

Análise técnica e económico-financeira de um sistema  
de abastecimento de veículos zero emissões  
integrando um sistema fotovoltaico

Nuno Miguel Martins da Rocha

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



11 de Setembro de 2012



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado em Energias Sustentáveis

Candidato: Nuno Miguel Martins da Rocha, Nº 1030852, 1030852@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Prof. Doutor António Andrade, ata@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Energias Sustentáveis

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



11 de Setembro de 2012



## *Agradecimentos*

Esta dissertação representa o final da minha vida académica, que foi passada integralmente no Instituto Superior de Engenharia do Porto. Por esse motivo, agradeço ao ISEP e aos seus docentes, pela maneira como me prepararam para a vida profissional, dotando-me das ferramentas necessárias para ultrapassar os desafios que se adivinham, perante um percurso profissional cada vez mais duro e exigente.

Ao Prof. Doutor António Andrade, pela sua disponibilidade e pelas várias horas de discussão passadas no seu gabinete, orientando-me de maneira a que esta dissertação se tornasse uma realidade, com uma valoração mais positiva.

A todos os amigos e companheiros de estudo, por proporcionarem um excelente ambiente de trabalho e de entreatada, durante aquelas horas de “batalha” diante dos apontamentos: em grupo os nossos objectivos são sempre mais fáceis de alcançar.

À minha família, pelo apoio e paciência revelados durante estes anos e pelos conselhos úteis que me proporcionaram quando as coisas estavam mais difíceis.

A mi segunda família de Vigo, por hacerme sentir querido, por estar sempre ahí en los momentos buenos y en los menos buenos y por tener siempre la palabra acertada en el momento oportuno.



## *Resumo*

Com o aumento da população mundial registado nos últimos anos surgiu também uma maior procura energética. Esse aumento foi inicialmente colmatado recorrendo essencialmente a fontes de origem fóssil, pelo facto destas serem mais baratas. No entanto, essa tendência de preços baixos sofreu o primeiro abalo nos anos 70 do século passado, altura em que o preço do petróleo disparou, devido a questões políticas. Nessa altura ficou visível para os países ocidentais o quanto estes eram dependentes dos países produtores de petróleo que, em geral, são instáveis politicamente. Começou então a procura de fontes energéticas alternativas.

Além da questão económica do aumento do preço dos combustíveis, existe também o problema ambiental. Os maiores responsáveis pela emissão de gases efeito estufa (GEE) são os combustíveis fósseis. Os GEE contribuem para o aquecimento global, o que origina fenómenos ambientais severos que poderão levar a mudanças climáticas significativas.

As energias renováveis apresentam-se como a solução mais viável ao problema energético e ambiental que se verifica actualmente, porque permitem colmatar o aumento da procura energética de uma forma limpa e sustentável. Na sequência destes problemas surgiram nos últimos anos veículos que permitem reduzir ou mesmo eliminar o consumo de combustíveis fósseis, como os veículos híbridos eléctricos, eléctricos e a hidrogénio.

Nesta dissertação analisa-se um sistema que foi pensado para ser implementado em áreas de serviço, que permite efectuar o carregamento de *electric vehicles* (EV) utilizando energia eléctrica de origem fotovoltaica e a produção de hidrogénio para os *fuels cell electric vehicles* (FCEV). É efectuada uma análise económica do sistema, uma análise ambiental e analisou-se também o impacto na redução da dependência do país em relação ao exterior, sendo ainda efectuada uma pequena análise ao sistema MOBIE. No caso dos veículos a hidrogénio, foi determinada qual seria a melhor opção em termos económicos, para a produção de hidrogénio considerando três regimes de produção: recorrendo apenas à energia eléctrica proveniente do sistema fotovoltaico, apenas à energia eléctrica da rede, ou uma combinação dos dois regimes.

O sistema estudado nesta dissertação apresenta um enorme potencial a nível energético e ambiental, surgindo como alternativa para abastecer os veículos que irão permitir, no futuro, eliminar a dependência energética em relação às fontes fósseis e ao mesmo tempo diminuir a quantidade de gases efeito estufa emitidos para a atmosfera.

***Palavras-Chave***

Veículos a hidrogénio, FCEV, Veículos eléctricos, EV, Gases Efeito Estufa, combustíveis fósseis, energia, veículo híbrido, baterias, células de combustíveis, células fotovoltaicas, fotovoltaico, análise, energia renovável, radiação.

## *Abstract*

The increase in world population that occurred over recent years has resulted in a greater energy demand. Due to the fact that in the past the fossil fuels were cheaper, they were seen and used as the solution to the increase of energy consumption. However, this trend of low prices suffered its first blow in the 70s of last century, when oil prices soared due to political issues. Due to the oil crisis, western countries realized how fuel dependent they were to the oil-producing countries which, in general, are politically unstable. The search for alternative energy sources began.

Aside from the issue of increasing fuel prices, there is the environmental side of the problem. Fossil fuels are the major responsible for greenhouse gas emissions (GHG). GHGs contribute to global warming, which causes severe environmental phenomena that may lead to significant climate changes.

Renewable energies are the most viable solution to the energy and environmental problem that exists today, because they can supply the growing energy demand in a clean and sustainable way. In light of these problems, vehicles that can reduce or eliminate the consumption of fossil fuels such as hybrid electric vehicles, electric and hydrogen have emerged in recent years.

This dissertation analyzes a system designed to be implemented in gas station that allows the charging of electric vehicles (EV) using electricity originated from photovoltaic technologies and the production of hydrogen for fuel cell electric vehicles (FCEV). The systems are analyzed economically and environmentally. It was also analyzed the impact on reducing the country's external dependence, and even made a small analysis of the system MOBIE. In the matter of hydrogen vehicles system, it was determined what would be the best option economically, for the production of hydrogen. It was considered three production options: using only the photovoltaic system, only from grid electricity, or a combination of the two production options.

The system studied in this dissertation shows great potential on an energy and environmental level, appearing as the alternative to refuel the vehicles that will allow in future to eliminate the energy dependence regarding fossil sources while, at the same time, reduce the amount of greenhouse gases emitted to the atmosphere.

***Keywords***

Hydrogen vehicles, FCEV, electric vehicles, EV, greenhouse gases, fossil fuels, energy, hybrid vehicles, batteries, fuel cells, photovoltaic cells, photovoltaic, analysis, renewable energy, radiation.

## *Résumé*

L'agrandissement de la population mondiale enregistré ces dernières années est aussi arrivé à une plus grande recherche d'énergie. Cet agrandissement a été accompli dans un premier moment en train d'utiliser des sources d'origine fossile qui sont même moins chers. Toutefois, cette tendance de bas prix a souffrit son premier montée dans les années 70 du dernier siècle, une hauteur dans laquelle le prix du pétrole a monté à cause des questions politiques. À ce moment-là des pays occidentales étaient dépendantes des pays producteurs du pétrole qui ont généralement une politique instable. Après cette situation, la recherche des sources d'énergie alternatives a commencé.

En plus de la question économique de l'augmentation du prix des combustibles, il y a aussi un problème environnemental. Les plus grands responsables de l'émission des gaz à effet de serre (GES) sont les combustibles fossiles. Les GES aident l'effet de serre, celui-ci origine des phénomènes environnementales très durs qui peuvent provoquer des changements climatiques importantes.

Les énergies renouvelables se présentent comme la solution la plus facile au problème de l'énergie et du environnement qui existe en ce moment parce qu'elles permettent de remplacer l'augmentation de la recherche de l'énergie dans une manière propre et durable. Au déroulement de ces problèmes ont surgi ces dernières années des véhicules qui permettent réduire ou même éliminer la consommation des combustibles fossiles, ce sont les véhicules hybrides électriques, qui fonctionent avec électricité et hydrogène.

Dans cette dissertation on analyse un système d'abord pensé pour être mis en pratique aux aires de service, celui-ci fait possible de charger les *electric vehicles* (EV) en train d'utiliser de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque et la production d'hydrogène pour les *fuels cell electric vehicles* (FCEV). On a fait un analyse économique du système, un analyse environnemental et aussi un analyse de l'impact dans la réduction de la dépendance du pays en relation au extérieur, avec un autre analyse au système MOBIE. Dans ce cas des véhicules à hydrogène, on a déterminé quelle serait la meilleure option en

des termes économiques pour la production d'hydrogène en traînant de considérer trois types de production: simplement en ayant recours à l'énergie électrique du système photovoltaïque, en utilisant l'énergie électrique du réseau ou en combinant les deux types derniers.

Le système étudié dans la dissertation présente un énorme potentiel à niveau énergétique et environnemental, il a surgi comme une alternative pour fournir des véhicules qui vont permettre, à l'avenir, éliminer la dépendance énergétique en relation aux sources fossiles et, au même temps, diminuer la quantité des gaz à effet de serre émis pour l'atmosphère.

***Mots-clés***

Véhicules à hydrogène, FCEV, Véhicules électriques, EV, Gaz à effet de serre, Combustibles fossiles, de l'énergie, véhicule hybride, Batteries, Cellules de combustibles, des cellules photovoltaïques, photovoltaïque, analyse, énergie renouvelable, radiation.

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ENERGIAS RENOVÁVEIS</b> .....	<b>4</b>
2.1. ENERGIA DOS OCEANOS .....	4
2.2. BIOMASSA .....	5
2.3. ENERGIA HÍDRICA .....	6
2.4. ENERGIA EÓLICA .....	6
2.5. ENERGIA GEOTÉRMICA.....	7
2.6. ENERGIA SOLAR.....	7
2.6.1 FACTORES QUE INFLUENCIAM A INTENSIDADE DA RADIAÇÃO [15] .....	9
2.6.2 MÉTODOS DE CAPTAÇÃO DA ENERGIA SOLAR [20].....	13
<b>3. VEÍCULOS</b> .....	<b>14</b>
3.1. VEÍCULOS ELÉCTRICOS [21] .....	14
3.1.1 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉCTRICOS .....	16
3.2. VEÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS .....	20
3.2.1 GRAUS DE HIBRIDAÇÃO.....	20
3.2.2 CONFIGURAÇÕES VEÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS .....	21
3.3. BATERIAS .....	31
3.3.1 BATERIAS DE ÁCIDO DE CHUMBO.....	32
3.3.2 BATERIAS DE NÍQUEL METAL-HIDRETO METÁLICO (NIMH).....	33
3.3.3 BATERIAS DE IÕES DE LÍTIO [39] .....	34
3.3.4 BATERIAS NÍQUEL ZINCO (Ni-Zn).....	35
3.3.5 BATERIAS NÍQUEL CÁDMIO (Ni-Cd) .....	36
3.3.6 BATERIAS LÍTIO-FERRO-FOSFATO (LiFePO <sub>4</sub> ) [49] .....	37
3.4. VEÍCULOS ELÉCTRICOS COM CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.....	37
3.4.1 HIDROGÉNIO.....	38

3.4.2	ARMAZENAMENTO HIDROGÉNIO [55] [56] .....	39
3.5.	CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	41
3.5.1	TIPOS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL [57] [61].....	41
<b>4.</b>	<b>SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>44</b>
4.1.	TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA .....	44
4.2.	EFEITO FOTOVOLTAICO [14] [64].....	45
4.3.	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	47
4.4.	TECNOLOGIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS [14] [66] [67].....	50
4.5.	EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS [72].....	53
<b>5.</b>	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>55</b>
5.1.	SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	56
5.2.	SISTEMA DE CARREGAMENTO EV .....	62
5.2.1	ANÁLISE ECONÓMICA.....	68
5.2.2	ANÁLISE AMBIENTAL .....	72
5.2.3	ANÁLISE DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA .....	74
5.3.	SISTEMA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO .....	81
5.3.1	HIPÓTESE 1- PRODUÇÃO RECORRENDO APENAS AO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	83
5.3.2	HIPÓTESE 2- PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO UTILIZANDO APENAS A ENERGIA DA REDE.....	87
5.3.3	HIPÓTESE 3- PRODUÇÃO RECORRENDO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO E À ENERGIA DA REDE.....	91
5.3.4	ANÁLISE AMBIENTAL.....	94
5.3.5	ANÁLISE DA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA .....	95
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>98</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>101</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Ciclo de carbono [5].....	5
Figura 2. Esquema de funcionamento de uma central hídrica [7].....	6
Figura 3. Turbina eólica [9].....	6
Figura 4. Diagrama de Lindal [78].....	7
Figura 5. Princípio da reacção de fusão; Ângulo dos raios solares [13] [14].....	8
Figura 6. Translação anual da Terra [16].....	9
Figura 7. Balanço da radiação solar que entra na atmosfera [17].....	10
Figura 8. Espectro da radiação solar [14].....	11
Figura 9. Espectro da luz visível [18].....	11
Figura 10. Movimento do Sol ao longo de um dia [20].....	12
Figura 11. Comparação de um veículo eléctrico e um veículo a gasolina [28].....	19
Figura 12. Configuração das ligações de veículo eléctrico típico [29].....	19
Figura 13. Híbrido paralelo [35].....	22
Figura 14 Configuração de um híbrido paralelo completo [29] [30].....	22
Figura 15. Modo <i>power assist</i> , híbrido paralelo [30].....	23
Figura 16. Modo de travagem regenerativa, híbrido paralelo [30].....	23
Figura 17. Carga da bateria utilizando o motor de combustão, híbrido paralelo [30].....	23
Figura 18. Modo zero-emissões, híbrido paralelo [30].....	24
Figura 19. Modo convencional, híbrido paralelo [30].....	24
Figura 20. Híbrido série [30].....	24
Figura 21. Configuração básica de um híbrido série [29] [30].....	25
Figura 22. Modo <i>battery drive</i> , híbrido série [30].....	25
Figura 23. Carga da bateria utilizando o motor de combustão, híbrido série [30].....	26
Figura 24. Modo <i>hybrid drive</i> , híbrido série [30].....	26
Figura 25. Modo de travagem regenerativa, híbrido série [30].....	27
Figura 26. Híbrido série-paralelo [35].....	27
Figura 27. Configuração básica de um híbrido combinado [29] [30].....	28
Figura 28. Modo de operação apenas com motor de combustão, híbrido combinado [30].....	28
Figura 29. Modo zero-emissões híbrido, combinado [30].....	29
Figura 30. Modo de travagem regenerativa, híbrido combinado [30].....	29
Figura 31. Carga da bateria utilizando o motor de combustão, híbrido combinado [30].....	30
Figura 32. Modo <i>power assist</i> , híbrido combinado [30].....	30
Figura 33. Princípio de funcionamento de uma bateria [37].....	31
Figura 34. Princípio do processo de electrólise [80].....	38

Figura 35. Princípio de funcionamento de uma célula de combustível [59].....	39
Figura 36. Estrutura cristalina de materiais semicondutores [65] .....	46
Figura 37. Efeito fotovoltaico [66] .....	47
Figura 38. Associação de células em série [14] .....	47
Figura 39. Associação células em paralelo [14] .....	48
Figura 40. Curva característica típica de um painel fotovoltaico [14] .....	49
Figura 41. Influência da radiação solar e da temperatura num painel fotovoltaico [14] .....	49
Figura 42. Módulos de silício amorfo, policristalino e monocristalino [68] [69] .....	51
Figura 43. Princípio de funcionamento das células fotovoltaicas de multi-junção [68].....	52
Figura 44. Sensibilidade ao Espectro da Luz [72] .....	53
Figura 45. Zonas de absorção de uma célula do tipo multi-junção [68].....	54
Figura 46. Fotografia satélite da estação de serviço de Antuã .....	58
Figura 47. Área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos .....	59
Figura 48. Sistema <i>SmartPark</i> da empresa Martifer Solar [82].....	60
Figura 49. <i>Cubierta Solar</i> , Murcia [97] [104] .....	60
Figura 50. Princípio da destilação fraccionada [85].....	76
Figura 51. Produtos e quantidades obtidos de um barril de petróleo [86].....	76
Figura 52. Precipitação anual média de Portugal continental [87].....	84

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1. Características das baterias de chumbo [42] .....	33
Tabela 2. Características das baterias NIMH [43] .....	34
Tabela 3. Características das baterias de íões de lítio [45] .....	35
Tabela 4. Características das baterias Ni-Zn [47] .....	36
Tabela 5. Características das baterias NiCd [48] .....	36
Tabela 6. Características das baterias LiFePO <sub>4</sub> [50] .....	37
Tabela 7. Análise económica do sistema EV, carregamento de veículos eléctricos .....	69
Tabela 8. Análise económica do sistema EV, fornecimento da energia à rede .....	70
Tabela 9. Viabilidade económica do sistema de carregamento EV .....	71
Tabela 10. Impacto ambiental do sistema de carregamento EV .....	72
Tabela 11. Impacto ambiental da energia fornecida à rede .....	73
Tabela 12. Consumo energético anual dos transportes rodoviários [99] .....	75
Tabela 13. Percentagem de consumo anual de combustível .....	75
Tabela 14. Redução da dependência energética exterior, carregamento EV (hipótese 1) .....	78
Tabela 15. Redução da dependência energética exterior, carregamento EV (hipótese 2) .....	79
Tabela 16. Dados do gás natural [98] .....	80
Tabela 17. Redução da dependência energética exterior, fornecimento à rede .....	80
Tabela 18. Orçamento sistema de produção de Hidrogénio- Hipótese 1 .....	83
Tabela 19. Custo água [88] .....	85
Tabela 20. Custo de produção de hidrogénio – Hipótese 1 .....	86
Tabela 21. Horas por período de tarifação .....	87
Tabela 22. Orçamento sistema de produção de hidrogénio - Hipótese 2 .....	87
Tabela 23. Horas por período de tarifação .....	88
Tabela 24. Custo de produção de hidrogénio – Hipótese 2 .....	90
Tabela 25. Orçamento sistema de produção de hidrogénio - Hipótese 3 .....	91
Tabela 26. Custo de produção de hidrogénio – Hipótese 3 .....	93
Tabela 27. Análise ambiental do sistema de produção de hidrogénio .....	95
Tabela 28. Análise da redução da dependência energética, sistema de produção de hidrogénio .....	97



## *Lista de Abreviaturas*

AC	–	<i>Corrente Alternada</i>
CFE	–	<i>Cash Flow de Exploração</i>
DC	–	<i>Corrente contínua</i>
EE	–	<i>Energia Eléctrica</i>
ERSE	–	<i>Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos</i>
EV	–	<i>Electric Vehicle</i>
FCEV	–	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
FV	–	<i>Fotovoltaico</i>
GN	–	<i>Gás Natural</i>
INE	–	<i>Instituto Nacional de Estatística</i>
GN	–	<i>Gás Natural</i>
Tx. Act.	–	<i>Taxa de Actualização</i>
VAL	–	<i>Valor Actual Líquido</i>



# 1. Introdução

Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento da população mundial que em 1999 era de cerca de 6 mil milhões e no final de 2011, segundo o Fundo de População das Nações Unidas, já ultrapassava os 7 mil milhões. A par do aumento da população registou-se também uma evolução tecnológica e económica, intimamente ligadas a um aumento do consumo energético. Países em desenvolvimento como a China e a Índia, que são os países mais populosos do mundo, começam a ter um nível de vida que se aproxima do estilo ocidental, o que implica um aumento do consumo de energia.

Actualmente, as grandes fontes de energia utilizadas para satisfazer as necessidades energéticas da população, são de origem fóssil. A energia primária de origem fóssil foi, durante muitos anos, vista como a alternativa mais económica para satisfazer o aumento da procura energética registada. No entanto, essa tendência de preços baixos sofreu o primeiro abalo nos anos 70 do século passado, altura em que o preço do petróleo disparou, devido a questões políticas. Foi nessa altura que ficou visível para os países ocidentais o quanto estes eram dependentes dos países produtores de petróleo que, em geral, são instáveis politicamente. Iniciou-se então a procura de fontes energéticas alternativas. Numa primeira fase diversificaram-se os vectores energéticos, aumentando o consumo de gás natural, mas isso não era suficiente. Começou-se a desenvolver tecnologia capaz de utilizar fontes de energia alternativas, renováveis e de preferência endógenas, conseguindo assim diminuir a dependência energética do exterior, melhorando a segurança no fornecimento de energia.

Na presente época, além da questão económica do aumento dos combustíveis, existe também o problema ambiental. Os maiores responsáveis pela emissão de gases efeito estufa (GEE) são os combustíveis fósseis. Os GEE contribuem para o aquecimento global, o que origina fenómenos ambientais severos que poderão levar a mudanças climáticas significativas. Se as fontes utilizadas para colmatar a nova procura energética não forem renováveis, estarão também a contribuir para aumentar a poluição.

As energias renováveis apresentam-se como a solução mais viável ao problema energético e ambiental que se verifica actualmente, porque permitem colmatar o aumento da procura energética de uma forma limpa e sustentável.

Para ir de encontro a estes problemas energéticos e ambientais a União Europeia iniciou em 2007 o programa 20-20-20. Esse programa tem como objectivos: diminuir o consumo energético em 20%, através do aumento da eficiência energética, 20% da energia total consumida deve ser de origem renovável e reduzir em 20% as emissões de GEE, isto até 2020. Os *electric vehicle* (EV) e os veículos a hidrogénio que também podem ser designados como *fuels cell electric vehicles* (FCEV), surgem como a alternativa aos veículos tradicionais de combustão interna e são uma solução que vai de encontro a dois dos três pontos do programa 20-20-20, nomeadamente na questão da energia renovável e dos GEE.

Num altura em que o planeta Terra se encontra altamente poluído e que é necessário diminuir as emissões de GEE, os EV e os FCEV como não emitem GEE durante o seu funcionamento, surgem como a melhor solução de mobilidade para responder às questões actuais do aquecimento global, da qualidade do ar que respiramos e também para reduzir a dependência actual dos combustíveis fósseis. Estes veículos apresentam zero emissões de GEE, mas para que a redução das emissões de GEE seja uma realidade é necessário que as tecnologias utilizadas para a produção da energia eléctrica necessária para o carregamento dos EV e produção de hidrogénio para os FCEV, sejam também elas neutras em relação aos GEE, sendo assim a produção de energia eléctrica recorrendo a tecnologias como a energia nuclear, hídrica, fotovoltaica, entre outras, possibilitaria um sistema neutro em emissões de GEE.

Nesta dissertação começa-se por fazer uma introdução ao tipo de energias renováveis existentes. De seguida efectua-se uma abordagem aos veículos que permitem reduzir ou mesmo eliminar o consumo de combustíveis fósseis, como os veículos híbridos eléctricos,

veículos eléctricos e a hidrogénio, referindo as baterias utilizadas e os tipos de células de combustível existentes, que permitem converter a energia existente no hidrogénio em energia eléctrica e os problemas inerentes ao uso do hidrogénio como combustível. Seguindo-se uma abordagem aos sistemas fotovoltaicos e ao seu funcionamento.

No caso de estudo, analisa-se um sistema que permite efectuar o carregamento EV utilizando energia eléctrica de origem fotovoltaica e a produção de hidrogénio para os FCEV. O sistema alvo de estudo está pensado para ser implementado em áreas de serviço situadas nas auto-estradas e foi avaliado com base num caso real, localizado em Antuã, Aveiro, na auto-estrada A1.

No caso do sistema EV foi efectuada uma análise económica do sistema, uma análise ambiental focada nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e analisou-se também o impacto na redução da dependência do país em relação ao exterior, sendo ainda efectuada uma pequena análise ao sistema MOBIE. No caso dos veículos a hidrogénio, foi determinada qual seria a melhor opção em termos económicos, para a produção de hidrogénio considerando três regimes de produção: recorrendo apenas à energia fotovoltaica, apenas à energia da rede, ou uma combinação dos dois regimes. No sistema de produção de hidrogénio, além de se determinar a melhor opção económica para a produção do mesmo, à semelhança do sistema EV, efectuou-se uma análise ambiental e do impacto na redução da dependência do país em relação ao exterior. Por fim são apresentados os resultados obtidos e a conclusão alcançada.

## 2. Energias renováveis

Uma fonte de energia renovável é uma fonte que nunca se esgota ou que se regenera num período de tempo igual ou inferior aquele durante o qual se utiliza a energia produzida por esse recurso. A energia renovável é a energia que se extrai dos recursos naturais que são renováveis. Existem várias fontes de energia renováveis, a seguir indicadas:

- Oceanos;
- Biomassa;
- Hídrica;
- Eólica;
- Geotérmica;
- Solar.

### 2.1. Energia dos Oceanos

A energia contida nos oceanos é proveniente das mais variadas origens, o que leva a diferentes tipos de classificações da mesma. A energia das marés pode ser considerada a mais relevante, proveniente da interacção dos campos gravíticos da Lua e do Sol. A energia das correntes marítimas, com origem nos gradientes de temperatura, salinidade e na acção das marés; a energia térmica dos oceanos, que depende directamente da radiação solar incidente e por fim a energia das ondas, fruto do efeito do vento na superfície do oceano. A energia contida nas ondas pode-se considerar como sendo uma forma de energia solar, pois é o Sol

que ao originar um aquecimento desigual da superfície terrestre faz com que se forme vento que origina as ondas [1]. A ideia de se aproveitar a energia das ondas oceânicas tem vindo a ser discutida há vários anos (cerca de 200 anos). Foi no entanto quando surgiu a crise do petróleo nos anos 1970, que esta ideia conseguiu finalmente uma maior atenção [2].

## 2.2. Biomassa

A biomassa consiste na fracção biodegradável de produtos, resíduos ou detritos de origem biológica provenientes da agricultura, incluindo substâncias de origem animal e vegetal, assim como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos [Decreto-lei nº 117/2010]. Pode ser utilizada directamente ou ser convertida noutro tipo de biocombustível. Durante a sua combustão é libertado dióxido de carbono. No entanto, o dióxido de carbono libertado é consumido pelas plantas, que o transformam em hidratos de carbono, através da fotossíntese, fechando assim o ciclo de carbono, ver figura 1. Por este motivo considera-se que a utilização da biomassa, desde que controlada, não agride o meio ambiente, pois a composição da atmosfera não é alterada de forma significativa [3]. A biomassa é uma forma de armazenamento de energia solar. As plantas capturam energia do Sol com uma eficiência de cerca de 0,1%, transformam-na em energia química e armazenam-na na sua estrutura celular (tronco, raízes, folhas, etc.) [4].

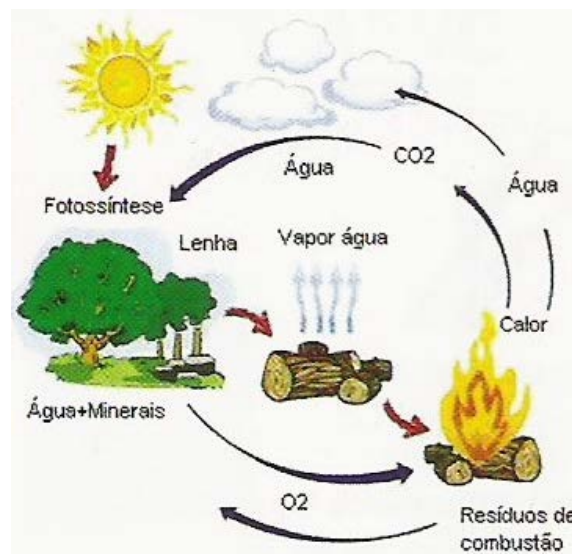


Figura 1. Ciclo de carbono [5]

### 2.3. Energia Hídrica

A energia hidráulica ou energia hídrica é a energia obtida a partir da energia contida numa massa de água [6]. Como se pode ver na figura 2, um fluxo de água de um rio contém energia cinética e potencial que recorrendo à utilização de uma turbina pode ser aproveitada para gerar energia eléctrica.



Figura 2. Esquema de funcionamento de uma central hídrica [7]

### 2.4. Energia Eólica

O vento surge como resultado da ocorrência de diferenças de pressão atmosférica devido às diferenças de temperatura registadas na superfície terrestre, resultantes da radiação solar. Desloca-se no sentido das regiões com menor pressão e é influenciado pela rugosidade e orografia do terreno. Uma turbina eólica aproveita a energia cinética do vento e transforma-a em electricidade. Entre 1 a 2% da energia proveniente do Sol (o Sol irradia cerca de 174,423 PWs), é convertida em energia eólica, a qual é cerca de 50 a 100 vezes superior à energia convertida em biomassa (0,011%), por todas as plantas da Terra [8].



Figura 3. Turbina eólica [9]

## 2.5. Energia Geotérmica

O núcleo da Terra encontra-se a uma temperatura elevada podendo essa energia térmica ser aproveitada para diversos fins. Essa energia é transmitida para a superfície terrestre por condução, podendo ser utilizada em aplicações que necessitem calor ou até mesmo na produção de energia eléctrica através de um ciclo de vapor de Rankine. Para aproveitar o calor extrai-se a água que se encontra no interior da Terra a elevada temperatura, ou pode-se injectar água para que esta seja aquecida, sendo depois utilizada em diversas aplicações, consoante a sua temperatura à superfície (figura 4). A quantidade de energia contida no interior do planeta sob a forma térmica representa uma potência de 10.000 vezes superior à energia consumida por ano no mundo actualmente [10].

