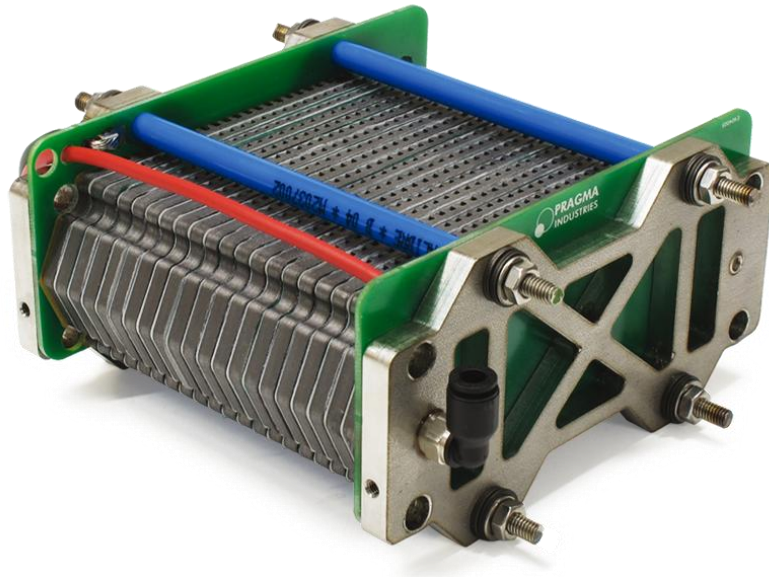




ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Estudo e otimização de uma pilha de combustível de pequena potência (10W) e sua integração em equipamento portátil**

**ANA SOFIA DA COSTA RAMALHO**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Jorge Filipe Oliveira Mendonça e Costa  
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente: Doutor João Carlos Quaresma Dias  
Vogais: Doutor Manuel José de Matos  
Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca  
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes  
Doutor Jorge Filipe Oliveira Mendonça e Costa

**Dezembro de 2013**

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao meu pai Ramalho por tanto me ter incentivado e dado forças para completar o mestrado, é graças a ele que isso é possível.

Ao meu namorado Frederico pela paciência e compreensão durante toda a elaboração deste trabalho.

Outra pessoa que sempre me apoio e incentivou neste longo caminho foi a minha amiga Magda, agradeço-lhe por isso e pelo tempo que dispensou a ajudar-me.

Não posso deixar de agradecer aos meus orientadores, Eng.º Mendonça e Costa e Eng.º Mário Mendes, que sempre me ajudaram e acreditaram que seria possível a realização deste trabalho.

Agradeço também aos colegas de electro, Eng.º Paulo Almeida e Eng.º Celso Menaia, pela ajuda que me deram, pela disponibilidade e compreensão que tiveram.

Quero também agradecer ao Eng.º António Farinha que sempre se mostrou disponível e que me ajudou no desenvolvimento da aplicação portátil.

## Resumo

Com o presente trabalho pretende-se, em termos globais, contribuir para o aprofundamento do conhecimento sobre as pilhas de combustível a hidrogénio através do estudo de uma pilha de combustível de pequena potência (10W) e a sua integração em equipamento portátil.

Em termos estruturais, de uma forma geral, esta dissertação engloba três partes distintas, uma parte inicial na qual se procede a uma revisão de literatura, uma segunda parte, na qual é efetuado um estudo acerca da implementação da pilha de combustível a hidrogénio no equipamento portátil escolhido, por fim, uma terceira parte na qual é apresentada uma simulação do funcionamento dessa pilha com a devida discussão sobre os resultados obtidos, bem como sobre as limitações do estudo.

Foram delineados três objetivos para este trabalho: o estudo teórico das pilhas de combustível, composto pelo estudo do seu princípio de funcionamento, das suas características, do tipo de combustível, das aplicações e dos desafios existentes neste tipo de tecnologia; o estudo comparativo entre as pilhas de combustível e outras tecnologias no mercado; e a implementação de uma pilha a hidrogénio num equipamento portátil escolhido por mim e estudo das suas características em funcionamento.

A implementação de uma pilha de combustível a hidrogénio num equipamento portátil foi conseguida através do recurso ao programa Matlab®. Assim, foi possível a simulação do funcionamento da pilha para o equipamento selecionado.

A simulação permitiu analisar e compreender o processo no interior da pilha de hidrogénio e o que esta transmite para o equipamento portátil.

Em termos de resultados, estes foram suficientes para se ajuizar sobre as curvas características típicas de uma pilha de hidrogénio, nomeadamente da variação da corrente e da tensão com a variação de carga aplicada na pilha de hidrogénio.

Palavras-chave: Hidrogénio, Pilha de hidrogénio, Equipamento portátil, Simulação.

## **Abstract**

The intention with the present work, in global terms, is to contribute for a more profound understanding about the hydrogen fuel cells from the studies of a low power fuel cell (10W) and its integration on portable equipment.

In structural terms, in a general way, this thesis is assembled in three distinct parts, one consisting in a literature revision, a second in a study about the implementation of a hydrogen fuel cell in a particularly chosen portable equipment, and a third consisting in a simulation and discussion of obtained results of a fuel cell operation as well as study shortfalls.

There were three objectives to be considered for this work: the theoretical study of the fuel cell, consisting on the: (i) study of the operation principle, (ii) main features, (iii) fuel type, (iv) existing applications and (v) technology challenges; the study of its functioning characteristics and also the comparative study between fuel cells and other technologies available in the market and the implementation of a hydrogen fuel cell in a portable equipment chosen by me.

The implementation of a hydrogen fuel cell in a portable equipment was only possible resorting to the Matlab® program. Therefore, it was possible to simulate in the selected equipment the functioning of the fuel cell.

The simulation allowed the analysis and the understanding of the interior process of the hydrogen fuel cell and what it provides to the portable equipment.

Concerning results, these were more than enough to get the typical outline of the characteristic curves of a hydrogen fuel cell, mostly about the current and tension variation with the charge variation applied the hydrogen fuel cell.

**Key words:** Hydrogen, Hydrogen fuel cell, Portable equipment, Simulation.

## Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos .....	1
1.2. Estrutura .....	2
2. Estado de arte do Hidrogénio .....	3
2.1. Características do hidrogénio .....	3
2.2. Hidrogénio como combustível .....	3
2.2.1. Produção .....	3
2.2.2. Distribuição.....	4
2.2.3. Armazenamento .....	4
2.2.3.1. Gás Comprimido .....	5
2.2.3.2. Líquido Criogénico .....	5
2.2.3.3. Armazenamento em materiais .....	6
3. Estado de arte das pilhas de combustível .....	9
3.1. O que são pilhas de combustível? .....	9
3.2. Como funcionam? .....	9
3.3. Tipos de pilhas .....	11
3.3.1. Pilha PEM (baixa temperatura).....	12
3.3.1.1. Membrana de permuta.....	12
3.3.1.2. Catalisador.....	14
3.3.1.3. Conjunto membrana/eléctrodo (MEA) .....	14
3.3.1.4. Camadas de suporte.....	15
3.3.1.5. Placas de fluxo .....	16
3.3.1.6. Conclusões sobre a pilha PEFC/PEM .....	19
3.3.2. Pilha PEM (alta temperatura) .....	20
3.3.3. Pilha de combustível regenerativa .....	22
3.4. Aplicações .....	23
3.4.1. Centrais eléctricas estacionárias .....	25
3.4.2. Veículos motorizados .....	25
3.4.3. Equipamentos portáteis .....	29

