produced achieved with the photovoltaic panels, it was enough to bridge the consumption considered as reference.

In the economics analysis, it was done a study starting from the beginning that when the motorhome its not being used the photovoltaic system continues being used in a fixed local, from where is verified that the return of initial investment will not occur.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic cells and modules, Stand-alone photovoltaic systems, Sizing of photovoltaic systems, Motorhome.

Agradecimentos

Queria agradecer a todos os que me acompanharam durante este percurso académico, de onde obtive os conhecimentos para poder realizar este trabalho.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Doutor Nuno Domingues e Prof. Doutor Mário Mendes, que me indicaram o caminho a seguir.

Agradeço especial aos meus pais e aos meus amigos pelo apoio, incentivo, paciência e compreensão.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	i
Agradecimentos	ii
Índice de figuras	vi
Índice de tabelas	vii
Simbologia.....	viii
Acrónimos	ix
Capítulo 1: Introdução	1
1.1. Motivação para este trabalho	3
1.2. Objetivos do trabalho.....	4
1.3. Estrutura do documento	4
Capítulo 2: Estado de arte.....	5
2.1. Energia solar	5
2.2. Radiação solar.....	5
2.3. Posição da terra em relação ao Sol	6
2.4. Sistemas fotovoltaicos	8
2.4.1. Módulos fotovoltaicos.....	9
2.4.2. Inversores	10
2.4.3. Baterias.....	10
2.4.4. Controlador de carga	10
2.5. Células fotovoltaicas.....	11
2.6. Associação de painéis fotovoltaicos	14
2.6.1. Associação em série	15
2.6.2. Associação em paralelo	16
2.6.3. Associação mista.....	17
2.7. Sistema fotovoltaico conectados à rede e isolados da rede.....	17
2.7.1. Sistema fotovoltaico conectado à rede (On Grid)	17
2.7.2. Sistema fotovoltaico isolado (Off Grid).....	18
2.8. Modelo matemático da célula fotovoltaica de um díodo	18
2.9. Curvas características I-V e P-V.....	20
2.10. Fatores que afetam o rendimento dos painéis	21
2.11. Díodos de Bypass e Díodos de Bloqueio.....	24
2.12. Seguidores solares.....	25
2.13.1. Tipos de seguidor.....	26

2.13.1.1. Seguidor passivo	26
2.13.1.2. Seguidor ativo	27
2.14.1. Sistema de controlo de seguidores de painéis solares.....	31
2.14.2. Seguimento com foto-sensores.....	32
2.14.3. Seguimento com visão artificial.....	33
2.14.4. Seguimento sem sensores (algoritmo).....	33
Capítulo 3: Metodologia.....	35
3.1. Dedução das curvas características de um painel	37
3.2. Cálculo das necessidades energéticas	39
3.3. Dimensionamento de bateria.....	40
3.4. Dimensionamento de controlo de carga.....	41
3.5. Dimensionamento do inversor	41
Capítulo 4: Casos de estudo	43
4.1. Primeiro caso de estudo	43
4.1.1. Criação de rota	43
4.1.2. Valores de radiação, temperatura	44
4.1.3. Tempos de viagem	46
4.1.4. Cálculo das necessidades energéticas do sistema	48
4.1.5. Dedução das curvas características de um painel em Excel.....	49
4.1.6. Dimensionamento do Painel.....	50
4.1.7. Dimensionamento de bateria (pela produção).....	53
4.1.8. Dimensionamento de bateria (pelo consumo).....	54
4.1.9. Dimensionamento de controlador de carga.....	55
4.1.10. Dimensionamento do inversor	55
4.2. Segundo caso de estudo	56
4.2.1. Concessão da rota.....	57
4.2.2. Valores de Radiação e temperatura.....	57
4.2.3. Cálculo das necessidades energéticas do sistema	57
4.2.4. Dimensionamento do Painel.....	57
Capítulo 5: Análise económica	61
5.1. Método de análise da viabilidade económica	61
5.1.1. Payback simples	61
Capítulo 6: Conclusões e recomendações para trabalhos futuros.....	67
Referências	69

Índice de figuras

Figura 1: Consumos global de energia [4].....	2
Figura 2: Energia bruta produzida [5]	2
Figura 3: Potencial da energia solar PV na EU [7].....	3
Figura 4: componentes da radiação [9]	6
Figura 5: Exemplificação do movimento de rotação e translação do planeta terra [10] ..	7
Figura 6: Ângulo azimute do Sol [43].	7
Figura 7: Ângulo de elevação do Sol [44].	7
Figura 8: Variação da altura do sol com a mudança da época do ano [11]	8
Figura 9: corte de uma célula fotovoltaica [12].....	9
Figura 11: Valores de <i>E_g</i> de diferentes materiais [13]	11
Figura 12: Repartição espectral da radiação solar e utilização do espectro pelo silício [13]	12
Figura 13: exemplo de uma ligação em série e uma ligação em paralelo [16].....	15
Figura 14: Representação das curvas IV relativas à associação em série [17].....	16
Figura 15: Representação das curvas IV referentes à associação em paralelo [17]	16
Figura 16: Representação das curvas I-V relativas à associação mista [17]	17
Figura 17: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z.[20]	18
Figura 18: Curvas características I-V e P-V de uma célula ou módulo [15].....	20
Figura 19: Impacto do angulo de incidência na corrente [12].....	21
Figura 20: Curva I-U de uma célula de silício monocristalino para várias radiâncias [20]	22
Figura 21: Curva I-U de uma célula de silício monocristalino para várias temperaturas [20]	23
Figura 22: Exemplo ilustrativo da expressão 3.1 [16]	24
Figura 23: Módulo PV com uma célula sombreada, o que resulta no bypass de uma string de 20 células PV [15]	25
Figura 24: Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com díodos de bypass e de fileira [15]	25
Figura 25: Exemplo do funcionamento de um seguidor [22].....	26
Figura 26: Comparação de rendimentos com e sem seguidor solar em um painel [22].	26
Figura 27: seguidor solar passivo [23]	27
Figura 28: Estimativas de energia produzidas por usando cada seguidor de um sistema de 1 KWp [24]	28
Figura 29: Seguidor de eixo horizontal [25].....	29
Figura 30: Seguidor de eixo vertical [24].....	29
Figura 31: Seguidor polar de eixo único [24].....	30
Figura 32: Seguidor de dois eixos [23].....	30
Figura 33: Seguidor de plataforma rotativa de dois eixos [24]	31
Figura 34: - Rendimento das diferentes estruturas solares [12]	31
Figura 35: Controlo em malha aberta [23]	32
Figura 36: Controlo em malha fechada [23].....	32
Figura 37: Foto-sensores com o uso de um colimador [23]	33

Figura 38: Foto-sensor com base inclinada [23]	33
Figura 39: Foto-sensor com placa de sombreamento [23]	33
Figura 40: Exemplo de uma instalação de painéis fotovoltaicos numa autocaravana [29]	35
Figura 41: Variação da curva característica com os aumentos de cada resistência [13] 38	
Figura 42: – Circuito equivalente para o modelo matemático de uma célula com um diodo [15].	39
Figura 43 Mapa do percurso	44
Figura 44: Ângulos de inclinação ótimos de sistemas PV	45
Figura 45 Dados introduzidos no programa PVGIS Online Tool (Madrid).....	45
Figura 46: resultados gráficos dos valores inseridos (Figura 45 Dados introduzidos no programa PVGIS Online Tool (Madrid).	46
Figura 47; Tempo de viagem (Lisboa-Madrid)	47
Figura 48: Curva característica obtida para o painel selecionado	50
Figura 49: Teste com 2 painéis e com produção de energia em andamento	51
Figura 50: Teste com 3 painéis e com produção de energia em andamento	52
Figura 51: Teste com 3 painéis e sem produção de energia em andamento.....	52
Figura 52: Teste com 4 painéis e sem produção de energia em andamento.....	53
Figura 53: Capacidade de descargas fornecidas pelo catálogo [32]	54
Figura 54: Indicações dos momentos em que a autocaravana se encontrava em Baiona, Paris e Berlim.	57
Figura 55: Variação da energia ao longo da nova rota, com 3 módulos fotovoltaicos ..	58
Figura 56: Variação da energia ao longo da nova rota, com 2 módulos fotovoltaicos ..	59

Índice de tabelas

Tabela 1: diagrama de bandas de energia de matérias semicondutores [13].....	12
Tabela 2; tabela de tempos de percurso	47
Tabela 3: Consumos diários	48
Tabela 4 Parâmetros do módulo PV	49
Tabela 5: Comparação de curvas	50
Tabela 6: Cálculo da potência total	55
Tabela 7: Valores de venda de energia [38]	63
Tabela 8: dados base da análise financeira	64
Tabela 9: valores obtidos do estudo financeiro	65

Simbologia

AC	Corrente Alternada
CB	Capacidade do banco de bateria para o regime de descarga
CBI	Capacidade do banco de bateria para o regime de descarga
DC	Corrente Contínua
D	Despesas periódicas
E_{gap}	band gap do material semiconductor
G	Irradiação
$I_{inicial}$	Investimento inicial
I_S	Corrente Fotoelétrica da célula
I_D	Corrente unidirecional
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_0	Corrente inversa máxima de saturação do díodo
I_{ph}	Corrente Fotoelétrica do módulo
k	constante de Boltzman
L_m	Energia ativa máxima necessária diariamente
m	Fator de idealidade do díodo
N	Número de dias em autonomia
P_d	Poder de descarga
$P_{(W)}$	Valor de potência consumida pelas cargas
P_{inv}	Potencia do inversor
q	Carga elétrica do eletrão
R	Receita periódicas
T	Temperatura absoluta da célula
T_a	Temperatura ambiente
T	Temperatura absoluta
t_R	Tempo de retorno de investimento
V_t	Potencial térmico
V	Tensão nos terminais da célula/módulo
V_{sist}	Tensão do sistema
α_i	Coefficiente de variação de corrente

α_V

Coefficiente de variação de tensão

n_s

Número de células

Acrónimos

DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
PV	Fotovoltaica
EPIA	Estudo Prévio de Impacto Ambiental
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
Google Maps	serviço de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite
MPPT	Maximum Power point tracking
STC	Condições de teste padrão
AM	Massa de ar
SC	Curto-circuito
OC	Circuito aberto
MPP	Ponto de potência máxima
NOCT	Temperatura nominal da célula

Capítulo 1: Introdução

Com o aumento do consumo de energia, que se evidencia na Figura 1, é preciso dar resposta a esta necessidade, através do aumento da produção. Através das Figura 1 e Figura 2, verifica-se que, de momento, a produção de energia é feita principalmente por via de fontes de energia não renováveis poluentes e limitadas, devem ser substituídas por outras.

A utilização de fontes de energia não renovável começou com a revolução industrial que se iniciou em meados do século XVIII na Inglaterra, desde então a sua utilização veio a aumentar.

Uma das formas de substituir estas fontes energéticas não renováveis é utilizar energias renováveis onde se enquadra a energia solar fotovoltaica, uma vez que o sol é uma fonte de energia inesgotável e a sua exploração não tem produção de resíduos poluentes [1]. Esta tecnologia tem sofrido avanços que levaram ao aumento do seu interesse.

Evidência desse desenvolvimento é o investimento por parte dos investimentos privado em parques solares. As construções de grandes parques de geração de energia impulsionam o desenvolvimento de tecnologias de menor custo para implementação de fontes renováveis de energia em residências ou locais de menor dimensão [2]. Por outro lado, pode auxiliar outras tecnologias como a produção do hidrogénio em que o fotovoltaico é a “fonte de energia” e o hidrogénio o “transportador”.

Segundo a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), em Portugal a produção de energia solar aumentou de 627 GWh para 4251 GWh de 2014 para 2023 [3].

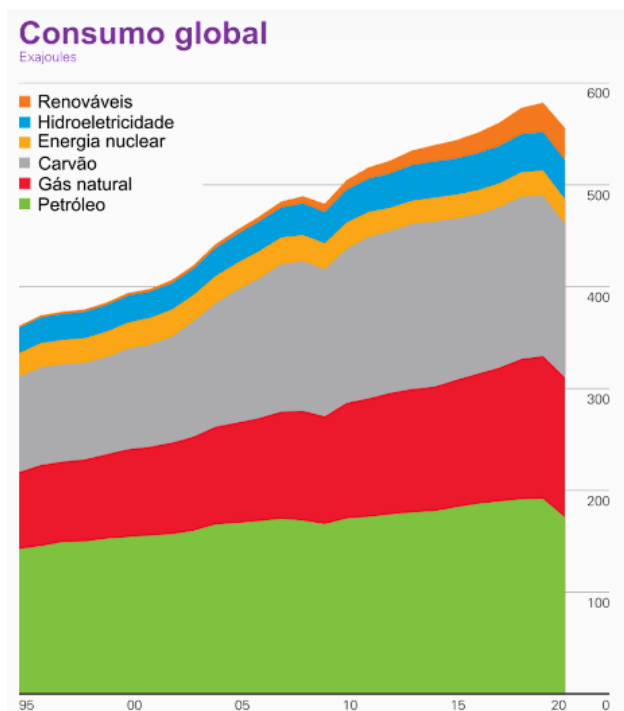


Figura 1: Consumos global de energia [4]

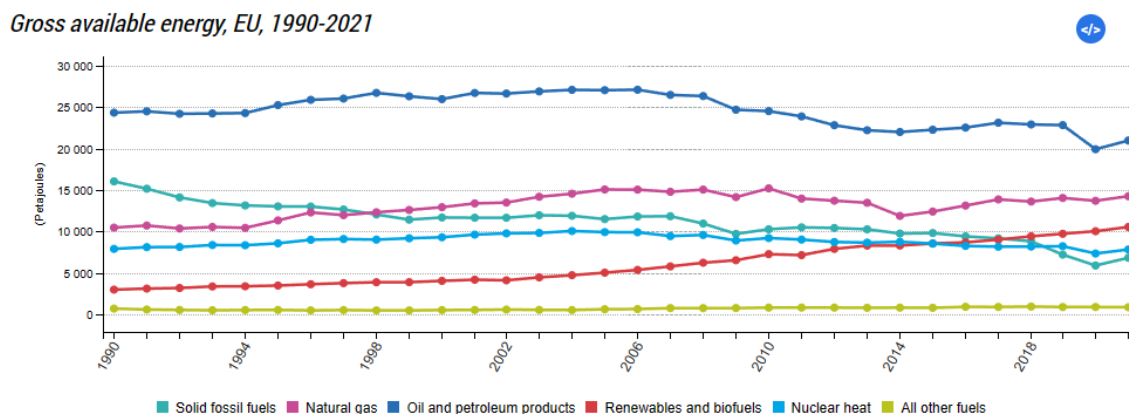


Figura 2: Energia bruta produzida [5]

Portugal é um dos países da Europa com melhores condições para aproveitamento de energia solar uma vez que dispõe de um número anual de horas de sol variável entre 2200 e 3000, no continente, e entre 1700 e 2200 nos Açores e Madeira, conforme se pode verificar na Figura 3 [6].

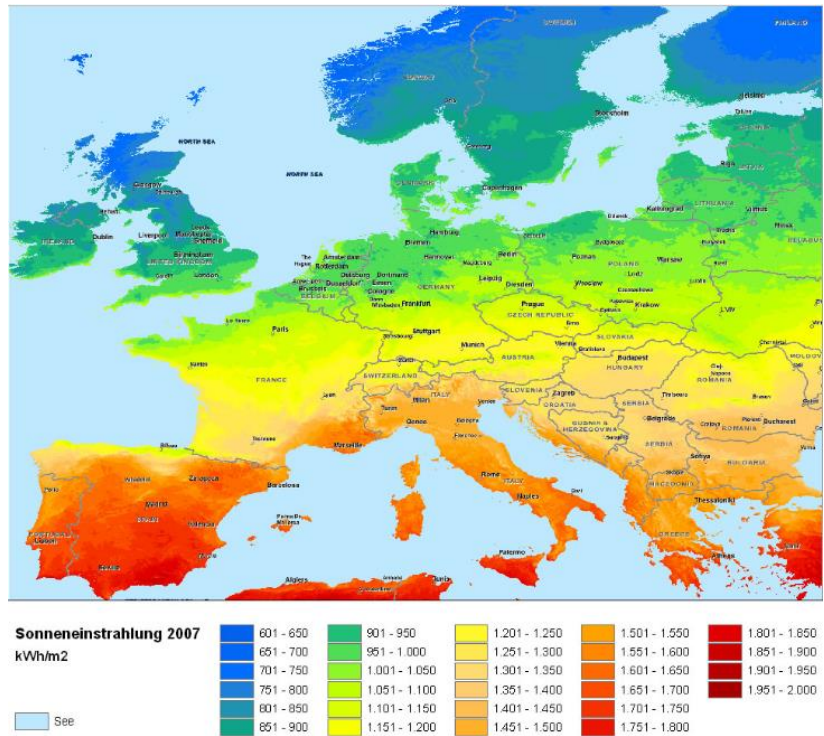


Figura 3: Potencial da energia solar PV na EU [7]

1.1. Motivação para este trabalho

Ao longo dos últimos anos, as energias renováveis têm sido objeto de pesquisa e desenvolvimento, para se alcançar a sustentabilidade da sociedade e sem ser prejudicial para o meio ambiente.

Neste contexto, um dos motivos da escolha deste tema é o incentivo para a diminuição da utilização de fontes de energia não renováveis, mostrando que é possível a utilização desta tecnologia aplicada a autocaravanas.

A instalação de painéis fotovoltaicos numa autocaravana, além de permitir o uso de energia de fontes externas, podendo dispensar-se o acesso à rede elétrica, aumentando a autonomia e mobilidade da autocaravana, o que trará mais opções para quem quer viajar para zonas sem acesso à rede elétrica.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é fazer o estudo sobre a instalação de painéis fotovoltaicos numa autocaravana e a sua produção de energia elétrica durante determinados percursos, promovendo desta forma as energias renováveis e a redução da emissão de gases para a atmosfera.

Assim, esta dissertação teve como objetivos:

- Avaliar a utilização dos painéis solares fotovoltaicos como fornecedores de energia elétrica para uma autocaravana;
- Determinar a viabilidade económica dos painéis solares fotovoltaicos numa autocaravana;

1.3. Estrutura do documento

Esta tese é constituída por uma introdução, estado de arte, metodologia, caso de estudo, análise financeira e conclusões. O primeiro capítulo: introdução é uma breve explicação dos motivos do aumento do investimento desta tecnologia, e as suas vantagens em relação às fontes de energia não renováveis. No segundo capítulo: estado de arte, está uma pesquisa e uma explicação de como esta tecnologia é implementada, no que ela consiste, e como ela funciona, assim como alguns problemas e soluções associadas. No terceiro capítulo: metodologia, há uma explicação de como são feitos os cálculos. No quarto capítulo: caso de estudo, aplica-se o explicado no terceiro capítulo assim como uma seleção dos equipamentos. No quinto capítulo: análise financeira, baseada em valores reais e projeções de preços futuros. Por último no sexto capítulo: conclusões, apresenta-se conclusões e trabalhos que se poderão fazer futuramente.

Capítulo 2: Estado de arte

2.1. Energia solar

A energia solar é uma forma de energia renovável obtida a partir do sol. É uma fonte de energia limpa e sustentável, de onde durante a sua exploração provêm gases de efeito estufa. A energia solar pode ser usada para a produção de eletricidade por meio de painéis solares ou energia térmica (aquecimento de água).

A energia solar existe em abundância e é de fácil acesso, não sendo exigente com a localização dos equipamentos, o que pode ser um problema com outro tipo de energias renováveis como a eólica e hídrica. Podendo ainda ser viável em grande escala em parque solares ou em pequena escala para uso doméstico.

As tecnologias usadas no funcionamento de sistemas fotovoltaicos têm sofrido melhorias constantes, trazendo consigo o aumento da sua eficiência, processos de produção mais eficazes, e tendendo a baixar os custos de manutenção. Um EPIA (Estudo Prévio de Impacto Ambiental) feito pela Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica e pelo Greenpeace em 2010 demonstrou uma descida de 63% do preço desta tecnologia até 2020, continuando a decrescer até 2050, mas a um ritmo muito inferior (77% em relação a 2010) [8]. Atualmente, desde 2010 que preços dos painéis solares fotovoltaicos baixaram aproximadamente 90%,

2.2. Radiação solar

A radiação é uma forma de transferência de calor de um corpo mais quente para outro menos quente, sem a necessidade de um meio de propagação entre eles.