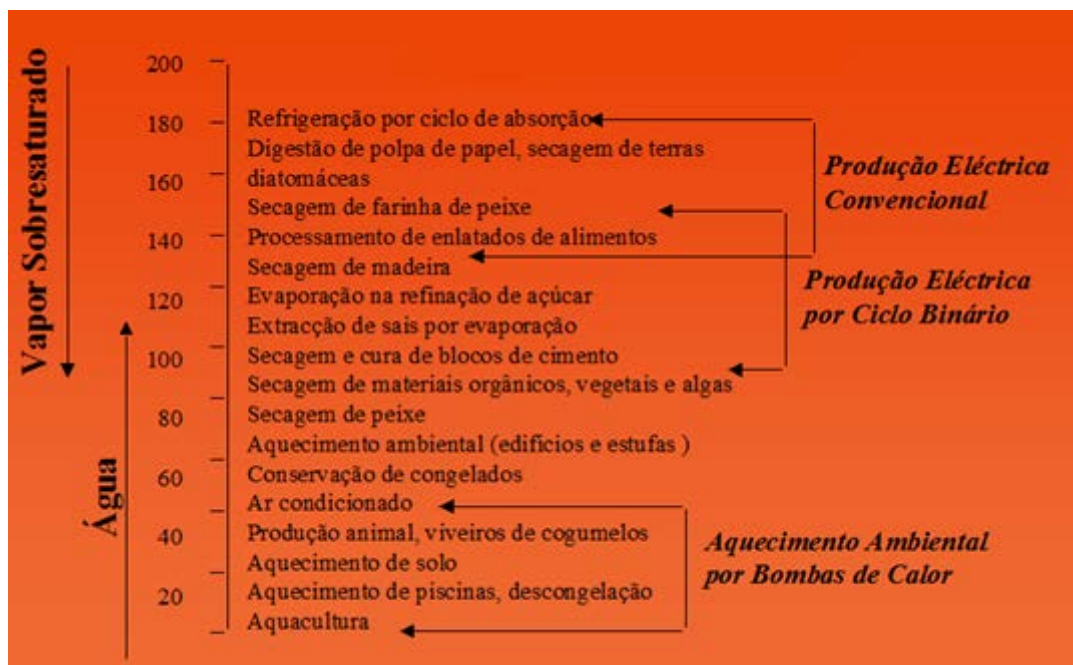


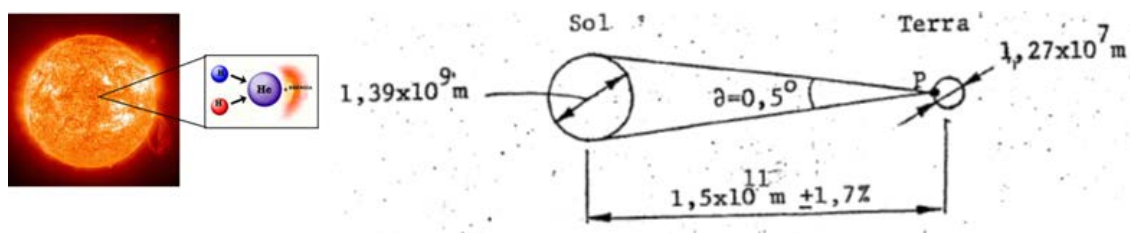
Figura 4. Diagrama de Lindal [78]

## 2.6. Energia solar

O Sol é a estrela central do sistema solar, a maior fonte de energia existente nesse mesmo sistema e é a base da vida existente no planeta Terra. Essa fonte de energia tem sido utilizada ao longo dos tempos pelo ser humano, animais e plantas. Esta energia pode ser utilizada de diversas maneiras desde o simples secar da roupa, às mais complexas, como por exemplo a produção de electricidade. O Sol é a maior fonte de energia directa ou indirecta conhecida.

O Sol é uma estrela que está a uma distância média de  $1,496 \times 10^{11}$  m da Terra e a luz que emana do seu corpo demora cerca de 8 minutos e 18 segundos para chegar à Terra. Na composição da sua massa o Sol apresenta cerca de 74% hidrogénio (92% do seu volume) e 24% de hélio (7% do volume solar). A sua composição apresenta também outros elementos com percentagens mais pequenas, tais como ferro, níquel, oxigénio, silício, enxofre, magnésio, néon, cálcio e crómio. A sua superfície tem uma temperatura de 5780 K o que faz com que pertença à classe espectral de G2V: G2 e também lhe confere uma cor branca (apesar de ser visto como amarelo no céu terrestre, o que se deve à dispersão dos raios na atmosfera) [11]. Os átomos de hidrogénio encontram-se num estado constante de agitação e colidem a velocidades elevadas, ao colidirem fundem-se originando um átomo de hélio mais pesado e através desse processo o Sol transforma parte da sua massa em energia. Isto acontece porque a massa do átomo resultante da fusão não é igual à soma da massa dos dois átomos de hidrogénio que deram origem a este, sendo então libertada energia durante o processo de fusão. Segundo Einstein a energia libertada é obtida pela fórmula  $E=mc^2$ , em que **m** representa a massa que foi perdida durante a fusão e **c**, a velocidade da luz. O Sol pode ser visto como um grande reactor de fusão em que parte da sua massa é transformada em energia [14].

O Sol é um corpo negro, ou seja, é um corpo que absorve toda a radiação, não reflecte nenhuma e é também um emissor difuso emitindo toda a radiação. Chama-se corpo negro porque não tem cor à reflexão, mas pode ter cor à emissão. O processo de transferência de calor do Sol para outro corpo ocorre por radiação [12]. Radiação é a quantidade de energia, sob a forma de luz e calor, recebida por unidade de uma superfície. Da energia libertada pelo Sol sob a forma de radiação, apenas uma pequena parte é emitida na direcção da Terra. Como o ângulo de incidência dos raios solares na superfície terrestre é tão reduzido, podem-se considerar como sendo paralelos à mesma [13] [14].



**Figura 5. Princípio da reacção de fusão; Ângulo dos raios solares [13] [14]**

### 2.6.1 Factores que influenciam a intensidade da radiação [15]

A intensidade de radiação ou energia que chega à superfície terrestre é influenciada por vários factores. A forma esférica da Terra influencia a quantidade de energia. Quanto maior for a latitude, menor é o ângulo de incidência e aumenta ainda a massa atmosférica atravessada pelos raios solares, incrementando assim as perdas por absorção, reflexão e difusão. Por este motivo a energia solar pode ser aproveitada em diferentes níveis em todo o mundo. Consoante a localização geográfica, quanto mais perto do Equador, mais energia solar pode ser potencialmente captada.

A distância da Terra ao Sol também influencia a intensidade de radiação. A radiação aumenta para distâncias menores e diminui para distâncias maiores. Ao longo do ano essa distância varia entre os  $1,47 \times 10^8$  e os  $1,52 \times 10^8$  quilómetros e a radiação que chega à atmosfera terrestre varia entre os  $1,325 \text{ kW/m}^2$  e os  $1,412 \text{ kW/m}^2$ . A distância maior corresponde ao solstício de verão e a menor ao de inverno.

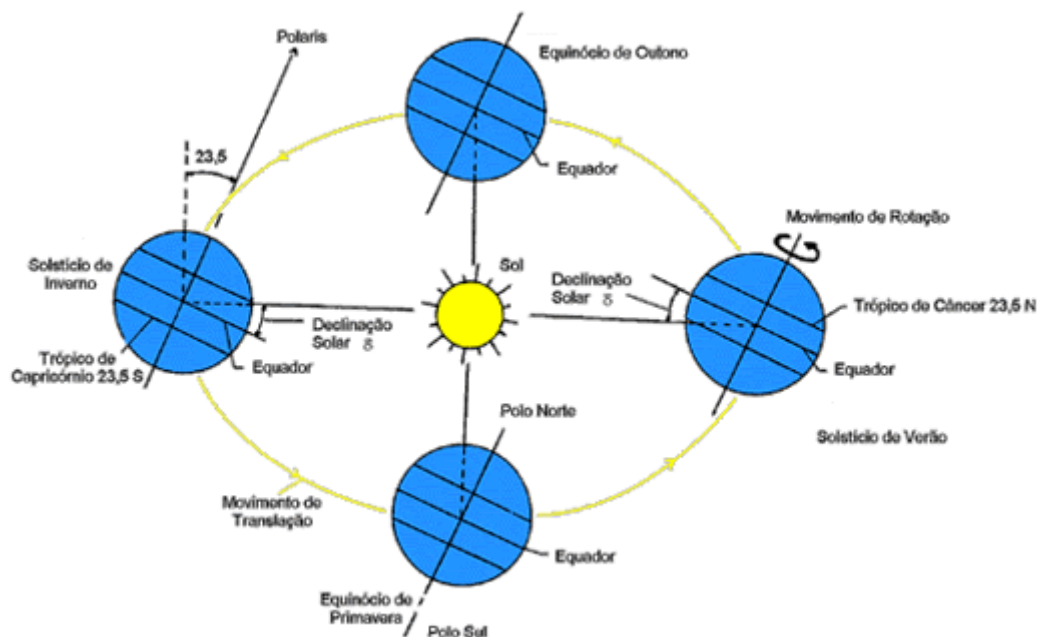


Figura 6. Translação anual da Terra [16]

Da radiação que chega à atmosfera apenas uma parte realmente atinge a superfície terrestre. A radiação proveniente do Sol ao atravessar a atmosfera é sujeita a vários fenómenos, como

reflexão, absorção e difusão que desviam a direcção e diminuem a intensidade da mesma quando esta atinge a superfície terrestre.

A radiação solar incidente pode ser dividida em três componentes base:

- Radiação directa: os raios solares incidem directamente na superfície;
- Radiação difusa: proveniente da radiação directa que se dispersa em várias direcções, nos gases presentes na atmosfera;
- Radiação reflectida: radiação que é reflectida pelo solo ou pela atmosfera, resultante da incidência de radiação directa.

A radiação global é a soma de todas as componentes da radiação referidas anteriormente.

A figura 7 demonstra como está distribuída a radiação que chega à Terra. Cerca de 30% dessa energia é interceptada pelos gases presentes na atmosfera e é reflectida directamente para o espaço. Outros 19% são absorvidos pelos constituintes da atmosfera. Ou seja a superfície terrestre recebe apenas 51% da energia que incide na atmosfera e esses 51% estão divididos em 21% de radiação directa e os restantes 30% na forma de radiação difusa [13].

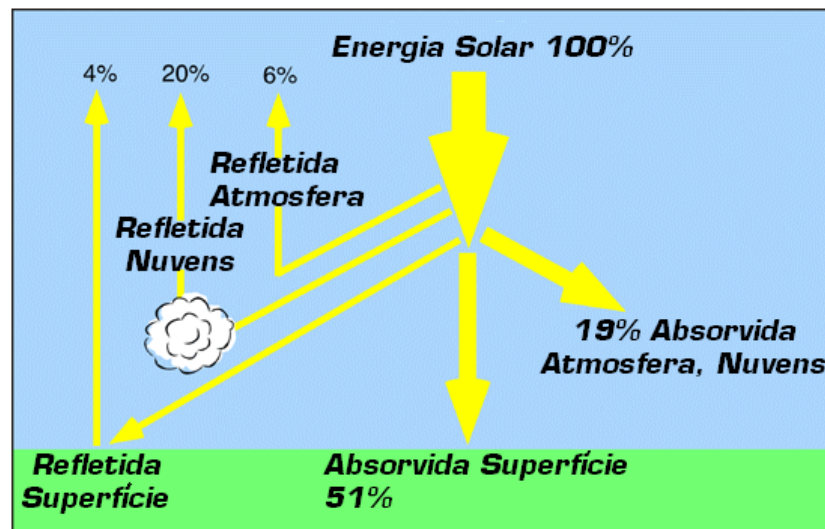


Figura 7. Balanço da radiação solar que entra na atmosfera [17]

Dos gases presentes na atmosfera, destacam-se o azoto, o dióxido de carbono e o vapor de água como os grandes responsáveis pelo fenómeno de absorção. O azoto é responsável pela

absorção da radiação na zona correspondente aos raios ultra violetas e o vapor de água na zona dos infravermelhos. No que diz respeito à difusão e a reflexão, além dos gases que constituem a atmosfera, deve-se também considerar as partículas sólidas e líquidas que se encontram em suspensão na atmosfera, como as nuvens, a neblina, as poeiras e os fumos. O fenómeno de difusão e reflexão varia muito com o estado do tempo, dependendo da densidade das partículas presentes na atmosfera interior e é maior para pequenos comprimentos de onda. A densidade das partículas invisíveis é muito maior que a das visíveis [13].

Analisando a figura 8 verifica-se que o espectro da radiação solar é difundido em toda a gama da zona visível, infravermelha e ainda numa pequena gama de radiação ultravioleta.

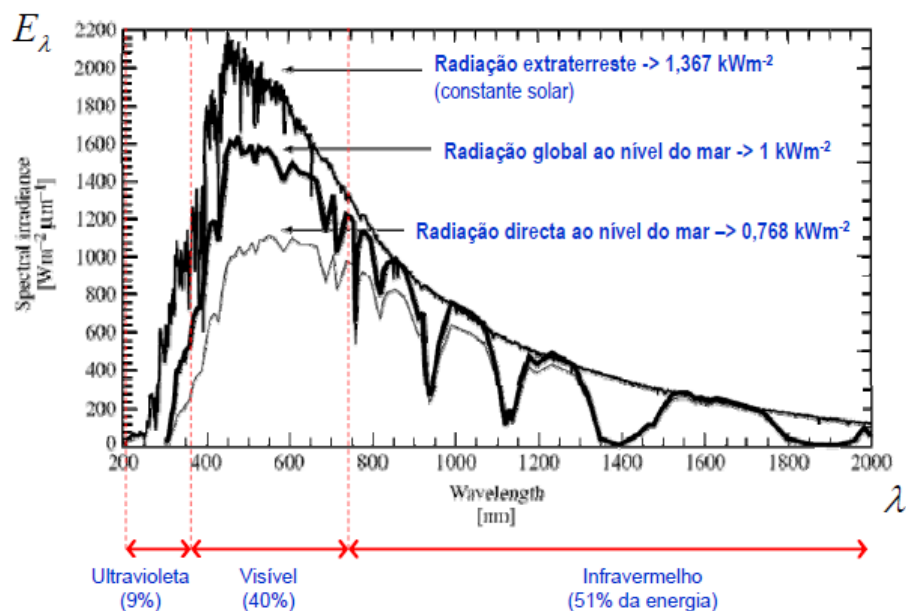


Figura 8. Espectro da radiação solar [14]

Consultando o espectro de luz visível (figura 9), entende-se por que razão o céu apresenta uma cor azul.

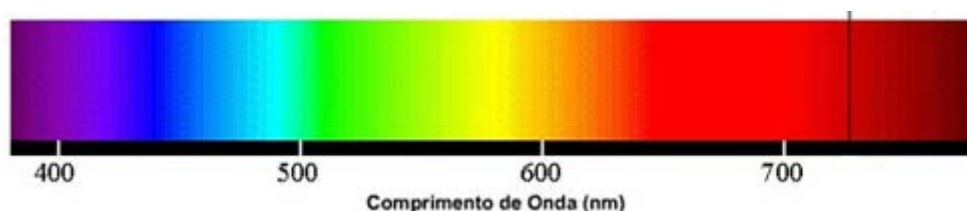
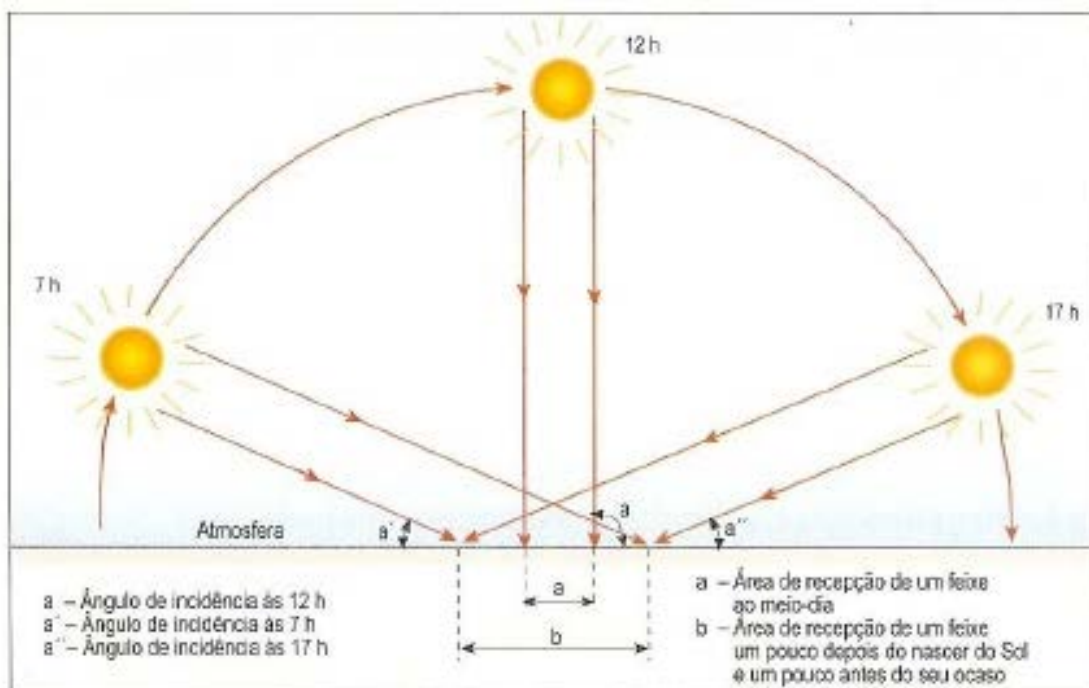


Figura 9. Espectro da luz visível [18]

Apesar dos gases diminuírem a intensidade da radiação que chega à superfície terrestre, também impedem esta de sair, o que permite a existência de vida na Terra. Este efeito designa-se por efeito estufa. O efeito estufa acontece quando parte da radiação infravermelha é absorvida pelos gases presentes na atmosfera, retendo assim o calor em vez de liberta-lo de volta para o espaço. Isto faz com que o planeta se mantenha a uma temperatura que possibilite a existência de vida [19].

A inclinação dos raios solares influencia também a quantidade de energia que chega a cada ponto da superfície terrestre e como a Terra apresenta uma inclinação constante de cerca de  $23,5^\circ$ , do seu eixo com o plano da sua órbita, isso faz com que o ângulo de incidência dos raios solares se altere ao longo de um dia e do ano, alterando também a quantidade de energia que incide na superfície. Por este facto, a geometria Sol -Terra é muito importante na determinação dos recursos energéticos provenientes do Sol.

Como podemos ver na figura 10, a área **a** recebe maior energia por  $m^2$ , que a área **b**.



**Figura 10. Movimento do Sol ao longo de um dia [20]**

## 2.6.2 Métodos de captação da energia solar [20]

Os métodos de captação da energia solar classificam-se em directos ou indirectos:

- Directo significa que existe apenas uma transformação para converter a energia solar num tipo de energia utilizável pelo homem:
  - A energia solar ao atingir uma célula fotovoltaica é convertida em energia eléctrica;
  - A energia solar ao atingir uma superfície escura (colector solar) é transformada em calor.
- Indirecto significa que será necessário mais de uma transformação para que surja energia utilizável.

Também se classificam em passivos e activos:

- Sistemas passivos são geralmente directos, apesar de envolverem (algumas vezes) fluxos em convecção, que é tecnicamente uma conversão de calor em energia mecânica;
- Sistemas activos são sistemas que apelam ao auxílio de dispositivos eléctricos, mecânicos ou químicos, para aumentar a eficiência do sistema de “recolha” da energia proveniente do Sol. Os sistemas indirectos são quase sempre também activos.

# 3. Veículos

Devido aos problemas inerentes à utilização dos combustíveis fósseis foi necessário encontrar alternativas aos meios de transportes ditos tradicionais, que utilizam combustíveis produzidos à base de petróleo e que emitem gases de efeito estufa durante a sua utilização. Para resolver este problema surgiram recentemente uma série de veículos que visam reduzir ou mesmo eliminar completamente, o uso de combustíveis fósseis nos meios de transporte. Esses veículos são os veículos híbridos eléctricos, os veículos eléctricos e a hidrogénio, também designados por veículos eléctricos com célula de combustível.

## 3.1. Veículos Eléctricos [21]

O veículo eléctrico é uma invenção que conta já com mais de 100 anos. Os primeiros veículos foram desenvolvidos em França e Inglaterra nos finais da primeira década do séc. XIX e em 1897 já havia uma frota de táxis eléctricos a circular na cidade de Nova York. Os primeiros modelos eléctricos tinham uma autonomia de 29 km e atingiam a velocidade 22 km/h.

No início do século XX, além dos veículos eléctricos existiam também veículos a gasolina e a vapor, no entanto os veículos eléctricos eram os mais procurados devido à ausência de gases, vibrações, ruído e, também como acontece actualmente nos Estados Unidos da América,

devido ao facto de não utilizarem caixa de velocidades. Os veículos a vapor também não tinham mudanças, mas tinham outras desvantagens significativas, como o facto de existir um tempo mínimo de espera de cerca de 45 minutos para conseguir fazer com que o motor “pegasse” numa manhã fria de inverno. Naquela altura os veículos eléctricos custavam cerca de três vezes mais que um veículo de outro tipo.

Com a melhoria dos acessos e das estradas surgiu a necessidade de uma autonomia maior, pois as deslocações passaram a ser maiores e a descoberta de petróleo no Texas, que fez com que o preço da gasolina reduzisse, levou ao declínio dos veículos eléctricos. Também quando Henry Ford iniciou a produção em massa de veículos de motor de combustão interna, o que fez com que esses veículos passassem a custar cerca de metade do que custavam anteriormente, contribuiu para o declínio do carro eléctrico, porque ao mesmo tempo o preço dos veículos eléctricos continuava a aumentar.

O veículo eléctrico desapareceu por volta da década de 1930 e surgiu mais tarde nas décadas de 1960 e 1970, devido à crise petrolífera, que levou à procura de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis. A evolução que se tem registado nos últimos anos neste tipo de veículos deve-se sobretudo à preocupação ambiental e à necessidade de cumprir os tratados, regulamentos e medidas internacionais para a redução das emissões de GEE e também para ir de encontro às políticas de desenvolvimento sustentável.

Nos últimos anos os veículos híbridos eléctricos apresentaram-se como a alternativa imediata, uma vez que permitem reduzir o consumo de combustíveis fósseis e não exigem grandes adaptações ou alterações aos seus utilizadores, habituados ao veículo com motor de combustão interna convencional. Os veículos híbridos eléctricos são constituídos por um motor de combustão interna, baterias ou outros sistemas de armazenamento de energia e por um ou mais motores eléctricos. Os veículos eléctricos actuais, de modo a aumentar a sua autonomia são limitados na sua velocidade máxima, sendo por isso tipicamente considerados lentos. Este tipo de veículos possui uma autonomia entre os 150 e os 200 quilómetros. No entanto, apresentam baixos consumos, são não poluidores e também silenciosos. Com os avanços tecnológicos previstos nas baterias, pode-se dizer que as próximas décadas serão as décadas do carro eléctrico.

### 3.1.1 Tipos de Veículos Eléctricos

Com o desenvolvimento tecnológico que se tem vindo a registar nos últimos anos na área dos veículos eléctricos existem actualmente vários tipos disponíveis. De seguida, apresenta-se uma lista de veículos eléctricos ou parcialmente eléctricos, de acordo com a classificação actual [22]:

- EV – *Electric Vehicle* – Veículo eléctrico: Veículo que utiliza um motor eléctrico em vez do tradicional motor de combustão interna;
- BEV – *Battery Electric Vehicle* – Veículo eléctrico a baterias: Veículo eléctrico que funciona unicamente com a energia contida nas baterias;
- NEV – *Neighbourhood Electric Vehicle* – Veículo eléctrico a baterias desenvolvido para atingir velocidades e acelerações baixas. Possui uma autonomia muito reduzida;
- HEV – *Hybrid Electric Vehicle* – Veículo eléctrico híbrido: Veículo constituído por dois motores, um motor eléctrico e um motor de combustão interna;
- PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – Tipo de veículo híbrido eléctrico, em que as baterias podem ser recarregadas recorrendo a uma fonte exterior (através de uma tomada da rede);
- FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle* – Veículo eléctrico que utiliza uma célula de combustível em vez de baterias, para fornecer a electricidade que o veículo necessita para locomoção.

Os EV são veículos que funcionam a energia eléctrica e que obtém a energia que consomem, através de uma fonte que não se encontra a bordo: um exemplo deste tipo de veículos é o metro. Os veículos BEV, frequentemente referidos como EV, também funcionam a energia eléctrica, no entanto obtém a energia necessária para o seu movimento, recorrendo a uma fonte de energia que se encontra a bordo, neste caso baterias. Estas podem ser carregadas principalmente através da ligação à rede eléctrica, mas também da energia eléctrica produzida na travagem regenerativa.

Os veículos do tipo NEV são designados como veículos de “vizinhança” e estão limitados por lei (nos Estados Unidos da América) a circular em estradas com o limite de velocidade de 72 km/h. A sua velocidade máxima é de cerca de 48 km/h devido ao facto das baterias utilizadas apresentarem uma baixa potência: um exemplo deste tipo de veículos são os carros de golfe [23].

Um motor eléctrico converte 75% da energia química armazenada nas baterias, ao contrário dos motores de combustão que apenas são capazes de aproveitar 20% da energia armazenada no combustível [24]. Esta forma de motorização é a mais eficiente de todas as conhecidas, devido às excelentes propriedades do motor eléctrico, que disponibiliza um elevado binário a baixas rotações, mantendo uma potência constante num grande intervalo. Por este motivo são eficientes a qualquer velocidade. Além disso, não consome energia quando parado [25]. Possuem um arranque suave e dispensam o uso de embraiagem e mudanças, que são uma fonte de perdas nos automóveis ditos convencionais.

Numa altura em que o planeta Terra se encontra altamente poluído e que é necessário diminuir as emissões de gases de efeito estufa, os EV surgem como a melhor solução de mobilidade para responder às questões actuais do aquecimento global, da qualidade do ar que respiramos e também para reduzir a dependência actual dos combustíveis fósseis. Os EV apresentam zero emissões de GEE, no entanto para que a redução das emissões de GEE seja uma realidade é necessário que as tecnologias utilizadas para a produção de energia sejam também elas neutras em relação a gases de efeito estufa. A produção de energia eléctrica recorrendo a tecnologias como a energia nuclear, hídrica, fotovoltaica, entre outras, possibilitaria um sistema neutro em emissões de GEE.

O principal elemento poluidor deste tipo de veículos são as baterias, devido à dificuldade de reciclagem das mesmas. No entanto, com a evolução da tecnologia os materiais utilizados nestes componentes mudaram, permitindo um elevado índice de reciclagem e um baixo nível de toxicidade, tornando-as sustentáveis a longo prazo.

Os motores eléctricos apresentam um funcionamento silencioso, devido ao facto de não apresentarem peças móveis, o que também faz com que necessitem de pouca manutenção. São ainda silenciosos, devido à ausência do tubo de escape, que é uma das grandes fontes de ruído num automóvel e à não existência de combustão interna, que é igualmente ruidosa.

Os veículos eléctricos apresentam uma autonomia reduzida, quando comparada com os veículos de combustão interna e o tempo de carregamento das baterias situa-se entre as 4 e as 8 horas e a opção de carregamento rápido (80% da carga) demora cerca de 30 min. Os módulos de baterias são caros, pesados e volumosos, reduzindo assim o espaço útil do veículo [24]. No entanto, com os avanços da tecnologia espera-se uma evolução considerável da tecnologia de baterias que eventualmente desenvolverá melhorias na diminuição do tempo de recarga, no aumento da autonomia, na diminuição do preço, entre outras.

Os veículos eléctricos podem ser equipados com dois tipos de motores eléctricos: motores de corrente contínua (DC) e motores de corrente alternada (AC). Os motores que funcionam com DC são mais baratos e têm uma grande capacidade de arranque, no entanto não são indicados para aplicações em que se necessite de grandes variações de carga, durante longos períodos de tempo. Esta situação resulta do facto de os motores DC terem ímanes permanentes na sua superfície interior, que permitem a disponibilização de um binário elevado, mas no entanto, não transmitem o calor de uma maneira eficiente, levando ao aquecimento do mesmo, por esta razão o seu ponto de operação é bastante inferior á sua capacidade máxima [26]. Os motores do tipo DC funcionam com tensões entre os 96 e os 192 volts. Os motores AC são ideais para aplicações em que existam grandes variações de carga, geralmente funcionam com uma tensão de 230 volts [27].

Com o aumento da penetração das energias renováveis ditas intermitentes como é o caso da energia solar e da energia eólica na rede e uma vez que a rede eléctrica é um sistema de equilíbrio em que em cada instante a produção tem de igualar o consumo mais as perdas, o carro eléctrico pode desempenhar um papel fundamental para conseguir atingir esse mesmo equilíbrio. Como estas fontes renováveis são muito voláteis é necessário manter constantemente em reserva centrais poluentes, mas ao passarem a existir milhões de veículos eléctricos estacionados e ligados à rede na maior parte do tempo, as suas baterias podem ser utilizadas como uma fonte de armazenamento de energia que poderá ser utilizada sempre que a procura for maior que a oferta, isto porque se cada carro fornecer um pouco da energia que dispõe armazenada nas suas baterias, o seu somatório será mais que suficiente para que a procura e a oferta se igualem, sendo assim atingida a estabilidade do sistema eléctrico. Também por norma, regista-se uma maior produção de energia de fonte eólica durante o período nocturno em que geralmente o consumo é reduzido. Ao surgir o carro eléctrico e

como o período “nobre” de carregamento deste tipo de veículos será durante a noite, o carro eléctrico permitirá então que as centrais eólicas continuem a produzir, em vez de serem obrigadas a cortar a sua produção, de modo a manter o equilíbrio na rede.

Na figura 11 apresenta-se uma comparação entre um veículo a gasolina e um veículo eléctrico.

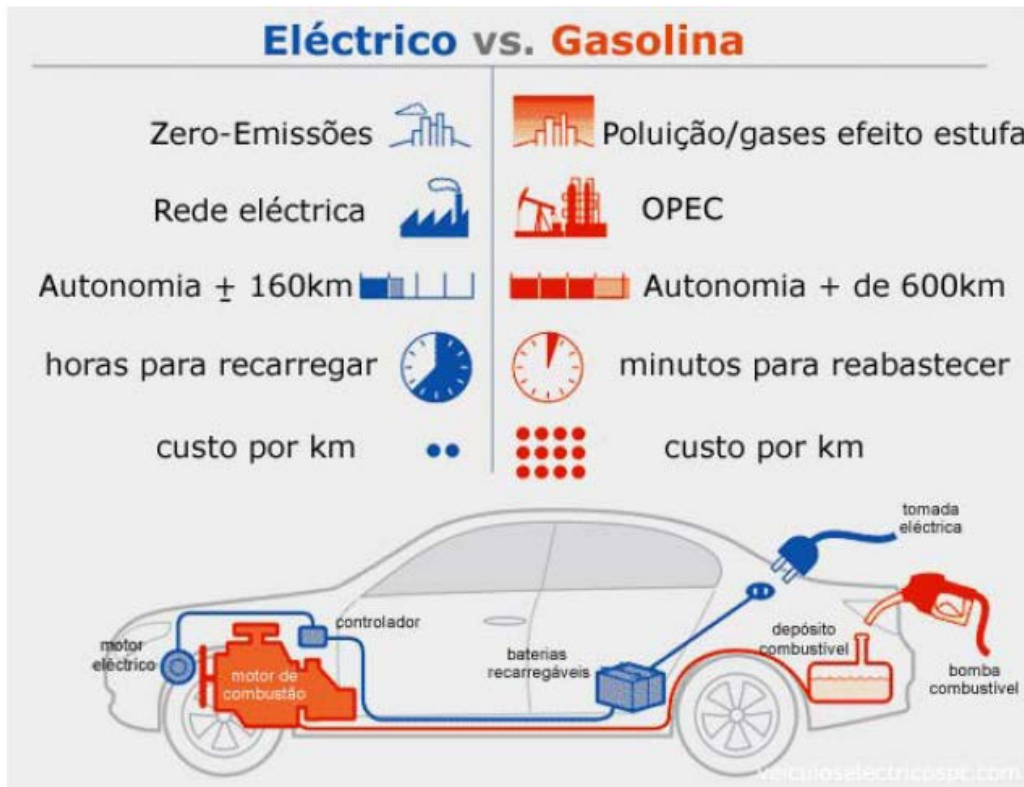


Figura 11. Comparação de um veículo eléctrico e um veículo a gasolina [28]

A configuração das ligações de um veículo eléctrico típico é visível na figura 12.