3.4.4. Outras aplicações possíveis .....	31
3.5. Desafios .....	32
4. Comparação com outras tecnologias .....	33
4.1. Comparação com o motor de combustão interna .....	33
4.2. Comparação com a bateria .....	34
4.3. Comparação com células fotovoltaicas .....	35
5. Aplicação portátil – Modelo 3D .....	37
5.1. Introdução.....	37
5.2. Características do equipamento.....	39
5.3. Cálculo da energia primária necessária .....	39
5.4. Armazenamento do hidrogénio (hidretos metálicos) .....	44
5.5. Recarregamento das botijas de hidretos metálicos.....	46
5.6. Características da pilha de hidrogénio .....	47
5.7. Modelo 3D da aplicação.....	48
5.8. Comparação de custos .....	55
6. Simulação em Matlab da pilha de hidrogénio .....	59
6.1. Introdução.....	59
6.2. Simulação Matlab.....	63
7. Conclusão .....	77
8. Bibliografia.....	79

## Índice de figuras

Figura 1 - Gás comprimido vs Líquido criogénico .....	5
Figura 2 - Adsorção vs absorção .....	6
Figura 3 - Armazenamento químico .....	6
Figura 4 - Esquema do funcionamento de uma célula de combustível .....	9
Figura 5 - Constituição de uma pilha PEM .....	13
Figura 6 - Conjunto membrana/eléctrodo .....	15
Figura 7 - Conjunto membrana/eléctrodo com camadas de suporte .....	16
Figura 8 - Detalhe do conjunto membrana/eléctrodo com camadas de suporte.....	16
Figura 9 - Placa de fluxo em aço inoxidável .....	17
Figura 10 - Constituição de uma célula de combustível.....	18
Figura 11 - Associação em série de três células de combustível.....	19
Figura 12 - Esquema do processo da pilha PEM de alta temperatura .....	21
Figura 13 - Exemplo de uma pilha regenerativa.....	23
Figura 14 - Esquema de uma central estacionária .....	25
Figura 15 – Protótipo FCV-R da Toyota .....	26
Figura 16 – Protótipo F125 Concept da Mercedes .....	27
Figura 17 - Frauscher River 600.....	27
Figura 18 - Esquema exemplificativo do sistema na bicicleta eléctrica (Modelo HMX)	28
Figura 19 - Bicicleta eléctrica com pilha de combustível (Modelo HMX).....	29
Figura 20 - Lanterna desenvolvida pela Angstrom (A2 micro hydrogen™ - 2006) ....	29
Figura 21 - Capacete equipado com lanterna da Angstrom.....	30
Figura 22 - Estação de reabastecimento portátil e lanterna para bicicleta da Angstrom	30
Figura 23 - Carregador portátil com células de combustível (Minipak) .....	30
Figura 24 - Câmara de vídeo alimentada com células de combustível .....	31
Figura 26 - Esquema de princípio da transformação do lixo em electricidade .....	32
Figura 27 - Esquema exemplificativo do funcionamento de um carro com pilha de combustível.....	33
Figura 28 - Transmissor portátil .....	37
Figura 29 – Recetor .....	38
Figura 30 - Hidreto MH10 da Pragma Industries .....	45
Figura 31 - Imagem exemplificativa do recarregamento de uma botija de hidretos .....	46
Figura 32 - Pilha de hidrogénio 10SR4 da SRE .....	47

Figura 33 - Transmissor.....	48
Figura 34 - "Cassete" .....	49
Figura 35 - Conjunto transmissor e "cassete" .....	49
Figura 36 - Regulador de pressão da empresa Pragma Industries .....	50
Figura 37 - Electroválvula de purga da empresa Pragma Industries .....	50
Figura 38 - Válvula manual de admissão da empresa Pragma Industries .....	51
Figura 39 - Sistema de ventilação (FP-108-S/DC S-2) .....	51
Figura 39 - Esquema de ligação dos vários componentes à pilha .....	52
Figura 40 - Esquema de ligação 3D dos vários componentes (vista frontal) .....	52
Figura 41 - Esquema de ligação 3D dos vários componentes (vista posterior).....	53
Figura 43 - Esquema 3D do conjunto "cassete" e dos vários componentes (vista frontal) .....	53
Figura 44 - Esquema 3D do conjunto "cassete" e dos vários componentes (vista posterior).....	54
Figura 45 - Esquema 3D completo (vista interior) .....	54
Figura 46 - Curva típica de polarização.....	60
Figura 47 - Esquema do modelo matlab.....	63
Figura 48 - Bloco representativo da pilha de combustível .....	64
Figura 49 - Características da pilha introduzidas no modelo .....	64
Figura 50 - Curva característica da pilha de combustível da SRE .....	65
Figura 51 - Potência em função da intensidade de corrente .....	66
Figura 52 – Tensão em função da intensidade de corrente.....	66
Figura 53 - Parâmetros da Pilha (Fonte: Matlab) .....	67
Figura 54 - Bloco representativo do regulador de caudal.....	67
Figura 55 - Parâmetros a introduzir no bloco regulador de caudal .....	68
Figura 56 - Bloco representativo do conversor DC/DC .....	68
Figura 57 - Circuito inserido no bloco conversor DC/DC .....	69
Figura 58 - Blocos representativos da variação de carga .....	69
Figura 59 - Valor da resistência 1.....	70
Figura 60 - Valor da resistência 0.....	71
Figura 61 - Valor da resistência 2.....	71
Figura 62 – Variação do caudal de combustível no tempo.....	72
Figura 63 - Variação da utilização no tempo.....	72
Figura 64 – Variação do consumo da pilha no tempo .....	73



Figura 65 - Variação da eficiência da pilha no tempo .....	74
Figura 66 - Variação da tensão no tempo .....	74
Figura 67 - Variação da intensidade de corrente no tempo .....	75
Figura 68 - Variação da tensão DC Bus no tempo .....	75
Figura 69 - Variação da intensidade de corrente DC Bus no tempo .....	76

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Tipos de pilhas de combustível .....	11
Tabela 2 - Características do sistema na bicicleta elétrica (Modelo HMX) .....	28
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens desta aplicação .....	39
Tabela 4 – Características do transmissor .....	39
Tabela 5 - Características da botija de hidretos MH10 .....	45
Tabela 6 - Especificações técnicas .....	47
Tabela 7 - Características elétricas .....	47
Tabela 8 - Outras Características .....	48
Tabela 9 - Características do sistema de ventilação (FP-108-S/DC S-2) .....	51
Tabela 10 - Pesos da solução proposta .....	55
Tabela 11 - Peso da aplicação inicial .....	55
Tabela 12 - Custo associados à aquisição da pilha de combustível .....	55
Tabela 13 - Custo associado à aquisição de pilhas alcalinas .....	56
Tabela 14 - Custo da garrafa de hidrogénio puro .....	57
Tabela 15 - Comparação de custos entre pilhas convencionais e a pilha de hidrogénio .....	57

## **1.Introdução**

Nos dias de hoje, a energia é um bem fundamental pois está sempre presente no nosso dia-a-dia quer seja em casa quer seja no trabalho. Como tal a sociedade tornou-se demasiado dependente dela e apenas o simples fato de não haver energia durante alguns minutos teria grandes prejuízos em certos setores industriais.

O grande problema da energia é o seu consumo excessivo por parte da sociedade, o que está a originar cada vez mais a escassez deste bem. Devido a este fato têm vindo a ser desenvolvidas várias ações de sensibilização por forma a ensinar as pessoas a reduzir o consumo de energia elétrica através de procedimentos simples, embora estes não sejam suficientes para resolver o problema.