Deste modo, a radiação solar é a energia emitida pelo sol na forma de ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda, onde se inclui a luz visível, infravermelhos e ultravioletas. Muito antes da descoberta de uma forma de converter a radiação em energia elétrica, esta já era importante para obtenção de calor, processo de fotossíntese, assim como outros fenómenos naturais.

O sol é a fonte desta energia, que irá ser captada pelos painéis fotovoltaicos, consoante a posição geográfica a captura de energia irá variar. A quantidade de energia que alcança a superfície terrestre é insignificante em relação à que é emitida pelo sol por questões de tamanho do nosso planeta e a distância a que este se encontra da fonte.

Devido a fenómenos como reflexão, absorção (devido aos gases da atmosfera como: ozono, vapor de água, oxigénio, dióxido de carbono) e dispersão (devido a partículas de pó, poluição e a própria composição da atmosfera) a nossa atmosfera reduz esta radiação. O nível de radiação que atinge a superfície do planeta é 1000 W/m^2 ao meio-dia e em boas condições meteorológicas.

A radiação que incide na terra será dividida em três categorias:

- Direta: raios solares recebidos diretamente do disco solar, sem sofrer nenhum tipo de dispersão ou absorção pelo meio ambiente;
- Difusa: originada quando os raios são dispersos na atmosfera devido a partículas no ar, vapor de água, poeiras, entre outros;
- Refletida: proveniente da reflexão em áreas e objetos circundantes.

Na Figura 4 está uma exemplificação das diferentes componentes da radiação.

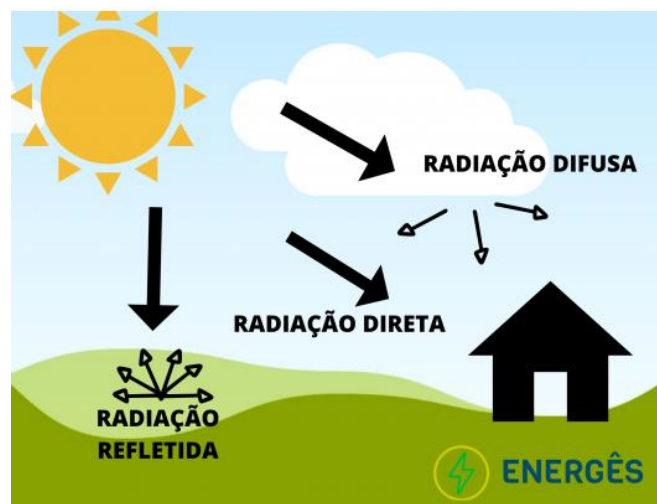


Figura 4: componentes da radiação [9]

2.3. Posição da terra em relação ao Sol

O planeta terra tem um movimento de rotação e de translação, o eixo de rotação da terra também vai variando.

O movimento de translação é o movimento que o planeta faz em redor do sol, neste movimento o planeta faz uma orbita elíptica em torno do sol, demorando em torno de 365 dias e 6 horas, ao que se chama de ano.

O movimento de rotação é um movimento que o planeta faz em torno do seu eixo. Devido à inclinação deste eixo como demonstrado na Figura 5, consoante as coordenadas, o tempo a que se está sujeito à radiação solar altera, ou seja, há uma alteração da quantidade de horas de dia (com luz) ao longo do ano.

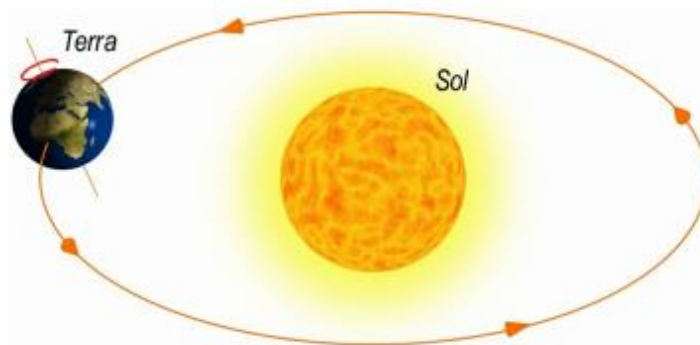


Figura 5: Exemplificação do movimento de rotação e translação do planeta terra [10]

A determinação da posição do sol é fundamental para a posição de instalação ideal. Por isso é importante definir o ângulo de elevação (Figura 7) assim como o ângulo de azimute (Figura 6).

O ângulo de azimute é formado entre a direção Norte e a projeção da linha Sol-Terra, sobre a horizontal.

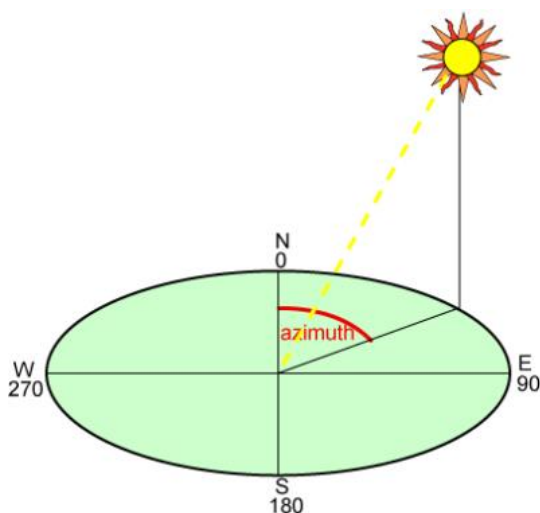


Figura 6: Ângulo azimute do Sol [43].

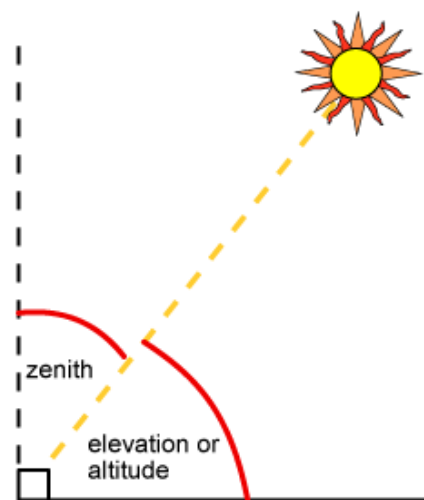


Figura 7: Ângulo de elevação do Sol [44].

A altura ou elevação é medida entre o plano horizontal e os raios solares, que será complementar ao ângulo zenital, que está compreendido entre a vertical (zênite) e os raios solares.

Assim fatores como a latitude, mês e ano vão influenciar a melhor posição de montagem do painel como mostra a Figura 8.

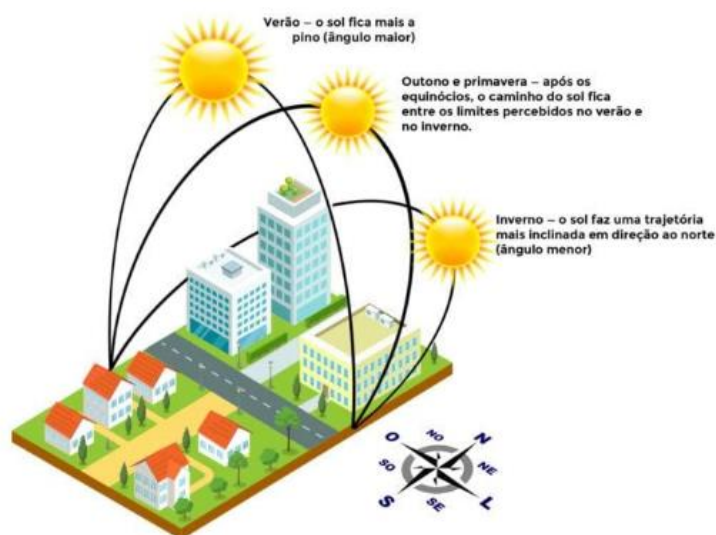


Figura 8:Variação da altura do sol com a mudança da época do ano [11]

2.4. Sistemas fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são equipamentos constituídos por células fotovoltaicas ligadas em série que permitem obter energia através da radiação. Estas células são formadas por duas camadas de semicondutores como o silício cristalino ou arsenito de gálio, onde é usado o efeito fotovoltaico, e estão protegidas por um material condutor térmico de maneira a dissipar o calor gerado.

Como o silício puro é um mau condutor elétrico, visto não ter elétrons livres, usa-se um processo chamado de “dopagem”, onde se introduz outros elementos para alterar essa propriedade.

De acordo com o material usado na dopagem, sendo usado o fósforo para obter silício tipo N, ou seja, ter carga negativa, ou usando boro para obter silício tipo P, ou seja, ter carga positiva.

Cada camada anteriormente referida é composta por um destes materiais, ao serem atingidas pelos fótons, os elétrons que as constituem são excitados e conduzidos externamente da camada N em direção à camada P como mostrado na seguinte Figura 9. A intensidade da corrente será proporcional de acordo com a luz incidente.

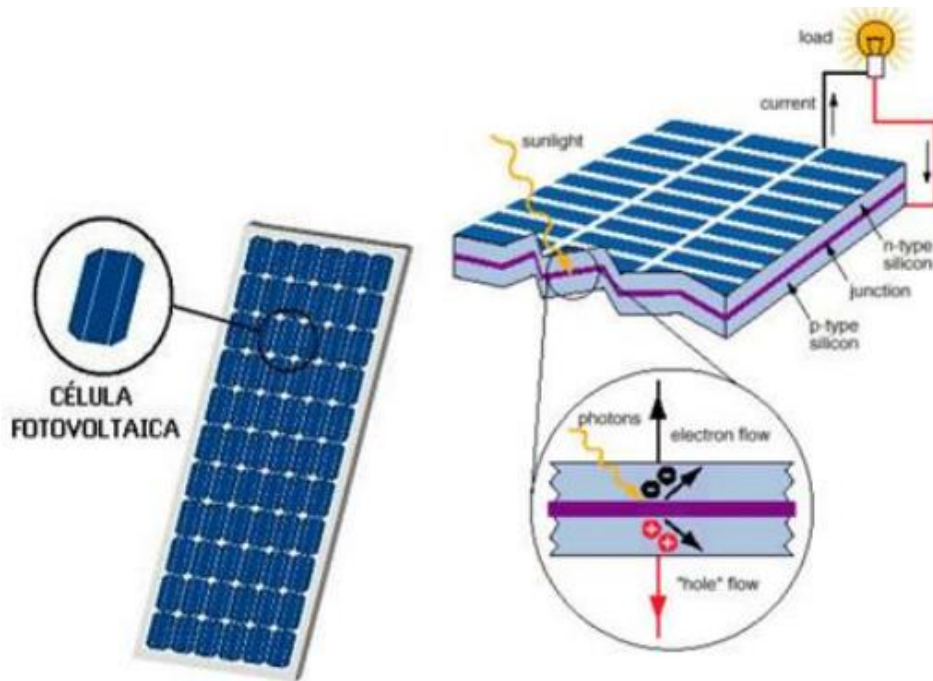


Figura 9: corte de uma célula fotovoltaica [12]

Normalmente os equipamentos comuns aos sistemas fotovoltaicos são:

- Módulo Fotovoltaico;
- Bateria;
- Controlador de Carga;
- Inversor;
- Equipamentos Complementares.

2.4.1. Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas ligadas em série formando um módulo fotovoltaico.

Os painéis fotovoltaicos devem ser instalados em lugares que esteja sujeito à radiação, como por exemplo telhados, fachadas de prédios, ou em áreas abertas como campos ou

terrenos. Para além de não produzirem poluentes, têm uma longa vida útil e não exigem muita manutenção.

2.4.2. Inversores

O objetivo dos inversores é transformar a corrente contínua produzida pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada, para ser fornecida para o consumidor [2].

Dependendo dos equipamentos a alimentar pode-se optar por inversores de onda modificada ou inversores de onda pura.

2.4.3. Baterias

A desvantagem dos sistemas isolados em relação aos sistemas conectados à rede, é a falta de fornecimento contínuo, de maneira a combater esta desvantagem as baterias são usadas para atender as necessidades do consumidor em períodos em que não há produção de energia.

2.4.4. Controlador de carga

Para o controlo de sistemas existe um controlador de carga que permite uma otimização do uso do banco de baterias e do seu carregamento. O controlador de carga possui díodos de bloqueio que impedem a passagem da corrente no sentido inverso, de maneira que as baterias nunca descarreguem para os painéis [13].

No caso de sobrecargas, irá depender se são inversores ligados em série ou em paralelo. Em controladores ligados em paralelo existem transístores que são responsáveis por dissipar o excesso de energia. Por outro lado, os controladores ligados em série cortam a ligação entre os painéis e as baterias [13].

2.5. Células fotovoltaicas

A base de funcionamento desta tecnologia é o efeito fotovoltaico, efeito que se baseia na transferência de energia dos fótons da radiação solar incidente para os elétrons do material.

As células fotovoltaicas são compostas por materiais semicondutores, de maneira a utilizar este fenómeno na produção de energia especialmente quando a sua estrutura é alterada com o processo de dopagem.

A dopagem irá produzir duas zonas com diferentes potenciais, a camada tipo P, de carga positiva, e camada tipo N, de camada negativa.

Na Figura 10 está um diagrama de bandas de energia de um material semiconductor. Com a energia da radiação solar incidente no material, os elétrons da banda de valência (nível inferior de energia E_v) são transferidos para a banda condutora (nível superior E_c), dando origem aos pares elétrons-lacuna [13].

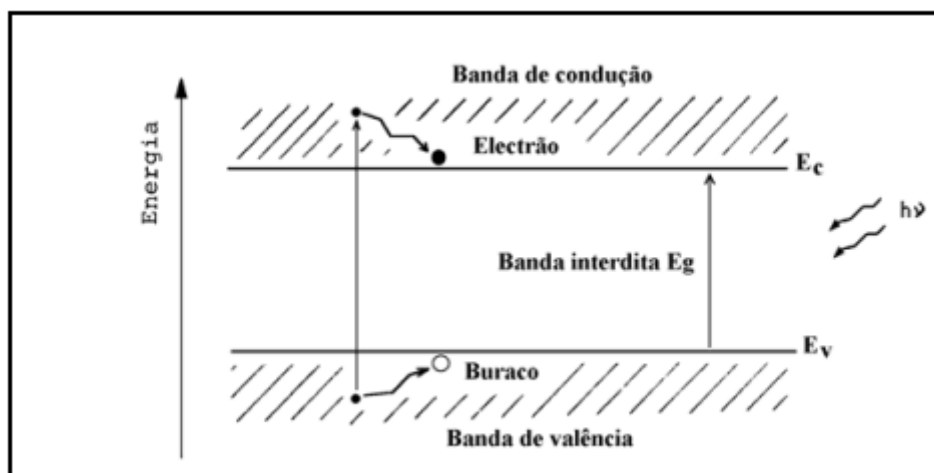


Figura 10: diagrama de bandas de energia de matérias semicondutores [13]

A diferença de energia entre o nível superior e inferior de energia chama-se energia da banda proibida ou hiato (E_{gap}). O valor da energia de banda proibida é uma característica de cada material. Na Tabela 1 estão alguns exemplos de E_{gap} de alguns materiais. Sendo $h\nu$ a energia de um fóton, em que $h = 6,62606885 \times 10^{-34} J.s$ (constante de planck) e ν a frequência da radiação.

Tabela 1: Valores de E_{gab} de diferentes materiais diagrama de bandas de energia de matérias semicondutores

[13]

Material Semicondutor	$E_g(\text{eV})$
Ge	0.7
Si	1.12
GaAs	1.43
a-Si:H	>1.5
CdS	2.53

Após a incidência da radiação o fóton pode ser absorvido, mas apenas originará um par de elétron-lacuna se a sua energia for superior a E_{gab} , o que implica a existência de uma frequência mínima, para a absorção de luz. Devido à relação entre comprimento de onda (λ), frequência (ν) e velocidade da luz (c), pela expressão ($\nu = \frac{c}{\lambda}$), haverá um comprimento de onda a partir do qual não há absorção de luz. A esse comprimento chama-se comprimento de onda de corte λ_c , onde se pode calcular pela seguinte expressão:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_{gab}} = \frac{1,24}{E_{gab}} \quad 1$$

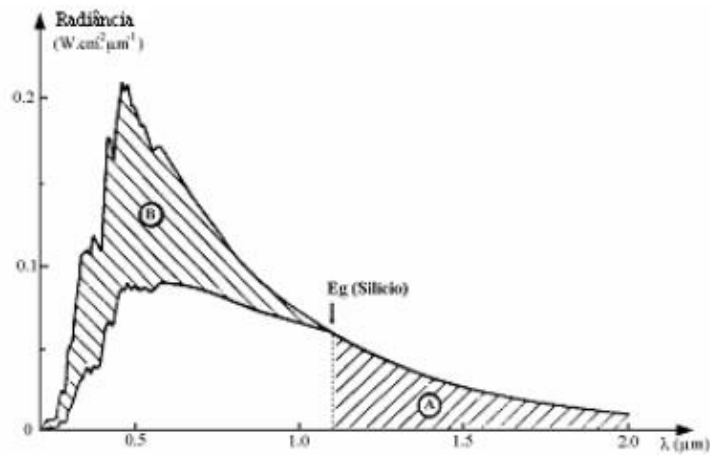


Figura 11: Repartição espectral da radiação solar e utilização do espectro pelo silício [13]

Na Figura 11 onde está exemplificado o comportamento do silício, o comprimento de onda de corte é $1,1\mu\text{m}$. A zona A é a faixa que não é utilizada por exceder o comprimento de onda de corte. A zona B é a energia dissipada em forma de calor por exceder o E_{gap} .

Independentemente de o fóton ter energia superior ou igual a E_{gap} , a energia gerada será sempre igual.

As células vão sempre ter diferenças entre si o que faz com que quando são montadas em série a corrente esteja sempre limitada à menor corrente de curto-circuito das células em série, o mesmo ocorre com a associação em série dos módulos [13].

De seguida são apresentados alguns tipos de células fotovoltaicas existentes:

- Células fotovoltaicas monocristalinas

São células constituídas por um único cristal de silício. Estas são as células de Si cristalino que apresentam a maior eficiência de conversão de radiação solar em eletricidade em comparação com outros tipos de células.

Foram o primeiro tipo de célula a aparecer, o seu rendimento é em torno de 20%, chegando a 23% em condições de laboratório.

No entanto na sua produção é necessária grande energia, devido à utilização de materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita [14].

- Células fotovoltaicas policristalinas

O processo de fabrico destas células é parecido ao processo de fabricação das células monocristalinas, mas com menos rigor.

Estas células precisam de menos energia na sua produção, mas têm piores rendimentos comparados com outras, na ordem dos 16% a 17%, conseguindo alcançar em laboratório os 18% [14].

- Células fotovoltaicas de silício amorfo

Ao contrário das células monocristalinas e das policristalinas, a estrutura dos átomos das células de silício amorfo é desorganizada. Estas células têm apresentado vantagem em relação às suas propriedades elétricas e fabrico. A vantagem em relação às propriedades elétricas é de apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível, sendo a maior parte da radiação solar que atinge a superfície da terra concentrada nessa faixa. A vantagem do seu fabrico é o facto de poder ser fabricada a partir da deposição de

diversos tipos de substratos. Devido às suas características mencionadas, o silício amorfo vem se demonstrando uma boa opção para sistemas fotovoltaicos.

Apresentam menos necessidades energéticas na sua produção, mas também os piores rendimentos (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório) [14].

- Células fotovoltaicas disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS)

Na fabricação das células fotovoltaicas disseleneto de cobre índio e gálio o substrato de vidro é inicialmente revestido com uma fina camada de molibdênio.

A camada tipo-P é formada usando a vaporização dos elementos cobre, índio, gálio e selênio numa câmara de vácuo, já para a formação da camada tipo-N é utilizado o óxido de zinco dopado com alumínio.

Estas células não se degradam pela exposição à luz, mas deverão ser robustamente seladas para evitar a degradação do óxido de zinco [15].

- Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

O Telureto de Cádmio é um material que apresenta uma elevada absorção de radiação solar, e um potencial em relação à redução de custos na produção em massa, no entanto, o uso de produtos contaminantes e venenosos é um problema [15].

- Células de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS)

As células de CIS são constituídas por selênio, cobre e índio. É uma célula bastante estável quando sujeito à radiação luminosa. Apresentam problemas quando instalados em ambientes quentes e húmidos. Tem uma boa eficiência sendo o mais eficiente entre as células de película fina, a sua eficiência varia entre os 7% e 12%, em laboratório já foram alcançados 20% de eficiência [15].

- Células com Multijunção (III-V)

Esta célula é constituída por várias camadas de junção PN com diferentes conjuntos de semicondutores. Cada uma com diferentes E_{gab} e absorções espectrais diferentes de forma a absorver o máximo possível do espectro da radiação solar [15].

2.6. Associação de painéis fotovoltaicos

Módulos fotovoltaicos isolados não conseguem satisfazer as atividades domésticas nem industriais, por exemplo um módulo cristalino agrupa normalmente 36, 60, 72 ou 96 células atingindo potências relativamente baixas [15].

Para resolver este problema os painéis podem ser ligados de duas maneiras, ou em paralelo ou em série, conforme se pode observar na Figura 12, dependendo da necessidade do equipamento podendo aumentar a tensão ou a corrente.

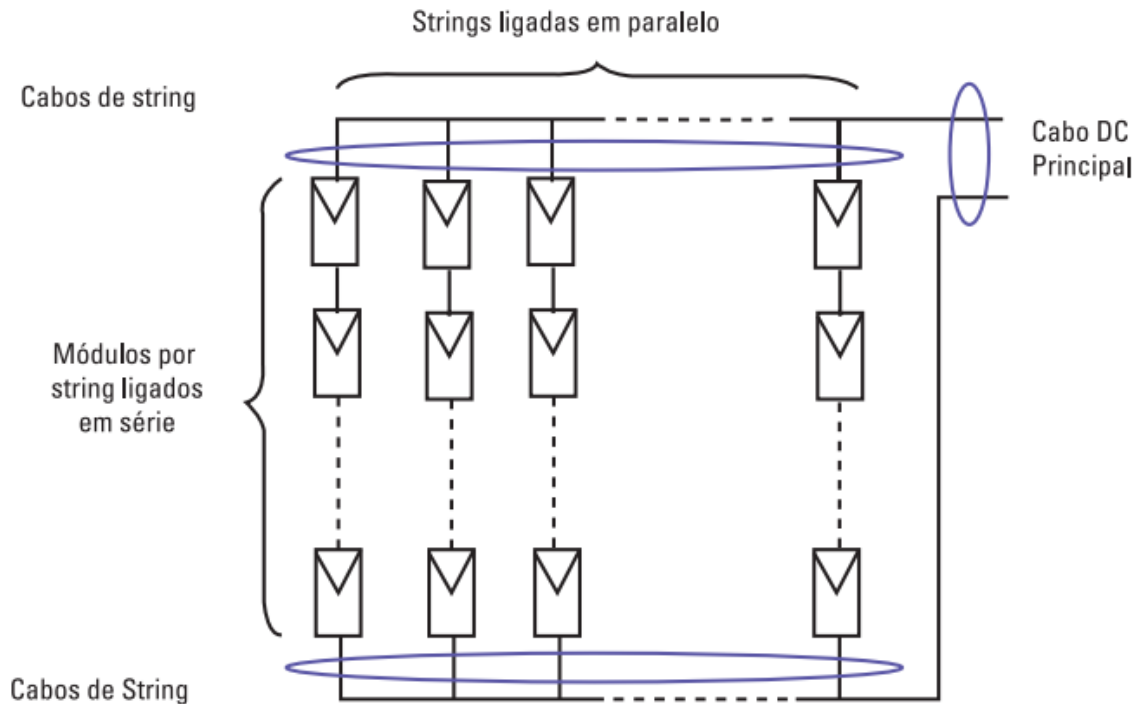


Figura 12: exemplo de uma ligação em série e uma ligação em paralelo [16]

2.6.1. Associação em série

Na associação de módulos PV deverão ser associados módulos do mesmo tipo, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema. A Figura 13 mostra 3 curvas I-V sobrepostas, que demonstram a proporcionalidade entre a corrente e o número de módulos. No caso 2 em que se tem 2 módulos associados em série, a corrente é o dobro do caso 1, e no caso 3 em que se tem 3 módulos associados em série, a corrente é o triplo do caso 1. Nesta situação, a corrente de curto-circuito de qualquer caso se mantém inalterada [17].

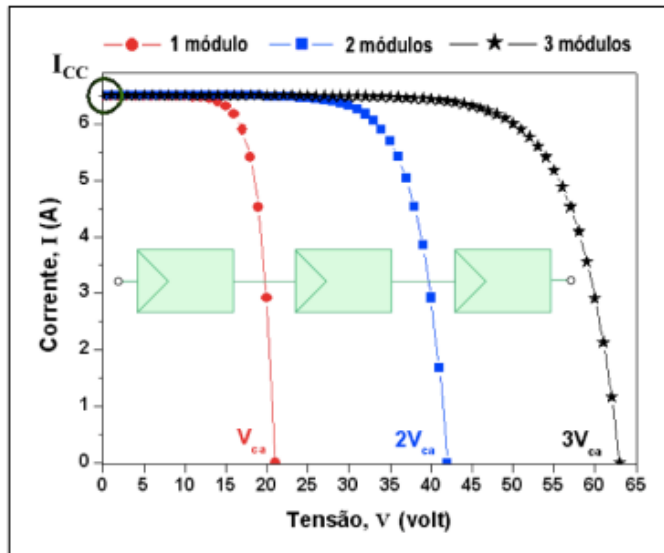


Figura 13: Representação das curvas IV relativas à associação em série [17]

2.6.2. Associação em paralelo

A Figura 14 mostra 3 curvas I-V sobrepostas em que demonstra que a tensão é proporcional ao número de módulos. No caso 2 em que se tem 2 módulos associados em paralelo, a tensão é o dobro do caso 1, e no caso 3 em que se tem 3 módulos associados em paralelo, a tensão é o triplo do caso 1. Nesta situação, a tensão em circuito aberto, em qualquer caso se mantém inalterada [17].

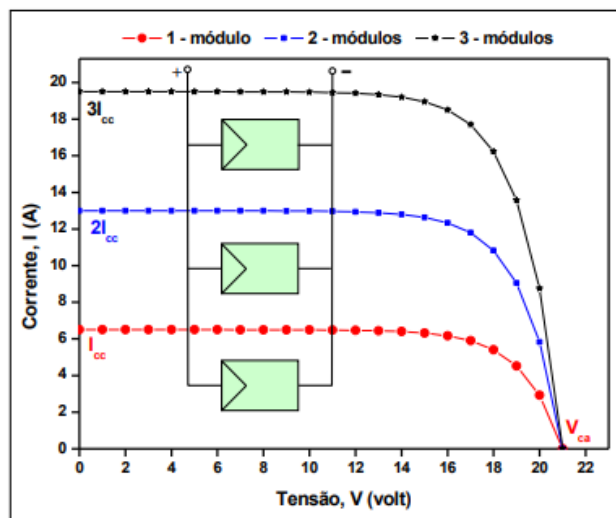


Figura 14: Representação das curvas IV referentes à associação em paralelo [17]

2.6.3. Associação mista

A associação mista apresenta uma configuração que tem várias fileiras em paralelo, e com esta associação, é possível aproveitar os benefícios, tanto das associações paralelas, como das associações em série, como mostra a Figura 15 [17]

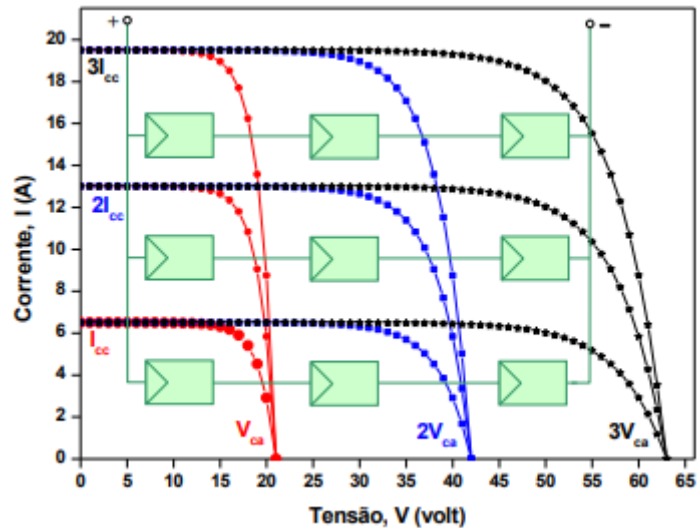


Figura 15: Representação das curvas I-V relativas à associação mista [17]

2.7. Sistema fotovoltaico conectados à rede e isolados da rede

2.7.1. Sistema fotovoltaico conectado à rede (On Grid)

Neste caso, as necessidades do consumidor são satisfeitas pela produção do painel, em caso de não produzir o suficiente é usada energia da rede. Com a vantagem de o excedente poder ser vendido à rede [18].

Este sistema terá os mesmos equipamentos que foram descritos anteriormente, mas com a ressalva de que o contador terá de ser trocado por um bidirecional de modo a evitar que a energia injetada na rede seja cobrada como consumida.

2.7.2. Sistema fotovoltaico isolado (Off Grid)

Neste tipo de sistema, a energia gerada irá diretamente para o consumo. Caso não exista utilização de energia, esta será armazenada em baterias, tornando possível ter energia em períodos de não produção por exemplo durante a noite.

Este sistema é ideal para locais mais isolados e de difícil acesso, mas no caso de não haver condições de produção de energia por longos períodos, é recomendável ter geradores de energia para combater a falta de energia, no caso em que as baterias não satisfaçam todas as necessidades do consumidor [18].

No dimensionamento de um sistema isolado, deve de se ter em consideração [19]:

- O consumo diário, que define a potência dos painéis fotovoltaicos;
- Os equipamentos elétricos ligados em simultâneo, que definem a potência do inversor;
- O período de utilização de energia, que define a capacidade do banco de baterias.

2.8. Modelo matemático da célula fotovoltaica de um díodo

Existe um modelo matemático representado na Figura 16 que ajuda a analisar o comportamento de uma célula fotovoltaica, constituída por uma fonte de corrente e por um díodo ligado em paralelo.

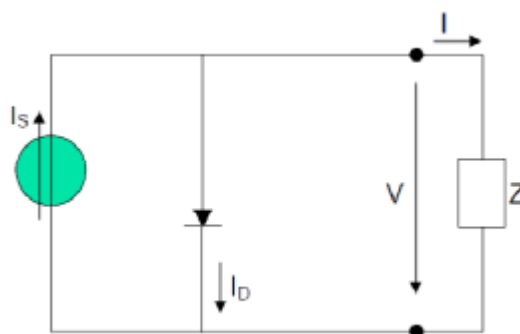


Figura 16: Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z . [20]

A fonte de corrente representa a corrente elétrica gerada em uma célula fotovoltaica, a partir do efeito fotoelétrico, a qual se designa corrente fotoelétrica (I_S). O díodo representa

a junção p-n, que é atravessado por uma corrente unidirecional (I_D) esta corrente existe mesmo sem a presença da luz, que depende da tensão aos terminais da célula (V).

A corrente I_D que se fecha através do díodo é calculada através da equação 2.

I_0 é a corrente inversa máxima de saturação do díodo;

V é a tensão aos terminais da célula;

m é o fator de idealidade do díodo (díodo ideal: $m = 1$; díodo real: $m > 1$);

V_t é designado por potencial térmico e dada pela equação 3.

$$V_t = \frac{K \times T}{q} \quad 3$$

T é a temperatura absoluta da célula em K ($0^\circ\text{C} = 273,16^\circ\text{K}$);

q é a carga elétrica do eletrão ($q = 1,6 \times 10^{-19}\text{C}$);

k é a constante de Boltzman ($1,3806503 \times 10^{-23}\text{J/K}$);

Pelas leis de Kirchhoff a corrente do circuito (I) é calculada pela seguinte equação (4).

$$I = I_S - I_d = I_S - I_0 \times \left(e^{\frac{V}{mV_t}} - 1 \right) \quad 4$$

Para calcular I_0 é usada a seguinte expressão (5).

$$I_0 = C \times T^3 \times e^{-\frac{E_{gab}}{k \times T}} \quad 5$$

E_{gab} é a band gap do material semiconductor, (silício cristalino $E_{gap} = 1,124\text{eV} = 1,8 \times 10^{-19}\text{J}$ e para o silício amorfo $E_{gap} = 1,7\text{eV} = 2.72370016 \times 10^{-19}\text{J}$)

C é o coeficiente de temperatura A/K^3 .

Este é o modelo matemático mais simples que consegue descrever o comportamento de uma célula fotovoltaica.

2.9. Curvas características I-V e P-V

Em geral os fabricantes de painéis fotovoltaicos disponibilizam as Curvas características I-V, estas que descrevem a relação entre a corrente que flui através do componente e a tensão aplicada nele, sendo importante para averiguar a resistência ou condutividade do componente a diferentes valores de tensão. Existem diferentes curvas para cada par de condições de irradiação e temperatura [21].

Estas curvas são obtidas em condições de teste padrão (STC), isto é, radiância incidente de 1000 W/m^2 , temperatura das células PV de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e um espectro de luz com uma massa de ar $AM=1,5$, onde os pontos principais são:

- Ponto de curto-circuito (SC), tem tensão zero aos terminais do módulo PV e por uma corrente de curto-circuito (I_{SC});
- Ponto de circuito-aberto (OC), tem uma corrente zero aos terminais do módulo PV e por uma tensão de circuito-aberto (V_{OC});
- Ponto de potência máxima (MPP), que é o máximo que o módulo PV pode fornecer em condições de funcionamento temporárias.

A curva I-V feita através da medição dos pares de dados corrente e tensão variando a carga aos terminais. Assim a curva P-V é retirada pelo produto dos pares de corrente e de tensão medidos, a Figura 17 tem um exemplo das duas curvas.

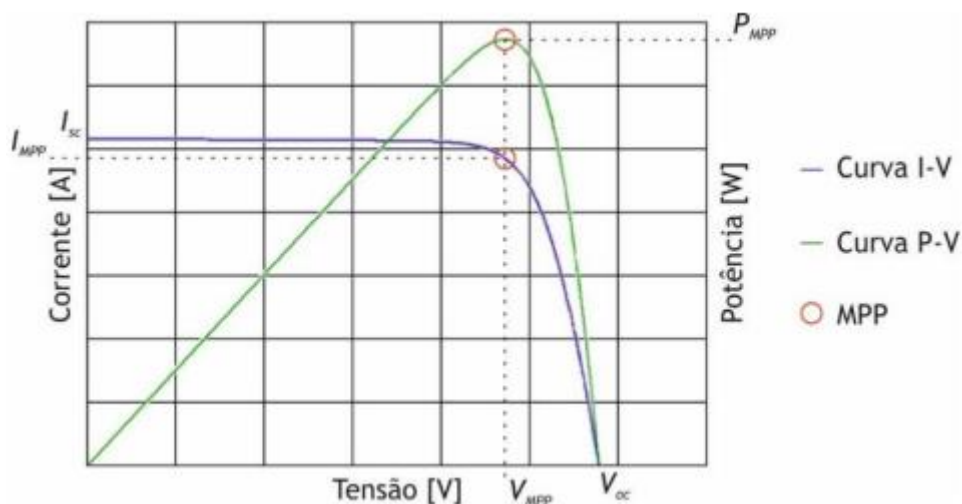


Figura 17: Curvas características I-V e P-V de uma célula ou módulo [15].

A curva P-V é útil para determinar o ponto de funcionamento ótimo de modo a saber as suas condições ideais, onde para cada curva haverá uma melhor tensão (ter em conta que quanto mais alta a radiação e menor a temperatura mais irá produzir). Este valor é também usado para dimensionar os restantes equipamentos do sistema de maneira a evitar avarias por excesso de energia.

2.10. Fatores que afetam o rendimento dos painéis

O rendimento ainda é afetado por outros fatores sendo eles:

- Ângulo de incidência - O ângulo de incidência é um dos principais fatores que afetam o rendimento de um painel, como demonstrado na Figura 18, onde se mostra que o maior rendimento (que é proporcional à corrente) se dá quando a radiação está perpendicular ao painel.

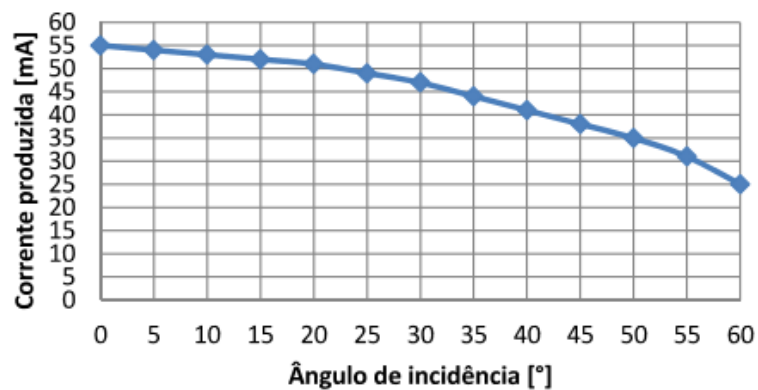


Figura 18: Impacto do ângulo de incidência na corrente [12]

- Radiação - Com aumento da radiação verifica-se um aumento das correntes do sistema, assim como um aumento do ponto de potência máxima (MPP) (Figura 19). Existe uma proporcionalidade direta entre a corrente com a irradiação.

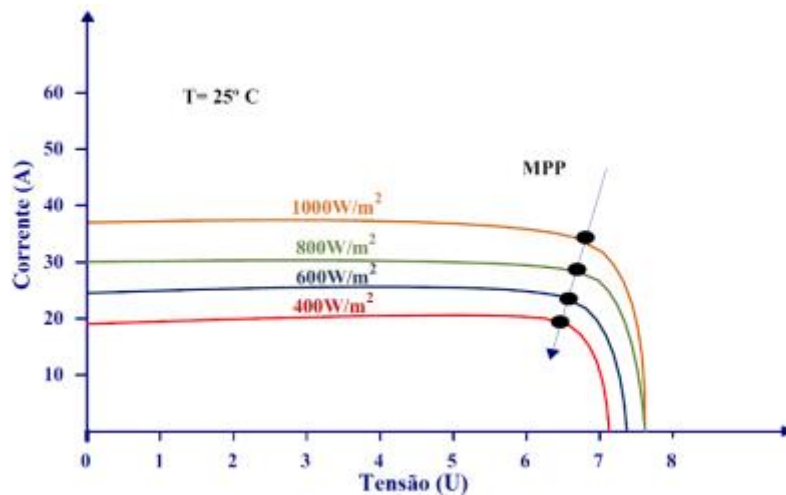


Figura 19: Curva I-U de uma célula de silício monocristalino para várias radiações [20]

- Temperatura ambiente – Em relação à temperatura, segundo a Figura 20 há um prejuízo da produção de energia com o aumento da temperatura. Resultante do facto da tensão diminuir à medida que a temperatura aumenta, ou seja, a potência diminui com o aumento da temperatura, (apesar de se ter um aumento da corrente, mas que não compensa a queda de tensão).

Como as células estão expostas a raios solares deve-se considerar o seu aquecimento, visto que, uma parte da radiação absorvida não é convertida em energia elétrica, mas sim convertida na forma de calor. Assim a temperatura a que a célula se encontra é quase sempre superior à temperatura ambiente, havendo fatores externos como vento e outros fenómenos que provoquem o arrefecimento.

De maneira a descrever este fenómeno pode-se utilizar a seguinte formula:

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G \quad 6$$

T_c – Temperatura da célula C°;

T_a – Temperatura ambiente C°;

$NOCT$ - Temperatura nominal da célula C°;

G - Irradiância W/m^2 .