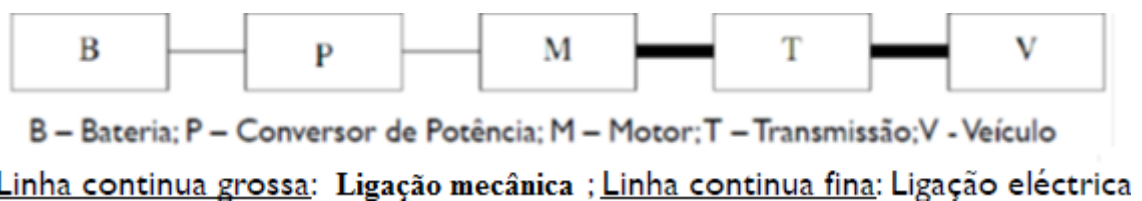


Figura 12. Configuração das ligações de veículo eléctrico típico [29]

## 3.2. Veículos Híbridos Eléctricos

Os veículos híbridos são veículos que utilizam mais do que um motor para a sua propulsão. Um veículo híbrido do tipo HEV consiste num veículo que possui um motor eléctrico e um motor de combustão interna e que utilizam baterias para alimentar o motor eléctrico. A principal vantagem de um veículo híbrido é que permite combinar as vantagens de um veículo puramente eléctrico, em que se destaca as zero-emissões, com as vantagens de um motor de combustão interna, nomeadamente a grande energia e densidade de potência disponível. A combinação destes dois motores permite [30]:

- Diminuição do tamanho do motor de combustão interna, mantendo o requisito de potência máxima;
- Recuperar a energia durante a desaceleração e a travagem;
- Optimizar a distribuição de energia pelos diferentes sistemas de propulsão primários;
- Eliminar as perdas enquanto o veículo se encontra ao ralenti, desligando o mesmo (*stop-and-start*);
- Eliminar as perdas da embraiagem, acoplando apenas a transmissão com o motor quando as velocidades são compatíveis.

Devido ao facto de terem mais componentes, como por exemplo os módulos de baterias, os veículos híbridos são mais pesados que os veículos que estão equipados apenas com um motor de combustão interna. A diferença de peso situa-se entre os 10% e os 30% [30].

### 3.2.1 Graus de Hibridação

Existem vários tipos de veículos híbridos e estes podem ser classificados segundo o seu grau de hibridação. Os graus de hibridação existentes são:

- Micro;
- Médio ou semi;
- Completo.

**Micro-híbrido:** São veículos equipados com um motor eléctrico de pequena potência, que apenas desempenham a função *stop-and-start*, que desliga o motor de combustão quando o veículo se encontra ao ralenti, por exemplo quando está parado num semáforo. Este tipo de híbrido tem a capacidade de carregar as baterias durante a desaceleração ou travagem do veículo [31]. Este sistema permite uma economia de combustível entre os 5 e 10% [32].

**Semi – Híbrido:** Este tipo de híbrido, além das funcionalidades do micro-híbrido, o motor eléctrico também auxilia o motor de combustão na propulsão do veículo, logo permitindo uma diminuição do tamanho do motor principal do veículo, o motor de combustão. O veículo não é capaz no entanto de mover-se apenas por acção do motor eléctrico. O motor eléctrico permite uma poupança de combustível na ordem dos 27 % [31] [33].

**Híbrido completo:** Este tipo de veículo além das funcionalidades dos micros e semi-híbridos pode ainda mover-se utilizando apenas o motor eléctrico.

Existem também outro tipo de veículos híbridos designados por *plug-in* ou híbrido recarregável. Os híbridos recarregáveis estão equipados com módulos de baterias de elevada densidade energética e apenas diferem dos outros tipos de híbridos porque as baterias podem ser recarregadas através de uma fonte exterior, como por exemplo uma tomada eléctrica. Esta característica faz com que este tipo de híbrido possa funcionar apenas com o motor eléctrico durante um maior período de tempo do que se regista nos outros tipos de híbridos eléctricos, conseguindo-se assim uma maior poupança de combustível [34].

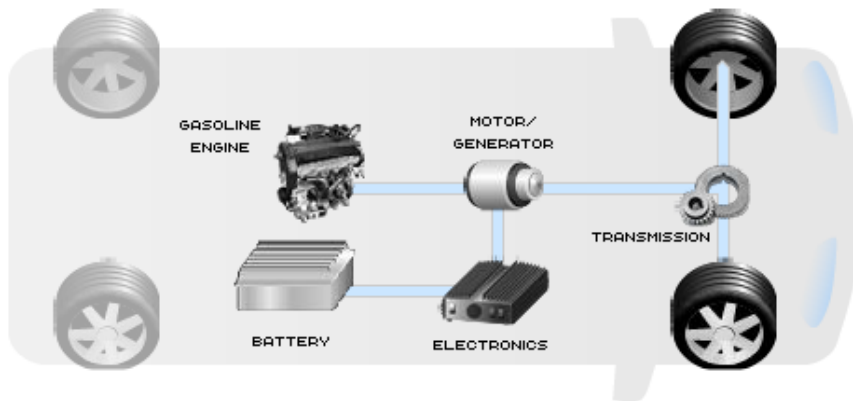
### 3.2.2 Configurações Veículos Híbridos Eléctricos

Os veículos híbridos eléctricos são também classificados pela sua configuração segundo três tipos, híbrido paralelo, série e série-paralelo ou combinado. Existem no entanto outro tipo de híbridos que não se “encaixam” em nenhum dos três grupos mencionados anteriormente, sendo então referidos como híbridos complexos.

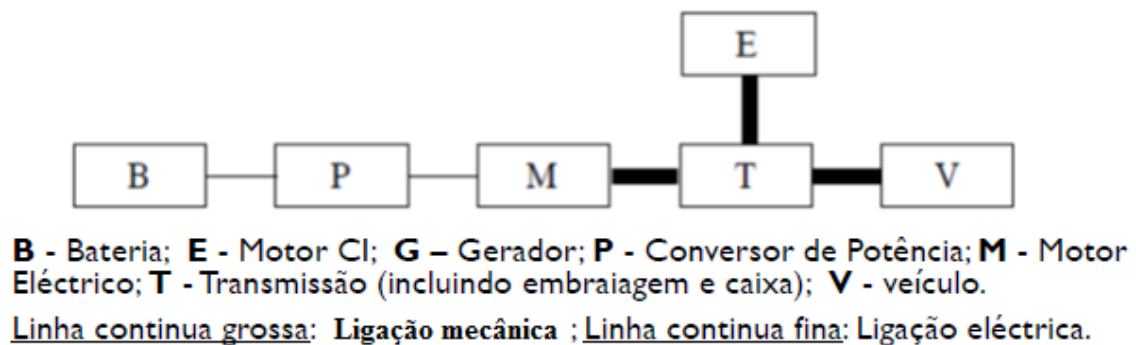
- **Híbrido Paralelo**

Nos híbridos classificados como paralelos, ambos os motores encontram-se acoplados à transmissão, logo os veículos podem mover-se pela acção simultânea dos dois ou apenas utilizando um dos motores presentes. O motor de combustão é considerado o motor principal,

no entanto como existe uma ligação em paralelo dos dois motores, o motor eléctrico e o motor de combustão interna, estes podem trabalhar os dois em simultâneo permitindo assim otimizar a distribuição de energia e um maior rendimento do sistema.



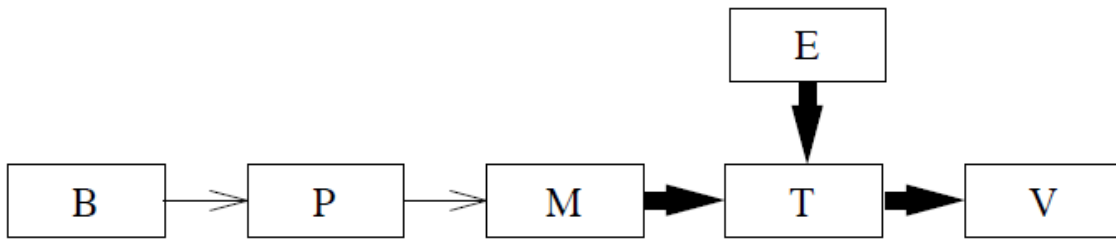
**Figura 13. Híbrido paralelo [35]**



**Figura 14 Configuração de um híbrido paralelo completo [29] [30]**

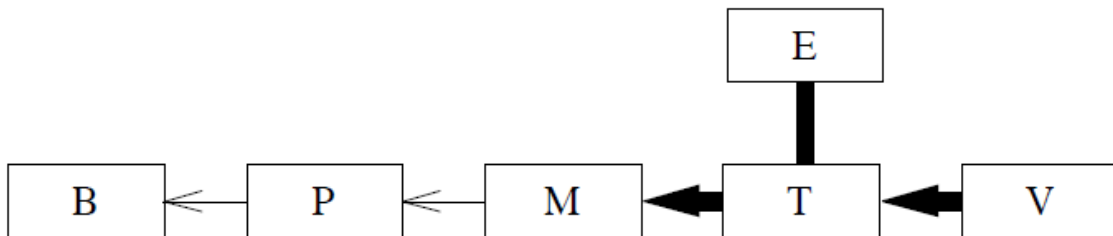
De modo a melhor entender como funcionam este tipo de veículos híbridos eléctricos, apresentam-se os diversos modos de operação, sendo que este tipo de veículo híbrido permite cinco modos de operação distintos, esses modos são:

1. No modo designado como *power assist* os dois motores estão a trabalhar em simultâneo: os fluxos de potência estão indicados na figura 15.



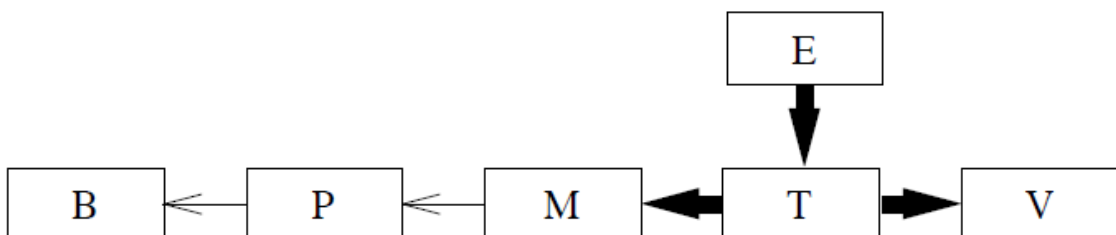
**Figura 15. Modo *power assist*, híbrido paralelo [30]**

- No modo de travagem regenerativa as baterias são recarregadas utilizando a energia proveniente da travagem do veículo. Os fluxos de potência estão indicados na figura 16.



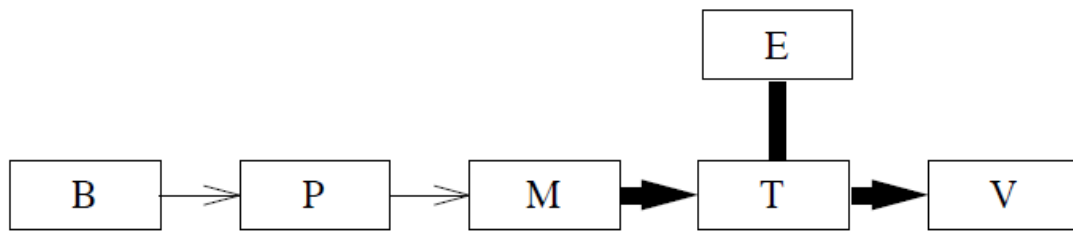
**Figura 16. Modo de travagem regenerativa, híbrido paralelo [30]**

- As baterias podem também ser recarregadas utilizando o motor de combustão, os fluxos de potência quando o veículo se encontra nesse modo de operação estão indicadas na figura 17.



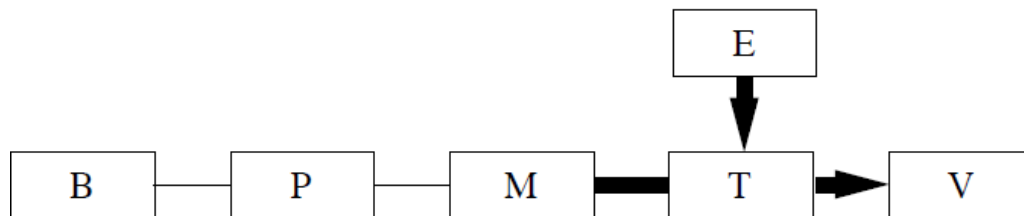
**Figura 17. Carga da bateria utilizando o motor de combustão, híbrido paralelo [30]**

- Este modo de operação é designado como o modo de zero-emissões, uma vez que o veículo opera apenas com o motor eléctrico, utilizando a energia acumulada nas baterias. Os fluxos de potência quando o veículo se encontra nesse modo de operação estão indicados na figura 18.



**Figura 18. Modo zero-emissões, híbrido paralelo [30]**

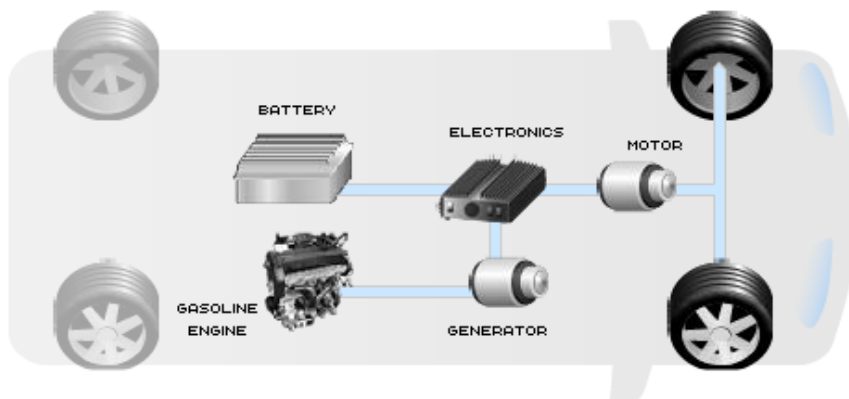
- O veículo pode também funcionar apenas com o motor de combustão interna. Esse modo de operação designa-se como modo convencional e os fluxos de potência deste modo estão indicados na figura 19.



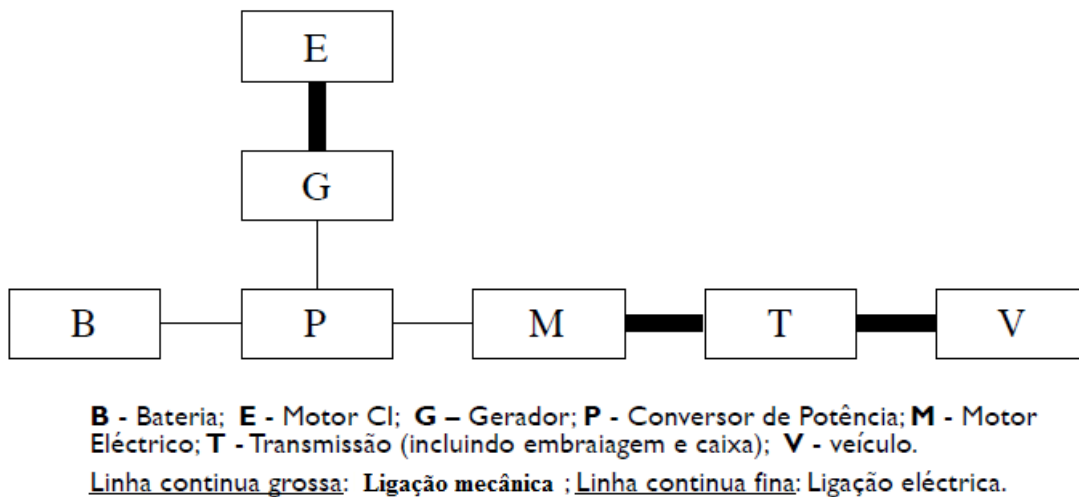
**Figura 19. Modo convencional, híbrido paralelo [30]**

- Híbrido Série**

Os veículos híbridos designados como série são considerados essencialmente veículos eléctricos, uma vez que é o motor eléctrico que efectua a propulsão do veículo sendo que o motor de combustão funciona apenas como gerador. Gerador, esse que pode alimentar o motor eléctrico directamente ou carregar as baterias.



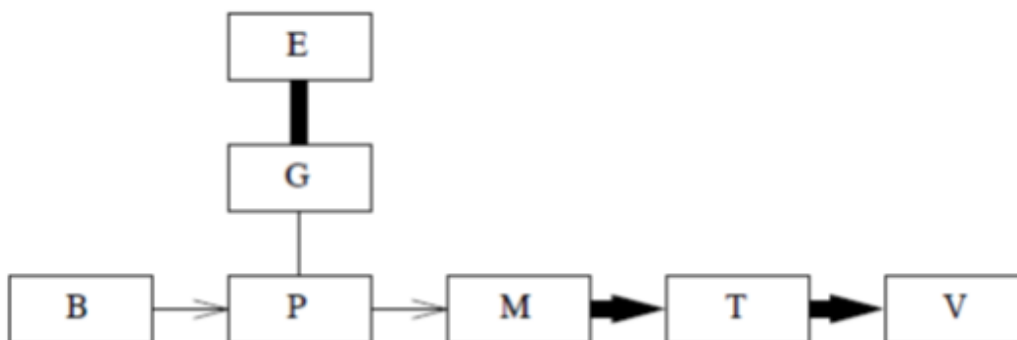
**Figura 20. Híbrido série [30]**



**Figura 21. Configuração básica de um híbrido série [29] [30]**

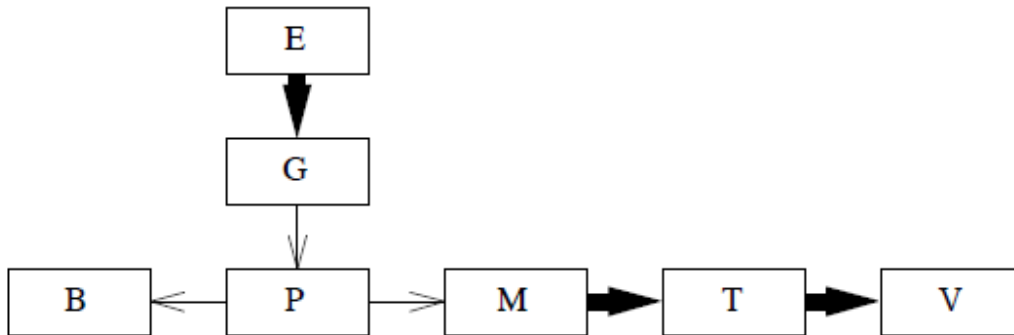
De modo a melhor entender como funcionam este tipo de veículos híbridos eléctricos, apresentam-se os diversos modos de operação. Os híbridos designados como série permitem quatro modos de operação distintos, esses modos são:

1. Neste modo de operação designa-se por *battery drive*, ou seja o veículo funciona, utilizando apenas à energia armazenada anteriormente nas baterias. Os fluxos de potência deste modo estão indicados na figura 22.



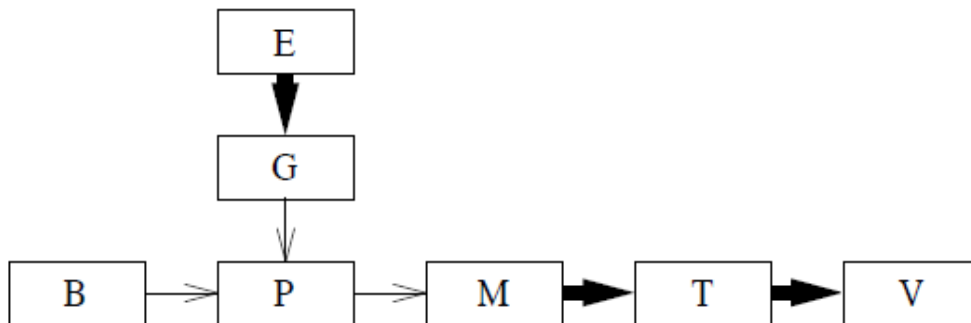
**Figura 22. Modo *battery drive*, híbrido série [30]**

2. As baterias podem também ser recarregadas utilizando o motor de combustão, os fluxos de potência quando o veículo se encontra nesse modo de operação estão indicadas na figura 23.



**Figura 23. Carga da bateria utilizando o motor de combustão, híbrido série [30]**

3. Este modo de operação designa-se por *hybrid drive* e neste modo de operação o motor de combustão e o motor eléctrico trabalham em simultâneo. Os fluxos de potência quando o veículo se encontra nesse modo de operação estão indicados na figura 24.



**Figura 24. Modo *hybrid drive*, híbrido série [30]**

4. No modo de travagem regenerativa as baterias são recarregadas utilizando a energia proveniente da travagem do veículo. Os fluxos de potência estão indicados na figura 25.

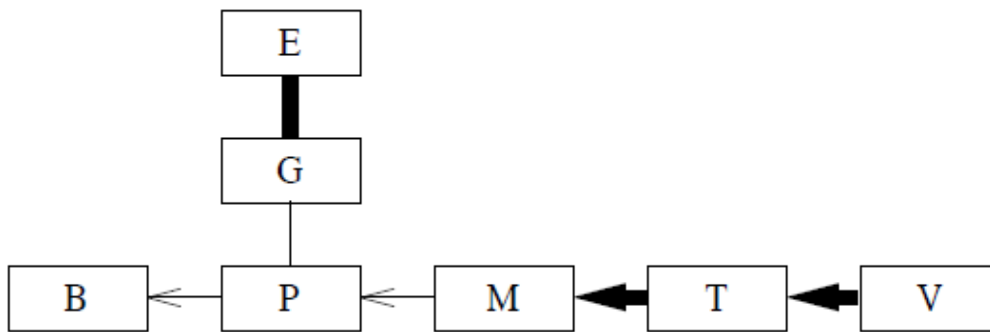


Figura 25. Modo de travagem regenerativa, híbrido série [30]

- **Híbrido Série-Paralelo ou Combinado**

Os híbridos combinados tem a capacidade de operar como um híbrido do tipo paralelo ou do tipo série, o que lhe confere as vantagens de cada tipo. Este tipo de veículos está equipado com um sistema de transmissão planetário, que permite alterar o seu modo de funcionamento, paralelo ou série, em qualquer momento. Quando este tipo de veículos se encontra a velocidades baixas opera como um híbrido série e como híbrido paralelo quando as velocidades são mais elevadas. Pelo facto de combinarem as características dos dois tipos de híbridos, paralelo e série, os híbridos combinados têm um melhor desempenho que qualquer um dos outros sistemas quando operam separadamente [35].

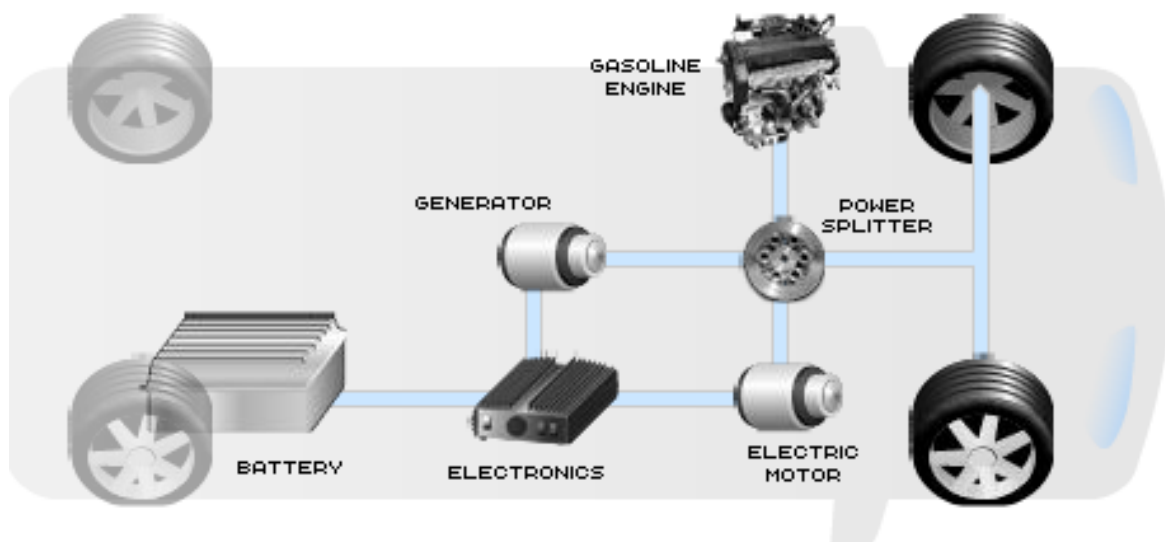
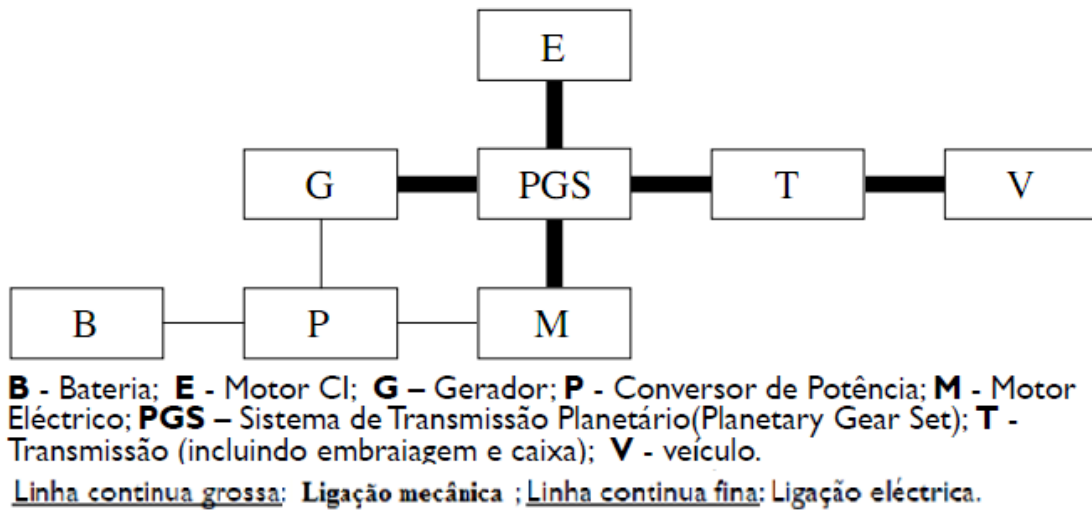


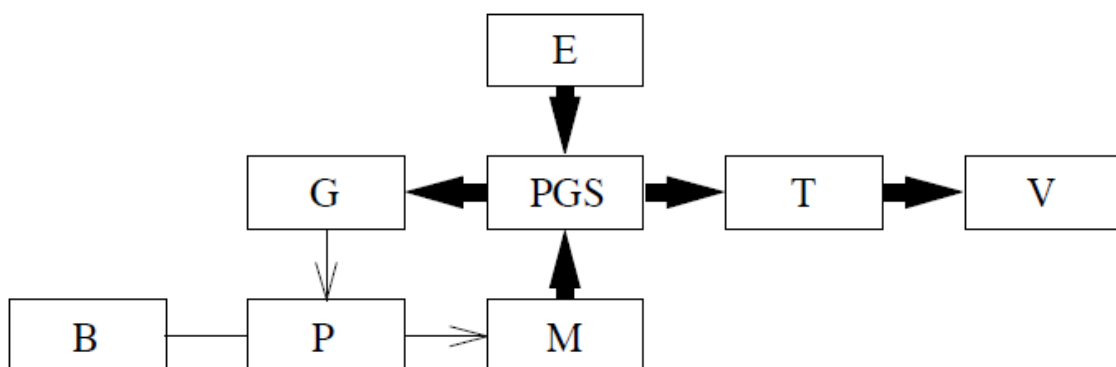
Figura 26. Híbrido série-paralelo [35]



**Figura 27. Configuração básica de um híbrido combinado [29] [30]**

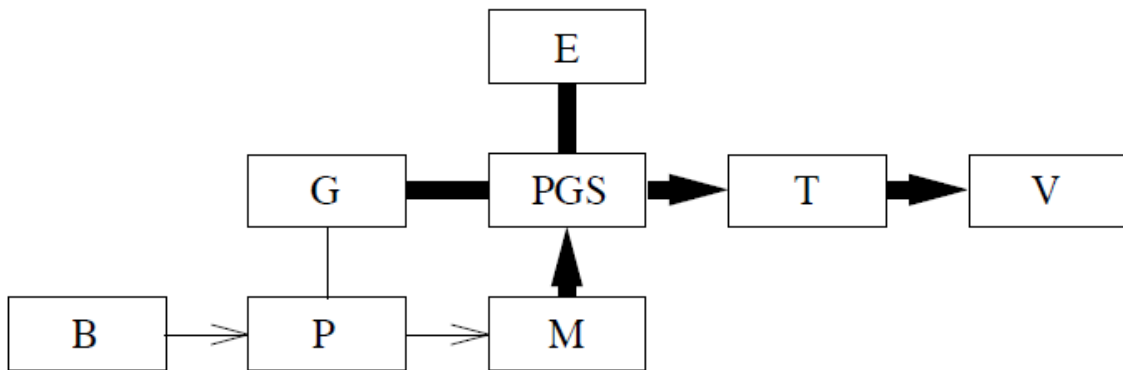
De modo a melhor entender como funcionam este tipo de veículos híbridos eléctricos, apresentam-se os diversos modos de operação. Os híbridos designados como combinados ao poderem trabalhar tanto como paralelo ou série, os seus diversos modos de operação são uma combinação dos vários modos de operação descritos anteriormente para cada um dos outros tipos de híbridos. Este tipo de híbridos permite cinco modos de operação distintos, esses modos são:

1. O veículo pode operar utilizando apenas o motor de combustão. Os fluxos de potência estão indicados na figura 28.



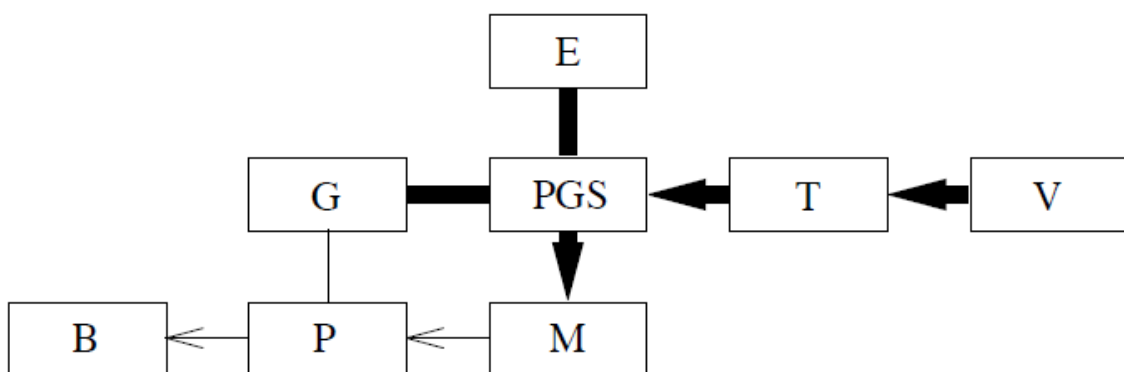
**Figura 28. Modo de operação apenas com motor de combustão, híbrido combinado [30]**

2. Este modo de operação é designado como o modo de zero-emissões, uma vez que o veículo opera apenas com o motor eléctrico, utilizando a energia acumulada nas baterias. Os fluxos de potência quando o veículo se encontra nesse modo de operação estão indicados na figura 29.