Desta forma torna-se extremamente importante começar a estudar e a desenvolver alternativas de produção de energia elétrica.

Existe uma grande controvérsia relativamente a quem descobriu primeiro o funcionamento da pilha de combustível, se o químico alemão Christian Friedrich Schönbein em 1838 ou o Sir William Robert em 1839.

Consta que Sir William Grove construiu a primeira pilha de combustível de hidrogénio-oxigénio, a qual denominava por bateria a gás. Após esse acontecimento houve vários avanços tecnológicos com o contributo de várias pessoas.

No entanto apenas em 1933 é que foi desenvolvida a primeira pilha de combustível com fins práticos graças a Thomas Francis Bacon. A partir desse momento até aos dias de hoje tem havido um constante progresso no desenvolvimento e melhoria das pilhas de combustível.

Nos tempos que correm a aposta nas pilhas de combustível tem vindo a evoluir com os conhecimentos adquiridos acerca da utilização de hidrogénio como transporte de energia, como tal o estudo deste tema é bastante interessante devido à grande variedade de aplicações desta tecnologia, como ilustrado ao longo dos próximos capítulos. Para além da forte motivação de ser uma tecnologia ainda em desenvolvimento e que irá ter seguramente grandes progressos no futuro [1].

### **1.1. Objetivos**

Um dos primeiros objetivos a atingir é o estudo teórico de uma pilha de combustível, onde é abordado o seu princípio de funcionamento, os vários tipos de pilhas existentes, as suas vantagens e desvantagens e também as suas aplicações. Outro dos objetivos é

perceber as diferenças deste tipo de tecnologias com outras mais conhecidas e utilizadas.

Esta primeira parte é essencial para o último objetivo, que consiste na aplicação da pilha a hidrogénio e a sua integração num equipamento portátil, que permitirá estudar o comportamento funcional da pilha de hidrogénio.

Todos os objetivos foram atingidos, no entanto quero referir que no estudo da aplicação da pilha a hidrogénio no equipamento portátil gostaria de ter feito a simulação num equipamento por forma a poder comparar com os resultados obtidos na simulação em computador.

## **1.2. Estrutura**

Este trabalho é composto por vários capítulos que vão explicar:

- Os aspetos importantes a ter em consideração no combustível utilizado neste tipo de pilhas a hidrogénio (capítulo 2);
- A teoria por detrás das pilhas de combustível, principalmente da pilha de hidrogénio em estudo, exemplos das inúmeras aplicações possíveis e os grandes desafios desta tecnologia (capítulo 3);
- Comparação desta tecnologia com outras, por forma a perceber-se as diversas vantagens e desvantagens de cada uma (capítulo 4);
- A implementação da pilha de hidrogénio no equipamento portátil escolhido, onde será estudada a melhor opção de integração (capítulo 5);
- Simulação do funcionamento da pilha de combustível a hidrogénio após a sua implementação no equipamento portátil (capítulo 6).

## **2. Estado de arte do Hidrogénio**

### **2.1. Características do hidrogénio**

Atualmente, a grande maioria das células utiliza como combustível o hidrogénio na sua forma gasosa ou como alternativa um gás de síntese rico em hidrogénio, visto que este é o constituinte mais abundante no universo.

O hidrogénio molecular ( $H_2$ ) é uma molécula diatómica e encontra-se na sua forma gasosa a uma pressão e temperatura padrão. Este não tem cor nem odor, é insípido e é mais leve do que o ar. Para além disso é o elemento mais abundante no universo e pode ser encontrado em inúmeras substâncias devido à sua fácil combinação com outros elementos, como a que ocorre, por exemplo com a água ( $H_2O$ ).

Nos tempos que correm, o hidrogénio é maioritariamente utilizado em processos industriais e apenas uma pequena parte é utilizada para transportar energia. Porém já se começa a ter consciência e conhecimento de que a sua utilização em pilhas de combustível é uma boa aposta, visto que estas têm uma grande eficiência na conversão de energia e podem ser utilizadas para transportar e gerar eletricidade [2].

Algumas vantagens do hidrogénio:

- A sua conversão em energia não é prejudicial ao ambiente;
- Tem uma grande gama de aplicações, desde os sistemas portáteis de pequena potência até aos sistemas de grande dimensão para aplicação industrial ou residencial;
- Pode ser produzido por via de energias renováveis e como tal pode potenciar o aumento da utilização destas, reduzindo assim o peso das importações de energia na economia.

### **2.2. Hidrogénio como combustível**

#### **2.2.1. Produção**

Já foi dito que o hidrogénio é o elemento mais abundante no universo, porém é importante saber que na Terra ele não existe na forma que se pretende (i.e. hidrogénio puro), pelo que tem de ser produzido.

Este pode ser produzido através de um processo térmico, um processo eletrolítico ou um processo fotolítico. O processo térmico utiliza a energia do carvão, gás natural e biomassa. Enquanto o processo eletrolítico utiliza a eletricidade para separar a água em

hidrogénio e oxigénio, sendo este processo semelhante ao de uma pilha de combustível (que produz eletricidade ao combinar hidrogénio e oxigénio). Por fim o processo fotolítico utiliza a energia da luz para separar a água em hidrogénio e oxigénio, no entanto este ainda se encontra numa fase inicial de pesquisa.

O grande desafio neste sector é produzir hidrogénio minimizando-se os custos, para que no mercado este seja competitivo em termos de preço com os outros combustíveis convencionais [2].

### **2.2.2. Distribuição**

O hidrogénio depois de produzido necessita de uma infraestrutura que o leve para as estações de reabastecimento (por exemplo: pipelines, camiões, navios, etc.).

Mais uma vez um dos grandes desafios é reduzir ao máximo os custos, para além disso tem de se assegurar que se mantém a pureza do hidrogénio bem como a minimização de fugas no transporte.

Os pipelines são a infraestrutura de menor custo para o transporte de grande quantidades de hidrogénio, porém o custo inicial da construção do mesmo é bastante elevado e leva a que esta infraestrutura não seja muitas vezes uma opção de transporte. Uma opção para que os pipelines tenham uma maior expansão e utilização é adaptar os pipelines já existentes para o transporte de gás natural, podendo-se converter o mesmo por forma a que esse transporte uma mistura de gás natural e hidrogénio (até cerca de 20%) ou então hidrogénio puro (opção mais cara que a anterior).

Já os camiões e os navios conseguem transportar hidrogénio sob a forma de gás comprimido e líquido criogénico. Atualmente, para longas distâncias o transporte em camiões é feito com hidrogénio sob a forma líquida pois é mais económico devido ao tanque conseguir armazenar uma maior quantidade de massa de hidrogénio comparativamente ao transporte em fase gasosa [2].

### **2.2.3. Armazenamento**

O grande desafio no armazenamento é o seu baixo conteúdo energético por unidade de volume, devido à sua baixa densidade quer no estado gasoso quer no estado líquido. Por outro lado o hidrogénio tem uma maior relação energia-peso do que qualquer outro combustível. Este pode ser armazenado sob a forma de gás comprimido e sob a forma líquida em tanques, como também em materiais (e.g. hidretos metálicos).

### 2.2.3.1. Gás Comprimido

A razão de se comprimir o gás é para se conseguir um armazenamento mais compacto.

Atualmente estão a ser desenvolvidos materiais compósitos, com um menor peso, que conseguem manter o hidrogénio a altas pressões.