Como dito anteriormente a corrente sofre um aumento o que inclui a corrente de curto-circuito (I_{ph}), a expressão seguinte expressa esse aumento:

$$I_{ph} = I_{ph,STC} \times \frac{G}{G_{STC}} \times [1 + \alpha_i(T - T_{STC})]$$

7

I_{ph} - Corrente de curto-circuito de um painel fotovoltaico;

α_i - Coeficiente de variação de corrente ($A/^{\circ}C$ ou em $\%/^{\circ}C$ (% relativamente a I_{ph})).

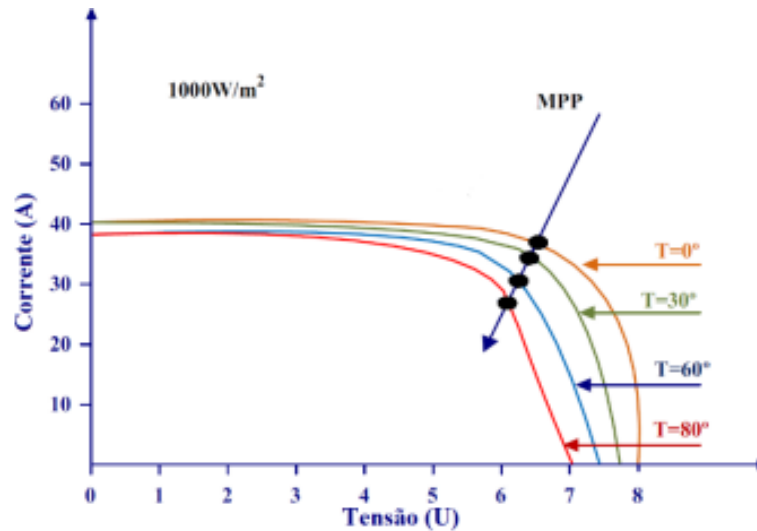


Figura 20: Curva I-U de uma célula de silício monocristalino para várias temperaturas [20]

- Sombreamento de painéis fotovoltaicos

O sombreamento dos painéis fotovoltaicos ocorre quando a radiação solar não incide no módulo fotovoltaico, logo tem uma grande influência na eficiência de um painel solar, pois a zona sombreada produz menos corrente face à situação da célula não estar sombreada.

De maneira a se ter a maior captação possível de radiação, ter-se-á de prevenir a ocorrência de sombreamento que prejudicará a produção de energia do painel.

Mais grave é a possibilidade de colocar em causa o bom funcionamento do painel, uma vez que a zona sombreada passa a atuar como carga, originando um ponto quente, por onde se irá consumir energia e dissipá-la em forma de calor.

De maneira a prevenir o sombreamento ter-se-á de ter em conta a distância entre as strings dos módulos de painéis, no caso das distâncias entre módulos não for superior à distância mínima, pode provocar sombreamento em painéis a adjacentes.

No caso da Figura 21 a fórmula que calcula a distância entre painéis é [16]:

$$d = b \times \left(\cos \beta + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right) \quad 8$$

β - Ângulo que corresponde à altura mínima Sol no Solstício de Inverno de dezembro.

α - Inclinação dos painéis.

d - Distância entre as string de painéis. (m)

b - Comprimento do painel. (m)

h - Altura. (m)

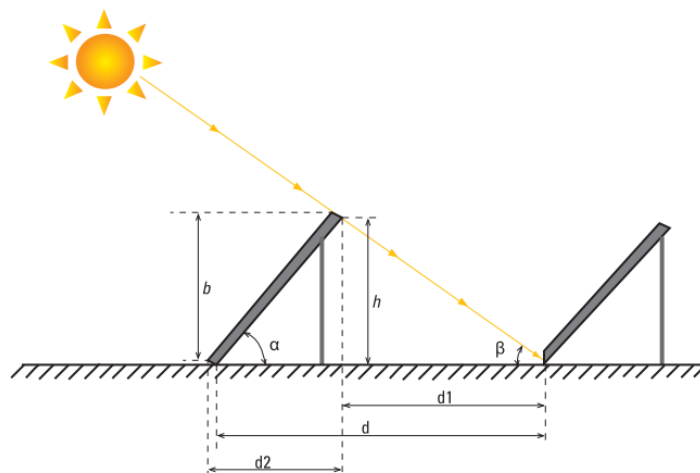


Figura 21: Exemplo ilustrativo da expressão 3.1 [16]

Hoje em dia devido à diminuição de preços dos módulos é mais relevante a potência pretendida, espaço para O&M.

2.11. Díodos de Bypass e Díodos de Bloqueio

Os díodos de desvio (bypass) são ligados em paralelo (com cada módulo que integra uma determinada fileira) de maneira a desviar a corrente produzida pelos outros módulos, assim isolando o módulo defeituoso. Enquanto nas associações em paralelo, são normalmente utilizados díodos de fileira.

Os díodos de fileira, servem para evitar curto-circuitos e correntes inversas entre fileiras, em situações onde possam surgir avarias ou o aparecimento de tensões diferentes nas fileiras. A Figura 23 e Figura 22 mostram utilização destes díodos.

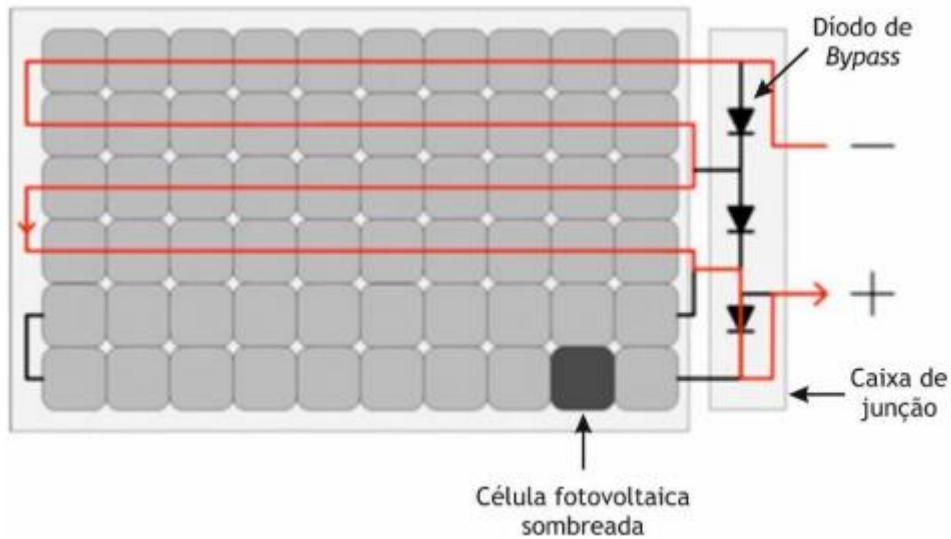


Figura 22: Módulo PV com uma célula sombreada, o que resulta no bypass de uma string de 20 células PV [15]

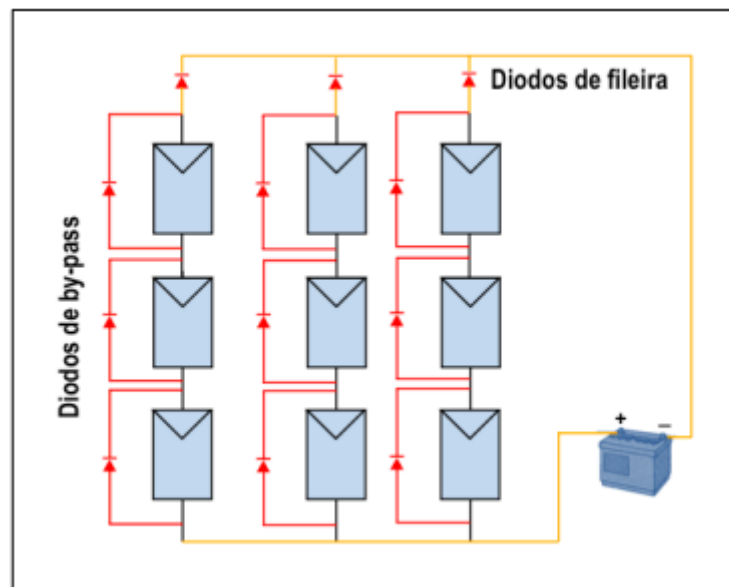


Figura 23: Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com diodos de bypass e de fileira [15]

2.12. Seguidores solares

Como explicado anteriormente manter um ângulo de incidência perpendicular é um dos critérios para ter o maior rendimento possível, para isso inventou-se o seguidor solar, para seguir o movimento do Sol ao longo do dia, Figura 24.

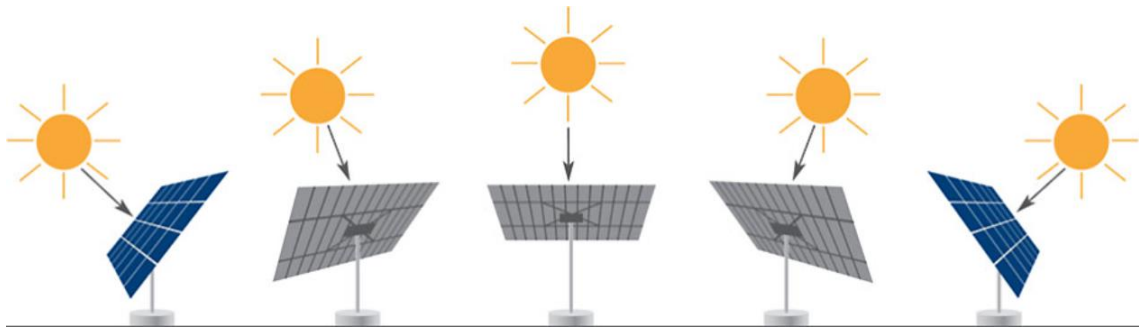


Figura 24: Exemplo do funcionamento de um seguidor [22]

Na Figura 25 é demonstrado o benefício da incorporação de um seguidor solar. Nesta figura encontra-se a potência ao longo do tempo, daí conclui-se que a área é proporcional à energia produzida, podendo-se concluir que com o seguidor há um aumento da produção de energia, na ordem dos 25%-45% [22].

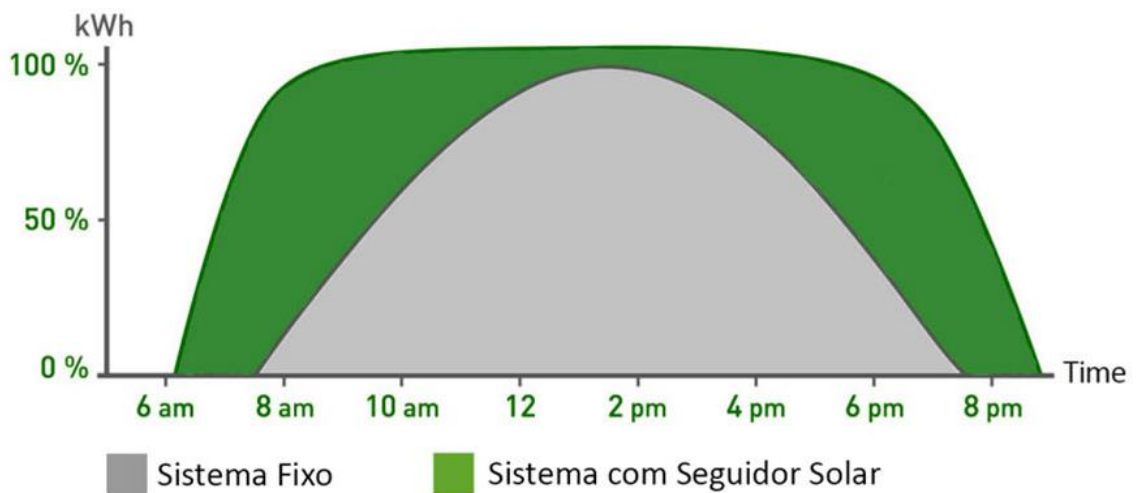


Figura 25: Comparação de rendimentos com e sem seguidor solar em um painel [22]

2.13.1. Tipos de seguidor

2.13.1.1. Seguidor passivo

Este tipo de seguidor não precisa de nenhuma alimentação elétrica para o seu funcionamento, ou seja, no movimento dos painéis. Este tipo de tecnologia tem como base as propriedades físicas de um gás, denominado de Freon [23]. Usando a expansão térmica do gás, que irá provocar o movimento do painel. Na Figura 26 há um painel em

que o gás é colocado em pólos opostos deste, a incidência de radiação irá provocar a evaporação e o transporte para o outro lado por tubos onde se condensa, e por gravidade move o painel.

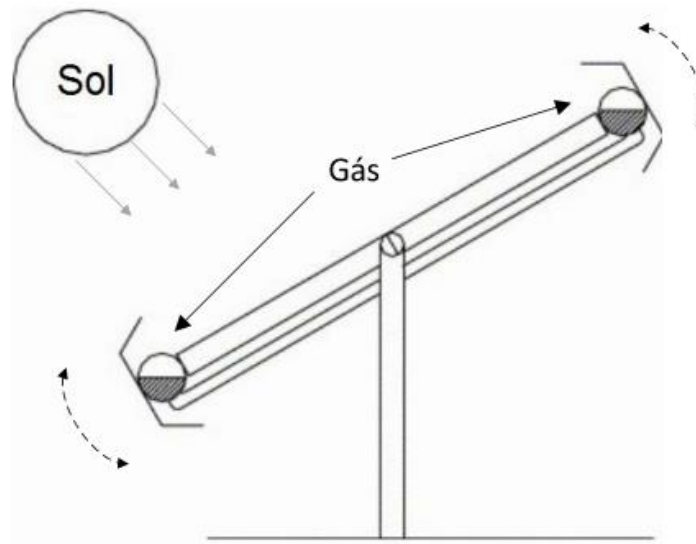


Figura 26: seguidor solar passivo [23]

O problema deste tipo de seguidor é o facto de ter baixa exatidão e só ser aplicável em locais que sofram uma variação térmica suficiente para provocar a expansão do gás.

2.13.1.2. Seguidor ativo

Estes seguidores ao contrário dos referido anteriormente precisam de um sistema de controlo, logo de uma alimentação eléctrica para o seu funcionamento. Este circuito de controlo terá de ter sensores que ajudam a determinar a posição do sol, ou algoritmos, que com base na informação recolhida enviará sinais para os atuadores, que serão os motores para a movimentação do painel.

De acordo com o tipo de movimentos do painel, este é classificado dentro dos seguintes tipos:

- Seguidor de eixo horizontal;
- Seguidor polar de eixo único;
- Seguidor de eixo vertical;
- Seguidor de dois eixos;

- Seguidor de plataforma rotativa de dois eixos.

Na Figura 27 evidenciam-se os benefícios nos rendimentos ao utilizar as diferentes tecnologias

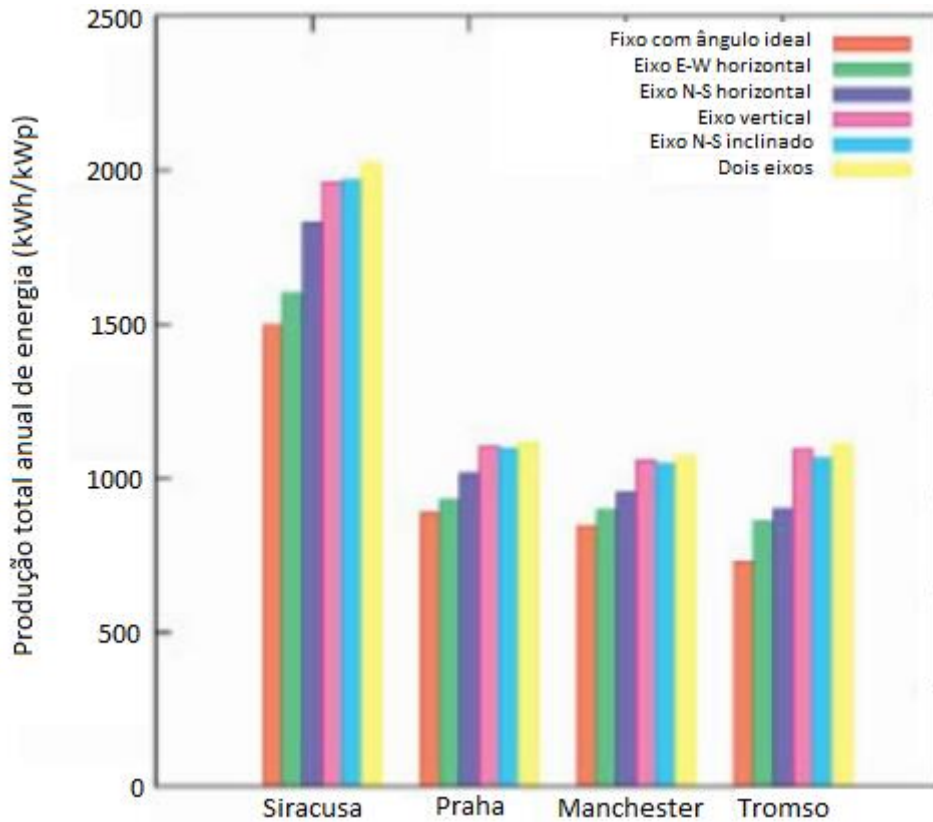


Figura 27: Estimativas de energia produzidas por usando cada seguidor de um sistema de 1 kWp [24]

2.13.1.3. Seguidor de eixo horizontal

Este seguidor contém um eixo que é usado como apoio para a rotação como exemplificado na Figura 28, desta maneira permite o seguimento sazonal do sol. Este tipo de seguidor tem os painéis paralelos à superfície e é ideal para zonas de baixa latitude (próximo ao equador).

Em comparação com outros tipos não é tão eficiente, mas é uma boa solução para quem tem em vista o aumento global da eficiência, visto suportar um maior número de painéis. Outra vantagem é ser de simples instalação e de ter um custo baixo de manutenção.



Figura 28: Seguidor de eixo horizontal [25]

2.13.1.4. Seguidor de eixo vertical ou azimute

Este painel irá rodar sobre uma base fixa como exemplifica a Figura 29, ou seja, vai provocar uma variação do azimute ao longo do dia, e tem uma inclinação que coincidirá com a latitude do local. Este seguidor é mais vantajoso em elevadas latitudes. É um sistema robusto e de fácil implementação.

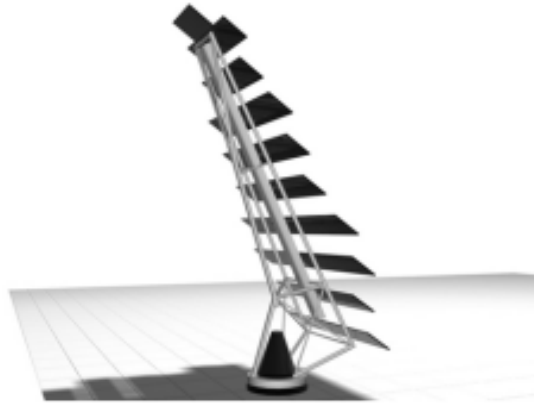


Figura 29: Seguidor de eixo vertical [24]

2.13.1.5. Seguidor polar de eixo único

Este seguidor terá um eixo de ângulo fixo correspondendo à latitude, representado na Figura 30, que garante que esteja perpendicular com a radiação solar, durante os equinócios, noutros dias haverá um erro associado.

Tal como os seguidores verticais, estes são mais apropriados para altitudes elevadas

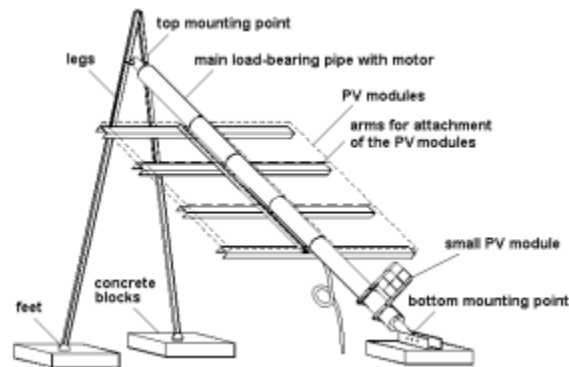


Figura 30: Seguidor polar de eixo único [24]

2.13.1.6. Seguidor de dois eixos

Este seguidor dispõe de dois tipos de eixo um que permite a rotação na direção Norte-sul e outro na direção Este-Oeste (Figura 31). Este painel é o mais usual em grandes parques solares e grandes instalações. Sendo o tipo de seguidor mais exato relativamente aos anteriores.