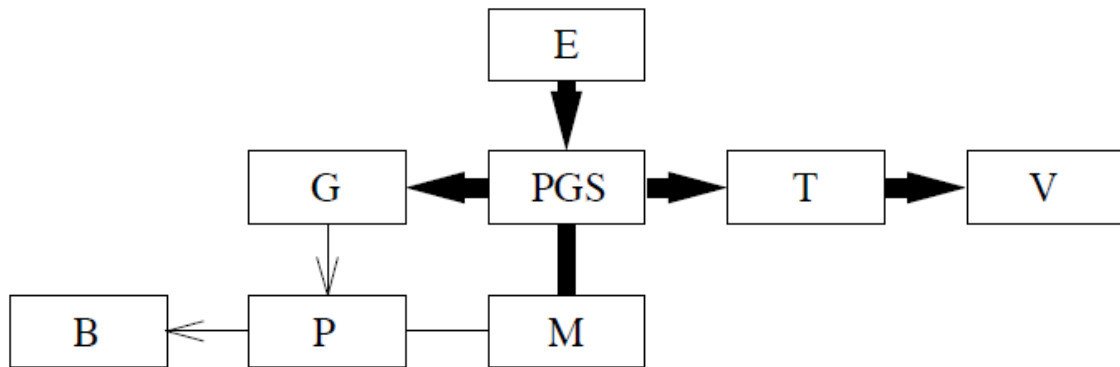
**Figura 29. Modo zero-emissões híbrido, combinado [30]**

3. No modo de travagem regenerativa as baterias são recarregadas utilizando a energia proveniente da travagem do veículo. Os fluxos de potência estão indicados na figura 30.



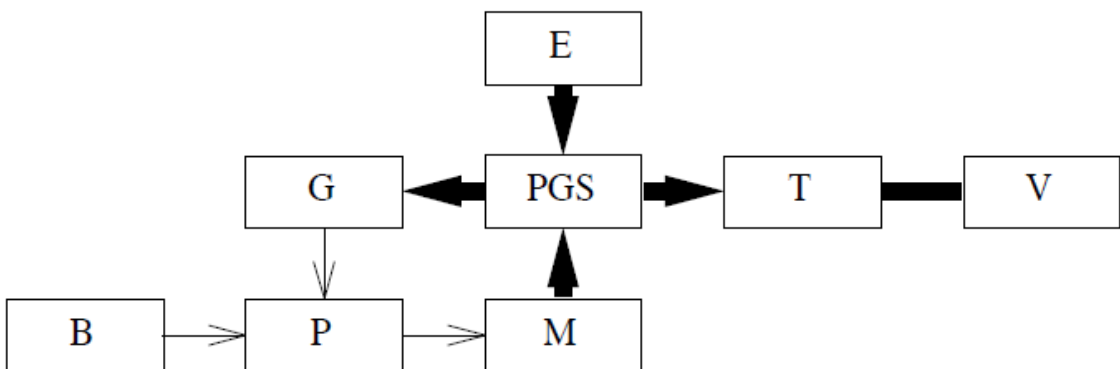
**Figura 30. Modo de travagem regenerativa, híbrido combinado [30]**

4. As baterias podem também ser recarregadas utilizando o motor de combustão. Os fluxos de potência quando o veículo se encontra nesse modo de operação estão indicados na figura 31.



**Figura 31. Carga da bateria utilizando o motor de combustão, híbrido combinado [30]**

5. No modo designado como *power assist* os dois motores estão a trabalhar em simultâneo, os fluxos de potência estão indicados na figura 32.



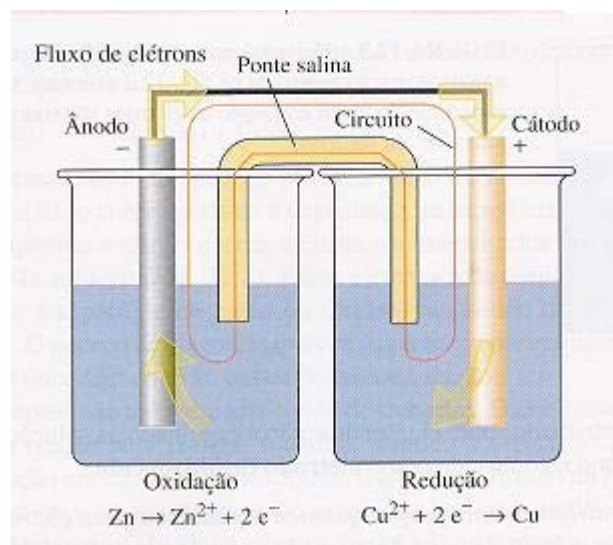
**Figura 32. Modo *power assist*, híbrido combinado [30]**

Como as baterias são um elemento fundamental nos veículos híbridos eléctricos e veículos eléctricos, de seguida faz-se uma pequena abordagem às mesmas.

### 3.3. Baterias

Uma bateria é um dispositivo electroquímico de armazenamento de energia que armazena a energia recebida sob a forma química, tornando-a disponível depois na forma de energia eléctrica. São dispositivos de armazenamento reversíveis e são consideradas os elementos chave dos veículos eléctricos e híbridos eléctricos [30].

Uma bateria inclui uma ou mais células electroquímicas, que constituem um electrólito líquido, em pasta ou sólido, em conjunto com um eléctrodo positivo e um eléctrodo negativo. As baterias electroquímicas produzem energia eléctrica através de uma reacção química, causada na presença do electrólito, de modo a que se libertem iões que atravessam o electrólito criando uma corrente contínua a uma tensão relativamente baixa (1 a 2 V). Existem diversos tipos de baterias, que diferem essencialmente nos materiais usados para a ocorrência das reacções químicas [36].



**Figura 33. Princípio de funcionamento de uma bateria [37]**

As baterias apresentam uma eficiência de armazenamento que varia entre os 60% e os 80%, consoante o tipo de material utilizado para efectuar as reacções químicas. A sua grande vantagem é o seu tempo de resposta, que é muito rápido, a desvantagem, o seu custo [38].

As baterias podem ser divididas em dois tipos, baterias primárias e baterias secundárias. As baterias primárias são baterias de uso descartáveis e não recarregáveis. As baterias secundárias são recarregáveis. Num veículo eléctrico ou híbrido eléctrico as baterias utilizadas são recarregáveis.

Os dispositivos de armazenamento mais utilizados nos veículos eléctricos são as baterias químicas, devido às suas características no que diz respeito à sua elevada densidade energética, fiabilidade e também por serem compactas. O nível de poupança de combustível que um veículo eléctrico ou híbrido eléctrico pode atingir depende do sistema que é utilizado para armazenar a energia [39]. Os requisitos que uma bateria deve possuir para poder ser utilizada em veículos híbridos eléctricos e veículos eléctricos são [29]:

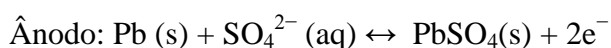
- Elevada potência específica;
- Elevada energia específica;
- Longa durabilidade e ciclos de carga;
- Baixos custos de aquisição e reposição;
- Elevada fiabilidade e robustez.

Como já foi dito anteriormente existem vários tipos de baterias, sendo que o princípio de funcionamento é igual em todos, mudando apenas a substância química utilizada. De seguida, faz-se uma pequena abordagem aos vários tipos de baterias que se utilizam nos veículos eléctricos ou híbridos eléctricos.

### 3.3.1 Baterias de Ácido de Chumbo

Este tipo de bateria é uma tecnologia já madura e que conta com mais de 50 anos de utilização generalizada, sendo produzida em grande escala, o que faz com que o seu preço seja bastante acessível e competitivo. No entanto, este tipo de bateria não é indicado para descargas superiores a 20% da sua capacidade e a sua densidade de energia e de potência são baixas [39].

A bateria de ácido de chumbo é constituída por dois eléctrodos. O chumbo é o ânodo, o óxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ) é o cátodo e a solução de ácido sulfúrico é o electrólito. As reacções químicas no cátodo e no ânodo são [40]:



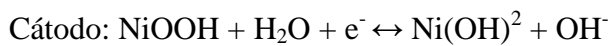
Na tabela 1 podemos consultar as características das baterias de chumbo.

**Tabela 1. Características das baterias de chumbo [42]**

Energia específica	30 – 40 Wh/kg
Densidade energética	60 – 75 Wh/L
Potência específica	180 W/kg
Nº de ciclos de carga	500 – 800
Tensão nominal da célula	2,105 V
Taxa de auto descarga	20 % / Mês
Rendimento carga/descarga	50% – 92%

### **3.3.2 Baterias de Níquel Metal-Hidreto Metálico (NIMH)**

Este tipo de baterias utiliza uma solução alcalina como electrólito. O eléctrodo positivo é feito de hidróxido de níquel e o eléctrodo negativo é feito de uma liga constituída por vanádio, titânio, níquel e outros metais. A sua densidade energética é o dobro da das baterias de chumbo e não são poluentes. As reacções químicas no cátodo e no ânodo são [41]:



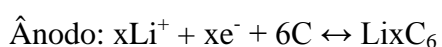
Este tipo de baterias pode operar com tensões elevadas, possui um ciclo de vida elevado, opera numa grande gama de temperaturas, é tolerante a sobrecargas e sobredescargas. O seu ciclo de vida é encurtado entre 200 a 300 ciclos de carga, se for continuamente descarregada a intensidades elevadas. O efeito de memória existente neste tipo de baterias vai diminuindo a energia disponível para uso [39]. Na tabela 2 podemos consultar as características das mesmas.

**Tabela 2. Características das baterias NIMH [43]**

Energia específica	60 – 120 Wh/kg
Densidade energética	140 – 300Wh/L
Potência específica	250 – 1000 W/kg
Nº de ciclos de carga	500 – 1000
Tensão nominal da célula	1,2 V
Taxa de auto descarga	30 % / Mês
Rendimento carga/descarga	66 %

### 3.3.3 Baterias de Iões de Lítio [39]

Estas baterias apresentam uma grande densidade energética, têm um bom desempenho a altas temperaturas e são recicláveis. O eléctrodo positivo é feito de óxido de cobalto e o negativo de carbono. Um sal de lítio é utilizado como electrólito. Este tipo de baterias tem um baixo efeito de memória, elevada energia e potência específica e um elevado número de ciclos, o que lhe confere uma utilização longa [44]. Estas características fazem com que este tipo de bateria assuma o papel da principal potencial substituta das baterias do tipo NIMH como as próximas baterias a serem utilizadas em veículos. As reacções químicas no cátodo e no ânodo são [45]:



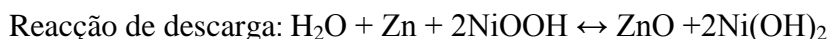
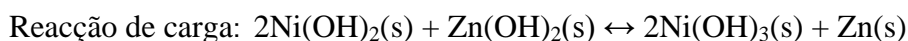
Na tabela 3 podemos consultar as características deste tipo de baterias.

**Tabela 3. Características das baterias de íões de lítio [45]**

Energia específica	100 – 250 Wh/kg
Densidade energética	250 – 620 Wh/L
Potência específica	250 – 340 W/kg
Nº de ciclos de carga	400 – 1200
Tensão nominal da célula	3,6 / 3,7 V
Taxa de auto descarga	8% a 21 °C; 15% a 40 °C; 31% a 60 °C / Mês
Rendimento carga/descarga	80% – 90%

### **3.3.4 Baterias Níquel Zinco (Ni-Zn)**

Estas baterias têm uma grande densidade de potência e energia, utilizam materiais de baixo custo, o que faz com que sejam mais acessíveis, com longos ciclos de vida e são recicláveis. Também têm muito bom desempenho a altas e baixas temperaturas. Estas baterias são capazes de fornecer a mesma energia que uma bateria do tipo NIMH, com menos 40% do peso, o que é uma característica atraente para a sua utilização em veículos eléctricos. Não contêm materiais inflamáveis o que as torna muito mais seguras que uma bateria de íões de lítio [46]. As reacções químicas deste tipo de baterias são indicadas de seguida [47]:



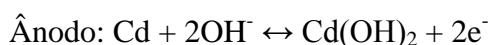
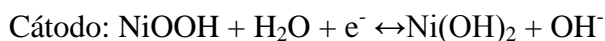
Na tabela 4 estão presentes as características deste tipo de baterias.

**Tabela 4. Características das baterias Ni-Zn [47]**

Energia específica	100 Wh/kg
Densidade energética	280 Wh/L
Potência específica	> 900W/kg
Nº de ciclos de carga	400 – 1000
Tensão nominal da célula	1,65 V

### 3.3.5 Baterias Níquel Cádmio (Ni-Cd)

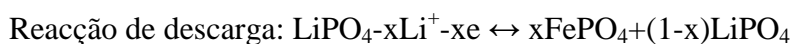
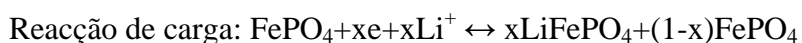
Estas baterias têm uma grande durabilidade e podem ser completamente descarregadas sem se danificarem [39]. Possuem baixa densidade energética, no entanto apresentam uma densidade de potência elevada o que significa que podem ser carregadas e libertar energia rapidamente, quando solicitadas. Como inconvenientes destaca-se o facto de existir efeito de memória e a utilização do cádmio que é um material tóxico [36]. As características deste tipo de baterias podem ser consultadas na tabela 5. As reacções químicas deste tipo de baterias são indicadas de seguida [79]:

**Tabela 5. Características das baterias NiCd [48]**

Energia específica	40 – 60 Wh/kg
Densidade energética	50 – 150 Wh/L
Potência específica	150 W/kg
Nº de ciclos de carga	2000
Tensão nominal da célula	1,2 V
Taxa de auto descarga	10 % / Mês
Rendimento carga/descarga	70% – 90%

### 3.3.6 Baterias Lítio-ferro-fosfato (LiFePO<sub>4</sub>) [49]

Surgiu mais recentemente um novo tipo de bateria de iões de lítio. Essa bateria designa-se por *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO<sub>4</sub>) e apresenta características promissoras para ser aplicada em veículos eléctricos, sendo vista como uma alternativa às tecnologias de baterias mais difundidas nos veículos eléctricos nos últimos anos. As suas características mais relevantes são, a sua elevada capacidade, a sua estabilidade química e térmica, baixo custo de produção e também pelo seu impacto ambiental na sua produção e reciclagem, ser reduzido. As reacções químicas deste tipo de baterias são as seguintes:



As características deste tipo de baterias estão registadas na tabela 6.

**Tabela 6. Características das baterias LiFePO<sub>4</sub> [50]**

Energia específica	90 – 110 Wh/kg
Densidade energética	220 Wh/L
Potência específica	>300 W/kg
Nº de ciclos de carga	2000
Tensão nominal da célula	3,3 V

### 3.4. Veículos Eléctricos com Célula de Combustível

Este tipo de veículos utiliza uma célula de combustível para fornecer a energia eléctrica necessária ao motor eléctrico, que o acciona. Este tipo de veículos são também designados por veículos a hidrogénio, uma vez que as células de combustíveis utilizam hidrogénio contido num recipiente e o oxigénio presente no ar para produzir electricidade.

### 3.4.1 Hidrogénio

O hidrogénio é o elemento mais abundante do universo representando 75% da massa elementar do universo [51]. O hidrogénio pode ser obtido de várias formas, sendo que habitualmente a nível industrial este é produzido utilizando combustíveis fósseis através de processos químicos, geralmente a partir do gás natural ou do metano. O hidrogénio pode ser obtido a partir do gás natural, com uma eficiência de 80% ou a partir de outros hidrocarbonetos, com graus de eficiência variáveis [52]. Existem outros processos utilizados para a produção de hidrogénio como os bio reactores de microalgas e a electrólise, entre outros. A electrólise é um processo que permite separar os elementos químicos de um composto utilizando electricidade. Consiste em aplicar uma corrente eléctrica contínua a um sistema líquido em que existam iões presentes, gerando assim reacções químicas que permitem separar os compostos presentes na solução aquosa. Para a produção de hidrogénio a solução utilizada é a água ( $H_2O$ ), a qual é decomposta em oxigénio (O) e hidrogénio ( $H_2$ ), recorrendo ao processo de electrólise [53]. O processo de produção de hidrogénio através da electrólise desperta bastante interesse porque o hidrogénio durante a sua utilização é uma substância não poluente, no entanto o mesmo não se pode afirmar do seu processo de produção. Se o processo utilizado for a electrólise e a electricidade necessária for obtida a partir de fontes renováveis, então o hidrogénio seria uma fonte de energia completamente limpa do ponto de vista ambiental, uma vez que o subproduto da sua queima é água. O processo de electrólise apresenta um rendimento de 50 a 60%, se não for considerado o oxigénio resultante do processo de electrólise e 80 a 94% se for considerado o oxigénio [54].

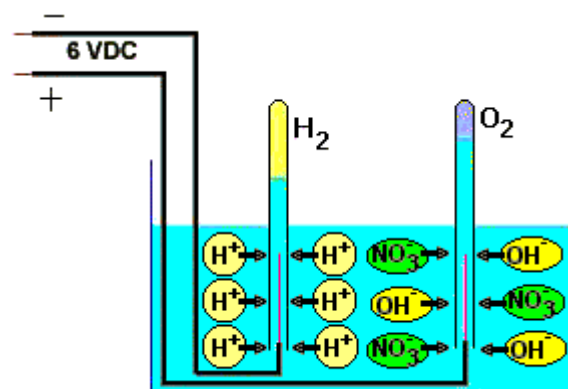
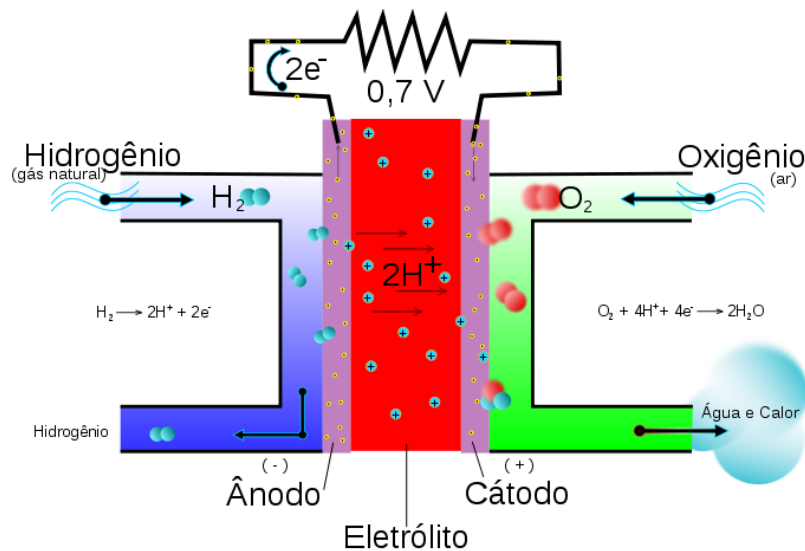


Figura 34. Princípio do processo de electrólise [80]

Para utilizar o hidrogénio como fonte de energia eléctrica é necessário utilizar uma célula de combustível. Uma célula de combustível gera energia eléctrica através da combinação química do oxigénio ( $O_2$ ) e do hidrogénio ( $H_2$ ). Durante esse processo é produzido também calor e água (figura 35).



**Figura 35. Princípio de funcionamento de uma célula de combustível [59]**

### 3.4.2 Armazenamento Hidrogénio [55] [56]

Qualquer veículo que não receba constantemente energia a partir de uma fonte externa, como por exemplo o metro, é obrigado a armazenar a bordo a energia necessária para se deslocar. Os aspectos a ter em conta quando se pretende armazenar qualquer combustível num veículo são: a segurança e o volume que ocupa o combustível necessário para que o veículo possa ter a autonomia desejada.

O transporte de hidrogénio de modo seguro em veículos, para que este possa ser utilizado como combustível é ainda um dos grandes desafios dos cientistas. O Hidrogénio é um gás que ocupa um grande volume o que dificulta o seu transporte, só pode ser liquefeito a temperaturas baixas e é facilmente inflamável [57].

Existem vários métodos de armazenamento de hidrogénio sendo os mais difundidos o armazenamento no estado líquido e no estado gasoso.

- **Hidrogénio líquido**

O hidrogénio apresenta-se no estado gasoso à temperatura ambiente e à pressão atmosférica. Este pode ser condensado se for sujeito a uma forte diminuição de temperatura, passando do estado gasoso para o estado líquido. O hidrogénio é menos volumoso no estado líquido do que no estado gasoso o que permite armazenar uma maior quantidade por unidade de volume, permitindo assim transportar mais hidrogénio ocupando o mesmo espaço. No entanto, a conversão do estado gasoso para o estado líquido utiliza muita energia: a eficiência deste processo é de cerca de 60%. É também um processo caro pois além da energia necessária para condensar o hidrogénio é também necessário mante-lo a uma temperatura inferior a  $-253^{\circ}\text{C}$ , pois a temperaturas superiores o hidrogénio evapora-se, o que obriga a um gasto constante de energia. O facto do hidrogénio líquido ocupar um volume reduzido torna-o ideal para aplicação em veículos, embora ainda ocupe muito espaço comparativamente à gasolina. Sistemas com iguais quantidades de energia podem ser 4 a 10 vezes mais pesados do que um tanque de gasolina equivalente.

O hidrogénio liquefeito apresenta menos perigos que o hidrogénio comprimido, porque se existir uma fuga o combustível tem primeiro de aquecer para se evaporar, o que faz o com que se liberte sobre a forma gasosa mais lentamente para a atmosfera. No entanto requer medidas extra de segurança, como a necessidade de isolar a superfície de armazenamento para que não possam ocorrer queimaduras por frio.

O hidrogénio líquido é utilizado na indústria automóvel nomeadamente nas células de combustível. Para ser utilizado numa célula de combustível tem que ser previamente aquecido, uma vez que as mesmas não funcionam com hidrogénio no estado líquido.

- **Hidrogénio comprimido**

O hidrogénio no estado gasoso encontra-se disponível sob a forma de botijas ou tanques sobre pressão. Este método de armazenamento é considerado um método de armazenamento directo e é utilizado quando se pretende pequenas quantidades de gás. Este método de armazenamento ocupa muito espaço e por isso só é utilizado quando a questão do espaço não constitui um problema. Para o seu armazenamento utilizam-se tanques no qual o gás se encontra comprimido, dependendo a pressão da densidade de armazenamento. Quanto maior a pressão maior a densidade. O custo energético de comprimir o hidrogénio é de aproximadamente 1,43% da energia total contida no hidrogénio a comprimir por cada 100 Bar de pressão.

O hidrogénio comprimido apresenta como vantagens a simplicidade e o facto de não apresentar perdas energéticas, depois de comprimido, com o passar do tempo. Utiliza-se este tipo de armazenamento quando a solicitação de hidrogénio não é muito alta e é variável. Por exemplo em células de combustível, nos autocarros, nos automóveis, em habitações, em estabelecimentos comerciais e industriais.

### **3.5. Células de Combustível**

Uma célula de combustível é uma célula electroquímica em que são consumidos um agente redutor (combustível) e um agente oxidante (comburente), com o objectivo de gerar energia eléctrica. A maioria das células de combustível utiliza directamente o hidrogénio como combustível, ou é capaz de o processar. Uma célula de combustível converte a energia química do combustível directamente em energia eléctrica, sem estágios intermédios de combustão ou de produção de energia mecânica [58]. Nas células de combustível, ao contrário das baterias ou das pilhas, estes agentes químicos são fornecidos e consumidos continuamente [59].

As células de combustível são constituídas por três elementos base: o ânodo, o cátodo e o electrólito que são montados juntos. Existem várias tecnologias de células de combustível, sendo a sua classificação efectuada consoante o tipo de electrólito utilizado. Na interface dos três materiais diferentes ocorrem duas reacções químicas, sendo obtidos como produtos finais electricidade, calor e água [60].

Uma célula de combustível produz uma tensão inferior a 1 volt, sendo por isso associadas em série de modo a atingir o valor de tensão desejado. Quando associadas, o conjunto passa a designar-se pilha de combustível. A corrente à saída da célula é do tipo contínuo o que implica o uso de um inversor de modo a transformá-la em corrente alternada.

#### **3.5.1 Tipos de Células de Combustível [57] [61]**

- **PEMFC** – Célula de Combustível de Membrana de Troca de Prótons, “*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*”

Este tipo de células de combustível utiliza uma membrana feita de um polímero especial como electrólito e possui uma elevada densidade de potência. Quando comparado com outro tipo de células apresentam como vantagens o seu baixo peso e volume. Utilizam hidrogénio e o oxigénio contido no ar para funcionar e não utilizam líquidos corrosivos, ao contrário do que

acontece com outro tipo de células. Funcionam numa faixa de temperatura que se situa entre os 60 °C e os 140 °C, sendo por isso consideradas como células de funcionamento a baixas temperaturas, permitindo que a célula entre em funcionamento mais rapidamente que outras de diferente tipo. Apresentam uma eficiência na geração de electricidade entre 35% a 55% e utilizam um catalisador de platina, que aumenta substancialmente o seu custo.

- **DMFC** – Célula de Combustível de Metanol Directo, “*Direct Methanol Fuel Cell*”

A grande maioria das células de combustível utiliza como combustível o hidrogénio, seja no seu estado puro ou processa-o através de outros compostos. No entanto este tipo de células não utiliza o hidrogénio como combustível mas sim o metanol. O metanol é misturado com vapor sendo esta mistura alimentada directamente ao ânodo da célula. O metanol é mais fácil de transportar e de fornecer ao público, por ser um líquido, também apresenta uma densidade superior ao hidrogénio. Todos estes factores permitem reduzir alguns dos problemas relativos ao armazenamento do combustível. É uma tecnologia relativamente nova quando comparada com as células que utilizam hidrogénio. A sua eficiência na geração de energia eléctrica é de 40% a 50%.

- **AFC** – Célula de Combustível Alcalina, “*Alkaline Fuel Cell*”

Estas células de combustível usam uma solução aquosa de hidróxido de potássio como electrólito. As células de combustíveis alcalinas de alta temperatura trabalham com temperaturas entre os 100 e os 250 °C. No entanto as novas células deste tipo trabalham com temperaturas entre os 23 e 70 °C. A grande desvantagem deste tipo de células de combustível é o facto de o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) afectar o funcionamento da mesma, diz-se mesmo que “envenena” a célula. Assim, torna-se necessário purificar o hidrogénio e o oxigénio utilizados, porque a mais pequena quantidade de CO<sub>2</sub> afecta o seu desempenho, no entanto é um processo dispendioso. Esta sensibilidade ao CO<sub>2</sub> também diminui a durabilidade deste tipo de equipamento, obrigando à sua substituição. Apresentam uma eficiência na conversão para energia eléctrica de 45% a 60%.

- **PAFC** – Célula de Combustível de Ácido Fosfórico, “*Phosphoric Acid Fuel Cell*”

Esta tecnologia utiliza o ácido fosfórico como um electrólito e representa a tecnologia mais avançada das células de combustível ditas comerciais. São utilizadas como gerador estacionário, mas também em veículos. Funcionam a baixa temperatura e por isso podem

tolerar combustíveis com impurezas como o metanol e o biogás. Utiliza um filtro para limpar o combustível e um aparelho interno para extrair o hidrogénio desses combustíveis. A sua eficiência na conversão para energia eléctrica situa-se entre os 35% e 47%. Tal como as células do tipo PEM estas também utilizam um catalisador de platina, o que aumenta substancialmente o seu custo.

- **SOFC** – Célula de Combustível de Óxido Sólido, “*Solid Oxide Fuel Cell*”

Estas células podem funcionar com os mais variados combustíveis, pois são capazes de processar o hidrogénio contido nesses combustíveis. Estas células utilizam um material cerâmico, sólido e não poroso como electrólito. Este tipo de tecnologia funciona a altas temperaturas, entre 600 e os 1000°C, pelo que não necessita de utilizar metais caros, reduzindo bastante o seu custo. A operação a alta temperatura apresenta como desvantagem um arranque mais lento da célula e a necessidade da utilização de protecções de modo a reter o calor e evitar queimaduras. A eficiência na produção de energia eléctrica varia entre 50% e 60%. Se o calor for aproveitado, a eficiência total de energia (energia eléctrica mais energia térmica) pode variar entre 75% a 85%.

- **MCFC** – Células de Combustível de Carbonato Fundido, “*Molten Carbonate Fuel Cell*”

São células que funcionam a temperaturas extremamente elevadas, superiores a 650 °C, o que faz com que não necessitem de utilizar metais caros, reduzindo assim o seu custo. Neste tipo de células o electrólito é composto por carbono fundido. Como acontece com as células do tipo SOFC, também estas são capazes de processar o hidrogénio, eliminando assim a necessidade deste ser produzido externamente. A sua principal desvantagem é a sua durabilidade. A sua alta temperatura de funcionamento e o facto do material utilizado como electrólito ser corrosivo, aceleram o processo de corrosão, contribuindo para a diminuição do seu tempo de vida útil. A sua eficiência na produção de energia eléctrica situa-se entre os 50 e os 60%. Se o calor resultante da reacção for aproveitado para aquecimento ou para a produção de mais energia eléctrica através de uma turbina a vapor, pode-se aumentar a eficiência total para 85%.

Os FCEV na generalidade utilizam actualmente células do tipo PEMFC ou AFC [81]. O grande entrave à difusão do uso das células de combustível é o seu preço, mas com o desenvolvimento deste tipo de tecnologias espera-se uma redução nos preços das mesmas nos próximos anos.

# 4. Sistemas Fotovoltaicos

Como já foi referido anteriormente, para que o uso de veículos eléctricos e de célula de combustível seja realmente neutro do ponto de vista de emissões de gases de efeito estufa é necessário que a energia eléctrica produzida para efectuar o carregamento dos veículos eléctricos e para produzir o hidrogénio, seja proveniente de fontes também elas neutras. Uma alternativa seria a utilização de um sistema fotovoltaico para produzir a energia eléctrica necessária.