O aumento da capacidade volumétrica de armazenagem de gás comprimido em tanques está a ser desenvolvido de duas formas distintas.

Uma delas envolve tanques crio-comprimidos e baseia-se na teoria de que os gases se tornam mais densos com a diminuição da temperatura. Arrefecendo o gás desde a temperatura dum sala até  $-196^{\circ}\text{C}$ , o seu volume vai diminuir em cerca de 3 vezes. O termo crio-comprimido também se refere a um tanque híbrido que combina gás a alta pressão e armazenamento criogénico.

A outra forma envolve o desenvolvimento de tanques adaptáveis como alternativa aos cilíndricos, pois esta não é a geometria melhor adaptável à volumetria de veículos ligeiros. Hoje em dia os tanques de gasolina já são adaptáveis, pois permitem que se aproveite espaço. Porém as paredes destes “novos” tanques têm de ser mais espessas e pesadas de forma a suportar a pressão [2].

### 2.2.3.2. Líquido Criogénico

Transforma-se hidrogénio gasoso em líquido, pois o hidrogénio liquefeito é mais denso que o gasoso e como tal tem uma maior energia por unidade de volume.

Ao contrário do que parecia, esta solução para o problema do armazenamento não é assim tão simples. Pois para fazer com que ele passe do estado gasoso para o líquido é necessário utilizar grandes quantidades de energia, o que leva a que se tenha de minimizar os custos no resto do processo para que este continue a ser competitivo no mercado. Ora como seria de esperar, esta redução nos custos não é fácil. Na Figura 1 é possível ver a diferença entre um gás comprimido e um líquido criogénico [2].

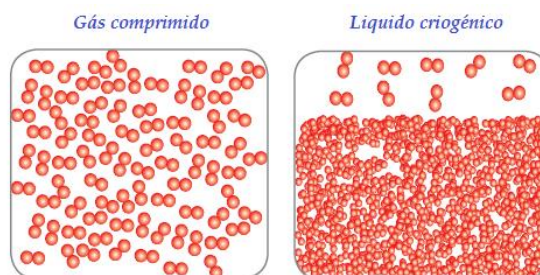


Figura 1 - Gás comprimido vs líquido criogénico [2]

### 2.2.3.3. Armazenamento em materiais

Outra forma de armazenar hidrogénio é em certas estruturas, ou na superfície de alguns materiais, ou então ainda sob a forma de compostos químicos que através de uma reação química libertam o hidrogénio.

Esse armazenamento pode ser de três maneiras: absorção, adsorção ou através de reação química. A diferença entre absorção e adsorção é que na absorção o hidrogénio é diretamente absorvido pela estrutura de armazenamento, enquanto na adsorção o hidrogénio é armazenado na superfície da estrutura de armazenamento. Na Figura 2 é possível observar-se a diferença entre adsorção e absorção [2].

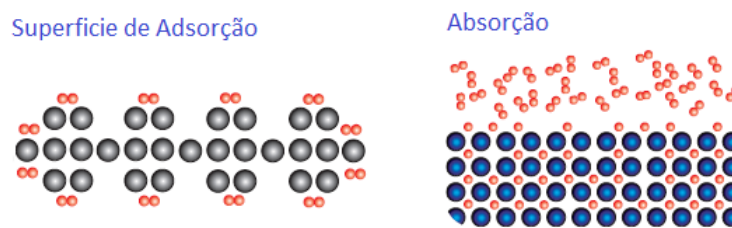


Figura 2 - Adsorção vs absorção [2]

Os materiais utilizados para o armazenamento podem ser: hidretos metálicos, materiais à base de carbono, armazenamento químico de hidrogénio e também novos processos e materiais. Na Figura 3 podemos observar um exemplo de armazenamento químico.

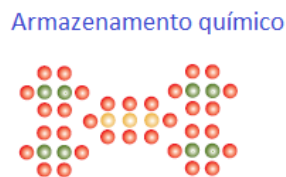


Figura 3 - Armazenamento químico [2]

Falando agora do hidreto metálico, este é basicamente um composto químico constituído por hidrogénio e pelo menos um metal, sendo o armazenamento feito através de absorção. Estão a ser desenvolvidos hidretos metálicos com uma maior capacidade de armazenamento e estes irão conseguir libertar e armazenar hidrogénio devido às reações químicas serem reversíveis. Embora seja um mecanismo bastante



promissor, ainda tem algumas lacunas e enfrenta grandes desafios no que toca à capacidade (que é baixa), ao consumo e libertação (que é lento) e ao custo (que é alto). Para além disso também é necessário um grande controlo no reabastecimento devido à grande quantidade de calor que se rejeita ou que se absorve.

Quanto aos materiais à base de carbono, estes armazenam hidrogénio através de adsorção porém a investigação a decorrer é ainda incipiente [2].



### 3. Estado de arte das pilhas de combustível

#### 3.1. O que são pilhas de combustível?

A pilha de combustível é formada por um conjunto de células eletroquímicas que convertem continuamente a energia química de um combustível e de um oxidante em energia elétrica através de um sistema elétrico/eletrólito.

Como cada célula de combustível apenas produz uma tensão de aproximadamente 0,7V, as pilhas de combustível são então uma associação em série de várias células [3].

#### 3.2. Como funcionam?

Tal como foi referido acima, temos um sistema elétrico/eletrólito responsável por converter a energia química em energia elétrica. Desta forma as células são constituídas por dois eletrodos (cátodo e ânodo), o eletrólito e um catalisador. O eletrodo (cátodo ou ânodo) é responsável pela produção de iões, que posteriormente serão transportados para o eletrodo oposto através do eletrólito, sendo que o catalisador apenas vai facilitar as reações eletroquímicas nos eletrodos (separação do hidrogénio em eletrões e protões) [3].

Para que se perceba bem o princípio de funcionamento será dado o exemplo de uma célula com hidrogénio ( $H_2$ ) como combustível e oxigénio ( $O_2$ ) como oxidante, de salientar que este tipo de célula será abordado mais à frente (Figura 4).

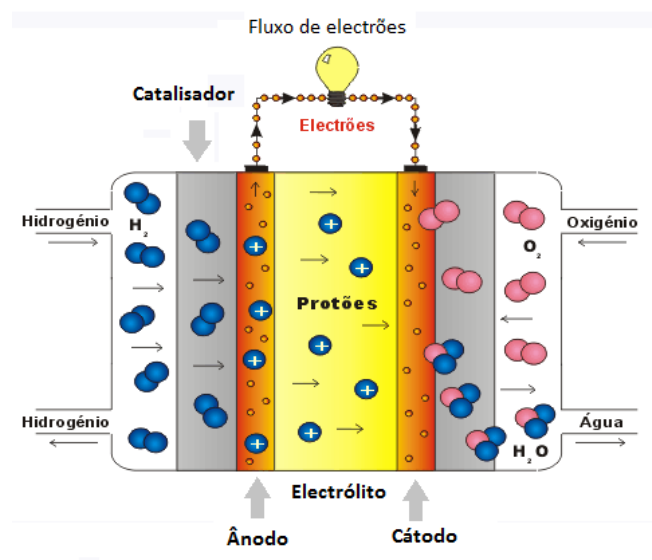
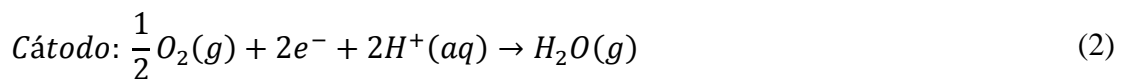


Figura 4 - Esquema do funcionamento de uma célula de combustível [3]

Primeiramente o ânodo é alimentado por hidrogénio que é de seguida oxidado no catalisador produzindo-se assim dois eletrões  $e^-$  e dois protões  $H^+$ , temos então a reação química no ânodo (Equação 1) [3].