A desvantagem deste seguidor está na base que terá de ser mais robusta, devido ao peso da estrutura, e ao facto de ter de ser bloqueada quando há muito vento. Devido às desvantagens referidas e à manutenção que lhe é característica devido à sua complexidade, muitas vezes este seguidor não é selecionado.



Figura 31: Seguidor de dois eixos [23]

2.13.1.7. Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

Assim como o seguidor de dois eixos este tem um eixo responsável pelo movimento na direção Norte-sul, e uma plataforma rotativa no sentido Este-Oeste (Figura 32).

Este seguidor é de grandes dimensões e robusto, visto ser comumente usado com vários painéis, de maneira a estarem sincronizados e devido à sua simples instalação, a desvantagem é a sua manutenção, remoção de obstáculos e a grande área que irá ocupar, que em outras soluções se encontra disponível.

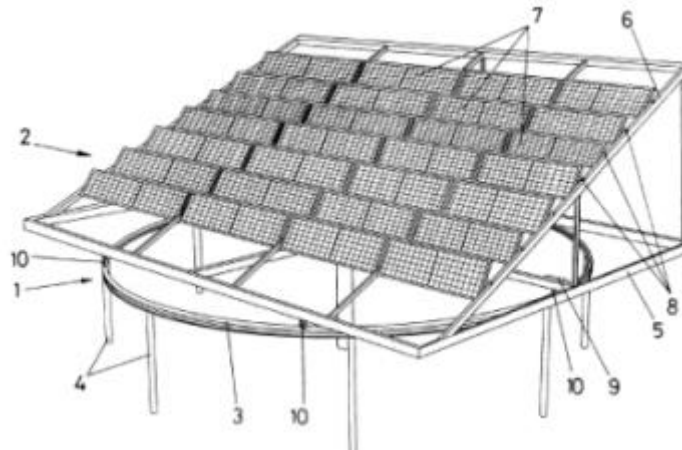


Figura 32: Seguidor de plataforma rotativa de dois eixos [24]

Na Figura 33 há uma comparação das vantagens em termos de rendimento das diferentes soluções.

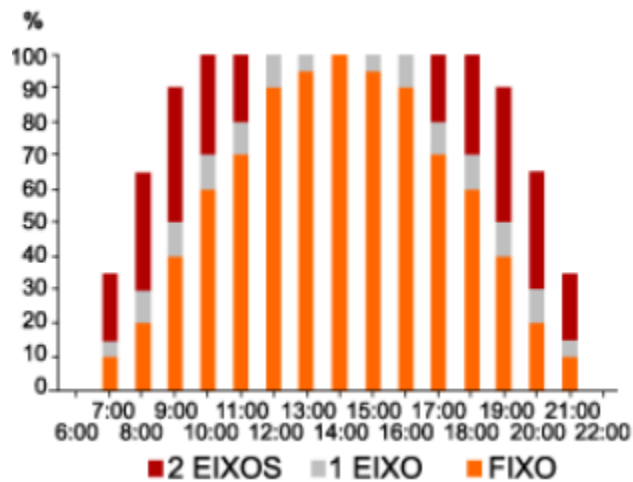


Figura 33: - Rendimento das diferentes estruturas solares [12]

2.14.1. Sistema de controlo de seguidores de painéis solares

Para haver um movimento adequando é necessário que haja um sistema de controlo por de trás deste equipamento. Existem algumas formas de garantir este controlo, podendo ser estas:

- Controlo de malha aberta

Este controlo não depende de realimentação, isto é, não depende do resultado à saída. Simplesmente depende de um sinal de entrada que irá acionar os atuadores para produzirem o resultado desejado. Para ser usado este controlo terá de ser aplicado em um sistema determinístico, em que se conhece o seu modo de operação [23]. Na Figura 34 apresenta-se um diagrama simples para a configuração em malha aberta.



Figura 34: Controlo em malha aberta [23]

- Controlo de malha fechada

Este controlo recebe uma realimentação, onde as variáveis são frequentemente atualizadas. Esta atualização é feita, ou com sensores ou visão artificial. Na Figura 35 apresenta-se um diagrama de um sistema de controlo de malha fechada.

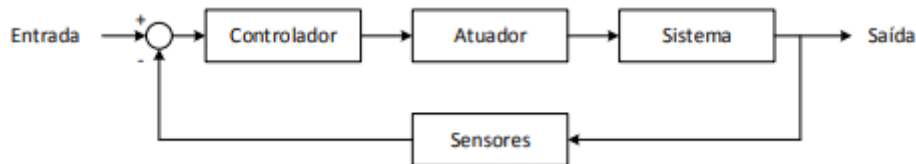


Figura 35: Controlo em malha fechada [23]

2.14.2. Seguimento com foto-sensores

Nesta situação usou-se a capacidade de o sensor variar as suas características elétricas consoante a quantidade de radiação que recebe. Para este caso, é usado um controlo de malha fechada visto depender-se da leitura do sensor que é feita periodicamente. Serão colocados normalmente dois sensores um em cada extremidade do painel, de maneira a aumentar a sensibilidade à inclinação. Desta forma os valores dos sensores, variarão consoante a inclinação solar, quando os valores dos sensores forem iguais significa que se está na melhor situação, no caso de serem diferentes será ativado o atuador [26].

Nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38 estão representadas três aplicações diferentes de sensores fotoelétricos.

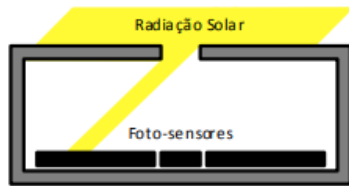


Figura 36: Foto-sensores com o uso de um colimador [23]

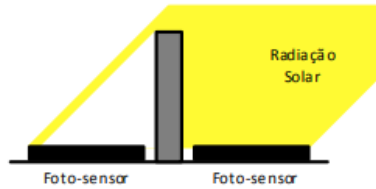


Figura 38: Foto-sensor com placa de sombreamento [23]

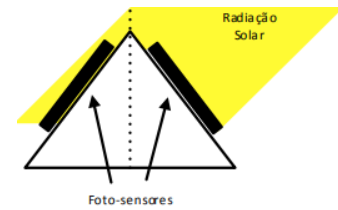


Figura 37: Foto-sensor com base inclinada [23]

Este sistema funciona com uma câmara de filmar para saber a posição do sol. Em comparação com o sistema anterior este é mais complexo na instalação e exige mais manutenção, sendo preciso alguma proteção assim como um filtro. A leitura da imagem também pode ser influenciada por poeiras e humidade na lente.

Por detrás do algoritmo deste sistema existe um ponto de referência na imagem, o objetivo do algoritmo é manter o sol sobre o ponto de referência.

As vantagens deste tipo de seguidor são a sua alta resolução e precisão, a capacidade de visualizar a proximidade de nuvens (que em sistemas de foto-sensores poderá ser um problema) e grande visão periférica [27].

2.14.4. Seguimento sem sensores (algoritmo)

O funcionamento dos eixos terá por base um algoritmo sendo um sistema em malha aberta, visto não precisar da resposta do sistema. Este tipo de seguimento pode dividir-se em dois grupos dependendo da complexidade. O primeiro grupo que é o mais simples calcula a posição do sol com base na inclinação solar ou na equação do tempo, sendo os parâmetros da entrada são a data, hora e ano. O segundo grupo é mais complexo, calcula a posição do sol com base nos dados do grupo anterior, com o acréscimo de outros como a temperatura, pressão, latitude e longitude, entre outros dados que dependem do tipo de algoritmo. Conseguindo garantir grande precisão com erros máximos até 3×10^{-40} (também dependendo da precisão da montagem) para grandes períodos como é o caso do algoritmo SPA (solar position algorithm) [28].

Capítulo 3: Metodologia

Um sistema solar fotovoltaico como dito anteriormente pode ser dividido em autónomo e ligado à rede. Dependendo do que se pretende, são usados critérios diferentes no dimensionamento do sistema de modo a garantir objetivos diferentes assim como equipamentos distintos.

No dimensionamento de um sistema fotovoltaico autónomo as escolhas dos critérios usados são vitais para o bom funcionamento do sistema. É uma tecnologia que trará vantagem a longo prazo, devido aos custos de investimento envolvidos em relação à energia produzida. Um sistema sobredimensionado levará a custos desnecessários enquanto um sistema subdimensionado não irá satisfazer o utilizador.

Neste caso esta dissertação foca-se numa alternativa em crescimento muito utilizada para alimentação elétrica de uma autocaravana, um sistema fotovoltaico. A Figura 39 exemplifica a instalação de painéis fotovoltaicos no tejadilho de uma autocaravana.



Figura 39: Exemplo de uma instalação de painéis fotovoltaicos numa autocaravana [29]

O método usado para os cálculos teve por base os seguintes passos:

1º Conceber um exemplo de rota

A rota utilizada terá de permitir uma diversidade de cenários, pois existem enumeras possibilidades de percursos, este estudo terá de tentar adaptar-se a várias opções possíveis.

2º Obter valores de radiação e valores de temperatura

Uma das bases do dimensionamento de painéis fotovoltaicos é saber os níveis de radiação a que eles vão estar sujeitos e por quanto tempo, de modo a saber a energia produzida.

Para este efeito recorreu-se ao programa PVGIS Online Tool, que dará a informação da temperatura e da radiação a todas as horas do dia.

3º Cálculo de tempos de viagem

O tempo de viagens entre cidades foi calculado usando o programa google maps. De maneira a ser realista esta autocaravana passará de 3 a 5 dias em cada cidade. A este tempo terá de se acrescentar o tempo de paragens de descanso do condutor, e decidiu-se aumentar o tempo num fator de 25%, visto ser uma autocaravana, e os tempos são calculados com base nas velocidades médias de carros.

4º Avaliação das necessidades energéticas.

A energia que se prevê que será consumida é o objetivo que se quer atingir, tendo os equipamentos e os seus consumos nominais calcula-se uma média de energia para todos os dias.

5º Dedução da curva característica do painel

Cada painel terá a sua curva característica, logo uma produção diferente de acordo com as condições externas (radiação e temperatura).

6º Números de painéis e capacidade de armazenamento

Usando os valores dos passos anteriores e a curva característica de um painel solar fotovoltaico calcula-se os gastos e consumos energéticos da rota proposta. Dependendo dos valores devolvidos pelo gráfico dimensionam-se o número de módulos.

Com o passo anterior sabe-se os valores de energia que o banco de baterias terá de suportar.

7º Dimensionar os equipamentos restantes do sistema.

Neste passo será a escolha de outros equipamentos como o inversor, controlador de carga e bateria.

3.1. Dedução das curvas características de um painel

A partir das curvas características tem-se uma melhor aproximação da produção de um painel, assim optou-se por desenvolver uma estrutura de cálculo que descreva as curvas características de qualquer painel posteriormente selecionado.

Esta estrutura de cálculo tem por base o modelo matemático de uma célula fotovoltaica, onde são usadas as seguintes expressões.

$$I = I_{SC} - I_0 \times \left(e^{\frac{V}{m \times n_s \times V_t}} - 1 \right) \quad 9$$

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G \quad 10$$

$$I_{SC} = I_{ph} \quad 11$$

$$I_{ph} = I_{ph,STC} \times \frac{G}{G_{STC}} \times [1 + \alpha_i(T - T_{STC})] \quad 12$$

$$I_0 = C \times T^3 \times e^{-\frac{E_{gap}}{k \times T}} \quad 13$$

η_s - Número de células

Com estas expressões será possível retirar uma curva característica, mas como os valores não são exatos o suficiente, optou-se por usar um método diferente baseado no modelo da Figura 41 neste modelo existem duas resistências. A resistência em série que representa as perdas de tensão e corrente através dos materiais semicondutores, à resistência entre contactos metálicos da parte posterior e frontal da célula e resistências devido às conexões entre os terminais da célula. Por outro lado, há a resistência em paralelo que representa as perdas por corrente de fuga, nas extremidades e imperfeições

dos materiais semicondutores. As células vão sempre ter diferenças entre si o que faz com que quando são montadas em série a corrente esteja sempre limitada à menor corrente de curto-circuito das células em série, o mesmo ocorre com a associação em série dos módulos, o comportamento das células está representado na Figura 40 [13].

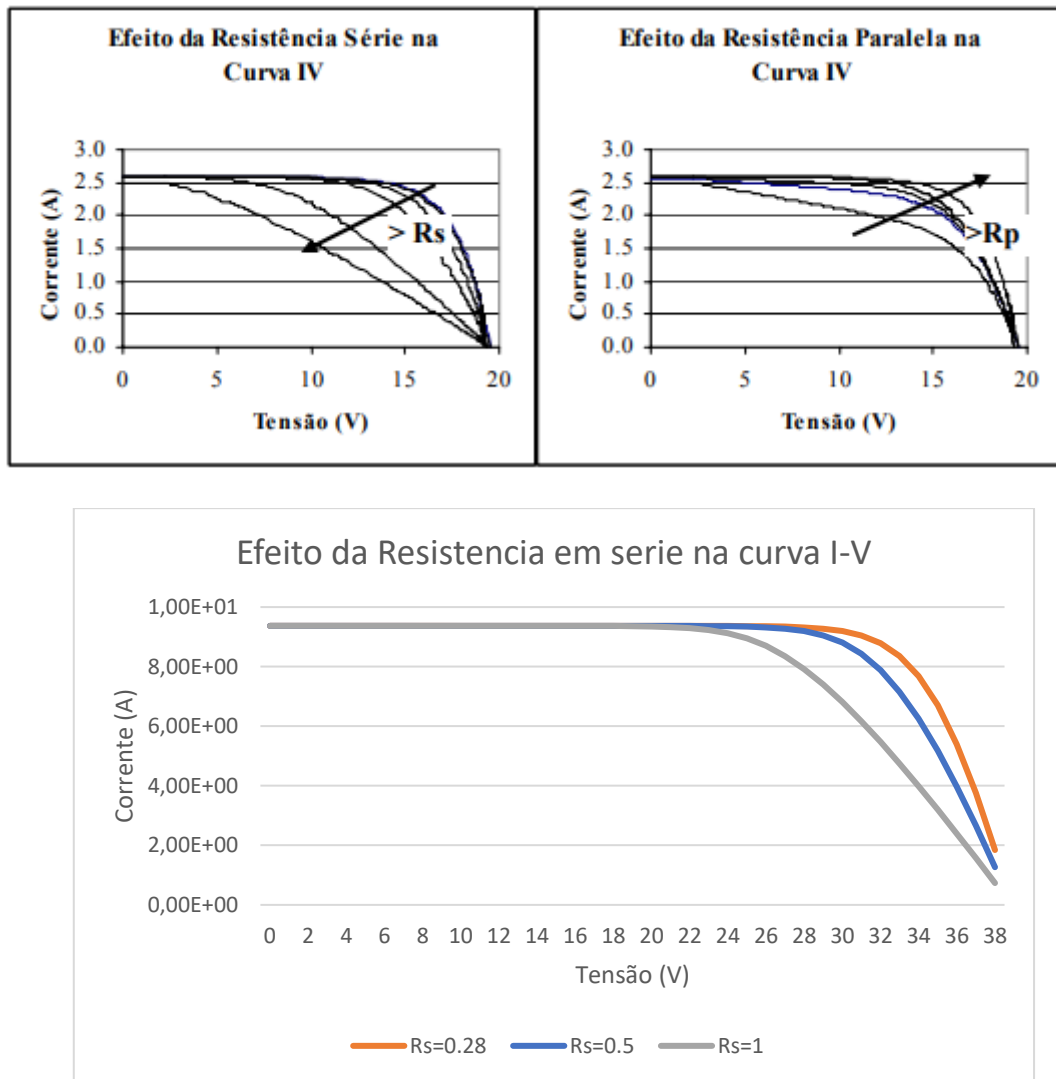


Figura 40: Variação da curva característica com os aumentos de cada resistência [13]

Os valores de resistência em série (R_S), coeficiente de temperatura (C), corrente inversa máxima de saturação do diodo (I_0) e o fator de idealidade do diodo (m) são calculados pelas seguintes formulas:

$$R_S = \frac{n_S \times m \times V_{t,STC} \times \ln \left(1 - \frac{I_{MPP,STC}}{I_{ph,STC}} \right) + V_{OC,STC} - V_{MPP,STC}}{I_{MPP,STC}} \quad 14$$

$$I_0 \approx I_{ph,STC} \times e^{-\frac{V_{OC,STC}}{m \times n_s \times V_{t,STC}}} \quad 15$$

$$C = \frac{I_{0,STC}}{T_{STC}^3 \times e^{\frac{E_{gap}}{k \times T_{STC}}}} \quad 16$$

$$m = \frac{\alpha_v - \frac{V_{OC}}{T_{STC}}}{n_s \times V_{t,STC} \times \left(\frac{\alpha_i}{I_{ph,STC}} - \frac{3}{T_{STC}} - \frac{E_{gap}}{k \times T_{STC}^2} \right)} \quad 17$$

α_v - Coeficiente de variação de tensão (V/°C ou em %/°C (% relativamente a V_{OC})).

Na Figura 41, está representado o circuito equivalente da célula fotovoltaica com a representação das resistências.

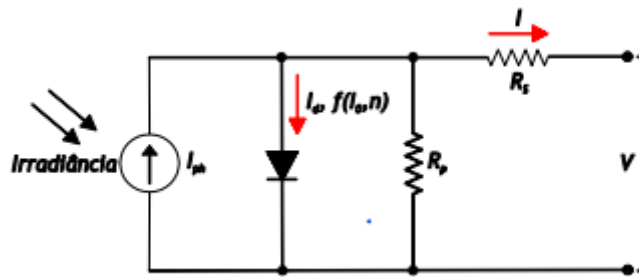


Figura 41: Circuito equivalente para o modelo matemático de uma célula com um diodo [15].

Onde normalmente se considera que R_p tendendo a infinito simplificando a expressão da corrente para [30]:

$$I = I_s - I_0 \times \left(e^{\frac{V + R_s \times I}{m V_t}} - 1 \right) \quad 18$$

3.2. Cálculo das necessidades energéticas

Este cálculo é o princípio do dimensionamento de outros componentes do sistema, como a bateria e área de painel (ou quantidade de módulos). A unidade base desta estimativa irá ser Watts-hora.

Antes do início do cálculo definiram-se os equipamentos que irão funcionar à base de eletricidade (como por exemplo a iluminação) e os equipamentos a outras formas de energia (como por exemplo o fogão a gás).

Os valores de consumo de cada equipamento têm por base a seguinte expressão:

$$\text{Consumo de um equipamento (Wh/dia)} = \frac{\text{Tempo } \left(\frac{h}{\text{dia}}\right) \times \text{Potencia (W)}}{\text{Perdas de inversor} \times \text{perdas de bateria}} \quad 19$$

No final é somado consumo diário de todos os equipamentos e multiplicado pelos dias de viagem.

$$\text{Consumo total diarios } \left(\frac{Wh}{\text{dia}}\right) = \sum_1^x \text{Consumo de um equipamento (Wh/dia)} \quad 20$$

x- Os equipamentos com consumos presentes na autocaravana.

3.3. Dimensionamento de bateria

O dimensionamento da bateria, será feito com base nos valores fornecidos pela tabela dos consumos em passos anteriores. Com a seguinte expressão e esses valores de consumo encontra-se a capacidade do banco de baterias, que segundo recomendações será para um regime de descarga de 20 horas [2].

$$CB = \frac{L_m \times N}{P_d} \quad 21$$

Onde:

CB - Capacidade do banco de bateria para o regime de descarga (Wh);

L_m - Energia ativa máxima necessária diariamente (Wh/dia);

N - Número de dias em autonomia, normalmente entre 2 e 4;

P_d - Máxima profundidade de descarga de bateria.

Depois de maneira a passar as unidades de Wh para Ah usa-se a seguinte expressão com o valor da tensão do sistema.

$$CBI = \frac{CB}{V_{sist}} \quad 22$$

Onde:

CBI_{Bat} - Capacidade do banco de bateria (Ah);

V_{sist} - Tensão do sistema (V).

De acordo com a disponibilidade de radiação o número de dias de autonomia será maior ou menor.