## 4.1. Tecnologia fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos ao contrário dos sistemas térmicos não utilizam o calor mas sim a energia proveniente da luz do Sol para produzir energia. O prefixo foto significa luz e o sufixo voltaico refere-se à electricidade.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou de prata, mergulhadas num electrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. Mas foi apenas em 1883, que foram construídas as primeiras células fotoeléctricas [62] [63]. A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954: era capaz de gerar 5 mW de potência eléctrica, tinha uma eficiência de 6% e a sua área de captação era de 2 centímetros quadrados. Actualmente já foram produzidas

mais de mil milhões de células fotovoltaicas, com eficiências na ordem dos 16%. Em 2004 ultrapassou-se pela primeira vez a barreira dos GW de potência eléctrica anual instalada [64].

As células fotovoltaicas, como permitem converter a energia (luz) proveniente do Sol em energia eléctrica, são o elemento chave dos sistemas fotovoltaicos. São constituídas por um material semiconductor (só permitem fluxo de electrões num sentido, funcionam como díodos). O semiconductor normalmente utilizado é o silício, tendo sido posteriormente submetido a um tratamento especial. A escolha recaiu sobre o silício por este ser barato, seguro e libertar naturalmente electrões (energia eléctrica), quando atingido por um fóton (fonte de luz).

## **4.2. Efeito fotovoltaico [14] [64]**

Os átomos de silício possuem uma camada de valência com 4 electrões. Quando os átomos de silício se agrupam entre si, formam uma estrutura cristalina, em que os átomos se distribuem no espaço como uma estrutura ordenada: cada átomo une-se a quatro outros átomos vizinhos, por meio de ligações covalentes, e cada um dos quatro electrões de valência de um átomo é compartilhado com um átomo vizinho, de modo que dois átomos adjacentes compartilham os dois electrões. Quando o painel é atingido por um fóton dá-se um aumento da temperatura e algumas ligações covalentes recebem energia suficiente para se romperem, fazendo com que os electrões das ligações rompidas passem a movimentar-se livremente no interior do cristal, tornando-se electrões livres, passando da banda de valência para a banda de condução. A energia necessária para que um electrão do cristal de silício se liberte é igual a 1,12 eV.

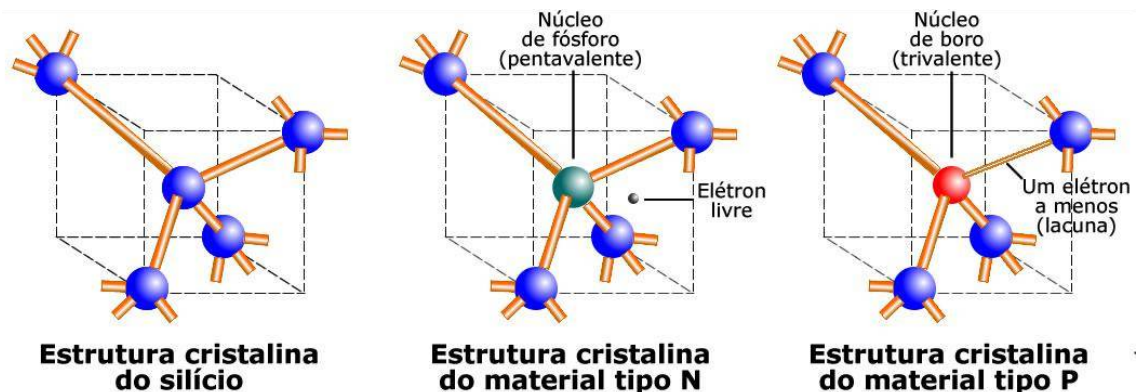
Com a quebra das ligações covalentes, no local onde havia um electrão de valência, passa a existir uma região com carga positiva, pois inicialmente o átomo era neutro, mas perdeu um electrão. Essa região positiva passa a designar-se lacuna ou buraco. As lacunas não existem na realidade, uma vez que são apenas espaços vazios originados pelo abandono dos electrões das ligações covalentes que se quebraram. Sempre que uma ligação covalente é quebrada, surgem, simultaneamente um electrão e uma lacuna.

Quando o cristal de silício é submetido a uma diferença de potencial, os electrões livres movem-se no sentido do maior potencial eléctrico e as lacunas automaticamente movem-se no sentido contrário ao movimento dos electrões. Esta diferença de potencial origina uma corrente.

Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produz energia eléctrica, pois os electrões que passaram para a banda de condução acabariam por se recombinar com as

lacunas, não dando origem a qualquer corrente eléctrica. Os cristais de silício são encontrados na natureza misturados com outros elementos. Dada a dificuldade de se controlar as características destes cristais é feito um processo de purificação do cristal e em seguida é injectado através de um processo controlado, uma quantidade proporcional de impurezas na ordem de 1 para cada 10<sup>6</sup> átomos do cristal, de modo a alterar a produção de electrões livres e das lacunas. A este processo de injeção dá-se o nome de dopagem. Ao dopar o silício, alteram-se as suas propriedades eléctricas, passando a célula a ser constituída por duas camadas: a camada tipo **p** e a camada tipo **n**.

Na camada **p** existem cargas positivas em excesso e na **n** cargas negativas. Para criar a região **p** utiliza-se normalmente o boro. O boro só apresenta três electrões na banda de valência e como forma quatro ligações de covalentes com os quatro átomos de valência do silício, surge uma lacuna que vai actuar como carga positiva. Essa lacuna viaja através do material, pois de cada vez que um electrão vizinho a preenche, outro buraco se cria. Para criar a região **n** utiliza-se o fósforo. O fósforo tem cinco electrões na sua banda de valência e cria quatro ligações covalentes com os átomos de silício, deixando um electrão livre que viaja através do material.



**Figura 36. Estrutura cristalina de materiais semicondutores [65]**

Na junção das camadas **n** e **p** forma-se um campo eléctrico que separa os portadores de carga que a atingem. Os electrões que receberam energia suficiente dos fotões para se libertarem são acelerados para o terminal negativo e as lacunas circulam para o terminal positivo. Se os dois terminais forem ligados por um circuito exterior fechado, através de uma carga, circulará corrente eléctrica, ver figura 37.

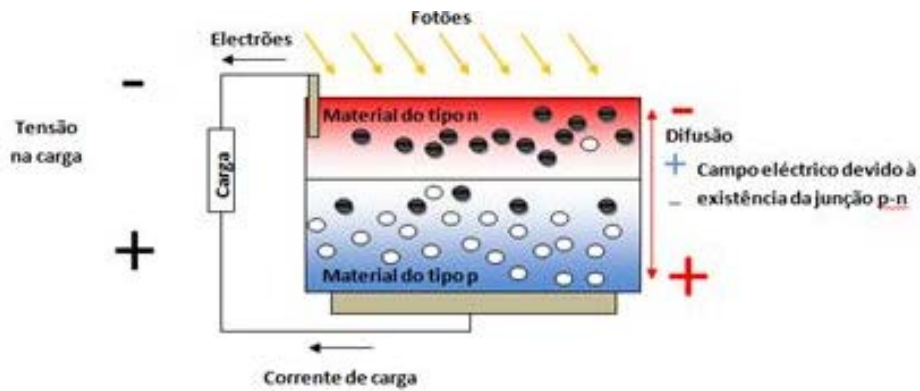


Figura 37. Efeito fotovoltaico [66]

### 4.3. Módulos Fotovoltaicos

Uma única célula fotovoltaica não produz mais de 2W [14], esta potência não é suficiente para a maioria das aplicações o que torna necessário associar várias células. As células podem ser associadas em série ou em paralelo de modo a poder fornecer a potência necessária. Várias células associadas em série formam um ramo. Quando existem vários ramos associados em paralelo, o sistema passa a designar-se por módulo ou painel.

A associação em série é utilizada de modo a aumentar a tensão do sistema. Quanto maior for o número de células ligadas em série, maior será a tensão do sistema, mantendo-se constante a corrente produzida pelo sistema, ver figura 38.

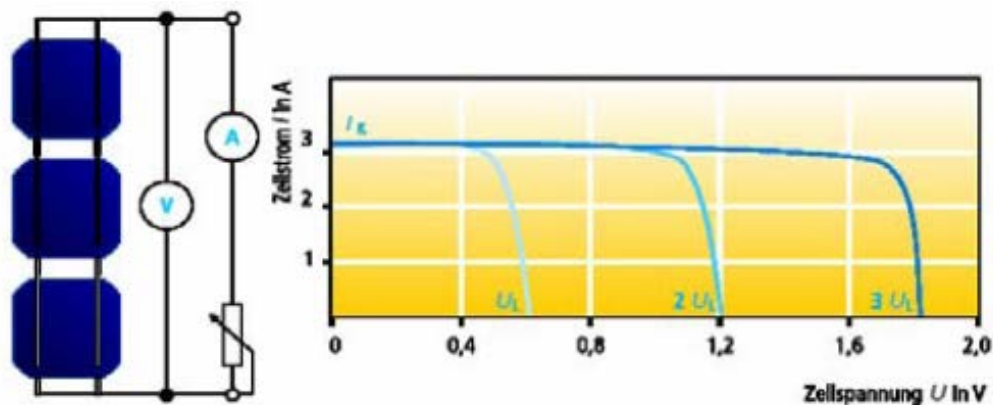


Figura 38. Associação de células em série [14]

A associação de ramos em paralelo utiliza-se quando se pretende obter potências elevadas. Neste caso é a tensão que se mantém constante, aumentando a corrente consoante o número de ramos ligados em paralelo, ver figura 39.

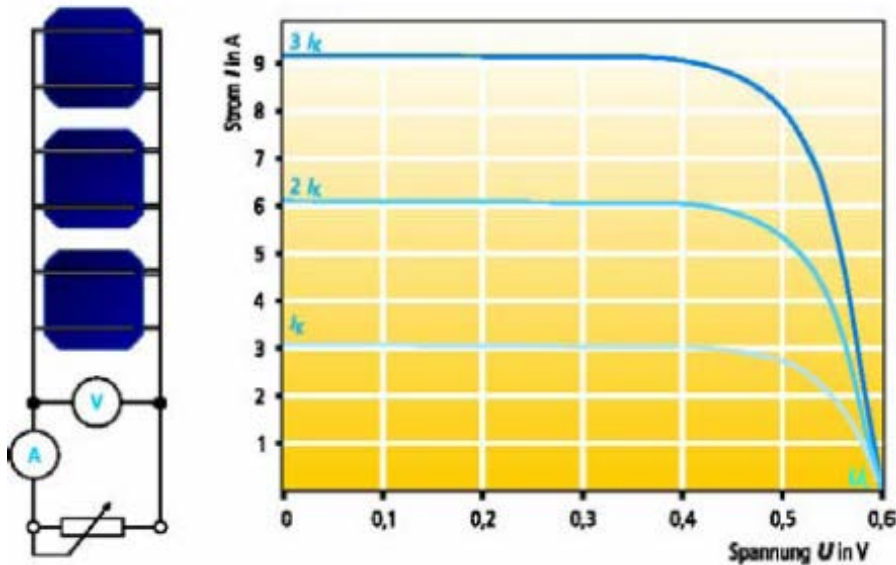


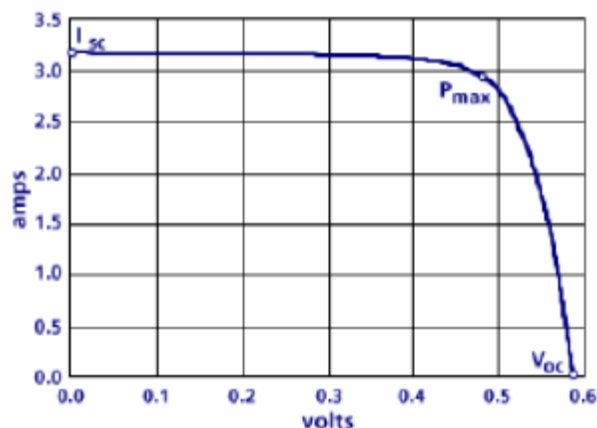
Figura 39. Associação células em paralelo [14]

Os módulos fotovoltaicos são principalmente caracterizados pela sua potência de pico ou seja, a potência nominal máxima que podem fornecer. Para determinar essa potência, sujeita-se o módulo às condições normalizadas de teste e obtêm-se a sua curva característica. Uma curva característica típica pode ser consultada na figura 40. As condições normalizadas de teste são:

- Temperatura: 25 °C;
- Radiação incidente: 1000 W/m<sup>2</sup>.

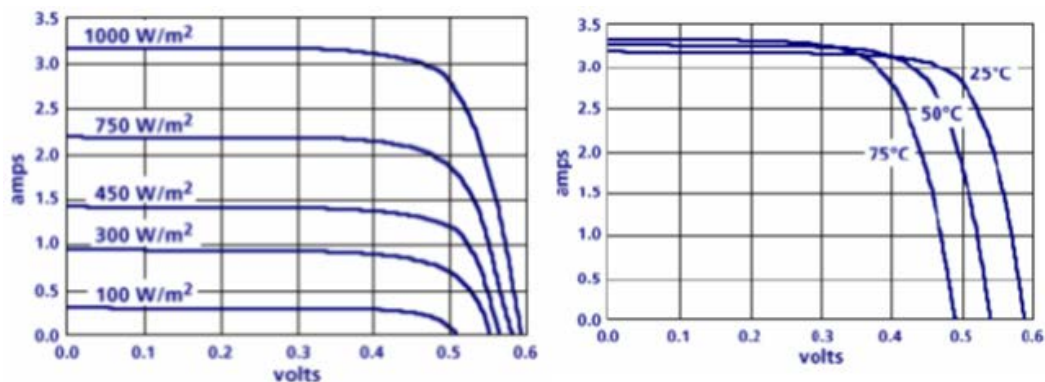
Os módulos são também caracterizados por outros parâmetros tais como:

- Voc – Tensão em circuito aberto;
- Ic – corrente em curto-circuito;
- In – corrente nominal,
- Tensão nominal.



**Figura 40. Curva característica típica de um painel fotovoltaico [14]**

Existem dois factores que influenciam as curvas características e o rendimento de um módulo fotovoltaico: a intensidade da radiação incidente e a temperatura das células. O aumento da temperatura diminui a potência de saída e consequentemente o rendimento do módulo. Ao contrário do que acontece com a temperatura, com o aumento da radiação incidente aumenta também a corrente gerada nos módulos e logo o seu rendimento. A influência destes factores no desempenho do módulo é visível na figura 41.



**Figura 41. Influência da radiação solar e da temperatura num painel fotovoltaico [14]**

Um painel fotovoltaico é normalmente constituído por uma camada transparente exterior que serve de protecção, duas camadas internas de células de silício das quais a camada superior está coberta por uma grelha metálica que recolhe os electrões, e também por um polímero rijo que serve de base a toda a estrutura. Os painéis podem ainda ter uma moldura, que contribui para a sua preservação, aumentando a sua durabilidade.

#### **4.4. Tecnologia das Células Fotovoltaicas [14] [66] [67]**

A tecnologia das células fotovoltaica pode ser dividida em três categorias: as células de primeira, de segunda e de terceira geração.

As células à base de silício cristalino foram o primeiro tipo de células que surgiram e são por isso designadas como a primeira geração de tecnologia solar e representam aproximadamente 90% das células disponíveis no mercado. Podem ser de dois tipos: monocristalino ou policristalino.

As células do tipo monocristalino apresentam um rendimento considerado elevado de cerca de 16%, podendo chegar aos 23%. A sua quota de mercado é de 60%. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico, no entanto as técnicas utilizadas no seu fabrico são caras e complexas. Necessitam de uma grande quantidade de energia no seu fabrico, devido ao facto de utilizarem materiais em estado de elevada pureza e com uma estrutura de cristal perfeita.

As células do tipo policristalino são constituídas por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispendo de uma quota de mercado de cerca de 30%. O seu custo de produção é inferior, visto que necessitam de menos energia no seu fabrico, no entanto têm um rendimento eléctrico inferior, entre 11% e 13%, conseguindo-se 18% em determinadas situações. A redução do rendimento é resultado da imperfeição do cristal, causada pelo sistema de fabrico.

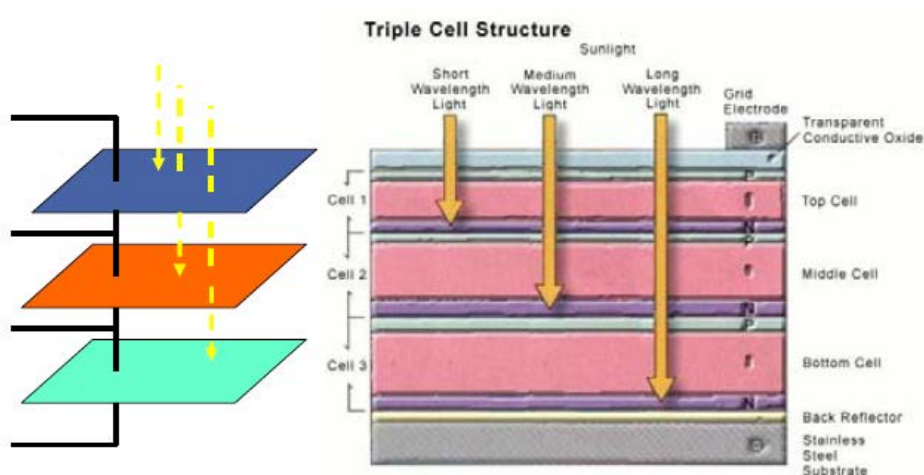
As células de segunda geração correspondem às soluções de película fina aplicadas sobre substratos rígidos e podem ser de quatro tipos conforme o material semiconductor utilizado. Os materiais que são utilizados neste tipo de células são: o disseleneto de cobre e índio (CIS), o telureto de cádmio (CdTe) o silício amorfo (a-Si), e o arsenieto de gálio (GaAs). A eficiência média das duas primeiras células situa-se na ordem dos 7%. As células à base de arsenieto de gálio têm uma eficiência de 30%, no entanto apresentam um custo muito elevado, o que faz com que só sejam praticamente utilizadas em aplicações espaciais. As células de silício amorfo são as células que apresentam o custo mais reduzido, das que utilizam silício, mas o seu rendimento eléctrico é também o mais baixo de 8% a 10%, com um máximo de 13% em condições específicas. O silício amorfo não possui uma estrutura cristalina e a sua estrutura

apresenta defeitos estruturais que em teoria deveriam ser um impedimento à sua utilização em células fotovoltaicas, pois esses defeitos potenciam a recombinação dos pares electrão-buraco. Para ser utilizado em células fotovoltaicas é necessário submeter o mesmo a um processo designado por hidrogenização. Esse processo consiste em adicionar uma pequena quantidade de hidrogénio ao silício amorfo que vai fazer com que os átomos do hidrogénio se combinem quimicamente, minimizando os efeitos negativos da estrutura policristalina, possibilitando assim o seu uso em células fotovoltaicas. O baixo rendimento das células é contra balanceado pelo baixo preço das mesmas, que se deve ao facto de estas utilizarem menos material e menos energia no seu fabrico, uma menor perda de eficiência a altas temperaturas e um melhor desempenho quando o nível de radiação incidente é baixo ou do tipo difusa. O facto de estas células serem películas muito finas, permite que sejam utilizadas como material de construção e, ainda, conseguir o proveito energético das mesmas.



**Figura 42. Módulos de silício amorfo, policristalino e monocristalino [68] [69]**

As células de terceira geração consistem em películas finas aplicadas sobre substratos flexíveis. É uma tecnologia ainda em desenvolvimento, não existindo ainda uma produção industrial deste tipo de células. As tecnologias em desenvolvimento neste domínio passam pelo fabrico de células multi-junção recorrendo a diferentes materiais semicondutores com degraus de energia sucessivamente mais baixos, possibilitando um melhor aproveitamento do espectro de radiação solar. A eficiência deste tipo de células para o caso de tripla junção atingiu já os 40%.



**Figura 43. Princípio de funcionamento das células fotovoltaicas de multi-junção [68]**

Nos últimos anos surgiram células constituídas por matérias orgânicas semicondutoras, como é o caso do dióxido de titânio, aplicadas sobre substratos flexíveis, cujo objectivo é, em geral, imitar o processo de fotossíntese. A eficiência deste tipo de células ronda ainda os 5%. Surgiram também um outro tipo de células designadas por termo-fotovoltaicas, cuja energia da radiação solar é primeiro convertida em calor e depois em energia eléctrica, por intermédio de uma célula fotovoltaica concebida para operar numa banda de comprimentos de onda térmicos.

Os painéis fotovoltaicos orgânicos, que fazem uso de polímeros orgânicos ou pequenas moléculas semicondutoras são a grande alternativa aos tradicionais painéis. Actualmente já existem projectos em que se estão a fabricar células fotovoltaicas orgânicas. O custo de produção de painéis fotovoltaicos orgânicos, que fazem uso de polímeros orgânicos ou pequenas moléculas semicondutoras, é significativamente mais baixo que o dos painéis fotovoltaicos tradicionais. Além disso, têm uma espessura muito reduzida e uma complexidade de produção bastante inferior. No entanto o seu grande defeito é que actualmente ainda são menos eficientes que os painéis tradicionais na conversão da luz do Sol em energia eléctrica [70].

Os responsáveis pelos projectos de fabricação de células solares orgânicas acreditam que as mesmas possam gerar electricidade a um preço semelhante ao da energia da rede, tornando assim a tecnologia mais competitiva, uma vez que as tecnologias fotovoltaicas existentes são bastante caras e por isso pouco competitivas [71]. No entanto, devido ao elevado potencial que possui a energia solar, as tecnologias fotovoltaicas têm vindo a registar uma grande evolução e

continuarão a evoluir, mantendo como principal objectivo a criação de uma célula com elevado rendimento, mas que mantenha as características das células de segunda geração. Por outras palavras, pretende-se criar uma célula que tenha um elevado rendimento e um baixo preço, permitindo assim diminuir o preço da tecnologia fotovoltaica.

#### 4.5. Eficiência das células [72]

Diferentes tipos de células apresentam diferentes eficiências na conversão da energia do Sol em electricidade, isso deve-se ao material que utilizam. As células podem ter maior ou menor eficácia na conversão das diferentes bandas de cor da luz solar em electricidade. A sensibilidade espectral de cada material permite determinar a faixa da radiação para a qual a célula funciona de um modo mais eficaz. A luz que emana do Sol está concentrada na faixa da luz visível ou seja entre 400 nm e 800 nm e o material que for mais sensível à luz dentro desses comprimentos de onda será o material mais eficaz. As células solares cristalinas são especialmente sensíveis à radiação solar de onda longa e as células de película fina utilizam melhor a luz visível. As células de silício amorfo são mais eficazes em absorver a radiação de onda curta. Os materiais CdTe e CIS são mais adequados para as ondas de comprimento médio.

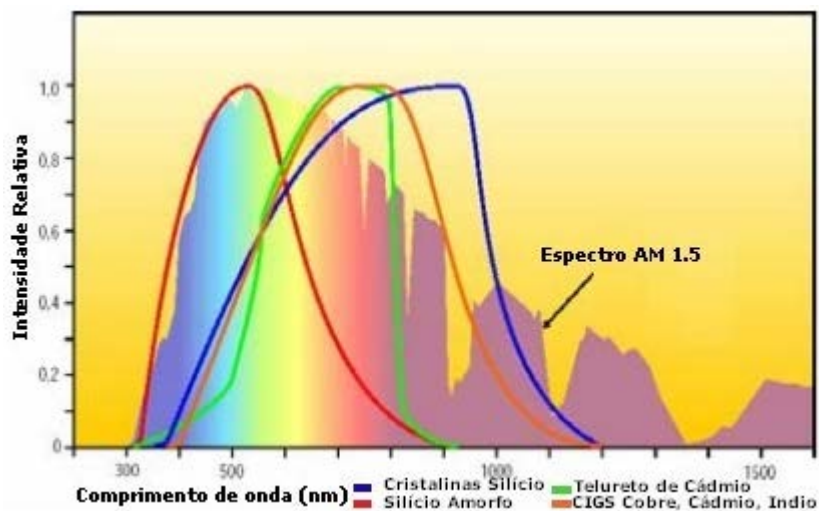
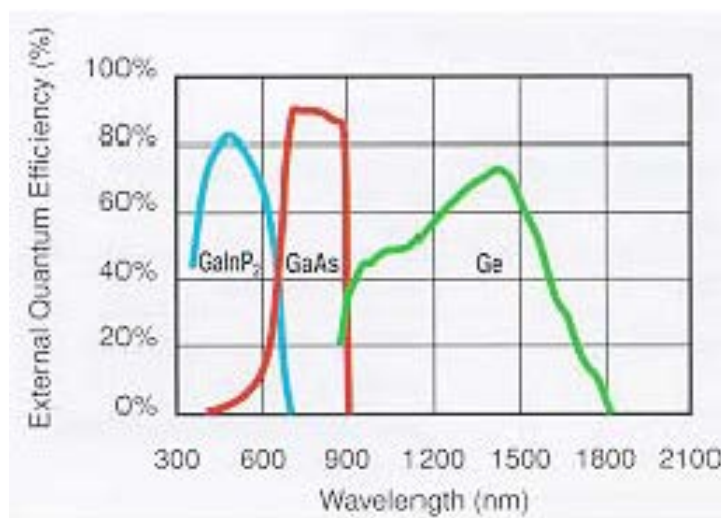


Figura 44. Sensibilidade ao Espectro da Luz [72]

Observando a figura 44 verifica-se que a área correspondente ao silício cristalino é a maior o que significa que a energia absorvida é maior que a dos restantes materiais representados nessa mesma figura. Entende-se assim a razão pela qual as células de silício cristalino são as que

apresentam um maior rendimento, entre as que utilizam apenas um tipo de material na sua constituição.

Como já foi dito anteriormente as células multi-junção são as que apresentam um maior rendimento pois permitem um melhor aproveitamento do espectro solar. Na figura 42, é possível verificar que combinando os três materiais aproveita-se mais o espectro solar comparativamente com as células que utilizam apenas um único material. No entanto, este tipo de células são muito caras sendo apenas utilizadas actualmente para fins aeroespaciais.



**Figura 45. Zonas de absorção de uma célula do tipo multi-junção [68]**

## 5. Caso de Estudo

Como já foi dito anteriormente os veículos eléctricos e os veículos a hidrogénio surgem como o meio de transporte alternativo, que permite colmatar o problema energético e ambiental actual, mas apenas se a energia utilizada para carregar os veículos eléctricos e produzir o hidrogénio for de origem renovável. Tendo isso em conta, efectuou-se o estudo de uma estação de carregamento de *Electric Vehicle* (EV) e de *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV), prevista para operar durante 20 anos, utilizando um sistema fotovoltaico como fonte de energia, pensado para ser implementado em áreas de serviço já existentes. No caso dos FCEV, pretende-se determinar qual será a melhor opção em termos económicos, para a produção de hidrogénio considerando três regimes de produção: recorrendo apenas à energia fotovoltaica, apenas à energia da rede, ou uma combinação dos dois regimes. Apesar de serem apenas um sistema, são analisados como sendo dois, de modo a obter uma análise mais objectiva. Irá iniciar-se o presente estudo pelo dimensionamento do sistema fotovoltaico.

## 5.1. Sistema fotovoltaico

Para dimensionar o sistema fotovoltaico (FV) a primeira fase do processo consiste em determinar a potência necessária para o funcionamento do sistema.

### Potência do sistema de Carregamento EV

O sistema de carregamento utilizado é um sistema de carregamento rápido ou seja, segundo o regulamento n.º 464/2011, publicado em diário da república, relativo à mobilidade eléctrica, este sistema tem de possuir uma potência igual ou superior a 40 kVA, em caso de fornecimento em corrente alternada, ou igual ou superior a 40 kW, em caso de fornecimento em corrente contínua.

O sistema fotovoltaico produz corrente contínua (DC), por esse facto optou-se por fornecer energia a uma potência de 40 kW. De seguida determinou-se a potência mínima necessária do sistema fotovoltaico da seguinte forma:

- Número máximo de carros admitidos em simultâneo: 10;
- Potência de carregamento: 40 kW.

A potência máxima necessária será:

$$P=10 \times 40=400 \text{ kW}$$

### Potência do sistema FCEV

O sistema de produção de hidrogénio em estudo necessita de um electrolisador, um compressor, sistema de armazenamento e um *dispenser*. No electrolisador é produzido o hidrogénio recorrendo ao processo de electrólise, utilizando água proveniente das chuvas e da rede de distribuição. Uma vez produzido, o hidrogénio é comprimido e armazenado.

Para escolher os aparelhos que se iria utilizar no sistema em causa, começou-se por escolher o tipo de electrolisador que se deveria utilizar neste tipo de sistema. Tendo em conta que um FCEV gasta em média 1 quilo de hidrogénio [105], por 100 quilómetros, optou-se por um electrolisador capaz de produzir 3,83 kg/h. As características do electrolisador escolhido podem ser consultadas na referência [91].

Uma vez escolhido o electrolisador passou-se à selecção do compressor. Na escolha do compressor deve-se ter em conta a velocidade de compressão, ou seja o compressor tem de ser capaz de comprimir a uma velocidade, no mínimo igual à que é produzido o hidrogénio e ser capaz de fornecer o mesmo com a pressão desejada de armazenamento. Optou-se então por um compressor com uma velocidade máxima de compressão 85 m<sup>3</sup>/h, cujas características podem ser consultadas na referência [92].

Por fim o *dispenser* é o sistema que permite abastecer o FCEV, fazendo a ligação do sistema de armazenamento ao veículo. As suas características podem ser consultadas na referência [93].

Para o sistema de produção de hidrogénio, depois de efectuada a selecção do equipamento verificou-se os requisitos de potência de cada componente, tendo sido apurados os seguintes valores:

- Electrolisador – 213 kW
- Compressor – 7,5 kW
- *Dispenser* – 0,660 kW

Na totalidade é necessário uma potência de 221,2 W.

A potência total do sistema é obtida pela soma dos dois sistemas, logo:

$$Potência\ total = Potência\ sistema\ EV + Potência\ sistema\ FCEV = 400 + 221,2$$

$$Potência\ total = 621,2\ kW$$

### **Dimensionamento do sistema FV**

Os painéis escolhidos são do tipo monocristalinos e apresentam as seguintes características:

- Potência pico de 275 W;
- Área: 1,659 m<sup>2</sup>.