Os eletrões produzidos seguem para um circuito elétrico onde são utilizados para produzir trabalho, enquanto os protões são transportados para o cátodo através do eletrólito. No cátodo dá-se também uma reação química entre o oxigénio com que se alimenta o cátodo, os eletrões do circuito elétrico e os protões vindos do ânodo. Desta reação resulta vapor de água (Equação 2) [3].



É importante referir que durante a conversão da energia há libertação de calor e como tal nem toda a energia química é convertida em eletricidade o que faz com que estas pilhas não tenham um rendimento de 100%. No entanto, esse calor é possível de se aproveitar através da cogeração, no entanto em grande escala isto apenas se aplica a pilhas de combustível com uma temperatura de funcionamento elevada, ou seja, as de ácido fosfórico (PAFC), as de carbonato fundido (MCFC) e as de óxido sólido (SOFC). Embora seja possível utilizar um sistema de cogeração para estes três tipos de pilhas, é de salientar que as pilhas do tipo ácido fosfórico (PAFC) são as que têm um maior desenvolvimento.

Mesmo com as perdas de calor na conversão, pode-se afirmar que o rendimento elétrico é superior ao rendimento de um motor de combustão interna visto que esse sofre ainda mais perdas na conversão de energia (química  $\rightarrow$  térmica  $\rightarrow$  mecânica  $\rightarrow$  elétrica).

Um fator importante para que este sistema funcione na perfeição é o eletrólito, pois deve ser escolhido de modo a que apenas permita a passagem de iões do ânodo para o cátodo, ou vice-versa [3].

### 3.3. Tipos de pilhas

As pilhas de combustível são tipificadas pela escolha do eletrólito e do combustível, pois estes vão influenciar as reações no eletrodo e o tipo de iões que serão transportados. Como tal existem vários tipos de pilhas tais como:

- ✓ PEM/PEFC - eletrólito de polímero / membrana de permuta de protões (caso em estudo)
- ✓ AFC - alcalinas
- ✓ PAFC - ácido fosfórico
- ✓ MCFC - carbonatos fundidos
- ✓ SOFC - óxidos sólidos
- ✓ DMFC - metanol direto
- ✓ RFC - regenerativa
- ✓ ZAFC - zinco - ar
- ✓ PCFC - cerâmica protónica

Tecnologia	Eletrólito	Combustível	Oxidante	Temperatura de funcionamento [°C]	Rendimento elétrico [%]	Potência de saída	Aplicações
<b>AFC</b>	KOH (hidróxido de potássio)	H <sub>2</sub> puro	Ar + H <sub>2</sub> O (s/CO <sub>2</sub> )	60 - 90	55 - 60	< 7kW	Produção de eletricidade (pequena escala)
<b>PEFC / PEM</b>	Membrana de polímero	H <sub>2</sub> puro	Ar (s/CO <sub>2</sub> )	70 - 90	35 - 45	5 - 250kW	Veículos, substituto de baterias recarregáveis
<b>PAFC</b>	Ácido fosfórico	H <sub>2</sub>	Ar (s/CO <sub>2</sub> )	200	35 - 45	200kW	Produção de energia (escala média)
<b>MCFC</b>	Lítio, potássio, carbonato fundido	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , CO	Ar + CO <sub>2</sub>	600 - 650	45 - 55	2 - 3MW	Aplicações elétricas
<b>SOFC</b>	Óxidos sólidos	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , CO	Ar	800 - 1000	45 - 55	tubular: 100 - 5000kW planar: 50 - 100kW	Aplicações de grande escala, veículos
<b>DMFC</b>	Polímero	-	-	-	-	-	Aplicações médias, telemóveis, laptops
<b>RFC</b>	-	-	-	-	-	-	Produção de energia em ciclo fechado
<b>ZAFC</b>	-	-	-	-	-	-	Baterias
<b>PCFC</b>	Material cerâmico	-	-	-	-	-	Produção de energia (grande escala)

Tabela 1 - Tipos de pilhas de combustível [1]

Como se pode ver na Tabela 1 estão representados os vários tipos de pilhas de combustível existentes e as suas principais características.

Dentro desses 5 tipos é ainda possível separar em dois grupos consoante a sua temperatura de funcionamento, temos então a AFC, PEFC/PEM e a PAFC com uma

temperatura de funcionamento abaixo dos 250 °C enquanto a MCFC e a SOFC têm uma temperatura acima dos 600 °C.

As pilhas com temperatura abaixo dos 250 °C são produtos com uma potência abaixo dos 250 kW, com rendimentos elevados, emissões reduzidas e arranque rápido (principalmente a PEFC/PEM). Porém têm um potencial limitado de cogeração, um processamento de combustível complexo, são mais sensíveis ao CO, requerem catalisadores de metais preciosos, têm potencial para reduzir os custos com o fabrico em larga escala e a PAFC tem um custo elevado.

Já as pilhas com temperatura acima dos 600 °C têm potências de cerca de 2 MW mas também existem com menos de 1 MW, o rendimento é muito elevado, emissões reduzidas, o processamento de combustível é mais simples, não são necessários catalisadores de metais preciosos e não são danificadas pelo CO. No entanto o potencial para reduzir os custos é mais baixo que as anteriores e os sistemas híbridos têm grande complexidade.

Como se pode verificar não existe uma pilha melhor do que a outra, visto que todas têm as suas vantagens e desvantagens, sendo que na sua escolha é importante ter-se em conta todas as características [1].

### **3.3.1. Pilha PEM (baixa temperatura)**

O seu funcionamento já foi explicado acima. Neste ponto será explicada a sua constituição e as suas características.

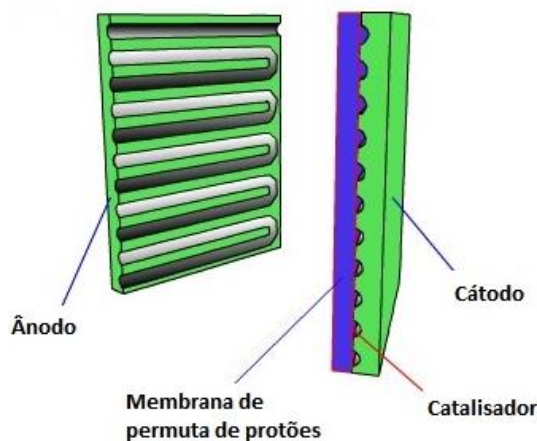
Tal como já foi referido a pilha PEM é constituído pelo ânodo, cátodo, eletrólito e o catalisador.

Este tipo de pilhas é característico pelas baixas temperaturas de funcionamento, as elevadas potências e ainda pela capacidade de rapidamente variar a tensão de saída. Este último aspeto é bastante importante pois traduz-se nas variações bruscas de carga a que o sistema pode estar sujeito, um exemplo disso é o automóvel.

Estas pilhas têm tido diversas aplicações sendo predominante a aplicação em veículos (FCV's - *fuel cell vehicles*), e é graças a estes e ao hidrogénio que se tem investido muito mais nestas pilhas do que em qualquer uma das outras.

#### **3.3.1.1. Membrana de permuta**

O eletrólito nesta pilha de combustível é uma membrana de permuta que é bastante boa na condução dos protões (Figura 5).