O seguinte passo é saber o número de baterias em paralelo e em série.

$$N^{\circ}_{Baterias\ em\ serie} = \frac{V_{sistema}}{V_{bat}} \quad 23 \quad N^{\circ}_{Baterias\ em\ paralelo} = \frac{CBI_{20}}{CBI_{Bat}} \quad 24$$

Ao mesmo tempo que a capacidade calculada pelas expressões acima se tem de verificar, as baterias terão de conseguir suportar toda a energia produzida como se tem de valores que as baterias terão de conseguir armazenar, outra opção será analisar os gráficos que se obterão e identificar a energia máxima que será preciso armazenar.

3.4. Dimensionamento de controlo de carga

O objetivo deste aparelho é proteger a bateria, por isso só poderá ser dimensionado depois de se saber qual bateria foi selecionada para então a proteger de eventuais sobrecargas ou descargas excessivas.

Como a radiação poderá ser de certa maneira imprevisível o controlador de carga deve de estar sobredimensionado em 25% [2]:

$$Corrente\ minima\ do\ controlador = 1,25 \times Corrente\ maxima\ do\ painel(I_{SC}) \quad 25$$

De maneira a simular o algoritmo do controlador responsável por manter o funcionamento no ponto de potência máxima, foi usado o programa solver do Excel aplicado à função que traduz o funcionamento do painel.

3.5. Dimensionamento do inversor

Este componente do sistema deve ser dimensionado de modo a garantir o fornecimento das cargas em a.c., e como em qualquer outro sistema prever os aumentos de consumo futuros, podendo ser um pouco mais elevados. O número de inversores é então calculado pela seguinte expressão [2]:

$$N^{\circ} \text{ de inversores} = \frac{P_{(w)}}{P_{inv}} \quad 26$$

$N^{\circ} \text{ de inversores}$ - Número total de inversores para este sistema;

$P_{(w)}$ - Valor de potência consumida pelas cargas a.c. em W;

P_{inv} - Valor da potência do inversor escolhido.

O regulador de carga e bateria devem estar dimensionados para uma corrente nominal 30% maior que a corrente máxima do painel. A potência de saída do inversor deve ser dimensionada para a máxima carga A.C.

Capítulo 4: Casos de estudo

Nesta dissertação foram abordados dois casos de estudo, que apresentam percursos distintos com a finalidade de evidenciar a influência da rota considerada na produção de energia elétrica. As duas rotas consideradas para estudo foram:

- De Lisboa até Noruega referente ao primeiro caso de estudo;
- De Lisboa até Itália referente ao segundo caso de estudo.

Os percursos adotados tiveram por base uma rota mais desfavorável à produção de energia (primeiro caso de estudo), e outra mais favorável à produção de energia (segundo caso de estudo), entre os meses de julho e agosto. Dentro do primeiro caso de estudo, foi tido em conta dois cenários distintos. No primeiro cenário há produção de energia durante a deslocação do veículo, enquanto no segundo cenário não existe produção de energia durante a deslocação. Desta forma é possível a verificar-se as diferenças da produção de eletricidade entre os dois cenários.

4.1. Primeiro caso de estudo

4.1.1. Criação de rota

A rota foi concebida tendo em conta a diversidade de diferentes cenários que poderão ocorrer ao viajar grandes distâncias:

- De Lisboa a Madrid desloca-se para este, mantendo a latitude, permanecendo no cinturão solar mundial e "perdendo" uma hora do dia;
- De Madrid- Paris- Bruxelas deslocar-se também para este, mudando a latitude, saindo do cinturão solar mundial e mantendo;
- De Bruxelas- Berlim- Varsóvia- Vilnius- Minsk- Moscovo está-se a deslocar para este, quase sem alterações na latitude.
- De Moscovo a Helsinkia, move-se para oeste, mudando a latitude.
- De Helsinkia a Mehamn, dirige-se em direção a norte.

Neste percurso está-se sujeito a diferentes temperaturas, irradiações solares, e tempos de carregamento (a radiação entre cidades é diferente de umas para as outras logo também se terá tempos de carregamento diferentes).

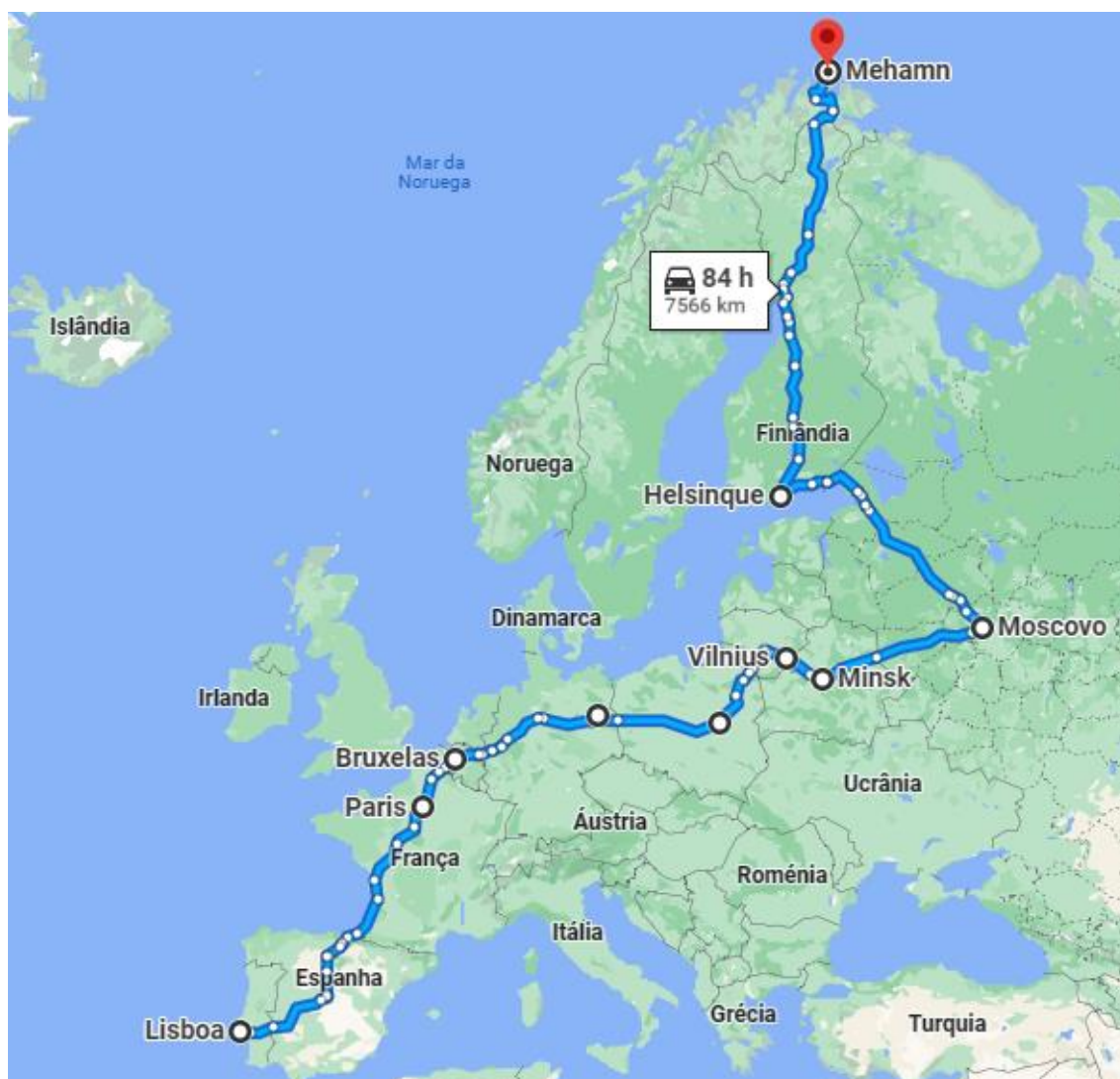


Figura 42 Mapa do percurso

4.1.2. Valores de radiação, temperatura

Os valores da radiação e temperatura dependeram sempre da latitude e longitude do local de carregamento e época do ano.

Assim usando o programa PVGIS Online Tool tem-se em conta o ângulo de montagem do painel, as coordenadas e o mês da simulação como exemplificado na Figura 44, de onde resultam os valores de irradiação (direta, indireta e global) a cada hora.

O valor da inclinação utilizado para os painéis fotovoltaicos provém da análise do mapa da Figura 43. Onde se considerou que para a rota realizada o melhor valor para a inclinação seria de 35° [13]. No entanto de maneira a preservar os painéis fotovoltaicos, durante o deslocamento foi considerado um angulo de 0°.

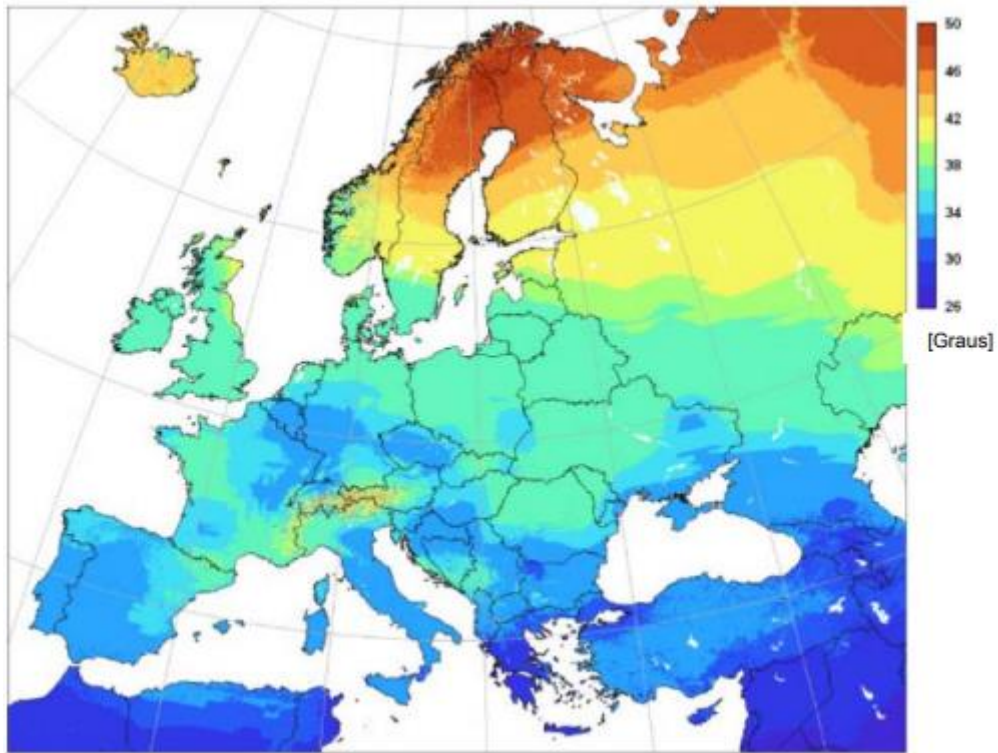


Figura 43: Ângulos de inclinação ótimos de sistemas PV

Estes Valores de seguida são exportados para Excel onde serão trabalhados para obter as potencias conseguidas nas condições a que estarão sujeitos os painéis.

Figura 44 Dados introduzidos no programa PVGIS Online Tool (Madrid)

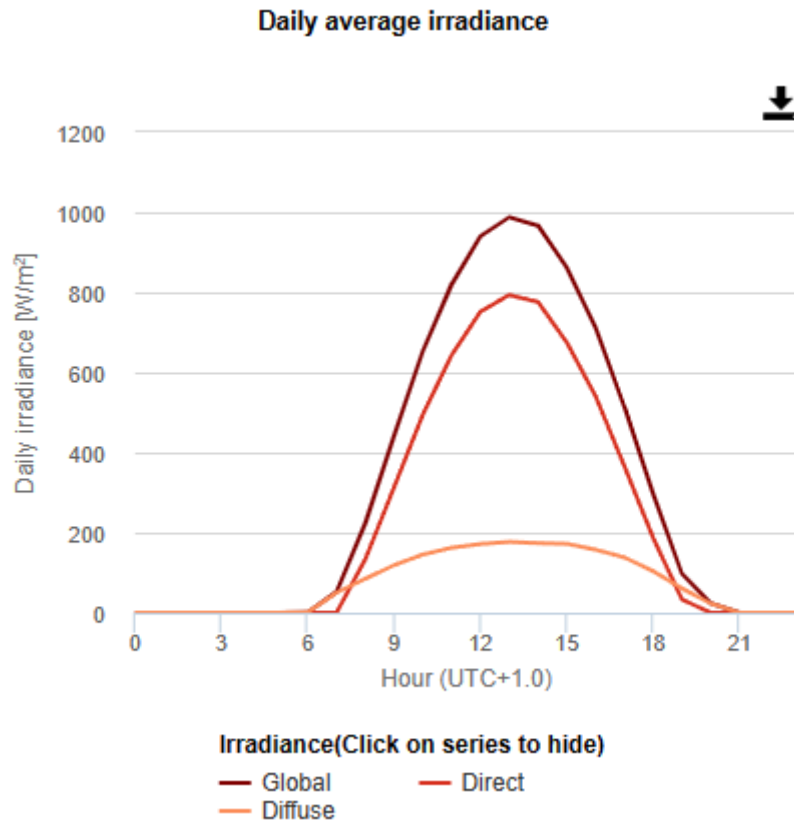


Figura 45: resultados gráficos dos valores inseridos (Figura 44 Dados introduzidos no programa PVGIS Online Tool (Madrid).

4.1.3. Tempos de viagem

Tendo por base a rota pré-definida é preciso saber os tempos de viagem, mais exatos possíveis, entre cidades. Com este objetivo foi usado o Programa Google Maps (Figura 46), os valores obtidos deste foram aumentados numa margem de 25%, pois o limite legal de velocidade de circulação de uma autocaravana é de 100 km/h, obtendo também uma margem de erro. Com rota apresentada e estimativa de tempo é determinada a posição do sistema a cada hora podendo estimar a sua localização, retirando valores para a produção em andamento. Na Tabela 2 são apresentados os tempos de viagem, tendo em conta as pausas que o condutor deverá fazer.

Foi definido que para os tempos de viagem de 0 a 2 horas não haverá pausas, de 3 a 5 horas haverá 1 pausas, de 6 a 8 horas haverá 2 pausas e de 9 a 11 horas haverá 3 pausas. Foi assumida uma duração de 15 minutos para cada pausa.



Figura 46; Tempo de viagem (Lisboa-Madrid)

Tabela 2; tabela de tempos de percurso

Partida-Chegada	Tempo h (resultante de google maps)	Tempo h x 1,25	Pausas	Tempo h x 1,25 mais pausas
Lisboa-Madrid	6	7,5	2	8
Madrid-Baiona	5,5	6,875	2	7,375
Baiona-Paris	7,5	9,375	3	10,125
Paris-Bruxelas	3,75	4,6875	1	4,9375
Bruxelas-Berlim	8	10	3	10,75
Berlim-Varsóvia	6	7,5	2	8
Varsóvia-Vilnius	6,25	7,8125	2	8,3125
Vilnius-Minsk	2,75	3,4375	1	3,6875
Minsk-Moscovo	9	11,25	3	12
Moscovo-Veliky Novgorod	7	8,75	2	9,25
Veliky Novgorod-Helsinque	7	8,75	2	9,25
Helsinque-Oulu	7,25	9,0625	3	9,8125
Oulu-Sodankyla	4,25	5,3125	1	5,5625
Sodankylä Mehamn	7,5	9,375	3	10,125

4.1.4. Cálculo das necessidades energéticas do sistema

Na Tabela 3 estão apresentadas as características dos equipamentos considerados assim como as perdas do inversor e da bateria (em caso de haver um equipamento que funcione em corrente contínua não será aplicada o fator de perda do inversor), potências nominais, que foram medidas e tempos médios de utilização. Assim estabelecendo um valor de consumo, que será aplicado em todas as horas.

Os fatores de perda relativos à bateria e ao inversor serão de 0,9 cada, o que dá um fator de 0,81. Aos equipamentos que não precisaram de passar a tensão das baterias de D.C. para A.C. será aplicado um fator de 0,9, visto não precisarem de inversor.

Tabela 3: Consumos diários

Equipamentos	Tempo de funcionamento (h/dia)	Potência (W)	Perdas de inversor e bateria (0,9×0,9)	Consumos (Wh/dia)
Máquina de café	0,1	1200	0,81	148,15
Frigorífico 12V	8	150	0,81	1481,5
Termoacumulador 230V	2,5	300	0,9	925,9
Bomba de água 12V	0,5	40,8	0,81	25,2
Televisão 12V	5	100	0,	617,3
Lâmpadas	5	15	0,9	92,6
2 PC 230V	6	120	0,9	888,9
4 Telemóveis 230V	2	40	0,9	98,76
Total/dia				4278,3
Total/hora				178.26

4.1.5. Dedução das curvas características de um painel em Excel

Primeiro teve de ser deduzido o valor de idealidade m , de seguida o coeficiente de temperatura C , a corrente inversa máxima de saturação do díodo I_0 e por último o valor de resistência em série R_S .

Na Tabela 4 seguinte estão os resultados dos cálculos dos parâmetros do painel fotovoltaico, determinados a partir das equações referidas acima. O objetivo principal de conhecer estes parâmetros é a construção de uma aproximação da curva característica do painel, de forma a se poder determinar valores mais exatos de energia produzida.

As informações do módulo fotovoltaico estarão disponíveis em [31].

Tabela 4 Parâmetros do módulo PV

Variável	Valor	Fonte
I_{ph}	9,37 A	catálogo
m	1,026	expressão 17
q	1,6E-19 C	constante
k	1,38E-23 J/K	constante
I_0	1,95E-10 A	Expressão 15
V_{oc} a 25°C	38,88 V	catálogo
C	73,65 AK^3	Expressão 16
E_{gap}	1,8E-19 J	constante
TNOCT	45 °C	catálogo
α_i	0,00055	catálogo
α_v	0,003	catálogo
n_S	60	catálogo
R_S	0,28 Ω	Expressão 14

Com os parâmetros acima foi obtido a seguinte curva característica, representada na Figura 47.

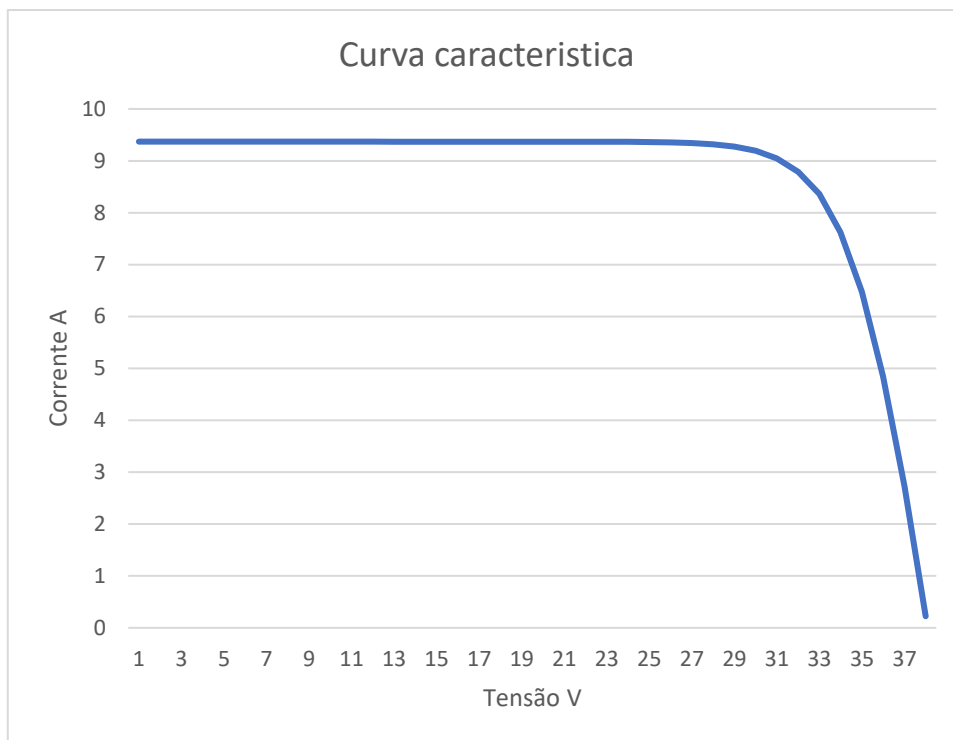


Figura 47: Curva característica em condições STC, obtida para o painel selecionado

Tabela 5 estão os erros associados a esta aproximação em comparação às informações fornecidas pelo catálogo em condições STC.