A partir das características dos painéis escolhidos foi determinado o número de painéis necessários e qual a sua área de ocupação.

$$Numero\ de\ painéis\ necessários: \frac{621,2}{0,275} = 2258,9 \rightarrow 2259\ painéis$$

$$Área\ ocupada: 2259 \times 1,659 = 3747,681\ m^2$$

O sistema alvo de estudo nesta dissertação está pensado para ser implementado em áreas de serviço situadas nas auto-estradas, foi então considerada para o caso de estudo a estação de serviço de Antuã da auto-estrada A1 (figura 46).



**Figura 46. Fotografia satélite da estação de serviço de Antuã**

Uma vez determinada a área de ocupação necessária, recorreu-se ao programa *Google Earth*, para determinar a dimensão da área que poderia ser aproveitada para a instalação de painéis fotovoltaicos. Na figura 47 encontram-se assinaladas as áreas passíveis de serem instalados painéis fotovoltaicos.



**Figura 47. Área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos**

Foram de seguida apuradas as dimensões de cada uma das áreas assinaladas na figura 47, tendo sido obtidos os seguintes resultados:

- Área a amarelo: 570 m<sup>2</sup>;
- Área a azul: 1323 m<sup>2</sup>;
- Área a vermelho: 2200 m<sup>2</sup>.

Área total disponível: 4093 m<sup>2</sup>

Como foi dito anteriormente o sistema apenas ocupa 3747,68 m<sup>2</sup>, podendo por isso ser instalado nesta estação de serviço. Nas áreas assinaladas a azul e a vermelho seria necessário instalar uma cobertura. Uma das possíveis soluções seria um sistema que é comercializado pela empresa Martifer Solar e que é designado por BIPV *SmartPark*. Este sistema é um sistema inovador e consiste numa cobertura exterior para automóveis que é constituída por módulos fotovoltaicos. Este sistema tem assim uma dupla função, pois além de proteger os veículos produz ainda energia. Este sistema é visível na figura 48.



**Figura 48. Sistema *SmartPark* da empresa Martifer Solar [82]**

Outra solução seria a utilização de uma cobertura do género da que foi construída em Murcia, Espanha e que é visível na figura 49. Esta instalação consiste numa cobertura industrial na qual a área correspondente ao telhado encontra-se totalmente revestida por painéis fotovoltaicos.



**Figura 49. Cubierta Solar, Murcia [97] [104]**

Para o caso em estudo optou-se pela segunda solução apresentada pelo facto do primeiro sistema não poder ser utilizado em parques destinados a veículos pesados, devido à altura dos mesmos.

Para determinar o preço de cada kW desse sistema coberto, consultou-se os preços de venda da estrutura presente na figura 49 e as suas características, tendo-se obtido os seguintes dados [97]:

- Preço de venda: 2.949.744 €
- Potencia pico: 1,2 MW.

Esta cobertura apresenta uma altura máxima de 14 metros, no entanto um veículo pesado não excede os 5 metros, logo seria conveniente diminuir em 9 metros a altura da estrutura, pois isso permitiria uma redução dos custos. Tendo isso em conta e uma vez que a estrutura é constituída por betão, apurou-se qual é o preço por m<sup>3</sup> de uma coluna de betão, de modo a obter uma melhor relação de custos. O metro cúbico de uma coluna de betão, segundo [103] está avaliado em 365,50 € e uma vez que a estrutura é constituída por 49 pilares admitiu-se uma redução de custos de:

$$49 \times 9 \times 365,50 = 161.185,5 \text{ €}$$

$$\text{Preço cobertura: } 2.949.744 \text{ €} - 161.185,5 \text{ €} = 2.788.558,5 \text{ €}$$

Cada kW fotovoltaico coberto teria um preço de:

$$\frac{2.788.558,5}{1,2 \times 1000} = 2323,8 \text{ €/kW}$$

Apenas as áreas assinaladas a azul e a vermelho necessitam de cobertura. A área assinalada a amarelo tem 570 m<sup>2</sup> e é necessário saber qual é a potência que se poderá instalar nessa área, de modo a determinar os custos da instalação. Para tal e tendo em conta as características dos painéis utilizados efectuaram-se os seguintes cálculos:

$$n^{\circ} \text{ de painéis } \frac{570}{1,659} = 343,6 \rightarrow 343 \text{ painéis}$$

$$\text{Potência área coberta: } 343 \times 0,275 = 94,3 \text{ kW}$$

$$\text{Potência área que necessita coberta: } 621,2 - 94,3 = 526,9 \text{ kW}$$

Consultando um caso real verificou-se que o valor de um sistema fotovoltaico em que não seja necessário construir a cobertura é de 1 €/Wp. Este valor engloba todos custos inerentes à instalação dos mesmos.

De modo a agilizar os cálculos somou-se os valores do preço por kW instalado, para as duas situações consideradas, com e sem cobertura e calculou-se o valor médio do custo de cada kW da seguinte forma:

- *Área a amarelo:*  $94,3 \times 1000 \text{ €} = 94300 \text{ €}$
  
- Áreas a vermelho e a azul:
  - *Painéis:*  $526,9 \times 2.323,8 \text{ €} = 1.224.410,22 \text{ €}$

$$\begin{aligned} \text{Preço médio de cada kW instalado: } & \frac{1.224.410,22 \text{ €} + 94300 \text{ €}}{621,2} \\ & = 2122,8 \text{ €/kW} \end{aligned}$$

De seguida apresentam-se as análises efectuadas aos dois sistemas em estudo.

## **5.2. Sistema de Carregamento EV**

Actualmente está já em funcionamento uma rede de pontos de carregamento de veículos eléctricos em Portugal. Essa rede é designada por MOBIE e permite ao utilizador dois tipos de carregamento: o carregamento designado como normal e o carregamento rápido. O carregamento normal demora 6 a 8 horas, enquanto que o rápido entre 20 a 30 min, dependendo o tempo de carregamento da capacidade da bateria [83].

Como já definido na secção 5.1, o sistema de carregamento em estudo será constituído:

- Sistema fotovoltaico, potência total 400 kWp;
  
- 10 Carregadores EV.

De realçar que a potência de 400 kWp a instalar será a inicial, pois as células fotovoltaicas sofrem uma redução de rendimento ao longo dos anos. O fabricante dos painéis utilizados nesta instalação garante valores superiores a 90 % de rendimento até aos 10 anos e superior a 80% até aos 25 anos.

Considerou-se para o custo dos carregadores o valor de 9900\$, convertido para euros. Este foi o valor mais baixo que se encontrou para este tipo de produto, depois de efectuada a devida pesquisa. Este valor diz respeito ao sistema de carregamento rápido e é comercializado pela marca Nissan. As suas características podem ser consultadas em [90].

Uma vez apurados os preços e características do material necessário para o sistema calculou-se o orçamento para este tipo de instalação:

- Sistema fotovoltaico: 400 x 2122,8 € = 849.120,00 €
- Carregadores: 74.570,70 €
  - Total: 923.690,70 €

### **Valor da energia eléctrica (compra/venda)**

Para efectuar a análise económica deste tipo de sistema foi necessário determinar qual seria o valor cobrado pelo carregamento dos veículos eléctricos. A portaria 180-2011 define como preço máximo passível de ser cobrado aos utilizadores deste tipo de sistemas de carregamento de rápido o valor de 0,20€/kWh.

Este sistema de carregamento de veículos eléctricos está pensado para ser integrado numa *smart grid*, ou rede inteligente. Uma *smart grid* tem a capacidade de recolher e enviar informação em tempo real, o que permite influenciar os vários constituintes dessa mesma rede, permitindo assim a sua adaptação às solicitações que se verificam nesse instante.

Actualmente está suspensa a atribuição de potência de injeção na Rede Eléctrica de Serviço Público [Decreto-Lei nº 25/2012], salvo em situações de interesse público. Como o sistema em estudo está pensado para fornecer a energia excedente à rede e considerando a possibilidade futura deste ser abrangido por esse regime especial, calculou-se qual seria o valor da remuneração de cada kWh fornecido à rede. Segundo o quadro legal vigente, o valor de remuneração dessa energia seria calculado da forma que a seguir se apresenta.

A energia proveniente do sistema fotovoltaico em estudo é considerada como produção em regime especial, do tipo descentralizado, sendo a remuneração desta energia definida pelo Decreto-Lei nº 225/2007, o qual estipula a fórmula para o cálculo do valor a que será remunerada a energia entregue à rede e que a seguir se apresenta.

$$\text{Remuneração} = [K_{pt} \times (PF + PV) + PA \times Z] \times K_p \times K_{ipc}$$

$K_{pt}$  é um factor de ponderação da energia entregue pelo sistema, consoante o período tarifário em que a mesma é entregue à rede. É opcional, podendo ser considerado unitário ou ser obtido pela seguinte fórmula:

$$K_{pt} = \frac{K_{pc} \times E_{pc} + K_v \times E_v}{E}$$

$E$  – energia total

$E_{pc}$  – energia fornecida nas horas de ponta e horas cheias

$E_v$  – energia fornecida nas horas de vazio

	Mini-hídricas	Outras renováveis
$K_{pc}$	1,15	1,25
$k_v$	0,8	0,65

Uma vez que um sistema fotovoltaico só produz energia quando é de dia e os períodos de horas cheias e de ponta englobam em geral os períodos diurnos, e os de vazio os período nocturnos, admitiu-se o valor de  $K_{pt}$  como sendo igual a 1,25.

A parcela PF é designada como parcela fixa e corresponde ao custo de investimento evitado pela potência fornecida por esta instalação renovável. Ou seja ao construir esta instalação evita-se o investimento em outros meios de produção. O valor de  $C_{pf}$  é de 5,44€/kW segundo o decreto-lei 168/99.

$$PF = C_{pf} \left( 1,25 \times \frac{P_{med}}{P_{nom}} \right) \times P_{med}$$

Admitiu-se que o sistema fotovoltaico produz energia durante 1450 horas por ano, tendo isso em conta foi calculada a potência média do sistema.

$$P_{med} = \frac{400 \times 1450}{30 \times 12 \times 24} \rightarrow P_{med} = 67,13 \text{ kW}$$

$$PF = 5,44 \times \left(1,25 \times \frac{67,13}{400}\right) \times 67,13 \rightarrow 76,61\text{€/mês} \rightarrow 919,31\text{€/ano}$$

$$PF = \frac{919,31}{400 \times 1450 \times 10^{-3}} = 1,585\text{€/MWh}$$

A parcela PV corresponde ao custo variável, ou seja, ao custo de manutenção e operação da central cuja nova central renovável evitou. O seu valor está fixado em 36€/MWh, pelo Decreto-Lei 33-A/2005.

A parcela PA é a parcela ambiental e é uma parcela que tem como objectivo valorizar o benefício ambiental proporcionado pela central renovável. O seu valor está fixado em 7,4€/MWh, pelo Decreto-Lei 33-A/2005.

O coeficiente Z é um coeficiente adimensional e é utilizado para diferenciar as características do recurso endógeno e da tecnologia utilizada na produção de energia. O Decreto-Lei nº 225/2007 estabelece o valor do coeficiente Z em 35, para instalações fotovoltaicas com potências superiores a 5 kw, que é o caso da instalação em estudo.

Kipc é um factor que está relacionado com a inflação e é obtido pela seguinte fórmula:

$$K_{ipc} = \frac{IPC_m - 1}{IPC_{ref}}$$

IPC<sub>m-1</sub> – é o índice do preço no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês anterior;

IPC<sub>ref</sub> - é o índice do preço no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês anterior ao do início do fornecimento de energia pela central à rede.

Consultada a página da internet do Instituto Nacional de Estatística, apurou-se os seguintes valores [95]:

- IPC total excepto habitação, Fevereiro 2012: 106,001;
- IPC total excepto habitação, Janeiro 2012: 105,922.

Logo o valor do Kipc será:

$$\text{Kipc} = \frac{106,001}{105,922} = 1,0008$$

O factor Kp diz respeito as perdas evitadas pelo facto de se utilizar produção distribuída. Segundo o Decreto-Lei nº 225/2007 para instalações com uma potencia inferior a 5 MW o seu valor é dado por:

$$\frac{1}{1 - 0,035} = 1,0363$$

Uma vez apurados todos os factores, foi então calculada a remuneração da energia entregue à rede pelo sistema em causa.

$$\text{Remuneração} = [1,25 \times (1,585 + 36) + 7,4 \times 35] \times 1,0363 \times 1,0008 = 315,55 \text{ €/MWh}$$

$$315,55 \text{ €/MWh} \rightarrow 0,3155 \text{ €/kWh}$$

Cada kWh de energia fornecida à rede seria renumerada a 0,3155€, no entanto, segundo o Decreto-Lei nº 225/2007 este valor de remuneração é válido por um período de 15 anos a contar desde o início do fornecimento de energia. Uma vez passados esses 15 anos a energia vendida à rede passa a ser renumerada segundo os preços de mercado e da receita proveniente da venda dos certificados verdes. Como a instalação está pensada para operar durante 20 anos, é necessário determinar qual a remuneração dos últimos 5 anos de operação, de modo a poder efectuar uma análise económica o mais correcta possível.

Para a análise económica que a seguir se apresenta foi considerado como preço de mercado, os valores indicados no tarifário de 2012 da ERSE. A instalação possui uma potência máxima de 400 kW o que significa que a energia fornecida à rede seria entregue em regime de média tensão. A energia proveniente da instalação passaria a ser remunerada a preços de mercado, ao fim de 15 anos de actividade, e os valores vigentes na altura, poderão divergir consideravelmente dos actuais. Optou-se então, por considerar como valor de remuneração para esses últimos anos, a média dos valores do tarifário de 2012, para as horas de ponta e cheias, escolhendo as longas utilizações, dos vários períodos tarifários. Fazendo essa média obteve-se o valor de 0,112 €/kWh.

Para o valor dos certificados verdes utilizou-se o valor de mercado registado na SENDECO<sub>2</sub> [96], no dia 23 de Março de 2012, que era de 4,12€/Ton. Sabendo que a parcela ambiental é obtida admitindo que uma central do tipo ciclo combinado emite em média 370 g de CO<sub>2</sub>, por cada kWh de energia eléctrica produzida, consoante a energia entregue pelo sistema à rede, foi determinado o valor de remuneração dos últimos 5 anos de actividade da instalação.

Como foi dito anteriormente, o sistema produz energia durante 1450 horas por ano. Considerando esse valor e a potência do sistema FV, foi calculada a energia produzida em cada ano de operação do sistema, de modo a efectuar a análise do mesmo. Sabendo que o valor da energia produzida é afectada pela perda de rendimento a que está sujeito um painel fotovoltaico e como para o caso em estudo se admitiu 20 anos como limite de funcionamento da estação de carregamento, considerou-se uma perda de 1% de rendimento do sistema fotovoltaico, por cada ano de actividade. No entanto, como o sistema fotovoltaico alimenta também o sistema de produção de hidrogénio, que necessita sempre de uma potência constante, para que o electrolisador e o compressor funcionem, a perda de rendimento do sistema fotovoltaico é totalmente imputada ao sistema EV, o que significa que na realidade a perda de rendimento ao fim de 20 anos do sistema de carregamento EV, seria 29,95% e não de 19%, isto porque:

Potência total:

$$\text{Potência EV} + \text{Potência FCEV} = 621,2 \text{ kW}$$

Perda de rendimento sistema FCEV:

$$221,2 \times 0,19 = 42 \text{ kW}$$

Perda de rendimento sistema EV:

$$400 \times 0,19 = 76 \text{ kW}$$

Perda de rendimento total sistema EV:

$$42 + 76 = 118 \text{ kW} \rightarrow \frac{118}{400} \rightarrow 29,95\%$$

Ou seja o número máximo de carros admitidos simultaneamente, ao fim de 20 anos será:

$$10 \times (1 - 0,29475) = 7$$

### 5.2.1 Análise Económica

Efectuou-se uma análise económica dos dois modos de funcionamento possíveis do sistema, de modo a verificar qual seria a melhor opção do ponto de vista económico: se vender a energia para o carregamento de veículos eléctricos ou directamente à rede. Para efectuar essa análise, primeiro é preciso apurar os vários *cash-flows* de exploração (CFE). Para tal foi necessário definir a taxa de actualização que seria utilizada. A taxa de actualização (Tx. Act.) é obtida pela seguinte forma:  $(1+i)^n$ , em que **n** é o ano e **i** a taxa de juro. A taxa de juro **i** deve considerar a questão da inflação e o custo do capital de investimento. Por outras palavras pode dizer-se que representa a remuneração mínima exigida pelo investidor. Neste caso considerou-se  $i=5\%$ .

Considerou-se que os gastos anuais com a manutenção do sistema seriam 1% do investimento inicial, por este ser o valor habitual deste tipo de sistemas.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos para os diferentes modos de funcionamento do sistema. O valor da receita obtida anualmente contempla também o valor dos certificados verdes, que o uso do sistema permitiria vender.

#### **Carregamento Veículos Eléctricos**

Neste caso considera-se que totalidade da energia produzida pelo sistema fotovoltaico é utilizada no carregamento de veículos eléctricos.

Analisando os resultados (tabela 7) verificamos que se a energia produzida pelo sistema for utilizada na sua totalidade no carregamento de veículos eléctricos, o investimento inicial será recuperado ao fim de 13 anos e o lucro será de 265.986 €, após 20 anos de actividade.

**Tabela 7. Análise económica do sistema EV, carregamento de veículos eléctricos**

Ano	Receita	Tx. Act.	Custo Anual Fixo	Receita Liquida	CFE	VAL
1	117.673 €	1,05	9.237 €	110.109 €	104.865 €	-818.816 €
2	115.845 €	1,10	9.237 €	108.255 €	98.191 €	-720.625 €
3	114.018 €	1,16	9.237 €	106.402 €	91.914 €	-628.711 €
4	112.191 €	1,22	9.237 €	104.549 €	86.012 €	-542.698 €
5	110.363 €	1,28	9.237 €	102.695 €	80.465 €	-462.234 €
6	108.536 €	1,34	9.237 €	100.842 €	75.250 €	-386.984 €
7	106.709 €	1,41	9.237 €	98.989 €	70.349 €	-316.635 €
8	104.881 €	1,48	9.237 €	97.135 €	65.745 €	-250.889 €
9	103.054 €	1,55	9.237 €	95.282 €	61.420 €	-189.470 €
10	101.227 €	1,63	9.237 €	93.429 €	57.357 €	-132.113 €
11	99.399 €	1,71	9.237 €	91.575 €	53.542 €	-78.570 €
12	97.572 €	1,80	9.237 €	89.722 €	49.961 €	-28.610 €
13	95.745 €	1,89	9.237 €	87.869 €	46.599 €	17.989 €
14	93.917 €	1,98	9.237 €	86.016 €	43.444 €	61.433 €
15	92.090 €	2,08	9.237 €	84.162 €	40.483 €	101.916 €
16	90.263 €	2,18	9.237 €	82.309 €	37.707 €	139.623 €
17	88.435 €	2,29	9.237 €	80.456 €	35.103 €	174.725 €
18	86.608 €	2,41	9.237 €	78.602 €	32.661 €	207.386 €
19	84.781 €	2,53	9.237 €	76.749 €	30.372 €	237.758 €
20	82.953 €	2,65	9.237 €	74.896 €	28.227 €	265.986 €

### Fornecimento à Rede

Neste caso considera-se que toda a energia produzida pelo sistema fotovoltaico é fornecida à rede eléctrica.

Analisando os resultados (tabela 8) verificamos que se o sistema for totalmente utilizado para fornecer energia à rede, o investimento inicial é recuperado ao fim de 7anos e que o lucro é de 782.036 €

**Tabela 8. Análise económica do sistema EV, fornecimento da energia à rede**

Ano	Receita	Tx. Act.	Custo Anual Fixo	Receita Líquida	CFE	VAL
1	183.034 €	1,05	9.237 €	173.797 €	165.521 €	-758.160 €
2	180.191 €	1,10	9.237 €	170.954 €	155.061 €	-603.099 €
3	177.349 €	1,16	9.237 €	168.112 €	145.222 €	-457.878 €
4	174.507 €	1,22	9.237 €	165.270 €	135.968 €	-321.910 €
5	171.664 €	1,28	9.237 €	162.427 €	127.266 €	-194.644 €
6	168.822 €	1,34	9.237 €	159.585 €	119.085 €	-75.559 €
7	165.980 €	1,41	9.237 €	156.743 €	111.394 €	35.835 €
8	163.137 €	1,48	9.237 €	153.901 €	104.166 €	140.001 €
9	160.295 €	1,55	9.237 €	151.058 €	97.373 €	237.375 €
10	157.453 €	1,63	9.237 €	148.216 €	90.992 €	328.366 €
11	154.610 €	1,71	9.237 €	145.374 €	84.997 €	413.363 €
12	151.768 €	1,80	9.237 €	142.531 €	79.367 €	492.730 €
13	148.926 €	1,89	9.237 €	139.689 €	74.080 €	566.810 €
14	146.083 €	1,98	9.237 €	136.847 €	69.117 €	635.927 €
15	143.241 €	2,08	9.237 €	134.004 €	64.458 €	700.385 €
16	50.384 €	2,18	9.237 €	41.148 €	18.850 €	719.235 €
17	49.364 €	2,29	9.237 €	40.128 €	17.508 €	736.743 €
18	48.344 €	2,41	9.237 €	39.108 €	16.250 €	752.993 €
19	47.324 €	2,53	9.237 €	38.087,54 €	15.073 €	768.065 €
20	46.304 €	2,65	9.237 €	37.068 €	13.970 €	782.036 €

Devido às dificuldades financeiras que o país atravessa, o tarifário actualmente em vigor para a produção em regime especial corre sério riscos de ser extinto. Como já foi dito anteriormente, encontra-se actualmente suspensa a atribuição de potência de injeção na rede de produção em regime especial. Por esse motivo considerou-se uma terceira hipótese, de modo a determinar qual teria de ser o grau de utilização do sistema, por parte dos EV, para que o sistema fosse economicamente viável. Neste caso, considerou-se que a energia entregue à rede seria remunerada, do mesmo modo que nos últimos 5 anos, no caso anterior. Os resultados obtidos estão registados na tabela 9.

**Tabela 9. Viabilidade económica do sistema de carregamento EV**

	EV	Rede	Grau de Utilização EV	55%			
Ano	Receita	Receita	Taxa Actualização	Custo Anual Fixo	Receita Líquida	CFE	VAL
1	65.227 €	29.275 €	1,05	9.237 €	85.779 €	81.695 €	-841.986 €
2	64.215 €	28.820 €	1,10	9.237 €	84.304 €	76.466 €	-765.520 €
3	63.202 €	28.366 €	1,16	9.237 €	82.828 €	71.550 €	-693.970 €
4	62.189 €	27.911 €	1,22	9.237 €	81.353 €	66.929 €	-627.041 €
5	61.176 €	27.456 €	1,28	9.237 €	79.877 €	62.586 €	-564.455 €
6	60.163 €	27.002 €	1,34	9.237 €	78.402 €	58.505 €	-505.950 €
7	59.150 €	26.547 €	1,41	9.237 €	76.926 €	54.670 €	-451.280 €
8	58.137 €	26.093 €	1,48	9.237 €	75.451 €	51.068 €	-400.212 €
9	57.124 €	25.638 €	1,55	9.237 €	73.975 €	47.685 €	-352.526 €
10	56.111 €	25.183 €	1,63	9.237 €	72.500 €	44.509 €	-308.018 €
11	55.098 €	24.729 €	1,71	9.237 €	71.024 €	41.526 €	-266.491 €
12	54.085 €	24.274 €	1,80	9.237 €	69.549 €	38.727 €	-227.764 €
13	53.072 €	23.820 €	1,89	9.237 €	68.073 €	36.101 €	-191.663 €
14	52.060 €	23.365 €	1,98	9.237 €	66.598 €	33.636 €	-158.027 €
15	51.047 €	22.910 €	2,08	9.237 €	65.122 €	31.325 €	-126.702 €
16	50.034 €	22.456 €	2,18	9.237 €	63.647 €	29.157 €	-97.544 €
17	49.021 €	22.001 €	2,29	9.237 €	62.171 €	27.125 €	-70.419 €
18	48.008 €	21.546 €	2,41	9.237 €	60.696 €	25.220 €	-45.199 €
19	46.995 €	21.092 €	2,53	9.237 €	59.220 €	23.435 €	-21.763 €
20	45.982 €	20.637 €	2,65	9.237 €	57.745 €	21.763 €	0 €

Como se pode ver na tabela 9, para que o sistema seja amortizado em 20 anos, os EV terão que consumir em média 55 % da energia produzida pelo sistema fotovoltaico.

Analisando os vários resultados obtidos verifica-se que a opção de vender a energia directamente à rede é actualmente mais vantajosa, que fornece-la aos veículos eléctricos (tabelas 7 e 8). Verifica-se também, que mesmo numa altura em que os veículos eléctricos representam ainda uma percentagem reduzida do parque automóvel, este tipo de sistema poderia ser implementando, desde que se mantivessem as condições tarifárias actuais para a produção em regime especial, pois o sistema seria viável do ponto de vista económico. Caso acabassem o tarifário do regime especial, um sistema deste tipo só seria viável quando os EV consumirem 55% da energia do sistema fotovoltaico.

## 5.2.2 Análise Ambiental

Como foi dito anteriormente a análise económica já contempla a receita proveniente da venda dos certificados verdes. Neste ponto vai-se demonstrar como foi calculado esse valor e analisar qual seria a quantidade de emissões de gases de efeito estufa evitada, consoante o destino final da energia proveniente do sistema fotovoltaico, considerando apenas o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### Carregamento Veículos Eléctricos

Para a determinação da quantidade GEE evitada, considerou-se que um veículo equipado com um motor de combustão interna emite em média 140g de CO<sub>2</sub> por cada quilómetro percorrido e admitiu-se que um EV gasta em média 20 kWh para percorrer 100 quilómetros. Com a energia que o sistema fornece aos veículos EV, determinou-se os quilómetros que este sistema permitiria percorrer com níveis de emissões nulos e determinou-se a quantidade de CO<sub>2</sub> que seria evitada. Tendo em conta o preço de transição dos direitos de emissão registado no dia 23 de Março de 2012, que era de 4,12€/Ton, calculou-se do valor económico das emissões evitadas, ver tabela 10.

**Tabela 10. Impacto ambiental do sistema de carregamento EV**

Ano	Energia EV [kWh]	km percorridos	Poupança CO <sub>2</sub> EV [Ton]	Direitos CO <sub>2</sub> EV
1	580.000	2900000	406	1.672,72 €
2	570.993	2854966	399,7	1.646,74 €
3	561.986	2809932	393,4	1.620,77 €
4	552.980	2764898	387,1	1.594,79 €
5	543.973	2719864	380,8	1.568,82 €
6	534.966	2674830	374,5	1.542,84 €
7	525959	2629795	368,2	1.516,87 €
8	516.952	2584761	361,9	1.490,89 €
9	507.945	2539727	355,6	1.464,91 €
10	498.939	2494693	349,3	1.438,94 €
11	489.932	2449659	343,0	1.412,96 €
12	480.925	2404625	336,6	1.386,99 €
13	471.918	2359591	330,3	1.361,01 €
14	462.911	2314557	324,0	1.335,04 €
15	453.905	2269523	317,7	1.309,06 €
16	444.898	2224489	311,4	1.283,08 €
17	435.891	2179454	305,1	1.257,11 €
18	426.884	2134420	298,8	1.231,13 €
19	417.877	2089386	292,5	1.205,16 €
20	408.870	2044352	286,2	1.179,18 €
<b>Total</b>	<b>9.888.704</b>	<b>49.443.521</b>	<b>6.922</b>	<b>28.519 €</b>

Como se pode ver na tabela 10 prevê-se uma poupança de CO<sub>2</sub> 6.922 Ton, avaliado em 28.519,02 €, no final dos 20 anos de operação, caso a energia produzida no sistema fotovoltaico fosse utilizada em veículos eléctricos.

### Fornecimento à Rede

A energia eléctrica produzida a partir de um sistema fotovoltaico é neutra do ponto de vista de emissões. Para determinar a quantidade de emissões evitadas se a energia do sistema fotovoltaico fosse fornecida à rede utilizou-se o valor de 370 g de CO<sub>2</sub>, por cada kWh de energia eléctrica produzida, referido anteriormente como sendo o valor típico do nível de emissões de uma central eléctrica de ciclo combinado. Os resultados obtidos estão registados na tabela 11.

**Tabela 11. Impacto ambiental da energia fornecida à rede**

Ano	Energia EE [kWh]	Poupança CO <sub>2</sub> EE [Ton]	Direitos CO <sub>2</sub> EE
1	580000	214,6	884,15 €
2	570993	211,3	870,42 €
3	561986	207,9	856,69 €
4	552980	204,6	842,96 €
5	543973	201,3	829,23 €
6	534966	197,9	815,50 €
7	525959	194,6	801,77 €
8	516952	191,3	788,04 €
9	507945	187,9	774,31 €
10	498939	184,6	760,58 €
11	489932	181,3	746,85 €
12	480925	177,9	733,12 €
13	471918	174,6	719,39 €
14	462911	171,3	705,66 €
15	453905	167,9	691,93 €
16	444898	164,6	678,20 €
17	435891	161,3	664,47 €
18	426884	157,9	650,74 €
19	417877	154,6	637,01 €
20	408870	151,3	623,28 €
<b>Total</b>	<b>9888704</b>	<b>3.658,8</b>	<b>15.074,34 €</b>

Este sistema permite uma poupança de 3.658,8 Ton, correspondente a um valor de 15.074,34 € no final dos 20 anos de operação, no caso de a energia ser fornecida à rede (tabela 11).

Analisando os resultados finais dos dois modos de funcionamento do sistema (tabelas 10 e 11), verifica-se que do ponto de vista ambiental é mais vantajoso fornecer a energia aos veículos eléctricos.

### **Rede MOBIE**

A pensar no conceito da rede MOBIE, foi também analisado qual seria o verdadeiro impacto ambiental de uma rede de carros eléctricos se a tecnologia utilizada para produzir energia eléctrica fosse poluente, que é caso que se verifica actualmente. Para tal foi considerada que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico seria agora fornecida pela rede eléctrica.

Utilizando os valores obtidos anteriormente relativos aos certificados verdes fez-se:

$$28.519 - 15.074,3 = 13.444,7 \text{ €}$$

O que em termos percentuais corresponde a:

$$\frac{13.444,7}{28.519} = 47,41 \%$$

Verifica-se que o ganho ambiental resultante do uso de EV, recorrendo à rede MOBIE é de 13.444,7 € Comparado com o sistema anteriormente analisado, que é completamente neutro no que diz respeito à emissão de gases de efeito estufa, constata-se que este sistema apenas permite uma redução de 47,41% das emissões de gases efeito estufa, que o outro sistema permitiria. Pode-se então afirmar que o sistema MOBIE é bastante vantajoso do ponto de vista ambiental, mas que não é totalmente limpo.