*Figura 5 - Constituição de uma pilha PEM*

A membrana de permuta de protões (eletrólito) tem como função proporcionar um caminho condutor e separar os gases reagentes. Estas funções devem-se ao facto de a membrana ser fabricada através de material polímero (geralmente conhecido por Nafion).

A membrana absorve a água e os iões negativos são rigidamente mantidos no interior da sua estrutura. Desta forma é necessário que a pilha de combustível tenha água no seu interior por forma a poder hidratar a membrana.

Apenas os iões positivos são móveis e carregam carga positiva através da membrana. O funcionamento da pilha baseia-se na movimentação dos iões de hidrogénio através da membrana e apenas numa única direção (do ânodo para o cátodo).

A membrana tem uma espessura entre os 50 e os 175 micrómetros, para se ter uma melhor perceção destes valores podemos comparar com uma folha de papel que tem cerca de 25 micrómetros de espessura. Embora seja fina, consegue separar com grande eficiência gases. O facto se conseguir separar o hidrogénio e o oxigénio é fundamental para a eficiência da pilha.

Outra particularidade na membrana é que esta não permita a condução de eletrões devido ao material de que é feita. Também esta particularidade é bastante importante para o bom funcionamento da pilha, pois os eletrões devem ir de um lado da pilha ao outro através de um fio externo de forma a completar o circuito. É nesse circuito externo até ao outro lado da pilha que os eletrões são utilizados para produzir energia elétrica.

Pela razão já explicada é importante a gestão da temperatura da água no interior da pilha por forma a hidratar a membrana assegurando assim que esta não se evapore muito rapidamente permitindo que mais seja produzida.

A água produzida no cátodo não só é importante para hidratar a membrana como também para manter a temperatura da pilha a cerca de 80°C. A água que já não é necessária é transportada para o exterior através do fluxo de ar [4] [5] [6].

### 3.3.1.2. Catalisador

O outro componente importante neste tipo de pilha é o catalisador, que tem como função melhorar a reação no elétrodo. Ou seja, reduz a energia de ativação necessária, permitindo que as reações no processo sejam mais rápidas ou a uma temperatura mais baixa.

O catalisador normalmente é de platina devido ao fato de ser um elétrodo inerte e como tal não é consumida no decorrer da reação, no entanto durante as reações vai perdendo a sua atividade.

Por exemplo no ânodo, a platina ao reagir com o hidrogénio (H<sub>2</sub>) consegue-se ligar aos seus átomos do hidrogénio (H) provocando assim a sua oxidação. Após essa reação a platina separa-se dos átomos de hidrogénio sob a forma de protões (H<sup>+</sup>) e eletrões (e<sup>-</sup>) (Equação 3 e Equação 4).



O que torna a platina especial é a ótima ligação que cria com os átomos de hidrogénio (H). Um aspeto importante é o fato dos elétrodos serem constituídos por carbono poroso (C) que facilita a ligação das pequenas partículas de platina a este.

No entanto este catalisador é caro e o grande desafio é conseguir-se diminuir os níveis de platina no mesmo. Uma das melhores maneiras de se conseguir isso é construir a camada do catalisador com a maior superfície possível [5] [6].

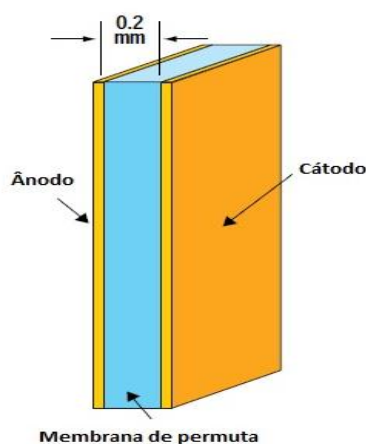
### 3.3.1.3. Conjunto membrana/elétrodo (MEA)

A combinação entre ânodo, membrana e cátodo é normalmente chamada de conjunto membrana/elétrodo.

O que é relevante neste ponto é que a constituição deste conjunto tem vindo a ser modificado por forma a aumentar o rendimento da pilha de combustível, tendo-se ao



longo dos anos descoberto formas de se utilizar menos platina. Na Figura 6 é possível observar-se o conjunto membrana/eléctrodo [5].



*Figura 6 - Conjunto membrana/eléctrodo [5]*

#### **3.3.1.4. Camadas de suporte**

As camadas de suporte foram concebidas com o intuito de maximizar a corrente que é obtida no conjunto membrana/eléctrodo. Estas camadas encontram-se junto ao cátodo e junto ao ânodo, e são normalmente compostas por papel de carbono poroso ou por tecido de carbono.

O facto de ser composta por material à base de carbono é que lhe permite conduzir os electrões do ânodo para o cátodo, sendo que o facto de esse material ser poroso assegura uma eficiente difusão do gás para o catalisador no conjunto membrana/eléctrodo. Para além disso o material poroso permite que o gás se espalhe à medida que se difunde, de maneira a quando penetrar na camada, o gás esteja em contacto com toda a superfície do catalisador.

As camadas de suporte também são importantes na gestão da água na pilha, pois o material das camadas apenas permite que passe para o conjunto membrana/eléctrodo a quantidade estritamente necessária de vapor de água para humidificar a membrana. Permitem também que água no estado líquida produzida no cátodo saia da pilha.

Outra característica das camadas de suporte é serem frequentemente à prova de água pois têm na sua constituição teflon. Esta característica garante que a grande maioria dos poros no tecido de carbono ou no papel de carbono não fiquem entupidos com água, pois isso iria provocar uma diminuição na difusão do gás e por consequência uma

diminuição do rendimento da pilha. Na Figura 7 é possível observar-se o conjunto membrana/eléctrodo com as camadas de suporte [5] [6].

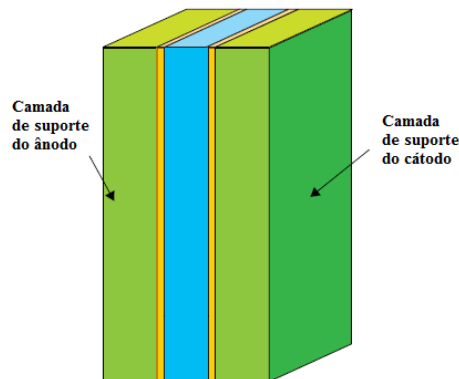


Figura 7 - Conjunto membrana/eléctrodo com camadas de suporte [5]

Para que se perceba melhor o que foi explicado temos a figura abaixo que mostra a estrutura das camadas de suporte, onde se pode observar os “caminhos” que o gás percorre para chegar ao conjunto membrana/eléctrodo. Na Figura 8 é possível observar-se o detalhe do conjunto membrana/eléctrodo com as camadas de suporte.

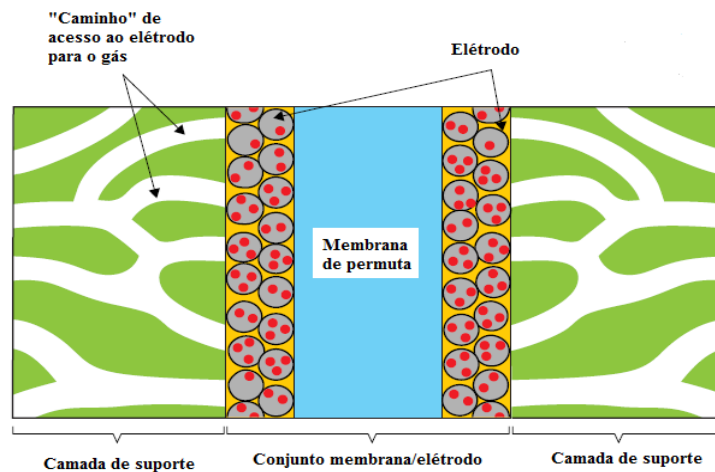


Figura 8 - Detalhe do conjunto membrana/eléctrodo com camadas de suporte [5]

### 3.3.1.5. Placas de fluxo

Na outra parte de cada camada de suporte está uma peça chamada de placa de fluxo.