Tabela 5: Comparação de curvas

	Catálogo	Calculado	Erro (%)
I_{SC} A	9,37	9,37	0
V_{oc} V	38.88	38.86	0,05
I_{MPP} A	8.85	8.89	0,4
V_{MPP} V	31.69	31.68	0,03

Aplicando as expressões no Excel, juntamente com os dados retirados de radiação e de temperatura, assim como a curva anterior que se refere às condições STC, tem-se acesso a qualquer curva, tendo o par de dados temperatura e radiação.

4.1.6. Dimensionamento do Painel

Sabendo os gastos e consumos para esta viagem pode-se ter um perfil de produção e consumo, ou seja, ter controlo de como a bateria irá funcionar. Assim foram feitos os

seguintes gráficos, um com produção em andamento (Figura 49) e outro sem produção em andamento (Figura 51).

$$\sum_1^n \text{energia produzida} - \frac{\text{consumo médio de energia}}{\text{hora}} \times n \quad 27$$

Sendo:

n - A hora a que foi feito o ponto do gráfico.

Depois de obter os dados referidos anteriormente. Pode-se calcular o número de painéis e de seguida área necessária para um sistema autónomo. Sendo que a energia produzida será diretamente proporcional ao número de painéis.

Usando a ferramenta Excel, na folha de calculo substituiu-se o número de painéis para saber o menor número de painéis necessário.

Estes gráficos representam um total de 1153 horas de percurso, para o primeiro caso de estudo.

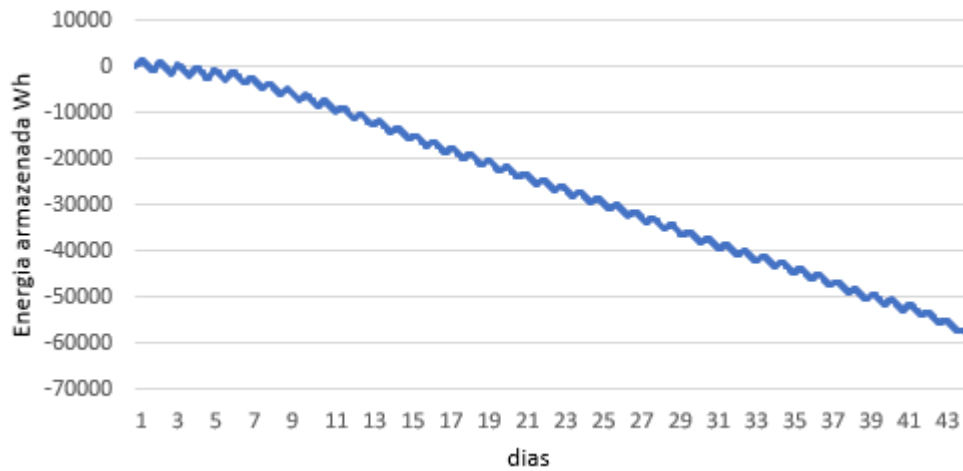


Figura 48: Teste com 2 painéis e com produção de energia em andamento

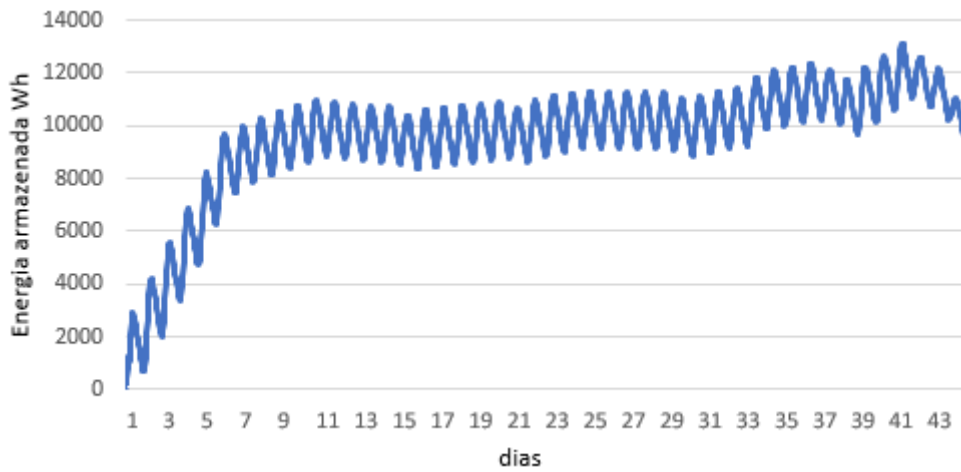


Figura 49: Teste com 3 painéis e com produção de energia em andamento

Assim segundo a Figura 48, no caso onde há produção de energia em andamento, utilizar 2 módulos não foi o suficiente para um sistema autónomo, por outro lado pela Figura 49 com 3 módulos foi bastante para compensar os consumos a mesma situação.

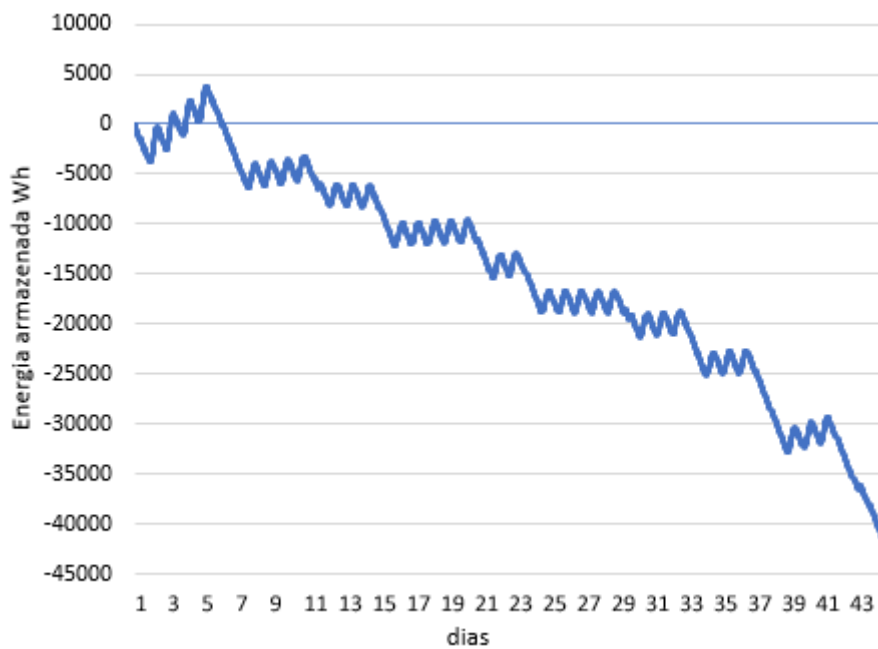


Figura 50: Teste com 3 painéis e sem produção de energia em andamento

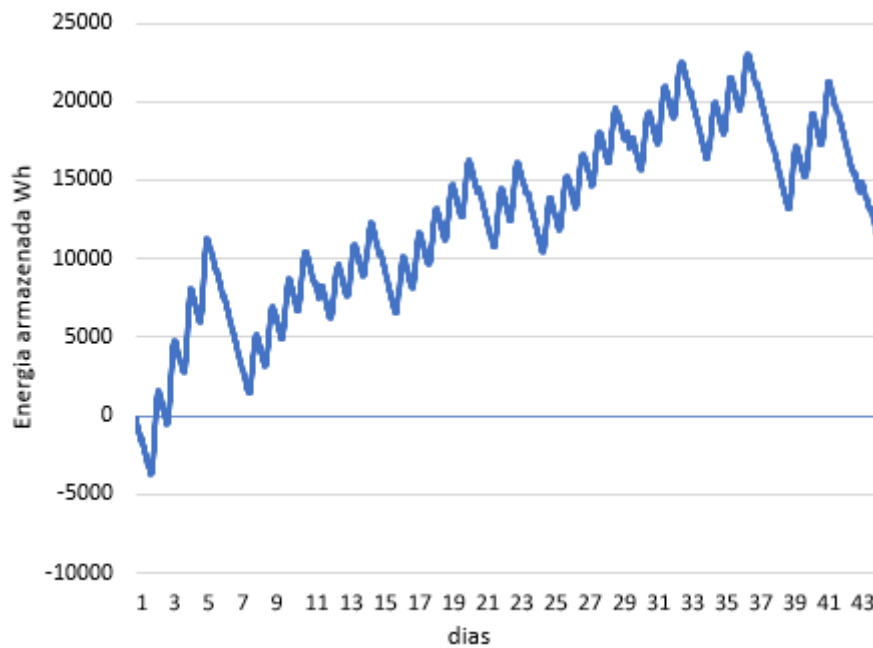


Figura 51: Teste com 4 painéis e sem produção de energia em andamento

No caso onde não há produção de energia em andamento foi testado com 3 módulos na Figura 50, no entanto verificou-se não satisfazerem as necessidade, sendo necessário o uso de 4 módulo, como se pode observar pela Figura 51.

4.1.7. Dimensionamento de bateria (pela produção)

Pela análise dos gráficos a cima na Figura 49 e Figura 51, conclui-se que será preciso uma bateria de 25 kWh para se poder armazenada toda a energia produzida, em especial se for sem produção de energia em andamento a bateria terá de começar com pelo menos 5 kWh de energia e neste caso basta uma de 12 kWh. Em condições iguais, deveria haver menor produção no caso de sem produção de energia durante o percurso isto é explicado pelo maior número de módulos, que prevalece em relação à quantidade de tempo em funcionamento.

Electrical Characteristics	
Nominal voltage	12 Volts
Nominal Capacity (20H)	230 Ah
Nominal Capacity (100H)	250 Ah
Electrolyte density	1.290 ± 0.015 g/ml

Figura 52: Capacidade de descargas fornecidas pelo catálogo [32]

Assim sabendo que a bateria usada tem 250Ah, pela Figura 52 e a tensão do sistema 12V, serão precisas 9 baterias, isto para o caso sem produção durante o percurso. Com produção durante o percurso bastariam 4 baterias.

4.1.8. Dimensionamento de bateria (pelo consumo)

Tendo a tabela de consumos e sabendo um mínimo para a capacidade das baterias pelos gráficos acima, procede-se aos restantes cálculos da capacidade das baterias.

Visto se tratar de uma autocaravana escolheu-se o número máximo de dias de autonomia, ou seja, 4 dias, e o valor de consumo diário foi aproximadamente 4,3 kWh (Tabela 3). O poder de descarga será o do catálogo da bateria previamente escolhida, que será de 30%.

A bateria selecionada irá ser do tipo lítio Gel de tração, sendo as de lítio mais vantajosas (podendo aumentar o poder de descarga de 0,3 para 0,9) e de gel porque estará num espaço fechado (autocaravana).

A capacidade do banco de bateria para o regime de descarga será de 57043,63 Wh que com uma tensão do sistema de 12 V corresponde 4753,64 Ah.

Logo só haverá uma bateria em série, e sendo a capacidade de descarga a 20 horas, 230 Ah disponibilizado no catálogo do fabricante (Figura 52) serão precisas 20,67, ou seja, 21 baterias.

Inferem que 21 baterias seriam demais (pela própria quantidade assim como o peso que representam 1197 Kg) então foi reduzido o número de dias de autonomia para 2, refazendo os cálculos com os mesmos pressupostos descritos acima, o número de baterias

será reduzido para 10,33 baterias, ou seja, 11 baterias (627 Kg). Isto tendo em conta que uma caravana em Portugal poderá ter 3500 kg.

As informações das baterias estarão disponíveis em [32].

4.1.9. Dimensionamento de controlador de carga

Para o dimensionamento do inversor foi assumido que os módulos serão montados em série de maneira a usar o mínimo de inversores e controladores de carga.

A corrente de curto-circuito não será afetada pelo número de módulos, visto estarem montados em série, logo manterá o valor de 9,4 A que com o fator de 25% segundo expressão a corrente máxima do controlador de carga será 11,75 A.

Optou-se por um controlador de carga de tecnologia MPPT pela sua eficiência em relação a outras tecnologias.

As informações do controlador de carga estarão disponíveis em [33].

4.1.10. Dimensionamento do inversor

Para o caso de todos os equipamentos estarem a funcionar simultaneamente, será utilizada no cálculo do dimensionamento do inversor, a soma de todas as potências dos equipamentos, que estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6: Cálculo da potência total

Equipamentos	Potência (W)
máquina de café	1200
frigorífico 12v	150
Termoacumulador 230v	300
bomba de água 12v	40,8
televisão 12v	100
3 lâmpadas	15
2 PC 230v	120
4 telemóveis 230v	40
total	1965,8

Como existem equipamentos dependentes de motores como o frigorífico e não se sabe que outros equipamentos poderão ser ligados futuramente optou-se por um inversor de onda sinusoidal pura.

O inversor selecionado converte 12 V/24 V DC em 110 V/220 V AC $\pm 10\%$ (opcional). A corrente de saída pode ser usada para todos os tipos de dispositivos. carregador para viagens, férias ou locais de trabalho remotos.

Como a potência das cargas não excede a do inversor basta um inversor.

As informações do inversor estarão disponíveis em [34].

4.2. Segundo caso de estudo

Pela análise da Figura 53, há um maior aumento da energia entre Lisboa e Baiona, em relação às outras cidades, pelo que se pode chegar à conclusão de que o sistema é mais eficiente, do ponto de vista de que produz mais em relação aquela que consome.

Assim inicia-se um segundo caso de estudo, para estudar as influências que a escolha do percurso terá na produção do sistema fotovoltaico, e se é viável a redução de módulos fotovoltaicos logo no investimento inicial, espaço a ser usado e peso.

Também poderá ter influência no número de baterias, uma vez se concluir que se pode reduzir o número de painéis poderá haver uma diminuição do máximo de energia armazenado. Por outro lado, mesmo que a produção por painel aumente, pode não aumentar o suficiente, de maneira que a produção consiga acompanhar os consumos.

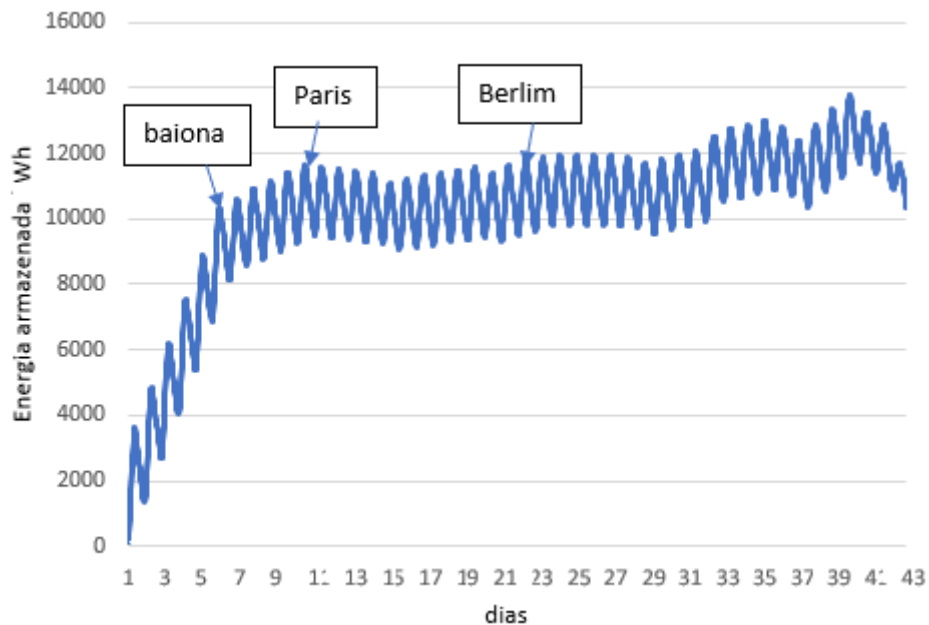


Figura 53: Indicações dos momentos em que a autocaravana se encontrava em Baiona, Paris e Berlim.

Esta eficiência denotasse mais em locais a sul de Paris, esta análise foi o que levou a execução deste segundo caso de estudo em que a rota será mais produtiva, isto é, a sul de Paris.

4.2.1. Concessão da rota

Esta rota foi concebida de maneira a estudar um caso mais provável de ocorrer e não o caso mais desfavorável, sendo assim foram considerados os seguintes locais de paragem, por ordem: Lisboa, Madrid, Baiona, Paris, Lyon, Milão, Veneza e Roma.

4.2.2. Valores de Radiação e temperatura

Tal como no Primeiro caso de estudo os valores de Radiação e temperatura são obtidos pelo programa PVGIS Online Tool.

4.2.3. Cálculo das necessidades energéticas do sistema

Os valores de consumo irão se manter como os usados no primeiro caso de estudo.

4.2.4. Dimensionamento do Painel

Depois de obter os dados referidos anteriormente. Pode-se calcular o número de painéis e de seguida área necessária para um sistema autónomo.

Usando a ferramenta Excel, na folha de calculo substituiu-se o número de painéis para saber o menor número de painéis necessário, assim no caso onde há produção de energia em andamento, tal como foi feito no primeiro caso de estudo.

Na Figura 54 está o resultado dos cálculos efetuados, onde foram usados 3 módulos, na Figura 55 está o resultado dos cálculos efetuados, onde foram usados 2 módulos.

Os gráficos conseguidos representam um total de 639 horas para o segundo caso de estudo.

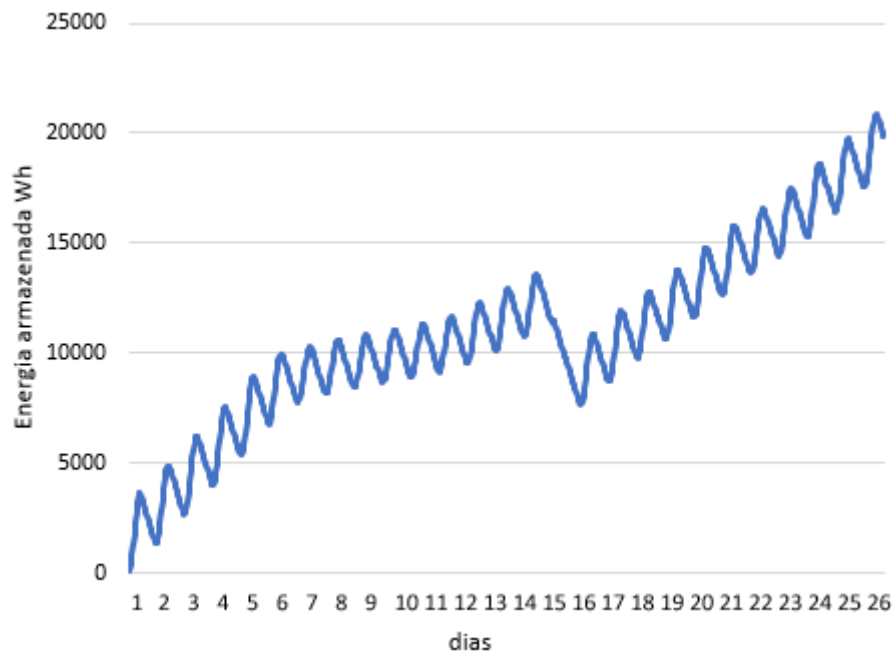


Figura 54: Variação da energia ao longo da nova rota, com 3 módulos fotovoltaicos

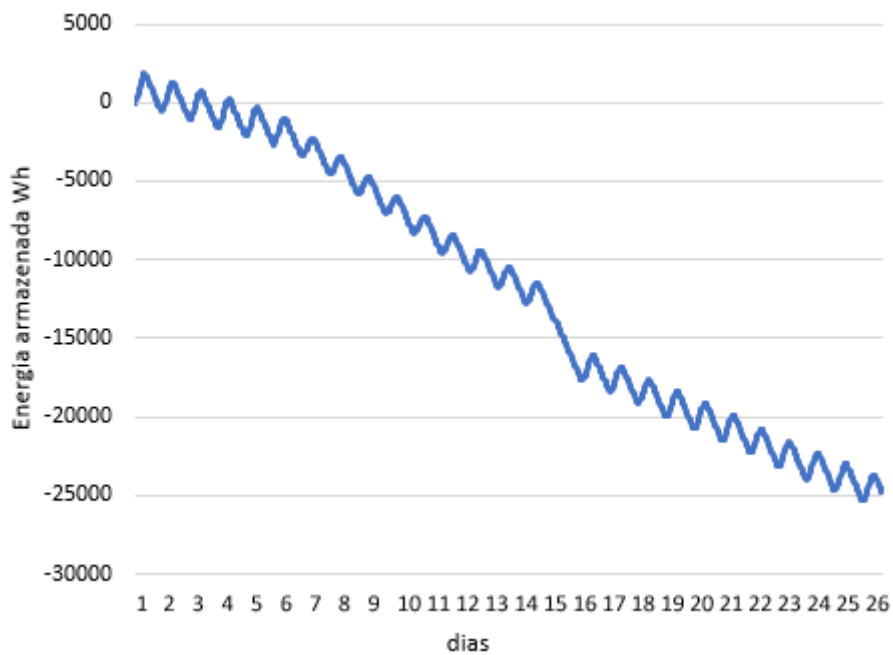


Figura 55: Variação da energia ao longo da nova rota, com 2 módulos fotovoltaicos

Com este resultado, representado na Figura 54 e Figura 55, comprova-se que a escolha da rota influencia a produção de energia. No entanto não foi o suficiente para se poder reduzir o número de painéis.