Foi ainda analisada uma outra componente deste sistema relacionada com a diminuição da dependência energética, que o mesmo permitiria em relação ao exterior.

### **5.2.3 Análise da Dependência Energética**

Como Portugal é um país totalmente dependente do exterior relativamente a fontes de energia primária de origem fóssil, efectuou-se ainda uma análise para determinar se seria mais vantajoso fornecer a energia directamente à rede ou aos EV.

## Carregamento Veículos Eléctricos

Para saber a poupança na importação de combustível conseguida por parte dos EV teve-se em conta a produção anual do sistema fotovoltaico, a sua utilização por parte dos mesmos e admitiu-se que um EV gasta em média 20 kWh para percorrer 100 quilómetros. Considerando que um automóvel ligeiro que utiliza gasolina ou gasóleo como combustível, consome em média 6 litros para percorrer 100 quilómetros calculou-se os litros que seriam necessários para percorrer os quilómetros correspondentes à carga que foi fornecida aos EV pelo sistema em causa.

Para saber a poupança na importação de energia primária do exterior, resultante da utilização deste sistema, diferenciou-se a quantidade de combustível poupado entre gasolina e gasóleo. Para efectuar esta distinção recorreu-se a dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística, relativos ao consumo energético anual dos transportes rodoviários (tabela 12).

**Tabela 12. Consumo energético anual dos transportes rodoviários [99]**

Ano 2010	
	TEP
Gasolina	1 479 410
Gasóleo	4 646 134

A partir dos dados da tabela 12 calculou-se a percentagem correspondente ao consumo de gasolina e gasóleo, tendo-se obtido os valores apresentados na tabela 13.

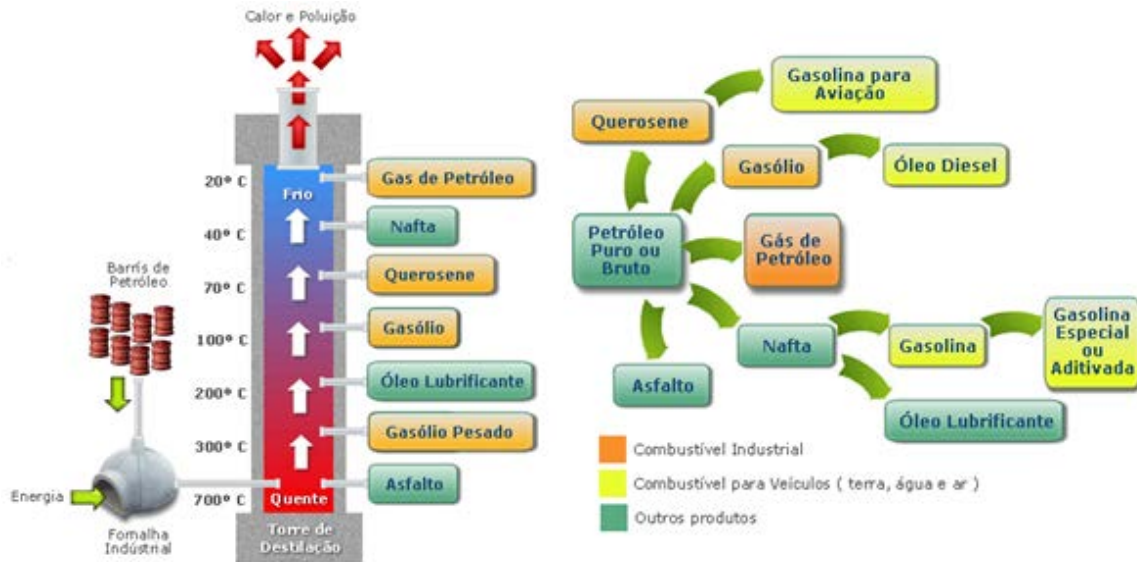
**Tabela 13. Percentagem de consumo anual de combustível**

Gasolina	24%
Gasóleo	76%

Com estas percentagens multiplicou-se o valor obtido relativo à quantidade total de combustível poupado, obtendo-se assim a poupança de combustível relativa a cada tipo de combustível.

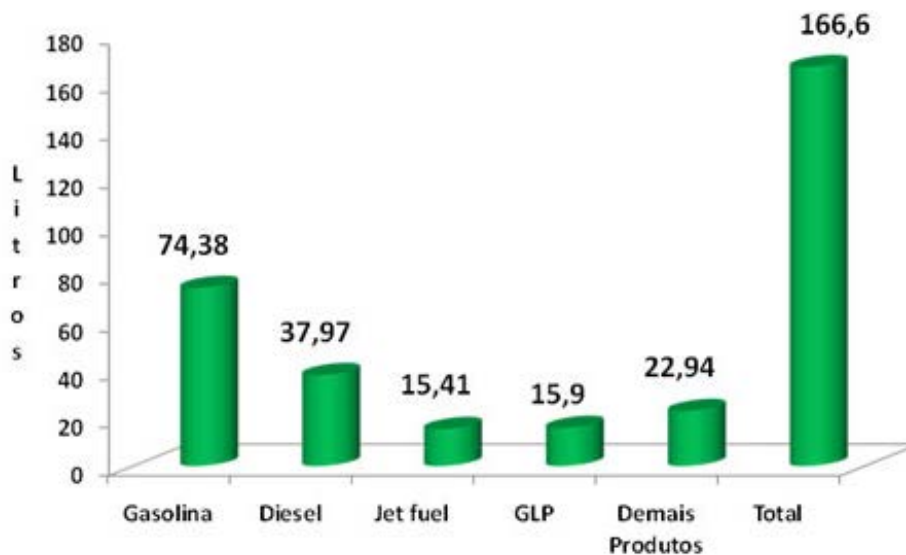
O petróleo é constituído por vários componentes, sendo necessário recorrer a um processo designado por destilação fraccionada para separar os vários componentes contidos no mesmo. A destilação fraccionada consiste em aquecer o petróleo até que este atinja o ponto de ebulição sendo depois introduzido numa coluna, designada como coluna de destilação. Ao longo dessa coluna são recolhidos os vários componentes resultantes deste processo consoante a sua

volatilidade. Nessa coluna a temperatura diminui da base para o topo e os componentes mais voláteis apenas retornam ao estado líquido no topo, sendo aí recolhidos. [84]. A figura 50 é ilustrativa do processo de destilação fraccionada.



**Figura 50. Princípio da destilação fraccionada [85]**

A partir de um barril de petróleo obtêm-se os componentes e respectivas quantidades, apresentados na figura 51.



**Figura 51. Produtos e quantidades obtidos de um barril de petróleo [86]**

Para determinar o valor da diminuição da dependência energética que o sistema permitiria, primeiro foi calculado o número de barris que seria necessário importar, para produzir os mesmos litros que o sistema permite substituir. Como em cada barril de petróleo a quantidade

de gasolina produzida é superior à de gasóleo, vai existir um excedente de gasolina. Para obter uma análise mais correcta, considerou-se que esse excesso seria vendido no mercado internacional. No dia 25 de Maio de 2012 a gasolina estava a ser transaccionada no NYMEX, *The New York Mercantile Exchange* com o valor 2,8929 \$ /gal, o que equivale a 0,764 €l [101]. Sabendo isto e depois de calculado o número de barris que seria necessário importar para produzir a quantidade de combustível que o sistema permite poupar e tendo como preço de referência o barril de Brent no dia 28 de Maio de 2012 era de 108,07\$ (86,18 €) [100], calculou-se o valor da poupança que este modo de funcionamento do sistema permitiria. Os resultados são apresentados na tabela 14.

Uma vez que a quantidade gasolina e de gasóleo obtido por cada barril representam apenas 67% da quantidade total de produtos que se obtêm de a partir de um barril de petróleo (figura 51) e devido à dificuldade de obter o valor dos restantes produtos, os valores da coluna “Poupança Dependência Exterior” da tabela 14, foram multiplicados por 67% de modo a obter-se um valor mais exacto.

Devido às dificuldades referidas anteriormente, também foi efectuada a análise da redução da dependência energética não considerando o preço dos barris de petróleo, mas sim considerando os valores de transacção da gasolina e do gasóleo, registados nos mercados internacionais. Para a gasolina foi utilizado o valor de 0,764 €l [101], já referido anteriormente. Para o preço do gasóleo foi utilizado o valor de 2,8880\$/gal o que corresponde a 0,763 €l. Esse valor foi o valor de transição do gasóleo registado no NYMEX no dia 28 de Maio de 2012 [102]. Os resultados obtidos desta análise (hipótese 2) são apresentados na tabela 15.

**Tabela 14. Redução da dependência energética exterior, carregamento EV (hipótese 1)**

Ano	Energia EV [kWh]	km Percorridos	Combustível Poupado [L]	Gasolina [L]	Gasóleo [L]	Barris de Petróleo	Excesso Gasolina [L]	Importação Barris	Exportação Gasolina	Poupança Dependência Exterior
1	580.000	2.900.000	174.000	42.024	131.976	3.476	216.507	299.545 €	165.460 €	89.837 €
2	570.993	2.854.966	171.298	41.371	129.927	3.422	213.145	294.893 €	162.891 €	88.442 €
3	561.986	2.809.932	168.596	40.718	127.877	3.368	209.783	290.242 €	160.321 €	87.047 €
4	552.980	2.764.898	165.894	40.066	125.828	3.314	206.421	285.590 €	157.752 €	85.652 €
5	543.973	2.719.864	163.192	39.413	123.779	3.260	203.058	280.939 €	155.182 €	84.257 €
6	534.966	2.674.830	160.490	38.761	121.729	3.206	199.696	276.287 €	152.613 €	82.861 €
7	525.959	2.629.795	157.788	38.108	119.680	3.152	196.334	271.635 €	150.044 €	81.466 €
8	516.952	2.584.761	155.086	37.455	117.630	3.098	192.972	266.984 €	147.474 €	80.071 €
9	507.945	2.539.727	152.384	36.803	115.581	3.044	189.610	262.332 €	144.905 €	78.676 €
10	498.939	2.494.693	149.682	36.150	113.531	2.990	186.248	257.680 €	142.335 €	77.281 €
11	489.932	2.449.659	146.980	35.498	111.482	2.936	182.886	253.029 €	139.766 €	75.886 €
12	480.925	2.404.625	144.277	34.845	109.432	2.882	179.523	248.377 €	137.196 €	74.491 €
13	471.918	2.359.591	141.575	34.193	107.383	2.828	176.161	243.725 €	134.627 €	73.096 €
14	462.911	2.314.557	138.873	33.540	105.333	2.774	172.799	239.074 €	132.058 €	71.701 €
15	453.905	2.269.523	136.171	32.887	103.284	2.720	169.437	234.422 €	129.488 €	70.306 €
16	444.898	2.224.489	133.469	32.235	101.234	2.666	166.075	229.771 €	126.919 €	68.911 €
17	435.891	2.179.454	130.767	31.582	99.185	2.612	162.713	225.119 €	124.349 €	67.516 €
18	426.884	2.134.420	128.065	30.930	97.136	2.558	159.351	220.467 €	121.780 €	66.121 €
19	417.877	2.089.386	125.363	30.277	95.086	2.504	155.989	215.816 €	119.210 €	64.725 €
20	408.870	2.044.352	122.661	29.624	93.037	2.450	152.626	211.164 €	116.641 €	63.330 €
									<b>Total</b>	<b>1.531.673 €</b>

**Tabela 15. Redução da dependência energética exterior, carregamento EV (hipótese 2)**

Ano	Energia EV [kWh]	km Percorridos	Combustível Poupado [L]	Gasolina [L]	Gasóleo [L]	Importação Gasolina	Importação Gasóleo	Poupança Dependência Exterior
1	580.000	2.900.000	174.000	42.024	131.976	32.116 €	100.689 €	132.804 €
2	570.993	2.854.966	171.298	41.371	129.927	31.617 €	99.125 €	130.742 €
3	561.986	2.809.932	168.596	40.718	127.877	31.118 €	97.562 €	128.680 €
4	552.980	2.764.898	165.894	40.066	125.828	30.619 €	95.998 €	126.617 €
5	543.973	2.719.864	163.192	39.413	123.779	30.121 €	94.435 €	124.555 €
6	534.966	2.674.830	160.490	38.761	121.729	29.622 €	92.871 €	122.493 €
7	525.959	2.629.795	157.788	38.108	119.680	29.123 €	91.307 €	120.431 €
8	516.952	2.584.761	155.086	37.455	117.630	28.624 €	89.744 €	118.368 €
9	507.945	2.539.727	152.384	36.803	115.581	28.126 €	88.180 €	116.306 €
10	498.939	2.494.693	149.682	36.150	113.531	27.627 €	86.617 €	114.244 €
11	489.932	2.449.659	146.980	35.498	111.482	27.128 €	85.053 €	112.181 €
12	480.925	2.404.625	144.277	34.845	109.432	26.630 €	83.489 €	110.119 €
13	471.918	2.359.591	141.575	34.193	107.383	26.131 €	81.926 €	108.057 €
14	462.911	2.314.557	138.873	33.540	105.333	25.632 €	80.362 €	105.994 €
15	453.905	2.269.523	136.171	32.887	103.284	25.133 €	78.799 €	103.932 €
16	444.898	2.224.489	133.469	32.235	101.234	24.635 €	77.235 €	101.870 €
17	435.891	2.179.454	130.767	31.582	99.185	24.136 €	75.671 €	99.807 €
18	426.884	2.134.420	128.065	30.930	97.136	23.637 €	74.108 €	97.745 €
19	417.877	2.089.386	125.363	30.277	95.086	23.139 €	72.544 €	95.683 €
20	408.870	2.044.352	122.661	29.624	93.037	22.640 €	70.981 €	93.620 €
							<b>Total</b>	<b>2.264.248 €</b>

Comparando os resultados finais das tabelas 14 e 15, concluiu-se que na primeira hipótese (tabela 14) a poupança seria de 1.531.673 € correspondendo à realidade portuguesa, e na hipótese 2 (tabela 15), a poupança seria de 2.264.248 €

Se a energia do sistema FV fosse utilizada nos veículos eléctricos, a dependência energética portuguesa seria reduzida, pelo menos, em 1.531.673€(tabela 14).

### **Fornecimento à Rede**

Para determinar o valor do gás natural que seria evitado importar, devido à energia eléctrica fornecida à rede pelo sistema FV, primeiro apurou-se o valor de mercado (*New York City Gate Spot* [100]) do gás natural, que no dia 28 de Maio de 2012, era de 2,193€/GJ. Usando os valores de conversão presentes na tabela 16 [98], determinou-se o valor do gás natural que não seria importado, cujos resultados são apresentados na tabela 17.

**Tabela 16. Dados do gás natural [98]**

Gás Natural	
Preço gás natural 28-5-2012 /GJ	2,193 €
Tep	41,868 GJ
Preço gás natural 28-5-2012 / Tep	91,82 €
kWh (energia eléctrica)	0,000215 Tep

**Tabela 17. Redução da dependência energética exterior, fornecimento à rede**

Ano	Energia [kWh]	Poupança importação GN
1	580.000,00	11.449,52 €
2	570.993,18	11.271,72 €
3	561.986,36	11.093,92 €
4	552.979,54	10.916,12 €
5	543.972,72	10.738,32 €
6	534.965,90	10.560,52 €
7	525.959,08	10.382,72 €
8	516.952,26	10.204,92 €
9	507.945,44	10.027,12 €
10	498.938,62	9.849,32 €
11	489.931,80	9.671,52 €
12	480.924,98	9.493,72 €
13	471.918,16	9.315,93 €
14	462.911,34	9.138,13 €
15	453.904,52	8.960,33 €
16	444.897,70	8.782,53 €
17	435.890,88	8.604,73 €
18	426.884,06	8.426,93 €
19	417.877,24	8.249,13 €
20	408.870,42	8.071,33 €
<b>Total</b>		<b>195.208 €</b>

Se a energia fosse entregue à rede a dependência do exterior a nível energético seria reduzida em 195.208 € (tabela 17), o que comparado com o valor obtido para o caso dos veículos eléctricos pode-se considerar como insignificante.

### **Rede MOBIE**

Foi também calculada qual é efectivamente a redução da dependência energética do país com o uso da rede MOBIE. Para tal, utilizando os valores anteriormente calculados relativos ao valor da redução da dependência energética do exterior, para a hipótese 1, fez-se:

$$1.531.673 € - 195.208 € = 1.336.465 €$$

O que em termos percentuais corresponde a:

$$\frac{1.336.465 \text{ €}}{1.531.673 \text{ €}} = 87,25 \%$$

Pode-se então afirmar que a rede MOBIE é vantajosa, principalmente na perspectiva de redução da dependência energética em relação ao exterior do país, pois mesmo usando energias fósseis para a produção de energia eléctrica para os EV, o valor obtido da redução da dependência energética do exterior por este sistema, corresponde a 87,25% de um sistema totalmente independente do exterior.

Depois de efectuada a respectiva análise do sistema de carregamento EV, verifica-se que apesar de este apresentar um retorno do investimento maior, caso a energia produzida fosse fornecida à rede, verifica-se também que analisando as outras componentes, o sistema seria mais vantajoso para o país se a energia fosse fornecida aos veículos eléctricos.

### **5.3. Sistema de produção de hidrogénio**

Existem actualmente vários sistemas de produção e fornecimento de hidrogénio localmente aos FCEV, instalados em diversos países. A *Hydrogenics* é uma das marcas líderes desse tipo de sistemas. Ao longo dos anos têm sido efectuados vários estudos relativos aos custos da produção de hidrogénio. Em 2006, foi publicado um trabalho em que eram analisados os custos de várias estações de produção e fornecimento de hidrogénio, consoante o método utilizado para a produção do hidrogénio [74]. Mais recentemente, em 2011, foi publicado um trabalho em que são também apurados os custos de produção de hidrogénio, neste caso focando-se na questão da energia eólica [73].

Nesta dissertação, também foi analisado um sistema que tem como objectivo produzir o hidrogénio localmente, pelo processo de electrólise e fornece-lo aos FCEV. Analisou-se qual seria a forma mais económica de o produzir, sendo consideradas três hipóteses para a sua produção.

Na primeira hipótese, a produção do hidrogénio é efectuada utilizando apenas a energia eléctrica proveniente do sistema fotovoltaico.

Na segunda hipótese, a produção do hidrogénio efectua-se utilizando apenas a energia da rede eléctrica, durante as horas de menos procura, também designadas por horas de vazio e de super vazio.

Por último, considerou-se a combinação dos dois regimes de produção.

Para todas as hipóteses a estudar, para determinar o custo de produção de 1 quilograma de hidrogénio, admitiu-se uma taxa de actualização igual à utilizada na análise económica dos EV e determinou-se qual seria o valor mínimo a que deveria ser remunerado cada quilograma para que o investimento e os gastos de produção fossem recuperados no final de vida do sistema. O valor da receita obtida anualmente contempla também o valor dos certificados verdes, que o uso do sistema permitiria vender. Para determinar o valor dos certificados, primeiro foi calculado o CO<sub>2</sub> evitado pelo sistema, admitindo que um FCEV gasta em média 1 quilograma de hidrogénio por cada 100 quilómetros percorridos e como um veículo a gásóleo ou a gasolina emite em média 140 gramas de CO<sub>2</sub> por cada quilómetro, conforme a produção de cada hipótese, calculou-se o valor dos certificados, tendo em conta o preço de transição dos direitos de emissão registado no dia 23 de Março de 2012, que era de 4,12€/Ton, calculou-se o valor económico destas emissões evitadas e considerou-se como sendo uma receita.

Devido à falta de informação, os valores relativos à instalação do sistema, manutenção (que corresponde a 7% do investimento), armazenamento e do *dispenser*, foram obtidos em [74], tendo estes sido ajustados, de acordo com a inflação registada durante os anos anteriores. Os valores relativos ao electrolisador e ao compressor foram obtidos em [75] e [76], respectivamente.

Cada hipótese apresenta um regime de produção diferente e logo uma solicitação maior ou menor dos aparelhos utilizados no mesmo. Para o electrolisador, segundo [73], o tipo de electrolisador escolhido apresenta um tempo de vida médio de 10 anos de utilização. Para o compressor admitiu-se um tempo de vida de cerca de 10 anos de utilização. Para os restantes componentes, considerou-se 20 anos como sendo o tempo de vida útil.

Na escolha do tipo de armazenamento deve-se ter em conta a pressão a que se pretende efectuar o armazenamento. Os FCEV existem no mercado em duas pressões: 350 e 700 Bar. Neste caso, o sistema foi pensado apenas para veículos do tipo 350 Bar, tendo-se optado por armazenar hidrogénio produzido a uma pressão de 432 Bar, que é compatível com o compressor seleccionado e escolheu-se um *dispenser* que opera à pressão de 350 Bar. As características do mesmo podem ser consultadas em [93].

Cada regime de produção necessita uma determinada capacidade de armazenamento. O dimensionamento do mesmo é efectuado para cada um dos casos a seguir apresentados, admitindo que todo o hidrogénio produzido é consumido durante um dia.

### 5.3.1 Hipótese 1- Produção recorrendo apenas ao sistema fotovoltaico

Começou-se por determinar a capacidade de armazenamento necessária. Neste caso o sistema funciona 1450 horas por ano, logo:

○ **Produção:**

$$\text{Produção H: } 42,62 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow 3,83 \text{ kg/h}$$

$$\text{Produção diária} = \frac{1450 \times 3,83}{365} = 15,22 \text{ kg}$$

○ **Capacidade de armazenamento: 21,4 kg/botija**

$$\text{Botijas necessárias: } \frac{15,22}{21,4} = 0,711 \rightarrow 1$$

Como este sistema só irá operar durante 1450 horas por ano, considerou-se que apenas seria necessário um electrolisador e um compressor para os 20 anos de actividade da instalação. Foi então elaborado o orçamento do sistema.

**Tabela 18. Orçamento sistema de produção de Hidrogénio- Hipótese 1**

	Potência [KW]	Preço	Quantidade	Total
Electrolisador	213	300.000,00 €	1	300.000,00 €
Compressor H <sub>2</sub> PPI 15,000 Psig (103.5 MPa)	7,5	72.258,00 €	1	72.258,00 €
Botijas - 21,4 kg a 432 Bar	-	17.438,06 €	1	17.438,06 €
Instalação H	-	121.346,64 €	-	121.346,64 €
Painel FV	221,2	2.122,78 €	-	469.473,13 €
<i>Dispenser</i>	0,66	37.006,42 €	1	37.006,42 €
			<b>Total</b>	<b>1.017.522,26 €</b>

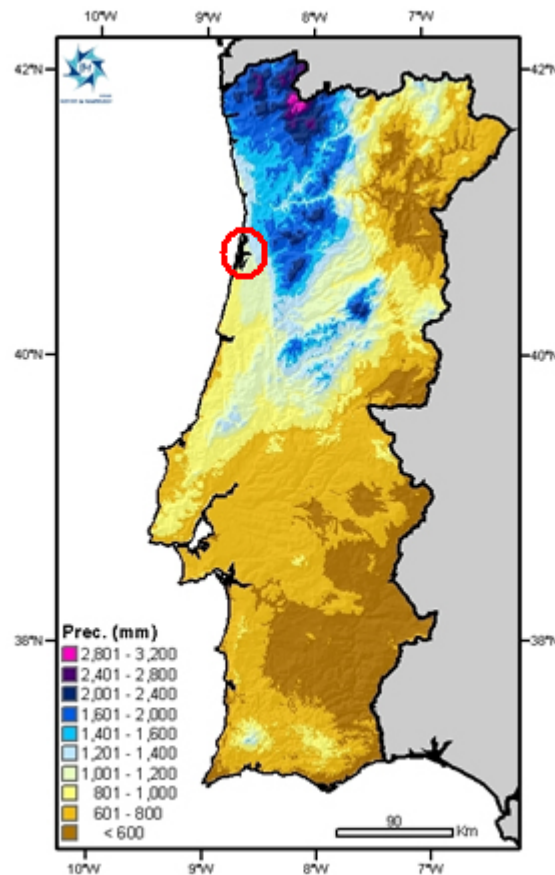
## Gastos de operação

O sistema necessita de água para produzir hidrogénio, que é considerada um gasto de operação. Para produzir 3,83 kg/h o sistema necessita de 36 l/h de água. Tendo em conta as 1450 horas ficará:

$$\text{Água total necessária} = 36 \times 1450 = 52200 \text{ l} \rightarrow 52,2 \text{ m}^3$$

Para minimizar a compra de água, será aproveitada a água da chuva, que cairá nas estruturas onde estão instalados os painéis fotovoltaicos.

O Instituto de Meteorologia, IP Portugal disponibiliza na sua página um mapa de Portugal onde está assinalada a precipitação anual média acumulada (figura 52).



**Figura 52. Precipitação anual média de Portugal continental [87]**

A estação de serviço de Antuã situa-se na zona assinalada a vermelho na figura 52. A essa zona corresponde uma precipitação anual de 1,2 a 1,4 l/m<sup>2</sup>, neste caso considerou-se um valor médio de 1,3 l/m<sup>2</sup> para o cálculo da água que o sistema iria aproveitar.

Admitindo que a área de recolha da água da chuva corresponde à área ocupada pelo sistema fotovoltaico e sabendo que o mesmo ocupa  $3747,681\text{m}^2$ , a quantidade de água aproveitada seria:

$$3747,681 \times 1,3 = 4871,981 \rightarrow 4,872 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Depois de determinada a quantidade de água que seria aproveitada e sabendo que o electrolisador necessita de 36 litros de água por hora para produzir a quantidade de hidrogénio máxima possível, calculou-se a quantidade de água que seria necessária comprar à rede de distribuição, da seguinte forma:

$$\text{Água da rede} = 52,2 - 4,872 = 47,328 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Depois de determinada a quantidade de água necessária e consultando o tarifário praticado pela empresa responsável pelo fornecimento de água na região de Aveiro, apresentado na tabela 19, determinou-se o custo anual da água consumida.

**Tabela 19. Custo água [88]**

Custos Variáveis	Custos Fixos
1,6716 €/m <sup>3</sup>	31,9 € / mês

Os custos utilizados dizem respeito ao ano de 2012, mas foram considerados como sendo os mesmos para os restantes anos de duração do projecto.

Depois de apurados todos os gastos de operação, foram determinados os custos de produção de cada quilograma de hidrogénio, segundo este regime de produção (tabela20).

A coluna “custos fixos anuais” da tabela 20 contempla os custos com a manutenção e os termos fixos referentes ao consumo de água da rede. Nesta hipótese, o custo de produção de 1 quilograma de hidrogénio é de 22,1 €

**Tabela 20. Custo de produção de hidrogénio – Hipótese 1**

Ano	Receita H	Custo Água	Custo Anual Fixo	Taxa Actualização	Receita Líquida	CFE	VAL
1	122.861 €	79 €	41.133 €	1,05	81.649 €	77.761 €	-939.762 €
2	122.861 €	79 €	41.133 €	1,10	81.649 €	74.058 €	-865.704 €
3	122.861 €	79 €	41.133 €	1,16	81.649 €	70.531 €	-795.173 €
4	122.861 €	79 €	41.133 €	1,22	81.649 €	67.173 €	-728.000 €
5	122.861 €	79 €	41.133 €	1,28	81.649 €	63.974 €	-664.026 €
6	122.861 €	79 €	41.133 €	1,34	81.649 €	60.927 €	-603.099 €
7	122.861 €	79 €	41.133 €	1,41	81.649 €	58.026 €	-545.073 €
8	122.861 €	79 €	41.133 €	1,48	81.649 €	55.263 €	-489.810 €
9	122.861 €	79 €	41.133 €	1,55	81.649 €	52.631 €	-437.178 €
10	122.861 €	79 €	41.133 €	1,63	81.649 €	50.125 €	-387.053 €
11	122.861 €	79 €	41.133 €	1,71	81.649 €	47.738 €	-339.315 €
12	122.861 €	79 €	41.133 €	1,80	81.649 €	45.465 €	-293.850 €
13	122.861 €	79 €	41.133 €	1,89	81.649 €	43.300 €	-250.550 €
14	122.861 €	79 €	41.133 €	1,98	81.649 €	41.238 €	-209.312 €
15	122.861 €	79 €	41.133 €	2,08	81.649 €	39.274 €	-170.038 €
16	122.861 €	79 €	41.133 €	2,18	81.649 €	37.404 €	-132.633 €
17	122.861 €	79 €	41.133 €	2,29	81.649 €	35.623 €	-97.010 €
18	122.861 €	79 €	41.133 €	2,41	81.649 €	33.927 €	-63.084 €
19	122.861 €	79 €	41.133 €	2,53	81.649 €	32.311 €	-30.773 €
20	122.861 €	79 €	41.133 €	2,65	81.649 €	30.773 €	0 €
		Preço kg H/Custo produção	<b>22,1 €</b>				

### 5.3.2 Hipótese 2- Produção de hidrogénio utilizando apenas a energia da rede

Nesta hipótese o sistema está pensado para só operar durante as horas de vazio e super vazio, logo para determinar a capacidade de armazenamento necessária foi determinado o número de horas de funcionamento do sistema.

**Tabela 21. Horas por período de tarifação**

Período	Horas por dia
S. Vazio	4
Vazio	6
Total	10

○ **Produção:**

Produção H: 42,62 m<sup>3</sup>/h → 3,83 kg/h → Produção diária: 10 × 3,83 = 38,3 kg

○ **Capacidade de armazenamento: 21,4 kg/botija**

$$\text{Botijas necessárias: } \frac{38,3}{21,4} = 1,79 \rightarrow 2$$

Uma vez calculado o material necessário elaborou-se o orçamento do sistema:

**Tabela 22. Orçamento sistema de produção de hidrogénio - Hipótese 2**

	Potência [kW]	Preço	Quantidade	Total
Electrolisador	213	300.000,00 €	2	600.000,00 €
Compressor H <sub>2</sub> PPI 15,000 Psig (103.5 MPa)	7,5	72.258,00 €	2	144.516,00 €
Botijas - 21,4 kg a 432 Bar	-	17.438,06 €	2	34.876,13 €
Instalação H	-	121.346,64 €	-	121.346,64 €
<i>Dispenser</i>	0,66	37.006,42 €	1	37.006,42 €
			<b>Total</b>	<b>937.745,20 €</b>

Para determinar o custo de produção do hidrogénio é necessário apurar também os gastos de operação do sistema.

## Gastos de operação

Para determinar o valor da energia gasta anualmente pelo sistema, utilizou-se os valores do tarifário de 2012 da ERSE para o regime de média tensão [94]. Analisando o tarifário verificou-se que o mais vantajoso seria o de longas utilizações. Apesar de instalação estar pensada para 20 anos, admitiu-se o custo da energia consumida como sendo o mesmo para os vários anos de duração do projecto.