Numa célula de combustível simples estas peças são o último componente na constituição da célula.

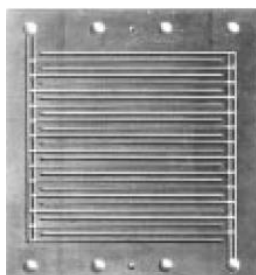
As placas de fluxo são feitas de grafite ou metal de forma a serem leves, resistentes, impermeáveis ao gás e condutores de elétrons.

Uma das funções destas placas de fluxo é assegurar um caminho por onde o gás pode fluir. A parte da placa a seguir à camada de suporte tem uns canais, que são usados para transportar o gás reagente desde o ponto em que entra na célula até ao ponto em que o gás sai.

O padrão, a largura e a profundidade dos canais têm grande influência na distribuição do gás reagente. Para além disso os canais também têm influência no fornecimento de água à membrana e na remoção da água proveniente do cátodo.

Outra das funções das placas de fluxo é servir de coletor de corrente. Os elétrons produzidos através da oxidação do hidrogénio têm de passar pelo ânodo, pela camada de suporte e pela placa antes de poderem sair da célula, deslocando-se a partir daí por um circuito externo até à placa do lado do cátodo e entrando novamente na célula.

Desta forma a célula encontra-se assim completa. Na Figura 9 é possível observar-se um exemplo de uma placa de fluxo em aço inoxidável [5] [6].



*Figura 9 - Placa de fluxo em aço inoxidável [5]*

Já na Figura 10 é possível observar-se uma célula de combustível completa, com todos os elementos acima referido.

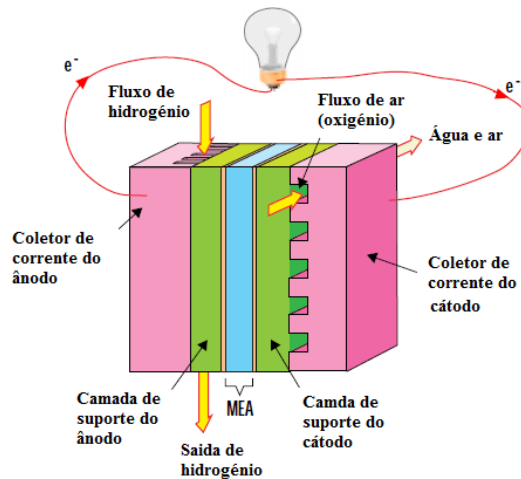


Figura 10 - Constituição de uma célula de combustível [5]

Visto a tensão de saída ser extremamente baixa numa célula de combustível é necessário ligarem-se várias células de combustível em série por forma a termos uma tensão de saída mais alta, a esta associação dá-se o nome de pilha de combustível como já tinha sido referido.

Se essa ligação fosse feita de uma forma simples, teríamos o coletor do ânodo ao lado do coletor do cátodo. No entanto com a intenção de se reduzir o volume e o peso da pilha, substituiu-se os dois coletores de corrente por apenas uma placa de fluxo que permite o escoamento em cada lado da placa (um para o hidrogénio e outro para o ar). Essas placas são denominadas por placas bipolares, separando assim uma célula da célula seguinte.

Visto que o fluxo de hidrogénio e de ar passam pelo mesmo prato é necessário que a placa bipolar seja constituída por material impermeável ao gás, caso contrário os dois gases poder-se-iam misturar e provocar a oxidação do combustível.

É essencial também que a placa bipolar seja condutor elétrico, pois os eletrões produzidos no ânodo num dos lados do prato têm de ser conduzidos através do prato até ao outro lado da placa por forma a entrarem então no cátodo.

Na Figura 11 é possível observa-se a associação de 3 células de combustível, onde são visíveis as placas bipolares [5] [6].

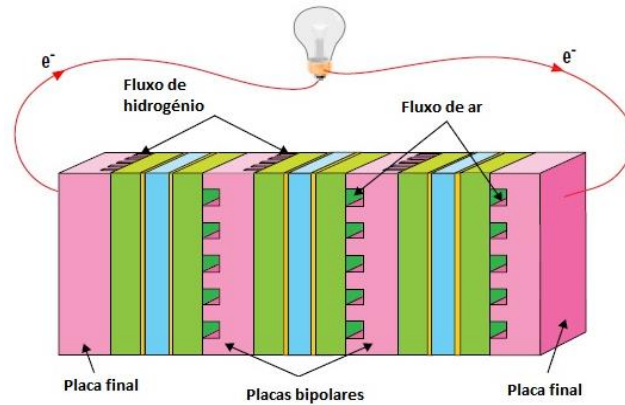


Figura 11 - Associação em série de três células de combustível [5]

### 3.3.1.6. Conclusões sobre a pilha PEFC/PEM

Através das várias características da pilha PEFC/PEM é possível perceber-se que esta tem várias vantagens no entanto também tem desvantagens.

Falando primeiro das vantagens temos:

- O eletrólito é sólido e possibilita uma boa resistência à passagem do gás;
- O arranque é rápido devido a trabalhar a baixas temperaturas, sem componentes corrosivos e altas densidades de corrente (segundo testes feitos);
- Têm uma maior eficiência do que um motor a diesel ou a gás;
- Funcionam de forma silenciosa comparativamente com os motores de combustão interna;
- Não prejudicam o ambiente visto que não há queima de combustível fóssil mas sim apenas uma reação química que tem como subproduto a água;
- Têm uma baixa transferência de calor tornando-as ideais para usos militares;
- Para aumentar o seu tempo de funcionamento apenas é necessário fornecer-lhes mais combustível, enquanto nas baterias seria necessário aumentar a sua capacidade;
- Apresentam maiores níveis de confiança, comparativamente com os motores de combustão interna, visto não possuem partes móveis, o que torna também a sua manutenção mais fácil.

Passando agora para as desvantagens temos:

- A difícil gestão da temperatura, principalmente com altas densidades de corrente elétrica,
- A difícil gestão da água pois é necessário garantir a hidratação suficiente à membrana sem que haja inundação da mesma;
- O catalisador em platina é bastante caro e tem uma grande sensibilidade para o envenenamento por substâncias contaminantes como o CO;
- O hidrogénio tem uma baixa densidade energética;
- A recuperação de calor possível é bastante baixa, o que torna inviável a sua utilização num sistema de cogeração;
- Têm diversos problemas no que toca à produção, distribuição e armazenamento do hidrogénio.

Algumas destas desvantagens podem ser contrariadas através da alteração de certos parâmetros tais como diminuindo a densidade de corrente elétrica de funcionamento e aumentando a carga do catalisador, no entanto estas alterações iam encarecer a pilha [3] [4] [6] [7].

### **3.3.2. Pilha PEM (alta temperatura)**

Devido às várias desvantagens das pilhas PEM de baixa temperatura, têm vindo a ser estudado e desenvolvido um novo tipo de pilha PEM. Para tal foi recentemente inventado um novo polímero condutor de prótons (PBI - “polibenzimidazole” dopado com ácido fosfórico) para utilizar nas pilhas PEM de alta temperatura. Para que se perceba melhor é importante explicar que o “polibenzimidazole” é uma fibra sintética com o ponto de fusão bastante elevado e proporciona uma excelente estabilidade térmica e química [8].