Por outro lado, para poder armazenar toda a energia seriam precisas mais baterias, o que neste caso não se justifica, e manter-se-ia a quantidade de baterias mesmo sabendo que parte da produção poderá vir a ser desperdiçada. No entanto, se os percursos escolhidos pelos utilizadores forem parecidos, pode-se diminuir o número de dias de autonomia no cálculo do número de baterias, o que consequentemente diminuiria o número de baterias.

Capítulo 5: Análise económica

Como em qualquer projeto viável este terá de apresentar lucro, para se poder avaliar este lucro, é feita uma análise de fluxos de caixa. Para além de se determinar o tempo de retorno ao investimento.

No contexto desta avaliação assume-se que quando a autocaravana não está em uso, o sistema fotovoltaico será desmontado e instalado num terreno junto à casa fornecendo eletricidade à casa. Neste caso torna-se num sistema que será complementado pelo fornecedor de energia (*ON GRID*).

Os valores serão baseados na mesma quantidade de painéis acima dimensionados com a diferença que as coordenadas usadas pelo programa PVGIS Online Tool serão as mesmas para o resto do ano, neste caso foi selecionada a zona de Fernão Ferro, em Portugal.

Os valores na base desta análise económica, são os resultados do primeiro caso de estudo com produção de energia ao longo da deslocação.

5.1. Método de análise da viabilidade económica

Na aplicação destes métodos é importante ter a noção de o que é o fluxo de caixa. O fluxo de caixa é uma ferramenta utilizada para o controlo de entrada e saída de capital, os dados em que esta se baseia correspondem às receitas e despesas ao longo de um período que poderá ser de dias, meses ou anos [2].

5.1.1. Payback simples

Neste método de análise é calculado o tempo de demora da recuperação do valor do investimento inicial [35].

Neste cálculo deve-se saber todos os custos relacionados com o investimento como equipamento, despesas, etc.

Deste modo dividindo o investimento inicial com a subtração das receitas com as despesas, obtém-se o tempo total de retor no de investimento.

$$t = \frac{R - D}{I_{inicial}} \quad 28$$

Onde:

t – Tempo de retorno de investimento, a unidade corresponderá à usada em R e D.

R – Receitas periódicas;

D – Despesas periódicas;

$I_{inicial}$ – Investimento inicial.

Na forma anterior é difícil demonstrar as variações das receitas e despesas daí é costume utilizar um somatório dos lucros anuais a onde se pode aplicar fatores que se vão aplicar às receitas e/ou aos lucros, (como por exemplo o aumento do preço da eletricidade) [36], [37].

Essa maneira pode ser representada pela seguinte expressão:

$$t_R = \frac{\sum_{t=1}^n (R_t - D_t)}{TMA} - I_0 \quad 29$$

Onde,

R_t - É a receita correspondente ao período t ;

D_t - É a despesa correspondente ao período t ;

$I_{inicial}$ – Investimento inicial;

t_R – Tempo de retorno de investimento.

TMA – Taxa mínima de atratividade.

Como se trata de painéis fotovoltaicos. a receita é diretamente proporcional ao preço do fornecedor de eletricidade. Assim o preço será de 0,1291 €/kWh, baseando-se nos valores fornecidos pela Tabela 7, onde foi selecionado o fornecedor Goldenergy.

Tabela 7: Valores de venda de energia [38]

Fornecedor	Preço kWh de luz
EDP Comercial	0.1958 €/kWh
Goldenergy	0.1291 €/kWh
Endesa	0.1293 €/kWh
Iberdrola	0.1283 €/kWh
Galp Energia	0.1711 €/kWh
Repsol	0.1325 €/kWh
Mercado Regulado SU Eletricidade	0.1567 €/kWh

A esse preço irá tentar-se atribuir um fator responsável por tentar simular as variações que ocorrem todos os anos nos preços do fornecedor.

Em que $R_{t+1} = R_t \times (1 + A)$

Sendo A uma taxa de atualização de preços de venda de energia todos os anos nos preços do fornecedor, neste estudo o valor corresponderá a 2,3%, valor baseado na média dos últimos 4 anos [39], [40].

Além da variação do preço os painéis fotovoltaicos também vão perdendo eficiência, onde para este caso foi considerado 0,5%, exceto para o primeiro ano que foi assumido 3%.

Neste caso os custos do investimento inicial, para além dos equipamentos iniciais como os módulos, inversor, controlador de carga e bateria, também existem os

equipamentos que irão substituir os iniciais ao fim do seu tempo de vida e a manutenção que será de 0,5% em relação ao custo inicial [41].

Os tempos de vida considerados para os cálculos foram [36]:

- Conjunto de baterias – 5 anos:
- Controlador de carga – 10 anos:
- Inversor de frequência – 10 anos;
- Painel solar fotovoltaico – 30 anos.

A unidade do período de teste foi ano, e foi analisado do ano 0 até ao 30 que corresponde respetivamente a 2023 e 2053. Logo foram comprados 3 vezes o número de inversores de frequência, 3 vezes o número de controladores de carga e 6 vezes o número de baterias, apesar de se saber que ocorrerá mudanças de preço nas baterias são valores insertos e não se sabe quando ocorreram, os painéis não foram alterados pois o seu tempo de vida acaba no fim do estudo.

No caso das baterias, a quantidade de baterias foi definida como 66, pelo cálculo mais conservador.

Na Tabela 8 estão os valores de base dos cálculos da análise financeira.

Tabela 8: dados base da análise financeira

Equipamento	Preço/unitário (€)	Quantidades	Valor total (€)
Painel fotovoltaico	116,35	4	465,4
Controlador de carga	54,17	3	162,51
Inversor	87,54	3	262,62
Baterias	229,6	66	15153,6
Total			16044,13
Total com manutenção	-----	-----	16124,35065
Perda de eficiência 1º ano/anos seguintes	3%/0,5%		
Aumento do preço (anual)	2,30%		
TMA	5%		

Na Tabela 9 é feito o fluxo de caixa de 30 anos, tal como em [42], de modo a se ter valores para o resto do ano, o sistema quando não está a ser utilizado em viagens estará fixo em Fernão Ferro, desta maneira este sistema passa a tratar-se como um sistema normal, onde se aplica a mesma metodologia de um sistema em viagem, com a diferença de que as coordenadas não se alteram, assim foi feita a Tabela 9.

Tabela 9: valores obtidos do estudo financeiro

Ano	Tarifa (€/KWh)	Produção (KWh)	Preço total anual (€)	Preço acumulado (€)	Fluxo de caixa (€)
2023	0,129	1583,53	204,43	204,43	-15929,65
2024	0,132	1536,02	202,86	407,30	-15754,92
2025	0,135	1528,34	206,49	613,78	-15594,14
2026	0,138	1520,70	210,18	823,97	-15446,47
2027	0,141	1513,10	213,94	1037,91	-15311,12
2028	0,145	1505,53	217,77	1255,68	-15187,34
2029	0,148	1498,00	221,66	1477,34	-15074,43
2030	0,151	1490,51	225,63	1702,97	-14971,71
2031	0,155	1483,06	229,66	1932,63	-14878,56
2032	0,158	1475,65	233,77	2166,40	-14794,37
2033	0,162	1468,27	237,95	2404,35	-14718,58
2034	0,166	1460,93	242,21	2646,56	-14650,65
2035	0,170	1453,62	246,54	2893,10	-14590,08
2036	0,174	1446,35	250,95	3144,05	-14536,39
2037	0,177	1439,12	255,44	3399,48	-14489,14
2038	0,182	1431,93	260,00	3659,49	-14447,90
2039	0,186	1424,77	264,66	3924,14	-14412,26
2040	0,190	1417,64	269,39	4193,53	-14381,85
2041	0,194	1410,56	274,21	4467,74	-14356,32
2042	0,199	1403,50	279,11	4746,85	-14335,31
2043	0,203	1396,48	284,10	5030,95	-14318,53
2044	0,208	1389,50	289,18	5320,13	-14305,66
2045	0,213	1382,55	294,36	5614,49	-14296,43
2046	0,218	1375,64	299,62	5914,11	-14290,57
2047	0,223	1368,76	304,98	6219,09	-14287,84
2048	0,228	1361,92	310,43	6529,52	-14287,98
2049	0,233	1355,11	315,99	6845,51	-14290,79
2050	0,239	1348,34	321,64	7167,15	-14296,06
2051	0,244	1341,59	327,39	7494,54	-14303,58
2052	0,250	1334,89	333,24	7827,78	-14313,18
2053	0,255	1328,21	339,21	8166,99	-14324,68

Pelas tabelas denota-se 94% do custo corresponde ao valor das baterias sendo uma desvantagem dos sistemas *off grid*, e assim sendo nunca ocorrerá o retorno do investimento, pelo menos com os valores iniciais usados

Capítulo 6: Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

Este trabalho apresentou um estudo que pretendeu avaliar a viabilidade técnica e económica de um sistema fotovoltaico isolado, com sistema de banco de baterias, associado a uma base móvel (autocaravana).

A análise técnica foi realizada com base nas equações apresentadas na metodologia e nas figuras, onde se chega à conclusão de que com 3 painéis fotovoltaicos a produção consegue superar os consumos definidos, e que houve uma influência significativa ao retirar a produção durante a deslocação.

A partir da análise técnica realizada, e com as quantidades e preços dos equipamentos requeridos, foi feita uma análise económica onde foi considerado a variação dos preços da eletricidade, a diminuição da eficiência dos equipamentos e o seu tempo de vida útil. De onde se concluiu que, financeiramente, o retorno do investimento inicial, com base nos valores usados, não ocorrerá. Tendo em conta os resultados apresentados chegou-se à conclusão de que o sistema é tecnicamente viável mas não é economicamente viável.

De seguida, pela análise dos valores dos gráficos do primeiro caso de estudo, foi realizado um segundo caso de estudo, uma vez que no primeiro caso de estudo, em certos dias, estes resultados apresentaram um maior aumento da produção de energia elétrica. Estes aumentos estão diretamente relacionados com a localização do sistema. Assim, foi feito um segundo caso de estudo onde a rota inicial foi modificada, dando resultado a um aumento da energia máxima, ou seja, houve um aumento da produção com a mesma quantidade de módulo. No entanto, esse aumento não justificou a redução do número de módulos. Se os percursos escolhidos forem sempre idênticos ao segundo caso de estudo, pode justificar uma diminuição no número de dias de autonomia, o que levará à diminuição no número de baterias, logo à diminuição do investimento inicial.

Algumas recomendações para trabalhos futuros serão:

Um estudo de forças aplicadas aos painéis, onde se tenha em conta as condições do veículo em especial a velocidade a que se desloca (pois irá provocar uma força por parte do ar), e o peso que o sistema total irá acrescentar ao veículo levando em conta que isso acarreta maior consumo de combustível.

Um estudo de critérios na escolha dos melhores percursos, tanto para o ponto de vista turístico como para o ponto de vista da produção da energia.

Estudar a variação de consumos que poderá haver de acordo com a ocupação do veículo, alteração de equipamento utilizados variando a eficiência dos mesmos e tempo de utilização.

Um estudo de impacto ambiental, uma vez que a diminuição das emissões de gases poluentes é uma mais-valia deste trabalho.

Referências

- [1] F. Pacheco, *Energias renováveis: breves conceitos,*” *Conjuntura e Planejamento*. Salvador (C&P), 2006.
- [2] B. Timoteo, «Projeto de sistema fotovoltaico isolado para uma área rural em sistema com bancos de baterias: análises das viabilidades técnica e econômica», Universidade federal do Pampa, 2022.
- [3] «Estatísticas rápidas das renováveis». Acedido: 7 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/publicacoes/estatisticas-rapidas-das-renovaveis/>
- [4] «EESC-USP». Acedido: 22 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://eesc.usp.br/noticias/comunicados_s.php?guid=eixo-tematicos-usp-algumas-preocupacoes-sobre-energia&termid=notas
- [5] «Energy statistics - an overview - Statistics Explained». Acedido: 18 de Outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview
- [6] «Portugal Um país com imensa energia». Acedido: 1 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dn.pt/revistas/nm/portugal-um-pais-com-imensa-energia-2546081.html>
- [7] «▷ Mapa de la radiación solar en Europa | Paneles solares». Acedido: 1 de Abril de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.panelessolaresbarcelona.com/energia-solar-renovable/mapa-de-la-radiacion-solar-en-europa/>
- [8] Greenpeace, «Solar Generation 6 - Executive Summary», *EPIA*, 2010.
- [9] «Sol, Radiação Solar e as Fontes de Energia Renováveis». Acedido: 27 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <http://energes.com.br/sol-e-a-radiacao-solar/>
- [10] «Antropia: Rotação e Translação». Acedido: 23 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <http://antropia3.blogspot.com/2010/10/rotacao-e-translacao.html>
- [11] «Incidência solar: como avaliar no momento de escolher um imóvel». Acedido: 23 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ryazbek.com.br/blog/apartamentos/incidencia-solar/>
- [12] L. Araújo e A. Pinho, «Projeto de um seguidor para coberturas, destinado a painéis solares», Universidade do Minho, Guimarães, 2012.
- [13] S. Viana, «Modelação de Micro-Sistemas Híbridos Fotovoltaicos/Eólicos para Produção Descentralizada», Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.

- [14] «Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares». Acedido: 23 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituientes-de-paineis-solares/>
- [15] H. Nunes, «Modelação e Análise de Sistemas de Geração Fotovoltaica», Universidade da beira interior, 2017.
- [16] «Capítulo 1-Energia Solar», Acedido: 24 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <http://www.prof2000.pt/users/geologia/testes/quiz.htm>
- [17] J. Carneiro, «“Módulos Fotovoltaicos: Características e Associações”», *Universidade do Minho*, 2010.
- [18] «Sistema fotovoltaico isolado ou conectado à rede: Entenda as diferenças». Acedido: 6 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-isolado-ou-conectado/>
- [19] «ENAT - Sistema Isolado da Rede elétrica». Acedido: 9 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.enat.pt/sistemas-isolados>
- [20] C. Sofia Adjuto da Silva Melo de Campos, J. Filipe Pereira Fernandes João Paulo Neto Torres Júri Presidente, R. Manuel Gameiro de Castro Orientador, J. Filipe Pereira Fernandes Vogal, e A. Carlos de Campos Simões Baptista, «Estudo da eficiência dos painéis solares com concentradores e arrefecimento térmico em função do fluido utilizado no arrefecimento das células solares», 2018.
- [21] «O que é uma curva IV em sistemas fotovoltaicos ? | LinkedIn». Acedido: 7 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-uma-curva-iv-em-sistemas-fotovoltaicos-cunha/?originalSubdomain=pt>
- [22] «Seguidor solar - tracker: vantagens e desvantagens | Portal Solar». Acedido: 24 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/seguidor-solar-tracker-vantagens-e-desvantagens>
- [23] B. Nascimento, «Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar», Jul. 2015.
- [24] R. José e M. Cortez, «Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica», Abr. 2013.
- [25] «Solar tracker performance and economics in Australia - Solar Choice». Acedido: 24 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>
- [26] I. Luque-Heredia, J. M. Moreno, P. H. Magalhães, R. Cervantes, G. Quéméré, e O. Laurent, «Inspira’s CPV sun tracking», *Springer Series in Optical Sciences*, vol. 130, pp. 221–251, 2007, doi: 10.1007/978-3-540-68798-6_11/COVER.
- [27] D. M, L. J, C. J, e W. T, «Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance», *Photovoltaic Specialists Conference*, 2008.

- [28] G. Roberto, «An algorithm for the computation of the solar position», pp. 462–470, 2008, Acedido: 25 de Março de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X07002162>
- [29] «Motorhomes solares - Minha Casa Solar». Acedido: 1 de Outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <http://blog.minhacasasolar.com.br/motorhomes-solares/>
- [30] N. Femia, G. Petrone, G. Petrone, e M. Vitelli, *Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems*, M. Vitelli. 2012.
- [31] «Luxor ECO LINE HALF-CELLS P120/280W solar panel». Acedido: 29 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.europe-solarstore.com/luxor-eco-line-half-cells-p120-280w.html>
- [32] «Bateria Solar 250AH OZONYX Solar Aberto - Baterias web». Acedido: 29 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://bateriasweb.com/bateria-solar-250ah/?lang=pt-pt>
- [33] «12a 25a mppt controlador de carga solar com tela lcd, regulador de carga dupla, portas para rv, painel solar - AliExpress». Acedido: 29 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/4001272688898.html>
- [34] «WREEE Inversor de onda senoidal pura (pico de 2000W/4000W), conversor de tensão DC de 12 V/24 V a 110 V/220 V/230 V, com conexão USB para campismo, viagens, carro, 2000 W-12 vTo220v : Amazon.es: Electrónica». Acedido: 29 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: https://www.amazon.es/dp/B09WDK9HC6?tag=track-ect-pt-918371-21&linkCode=osi&th=1&language=pt_PT&ascsubtag=ecSEP1jw3crzljfpg72c
- [35] «Payback: O que é e como calcular o da sua empresa». Acedido: 6 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://rockcontent.com/br/blog/payback/>
- [36] «Vista do Estudo Sobre a Implantação de Energia Solar Fotovoltaica: Estudo de Caso do Museu Amanhã e Aquário Marinho do Rio de Janeiro (Aquário)». Acedido: 6 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/724/591>
- [37] «View of Análise da viabilidade econômico-financeira para implantação de projeto de produção de energia solar fotovoltaica em uma propriedade rural». Acedido: 6 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/1521/734>
- [38] «Melhor preço de eletricidade em 2023 - Descubra o mais barato». Acedido: 23 de Outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.comparamais.pt/blog/saiba-qual-o-melhor-preco-de-eletricidade-em-2021-e-poupe-nas-faturas>
- [39] «INE confirma inflação média anual de 7,8% em 2022, um máximo de 30 anos – ECO». Acedido: 26 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://eco.sapo.pt/2023/01/11/ine-confirma-inflacao-media-anual-de-78-em-2022-um-maximo-de-30-anos/>

- [40] «ERSE - Tarifas e preços - eletricidade». Acedido: 26 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.erse.pt/atividade/regulacao/tarifas-e-precos-eletricidade/>
- [41] «Custo de manutenção de painel fotovoltaico: alto ou baixo?» Acedido: 6 de Julho de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://elysia.com.br/manutencao-de-painel-fotovoltaico/>
- [42] «Vista do Estudo Sobre a Implantação de Energia Solar Fotovoltaica: Estudo de Caso do Museu Amanhã e Aquário Marinho do Rio de Janeiro (Aquário)». Acedido: 7 de Setembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/724/591>
- [43] «Azimuth Angle | PVEducation». Acedido: 23 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/azimuth-angle>
- [44] «Elevation Angle | PVEducation». Acedido: 23 de Fevereiro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/elevation-angle>