Uma vez que neste caso se coloca a hipótese de o hidrogénio ser produzido apenas recorrendo à energia da rede, considerou-se que a área passível de ser aproveitada para recolha da água da chuva corresponde à área do sistema fotovoltaico para alimentação dos EV, que para uma potência de 400 kW ficará:

$$\frac{400}{0,275} = 1454,54 \rightarrow 1455 \text{ painéis}$$

Área ocupada:

$$1455 \times 1,659 = 2413,8 \text{ m}^2$$

Logo a quantidade de água aproveitada, considerando um valor médio de 1,3 l/m<sup>2</sup> já utilizado na hipótese 1, seria:

$$2413,8 \times 1,3 = 3137,94 \text{ l} \rightarrow 3,137 \text{ m}^3/\text{ano}$$

As horas de funcionamento do electrolisador são apresentadas na tabela 23.

**Tabela 23. Horas por período de tarifação**

Período	Horas por dia	Horas anuais
S. Vazio	4	1460
Vazio	6	2190
Total	10	3650

A quantidade de água anual que seria necessária comprar à rede de distribuição ficará:

$$\text{Água total necessária} = 36 \times 3650 = 131400 \text{ l} \rightarrow 131,4 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Logo:

$$\text{Água da rede} = 131,4 - 3,137 = 128,263 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Uma vez determinada a quantidade de água calculou-se os gastos, pelo tarifário da empresa fornecedora da água, referido na hipótese anterior. Determinados todos os custos de produção, foi calculado o custo de produção de cada quilograma de hidrogénio para este regime de produção (tabela 24).

A coluna “custo anual fixo” da tabela 24 diz respeito aos valores de manutenção e dos encargos com a potência contratada, ao termo fixo do tarifário de longas utilizações, regime de média tensão e os termos fixos referentes ao consumo de água da rede. Nesta hipótese, o custo de produção de 1 quilograma de hidrogénio é de 13,4 €

**Tabela 24. Custo de produção de hidrogénio – Hipótese 2**

Ano	Receita H	Custos Energia [kWh]	Custo Água	Custo Anual Fixo	Tx. Act.	Receita Total	Receita Líquida	CFE	VAL
1	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,05	188.186 €	75.247 €	71.664 €	-866.081 €
2	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,10	188.186 €	75.247 €	68.251 €	-797.830 €
3	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,16	188.186 €	75.247 €	65.001 €	-732.829 €
4	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,22	188.186 €	75.247 €	61.906 €	-670.923 €
5	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,28	188.186 €	75.247 €	58.958 €	-611.965 €
6	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,34	188.186 €	75.247 €	56.151 €	-555.814 €
7	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,41	188.186 €	75.247 €	53.477 €	-502.337 €
8	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,48	188.186 €	75.247 €	50.930 €	-451.407 €
9	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,55	188.186 €	75.247 €	48.505 €	-402.902 €
10	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,63	188.186 €	75.247 €	46.195 €	-356.707 €
11	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,71	188.186 €	75.247 €	43.995 €	-312.712 €
12	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,80	188.186 €	75.247 €	41.900 €	-270.811 €
13	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,89	188.186 €	75.247 €	39.905 €	-230.906 €
14	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	1,98	188.186 €	75.247 €	38.005 €	-192.901 €
15	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	2,08	188.186 €	75.247 €	36.195 €	-156.706 €
16	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	2,18	188.186 €	75.247 €	34.472 €	-122.234 €
17	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	2,29	188.186 €	75.247 €	32.830 €	-89.404 €
18	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	2,41	188.186 €	75.247 €	31.267 €	-58.138 €
19	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	2,53	188.186 €	75.247 €	29.778 €	-28.360 €
20	188.186 €	46.376 €	214 €	66.349 €	2,65	188.186 €	75.247 €	28.360 €	0 €
Preço kg H/Custo produção				13,4 €					

### 5.3.3 Hipótese 3- Produção recorrendo ao sistema fotovoltaico e à energia da rede

Esta hipótese combina o regime de produção das duas hipóteses anteriormente abordadas, logo a produção de hidrogénio é efectuada durante os períodos de vazio, de super vazio e durante o dia utilizando a energia proveniente do sistema fotovoltaico. As horas anuais de funcionamento do sistema são:

- Horas de funcionamento energia da rede: 3650
- Horas sistema fotovoltaico: 1450

Tendo em conta as horas de funcionamento do sistema de produção, calculou-se a capacidade de máxima de armazenamento necessária.

- **Produção:**

Produção H: 42,62 m<sup>3</sup>/h → 3,83 kg/h

$$\text{Produção diária} = \left[ \frac{3650 + 1450}{365} \right] \times 3,83 = 53,51 \text{ kg}$$

**Capacidade de armazenamento: 21,4 kg/botija**

$$\text{Botijas necessárias: } \frac{53,51}{21,4} = 2,5 \rightarrow 3$$

**Tabela 25. Orçamento sistema de produção de hidrogénio - Hipótese 3**

	Potência [KW]	Preço	Quantidade	Total
Electrolisador	213	300.000,00 €	2	600.000,00 €
Compressor H2 PPI 15,000 Psig (103.5 MPa)	7,5	72.258,00 €	2	144.516,00 €
Botijas - 21,4 kg a 432 Bar	-	17.438,06 €	3	52.314,19 €
Instalação H	-	121.346,64 €	-	121.346,64 €
<i>Dispenser</i>	0,66	37.006,42 €	1	37.006,42 €
Painel FV	221,16	2.122,78 €	-	469.473,13 €
			<b>Total</b>	<b>1.424.656,39 €</b>

## **Gastos de operação**

Os gastos de operação deste sistema correspondem a uma junção dos gastos de operação dos dois sistemas anteriormente abordados. Os gastos com a energia são os mesmos que na hipótese 2. A quantidade de água utilizada corresponde à quantidade necessária para cada uma das hipóteses anteriores, sendo assim:

$$\text{Quantidade de água necessária: } 131 + 52,2 = 183,6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Quantidade de água aproveitada da chuva: } 4,872 \text{ m}^3/\text{ano}$$

E a quantidade necessária da rede seria:

$$\text{Água da rede} = 183,6 - 4,872 = 178,728 \text{ m}^3/\text{ano}$$

De seguida, apresenta-se uma tabela com os gastos e receitas do sistema que se utilizou para determinar o custo da produção de 1 quilograma de hidrogénio para este sistema (tabela26).

**Tabela 26. Custo de produção de hidrogénio – Hipótese 3**

Ano	FV	Rede	Custos Energia [kWh]	Custo Água	Custo Anual Fixo	Tx. Act.	Receita Total	Receita Líquida	CFE	VAL
	Receita H	Receita H								
1	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,05	231.725 €	114.318 €	108.874 €	-1.315.782 €
2	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,10	231.725 €	114.318 €	103.690 €	-1.212.092 €
3	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,16	231.725 €	114.318 €	98.752 €	-1.113.340 €
4	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,22	231.725 €	114.318 €	94.050 €	-1.019.290 €
5	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,28	231.725 €	114.318 €	89.571 €	-929.719 €
6	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,34	231.725 €	114.318 €	85.306 €	-844.413 €
7	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,41	231.725 €	114.318 €	81.244 €	-763.169 €
8	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,48	231.725 €	114.318 €	77.375 €	-685.794 €
9	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,55	231.725 €	114.318 €	73.690 €	-612.104 €
10	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,63	231.725 €	114.318 €	70.181 €	-541.922 €
11	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,71	231.725 €	114.318 €	66.839 €	-475.083 €
12	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,80	231.725 €	114.318 €	63.657 €	-411.426 €
13	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,89	231.725 €	114.318 €	60.625 €	-350.801 €
14	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	1,98	231.725 €	114.318 €	57.738 €	-293.062 €
15	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	2,08	231.725 €	114.318 €	54.989 €	-238.073 €
16	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	2,18	231.725 €	114.318 €	52.370 €	-185.703 €
17	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	2,29	231.725 €	114.318 €	49.877 €	-135.826 €
18	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	2,41	231.725 €	114.318 €	47.502 €	-88.325 €
19	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	2,53	231.725 €	114.318 €	45.240 €	-43.085 €
20	65.883 €	165.842 €	46.376 €	299 €	71.860 €	2,65	231.725 €	114.318 €	43.085 €	0 €
				Preço kg H/Custo produção	<b>11,9 €</b>					

A coluna “custo anual fixo” da tabela 26 diz respeito aos valores de manutenção e dos encargos com a potência contratada, ao termo fixo do tarifário de longas utilizações, regime de média tensão e os termos fixos referentes ao consumo de água da rede. Nesta última hipótese, o custo de produção de 1 quilograma de hidrogénio é de 11,90 €

Analisando as três hipóteses estudadas conclui-se que a opção mais económica é a de utilizar os dois regimes combinados para produzir hidrogénio.

Admitindo que um veículo que utiliza gasolina ou gasóleo como combustível gasta em média 6 litros por cada 100 quilómetros percorridos, averiguou-se qual teria de ser o preço médio por litro, de modo a que o hidrogénio fosse realmente competitivo.

$$x \times 6 = 11,90 \leftrightarrow x = 1,983 \text{ €/l}$$

Comparando com o valor mais baixo obtido para o custo de produção do hidrogénio que é de 11,90 €, constata-se que o hidrogénio apenas poderá competir com os combustíveis ditos tradicionais, quando estes atingirem um preço médio de 1,983 €/l. No entanto, de notar que o 11,90 € é o custo de produção. Seria ainda necessário acrescentar o lucro do investidor, o que iria inflacionar ainda mais o valor de venda do hidrogénio, mas com a escalada dos preços dos combustíveis que se tem vindo a verificar, é possível afirmar que esta alternativa energética poderá ser verdadeiramente competitiva num futuro próximo.

### **5.3.4 Análise ambiental**

Depois de determinada a opção mais económica (hipótese 3) para a produção de hidrogénio localmente, analisou-se qual seria o impacto ambiental, se a energia da rede utilizada nessa situação fosse proveniente de fontes fósseis, comparando com o benefício da utilização de veículos a hidrogénio. Nesta análise, apenas considerado o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para tal, à semelhança do que foi efectuado nos casos anteriores, considerou-se que são emitidos 370 g de CO<sub>2</sub>, por cada kWh de energia eléctrica, referido no Decreto-Lei 33-A/2005, na parcela ambiental como sendo o valor típico de uma central a ciclo combinado a gás natural. Admitiu-se que um FCEV gasta em média 1 quilograma de hidrogénio por cada 100 quilómetros percorridos e que um veículo a gasóleo ou a gasolina emite em média 140 gramas de CO<sub>2</sub> por cada quilómetro e tendo em conta o preço de transição dos direitos de emissão registado no dia 23 de Março de 2012, que era de 4,12€/Ton, calculou-se o valor económico das emissões inerentes ao sistema. Os resultados estão disponíveis na tabela 27.

**Tabela 27. Análise ambiental do sistema de produção de hidrogénio**

Ano	Energia EE [kWh]	Emissões EE CO <sub>2</sub> [Ton]	Direitos Emissões EE CO <sub>2</sub> [Ton]	Produção H [kg]	km Percorridos	Poupança Emissões FCEV CO <sub>2</sub> [Ton]	Direitos Emissões FCEV CO <sub>2</sub> [Ton]	Diferença
1	807.380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
2	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
3	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
4	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
5	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
6	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
7	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
8	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
9	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
10	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
11	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
12	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
13	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
14	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
15	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
16	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
17	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
18	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
19	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
20	807380	298,7	1.231 €	19.545	1.954.543	273,6	1.127 €	-103 €
							<b>TOTAL</b>	<b>-2.068 €</b>

Analisando os resultados registados na tabela 27, verifica-se que se a fonte de energia primária utilizada para a produção da energia eléctrica necessária fosse de origem fóssil, o sistema não apresentaria qualquer benefício ambiental. Este sistema apresenta, no entanto um elevado potencial para ser integrado numa *smart grid*, e utilizar o excesso de energia renovável que se poderá verificar, por exemplo durante o período nocturno.

### 5.3.5 Análise da Dependência Energética

Foi também analisado o benefício deste regime de produção (hipótese 3), no que diz respeito à redução da dependência energética do exterior, caso a energia da rede eléctrica utilizada para a produção de hidrogénio fosse de origem fóssil.

O raciocínio utilizado para determinar o número de barris de petróleo poupado pelo sistema foi o mesmo que foi aplicado no caso do sistema EV, sendo agora considerado que um FCEV gasta 1 quilo de hidrogénio por cada 100 quilómetros percorridos.

Verificou-se que mesmo utilizando energia da rede eléctrica proveniente de fontes fósseis para produzir hidrogénio, o sistema ainda permitiria reduzir a dependência energética do exterior em 962.628 €. Os resultados estão disponíveis na tabela 28.

**Tabela 28. Análise da redução da dependência energética, sistema de produção de hidrogénio**

Ano	Energia [kWh]	Importação GN	Produção H [kg]	km Percorridos	Combustível Poupado [L]	Gasolina [L]	Gasóleo [L]	Barris de Petróleo	Excesso gasolina [L]	Importação Barris	Exportação Gasolina	Poupança Dependência Exterior
1	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
2	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
3	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
4	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
5	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
6	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
7	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
8	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
9	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
10	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
11	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
12	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
13	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
14	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
15	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
16	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
17	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
18	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
19	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
20	807.380	18.533 €	19.545	1.954.543	117.273	28.323	88.950	2.343	174.245	201.887 €	145.921 €	48.131 €
												962.628 €

## 6. Conclusão

O sistema estudado nesta dissertação apresenta um enorme potencial a nível energético e ambiental, surgindo como alternativa para abastecer os veículos que irão permitir, no futuro, eliminar a dependência energética em relação às fontes fósseis e ao mesmo tempo diminuir a quantidade de gases efeito estufa emitidos para a atmosfera. O grande entrave à difusão deste tipo de sistema é a questão económica. A começar pelos veículos, que actualmente são ainda bastante caros, para que os mesmos sejam utilizados em grande escala.

No caso de um sistema fotovoltaico de carregamento de EV, provou-se que actualmente o mesmo é viável do ponto de vista económico. No entanto, apresenta um retorno do investimento maior, caso a energia produzida seja fornecida à rede, sendo que o país beneficiaria mais, caso a energia fosse fornecida aos veículos eléctricos.

No caso do sistema de produção de hidrogénio para os FCEV, constatou-se que o sistema não é actualmente competitivo, quando comparado com os preços actuais dos combustíveis fósseis. Uma solução seria a aplicação de um plano de incentivos, de modo a tornar o hidrogénio mais competitivo.

Durante a pesquisa verificou-se que o preço da tecnologia utilizada para a produção de hidrogénio tem vindo a descer nos últimos anos prevendo-se por isso, que a mesma atinja valores que permitam reduzir substancialmente o custo de produção do hidrogénio, que associados à previsão do aumento dos combustíveis fósseis poderão fazer deste o combustível do futuro.



## Referências

- [1] Eng. Maria Emília Cardoso da Silva Cascaes (MEC) – Energia hídrica, ENRE 1 (2010/2011), ISEP
- [2] <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-das-ondas2.htm> - Consulta em 25/6/2011
- [3] <http://www.brasilecola.com/geografia/biomassa.htm> - consultado em 16/04/2012
- [4] [http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID\\_conteudo=1&ID\\_area=2&ID\\_sub\\_area=2](http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=1&ID_area=2&ID_sub_area=2) – Consultado em 16/04/2012
- [5] <http://portalcienciaecultura.blogspot.pt/2010/08/o-ciclo-do-carbono.html> – consultado em 16/04/2012
- [6] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_hidr%C3%A1ulica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_hidr%C3%A1ulica) – Consultado 16/04/2012
- [7] <http://reciclapah.weebly.com/energia-hiacutedrica.html> - Consultado em 16/04/2012
- [8] [http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID\\_conteudo=15&ID\\_area=3&ID\\_sub\\_area=6](http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=15&ID_area=3&ID_sub_area=6) – Consultado em 16/04/2012
- [9] <http://www.presenteparahomem.com.br/wp-content/uploads/2010/02/energia-eolica-usinas-387483.jpg> - consultado em 16/04/2012
- [10] [http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID\\_conteudo=16&ID\\_area=4&ID\\_sub\\_area=10](http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=16&ID_area=4&ID_sub_area=10) – Consultado em 16/04/2012
- [11] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Sol> – consulta a 3.04.2011
- [12] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo\\_negro](http://pt.wikipedia.org/wiki/Corpo_negro) - consulta a 29/03/2011
- [13] Doutor Leonardo Ribeiro (LSR) – *Energia solar térmica*, ENRE 2 (2010/2011), ISEP
- [14] Doutor António Andrade (ATA) – *Modulo energia solar fotovoltaica*, ENRE 2 (2011/2011), ISEP
- [15] <http://pt.scribd.com/rjgeo/d/22732613-A-Variacao-da-Radiacao-Solar> - Consultado em 9/03/2012
- [16] [http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/images/tutorial\\_solar/Image68.gif](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/images/tutorial_solar/Image68.gif) - Consultado em 9/03/2012
- [17] <http://www.electronica-pt.com/solar/energia-solar.gif> - Consultado em 9/03/2012
- [18] <http://quantasneira.files.wordpress.com/2010/09/espectro.jpg> - Consultado em 10/03/2012
- [19] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_estufa](http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_estufa) - Consultado em 10/03/2012
- [20] [http://www.fcmc.es.gov.br/download/energia\\_solar.pdf](http://www.fcmc.es.gov.br/download/energia_solar.pdf) - Consultado em 10/03/2012
- [21] [http://www.eficienciaenergetica.com/DetailheConceitos.asp?ID\\_conteudo=80&ID\\_area=5&ID\\_sub\\_area=14](http://www.eficienciaenergetica.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=80&ID_area=5&ID_sub_area=14)
- [22] <http://vancouver.ca/sustainability/documents/ElectricVehicleClassificationTable.pdf> - Consultado em 20/04/2012
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Neighborhood\\_Electric\\_Vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Neighborhood_Electric_Vehicle) - consultado em 23/02/2012
- [24] <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml> - Consultado em 20/04/2012
- [25] <http://www.edp.pt/pt/sustentabilidade/ied/wattdrive/veiculoselectricos/Pages/VeiculosElectricos.aspx> - consultado em 16/02/2012
- [26] <http://evauthority.com/dc-vs-ac-electric-car-motors/> - consultado em 24/02/2012
- [27] <http://auto.howstuffworks.com/electric-car3.htm> - consultado em 24/02/2012
- [28] <http://www.veiculoselectricospt.com/pros-e-contras/>
- [29] Doutor Rui Rego (RFR) – *Sistema motrizes em transportes*, SISMT, (2010/2011), ISEP
- [30] Guzzella, Lino; Sciarretta António - *Vehicle Propulsion Systems*. 2ª ed. Zurique, Suíça. Springer, 2007.

- [31] K. T. Chau; C. C. Chan - *Emerging Energy Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles*, IEEE vol. 95, nº. 4, Abril 2007
- [32] [http://en.wikipedia.org/wiki/Start-stop\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Start-stop_system) - consultado em 24/02/2012
- [33] [http://en.wikipedia.org/wiki/Mild\\_hybrid](http://en.wikipedia.org/wiki/Mild_hybrid) - consultado em 24/02/2012
- [34] Ali Emadi; Young Joo Lee; Kaushik Rajashekara - *Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 55, nº. 6, Junho 2008
- [35] <http://www.hybridcenter.org/hybrid-center-how-hybrid-cars-work-under-the-hood-2.html> - Consultado em 17/04/2012
- [36] *Armazenamento de energia*, EFIPRE, Dep. de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra, 2006. Disponível em: <https://woc.uc.pt/deec/getFile.do?tipo=2&id=9953>
- [37] [http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2006/Pilha\\_de\\_Daniel/pilha1.JPG](http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2006/Pilha_de_Daniel/pilha1.JPG)- consultado em 27/02/2012
- [38] Schainker, R. B. - *Executive Overview: Energy Storage Options for a Sustainable Energy Future*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, páginas: 2309-2314, 2004
- [39] Alireza Khaligh; Zhihao Li - *Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art*, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, vol. 59, nº. 6, Julho 2010.
- [40] Silva Pontes, Ronaldo – *Baterias de chumbo*, UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA, 2009. Disponível em: [http://www.quimica.ufpb.br/monitoria/Disciplinas/termodinamica2/material/M1\\_Baterias\\_de\\_chumbo\\_-\\_RONALDO\\_DA\\_SILVA\\_PONTES.pdf](http://www.quimica.ufpb.br/monitoria/Disciplinas/termodinamica2/material/M1_Baterias_de_chumbo_-_RONALDO_DA_SILVA_PONTES.pdf)
- [41] <http://www.advanced-battery.com/batteryknowledge.html> - consultado em 25/02/2012
- [42] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery) - consultado em 27/02/2012
- [43] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal\\_hydride\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydride_battery)- consultado em 27/02/2012
- [44] E. Karden, S. Ploumen, B. Fricke, T. Miller, and K. Snyder, *Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*, J. Power Sources, vol. 168, nº. 1, pp. 2–11, Maio 2007.
- [45] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery) - consultado em 27/02/2012
- [46] <http://veiculosecologicos.webs.com/bateriasniquelzinco.htm> - consultado em 25/02/2012
- [47] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93zinc\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93zinc_battery)- consultado em 27/02/2012
- [48] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ni-Cd> - consultado em 27/02/2012
- [49] Wang Jiayuan, Sun Zechang, Wei Xuezhe - *Performance and Characteristic Research in LiFePO4 Battery for Electric Vehicle Applications*, Shanghai, China, 2009
- [50] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_iron\\_phosphate\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery) - Consultado em 17/04/2012
- [51] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Hidrog%C3%A9nio> – consultado em 28/02/2012
- [52] [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_production#cite\\_note-2](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production#cite_note-2) – consultado em 28/02/2012
- [53] [http://pt.wikipedia.org/wiki/Eletr%C3%B3lise\\_da\\_%C3%A1gua](http://pt.wikipedia.org/wiki/Eletr%C3%B3lise_da_%C3%A1gua) – consultado em 28/02/2012
- [54] <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis> - consultado em 1/03/2012
- [55] Santos, Fernando Miguel; Santos, Fernando António – *O combustível “hidrogénio”*. Disponível em: <http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf> - consultado em 1/03/2012

- [56] Rayment, Chriss; Sherwin, Scott - *Introduction to Fuel Cell Technology*, Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame Notre Dame, IN 46556, U.S.A. Maio 2, 2003
- [57] [http://www.passeiweb.com/saiba\\_mais/voce\\_sabia/hidrogenio\\_energia\\_alternativa](http://www.passeiweb.com/saiba_mais/voce_sabia/hidrogenio_energia_alternativa) – consultado em 28/02/2012
- [58] Brandão, Sérgio – *Cogeração*, Trabalho no âmbito da cadeira: Produção e Planeamento de Energia Eléctrica, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores Universidade de Coimbra, Outubro 2004. Disponível em: <http://ssbrandao.no.sapo.pt/Cogeracao.pdf> - em 2/03/2012
- [59] [http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula\\_de\\_combust%C3%ADvel](http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_de_combust%C3%ADvel) – consultado em 28/02/2012
- [60] [http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell#Types\\_of\\_fuel\\_cells.3B\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell#Types_of_fuel_cells.3B_design) – consultado em 29/02/2012
- [61] [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html) – consultado em 28/02/2012
- [62] [http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula\\_solar#Hist.C3.B3ria](http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_solar#Hist.C3.B3ria) – Consultado em 6/03/2012
- [63] Vallêra, António; Brito, Miguel – *Meio seculo de história fotovoltaica*, Faculdade de ciências da universidade de Lisboa, 2006. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf> - Consultado em 6/03/2012
- [64] <http://ricardogomes.no.sapo.pt/> - Consultado em 6/03/2012
- [65] <http://blogs.forumpcs.com.br/bpiropo/2008/10/26/discos-de-estado-solido-ssd-ii-semicondutores/> - Consultado em 6/03/2012
- [66] Garrido, Emanuel – *Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública*. Dissertação apresentada à Universidade do Porto - FEUP, 2010 Disponível em: [http://paginas.fe.up.pt/~ee03096/Dissertacao\\_vprov2.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~ee03096/Dissertacao_vprov2.pdf) - Em 21/04/2012
- [67] <http://www.ceeeta.pt/downloads/pdf/Solar.pdf> - Consultado em 7/03/2012
- [68] Marques Dutra, Ricardo – *Energia Solar Fotovoltaica*, Centro de pesquisas de energia eléctrica-DTE, 2010. Disponível em [http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20100705\\_Tecnologia\\_Solar\\_Fotovoltaica\\_%282010\\_updates%29.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20100705_Tecnologia_Solar_Fotovoltaica_%282010_updates%29.pdf) – Em 21/04/2012
- [69] [http://images01.olx.pt/ui/16/84/45/1323365546\\_289477945\\_1-Fotos-de--Painel-Solar-Monocristalino-50W.jpg](http://images01.olx.pt/ui/16/84/45/1323365546_289477945_1-Fotos-de--Painel-Solar-Monocristalino-50W.jpg) - Consultado em 8/03/2012
- [70] <http://www.engenhariaportugal.com/paineis-organicos-fotovoltaicos-mais-eficientes>
- [71] <http://www.gstriatum.com/pt/celulas-fotovoltaicas-organicas-produzem-energia-solar-mais-barata/>
- [72] <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/271/202/> - Consultado em 7/03/2012
- [73] P. Menanteau - *An economic analysis of the production of hydrogen from wind-generated electricity for use in transport applications*, paper publicado em: *Energy Policy*, vol. 39, nº 5, Maio 2011, pp. 2957-2965
- [74] X. Weinert, Jonathan; M. Ogden, Joan; Shaojun, Liu; Jianxin, Ma - *Hydrogen Refueling Station Costs in Shanghai*, Davis, California, 2006
- [75] [http://www.pureenergycentre.com/pureenergycentre/Hydrogen/Hydrogen\\_Electrolyser/Hydrogen\\_electrolyser.php](http://www.pureenergycentre.com/pureenergycentre/Hydrogen/Hydrogen_Electrolyser/Hydrogen_electrolyser.php) - Consultado em 21/04/2012
- [76] [http://www.pureenergycentre.com/pureenergycentre/Hydrogen/Hydrogen\\_Compressor/Hydrogen\\_Compressor.php](http://www.pureenergycentre.com/pureenergycentre/Hydrogen/Hydrogen_Compressor/Hydrogen_Compressor.php) - Consultado em 21/04/2012
- [77] <http://www.martifersolar.com/en/solar-photovoltaic-energy/BIPV>- Consultado em 22/04/2012

- [78] Doutor José Martins Carvalho (JOM) – *Modulo energia geotérmica*, ENRE2, (2010/2011), ISEP
- [79] <http://www.mspc.eng.br/tecdiv/bat130.shtml> - Consultado em 24/04/2012
- [80] <http://melhorestrabalhospropostos.blogspot.pt/2008/12/hidrogenio-clulas-de-combutvel.html> – *consultado em 28/02/2012*
- [81] <http://www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf> - Consultado em 24/04/2012
- [82] <http://www.martifersolar.com/en/solar-photovoltaic-energy/BIPV> - Consultado em 25/04/2012
- [83] <http://www.mobie.pt/> - Consultado em 25/04/2012
- [84] [http://www.infopedia.pt/\\$destilacao-do-petroleo](http://www.infopedia.pt/$destilacao-do-petroleo) – Consultado em 29/3/2012
- [85] <http://www.guiadacarreira.com.br/artigos/atualidades/refinarias-de-petroleo/> - Consultado em 29/3/2012
- [86] [http://www.soberania.org/Articulos/articulo\\_6347.htm](http://www.soberania.org/Articulos/articulo_6347.htm) - Consultado em 29/3/2012
- [87] <http://www.meteo.pt/pt/areaeducativa/otempo.eoclima/clima.pt/index.html> - Consultado em 25/04/2012
- [88] <http://www.adra.pt/files/927.jpg> - Consultado em 25/04/2012
- [89] [http://www.pressureproductsindustries.com/compressors/diaphragm\\_compressors.html](http://www.pressureproductsindustries.com/compressors/diaphragm_compressors.html) - Consultado em 4/05/2012
- [90] <http://www.treehugger.com/cars/new-quick-charging-station-is-half-the-size-price-as-old-one.html>
- [91] [http://www.pureenergycentre.com/pureenergycentre/Hydrogen/Hydrogen\\_Electrolyser/Pure%20Energy%20Centre%2042Nm3h%20hydrogen%20electrolyser%20production.pdf](http://www.pureenergycentre.com/pureenergycentre/Hydrogen/Hydrogen_Electrolyser/Pure%20Energy%20Centre%2042Nm3h%20hydrogen%20electrolyser%20production.pdf) – Consultado em 4/05/2012
- [92] [http://www.pressureproductsindustries.com/compressors/diaphragm\\_compressors.html](http://www.pressureproductsindustries.com/compressors/diaphragm_compressors.html) - Consultado em 4/05/2012
- [93] <http://www.fuelingtech.com/index990e.html?id=806> - Consultado em 4/05/2012
- [94] [http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/tarifas2012/Documents/PrecosTVCF%20PTCo nt\\_2012.pdf](http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/tarifas2012/Documents/PrecosTVCF%20PTCo nt_2012.pdf) - Consultado em 4/05/2012
- [95] [http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_indicadores&indOcorrCod=0002386&se lTab=tab0](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0002386&se lTab=tab0) – Consultado em 6/05/2012
- [96] <http://www.sendeco2.com/index-pt.asp> – Consultado em 23/03/2012
- [97] [http://energia.get.es/userfiles/energia/Cubierta\\_Solar\\_Alhama\\_A\\_y\\_B\\_naves\\_datos\\_macro\\_20\\_5\\_11.pdf](http://energia.get.es/userfiles/energia/Cubierta_Solar_Alhama_A_y_B_naves_datos_macro_20_5_11.pdf)– Consultado em 21/05/2012
- [98] <http://dre.pt/pdf2sdip/2008/06/122000000/2791227913.pdf> – Consultado em 27/05/2012
- [99] [http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_main](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_main) – Consultado em 27/05/2012
- [100] <http://www.bloomberg.com/energy/> - Consultado em 28/05/2012
- [101] <http://www.oilngold.com/data/charts/nymex-rbob-gasoline-charts-200808191154/> - Consultado em 25/05/2012
- [102] <http://www.findata.co.nz/markets/stockquote/nymex/ll.c.htm> - Consultado em 28/05/2012
- [103] <http://orcamentos.eu/ficha-rendimento-betao-armado-pilares/> - Consultado em 4/06/2012
- [104] <http://www.telealhamanews.es/noticias/images/376> - Consultado em 4/06/2012
- [105] Martins, Jorge; Brito, Francisco – *Carros Eléctricos*. PUBLINDUSTRIA, 2012.