Passamos agora a enumerar as características deste polímero:

- É condutora de prótons;
- Tem uma grande estabilidade térmica;
- Tem um baixo custo;
- Tem uma baixa resistência mecânica;
- Suportam 3% de CO.

De forma a tornar a membrana num material compósito, junta-se o PTFE (polímero mais conhecido por teflon) à PBI. Esse material compósito criado dá uma melhor resistência mecânica à membrana, no entanto o desempenho da pilha baixa.

Foram feitos vários testes para comprovar a alta resistência mecânica da membrana PTFE/PBI e a conclusão a que se chegou foi que esta membrana tem uma boa resistência mecânica, resistência essa similar à membrana normal em nafion (já anteriormente citada) [8].

Enumeramos algumas vantagens deste tipo de pilha:

- Melhor tolerância aos contaminantes, mais especificamente o CO:

Na pilha PEM de baixa temperatura o hidrogénio e o CO competem pelas zonas ativas no catalisador de platina, o problema é que a platina é sensível ao envenenamento por CO. Por forma a solucionar esse problema, foi inventado um processo de separação, purificação e bombeamento do hidrogénio. Neste processo a bomba eletroquímica foi projetada para oxidar e reduzir o hidrogénio no ânodo e no cátodo respetivamente. O processo começa então com a ida de hidrogénio para o ânodo onde ocorre a oxidação do mesmo resultando daí protões e eletrões. Os protões são então conduzidos através da membrana para o cátodo, enquanto os eletrões são conduzidos através do circuito elétrico para o cátodo. Os protões e os eletrões no cátodo combinam-se e formam hidrogénio.

Este processo é bastante rentável pois o tamanho da bomba eletroquímica necessária para oxidar e reduzir o hidrogénio é bastante inferior comparativamente com a de uma pilha galvânica (Figura 12).

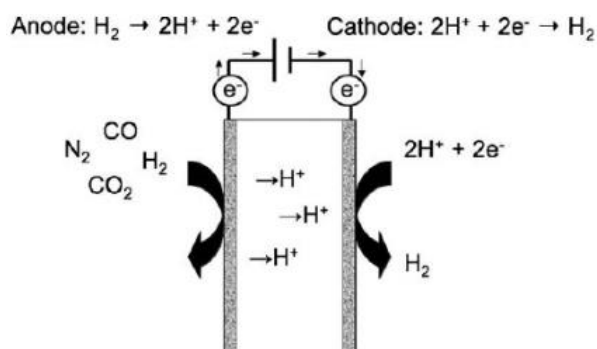


Figura 12 - Esquema do processo da pilha PEM de alta temperatura [8]

- Melhoria na gestão da água e do transporte de gás:

Como já anteriormente foi referido, a gestão da água é fundamental para o desempenho da pilha de combustível. Nas pilhas de baixa temperatura, a falta de água na membrana faz diminuir a sua condutividade e a sua resistência aumenta. Enquanto água a mais no cátodo dá origem à restrição do transporte de oxigénio. Já para as pilhas de alta temperatura a gestão de água é ainda mais importante, por essa razão estas pilhas utilizam o efeito eletro-osmótico que melhorou essa gestão.

O efeito eletro-osmótico tem como princípio o transporte da água por intermédio dos prótons que vão do ânodo ao cátodo através da membrana. No entanto caso haja um diferencial de pressão, a pressão irá forçar a água a ir do cátodo para o ânodo. Como tal o fluxo de água na pilha é uma combinação do efeito eletro-osmótico e da difusão.

- Melhoria da eficiência do calor rejeitado:

Neste tipo de pilhas o calor rejeitado é eficiente e pode ser utilizado para outros fins, o que resulta numa significativa melhoria na eficiência global da pilha [8].

No entanto estas pilhas ainda têm de ser melhor estudadas e desenvolvidas por forma a eliminar ou minimizar os efeitos abaixo:

- Elevada temperatura – pode causar falhas no mecanismo iónico da membrana;
- Humidade – pode causar a desidratação da membrana pois o calor produzido pode levar ao aumento da evaporação da água;
- Espessura da membrana – para as altas densidades de corrente uma membrana grossa não tem um bom desempenho, pois cria resistência à passagem dos prótons [8].

### **3.3.3. Pilha de combustível regenerativa**

As pilhas de combustível regenerativas estão em desenvolvimento e também funcionam com hidrogénio e ar com o intuito de produzirem eletricidade, água e calor tal como as pilhas de combustível convencionais.

No entanto, a pilha regenerativa possibilita a inversão das reações, ou seja, produz hidrogénio e oxigénio através da eletricidade e da água. Nesta inversão das reações



(denominada eletrólise), a eletricidade utilizada nos elétrodos da pilha obriga à separação da água nos seus componentes.

A grande vantagem desta pilha regenerativa é ser um sistema fechado e ser capaz de garantir o funcionamento da pilha de combustível sem necessitar de outra infraestrutura para o hidrogénio.

Porém uma das preocupações relativamente a este pilha regenerativa é o custo extra que se teria de suportar para que a pilha de combustível fosse reversível, enquanto a outra preocupação é o facto de se ter de utilizar eletricidade da rede para a produção do hidrogénio.

O grande impulso para o desenvolvimento e uso deste tipo de pilhas virá quando as energias renováveis forem mais exploradas.

Na Figura 13 é possível observar-se como seria uma pilha de combustível regenerativa utilizando a energia solar para produzir energia [5].

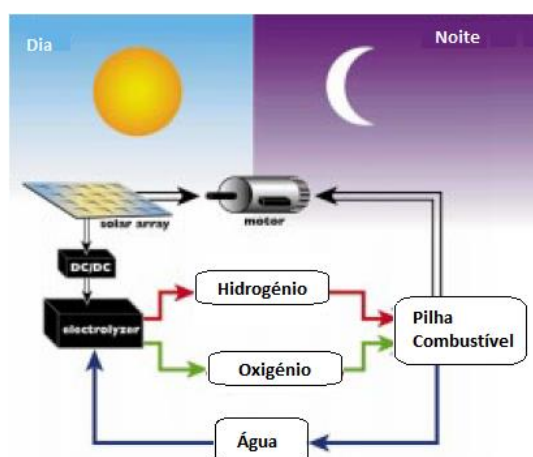


Figura 13 - Exemplo de uma pilha regenerativa [5]

### 3.4. Aplicações

As pilhas de combustível têm inúmeras aplicações em diversas áreas tais como as telecomunicações, os veículos motorizados, os equipamentos portáteis, entre outros, porém o grande investimento e a grande aposta é na comercialização de carros com essa tecnologia.

Relativamente à aplicação nos transportes, as pilhas PEM/PEFC são bastante apropriadas pois conseguem fornecer continuamente energia com grande eficiência,

para além disso necessitam de muito pouca manutenção visto não terem partes móveis na sua constituição.

Para além dessas aplicações referidas acima, as pilhas de combustível têm sido bastante utilizadas nos programas espaciais de forma a proporcionar aos astronautas água potável e eletricidade.

Falando agora em aplicações ligadas a serviços públicos, as pilhas de combustível têm uma enorme vantagem comparativamente às centrais, passo a explicar porquê. Estimativas apontam que apenas cerca de 1/3 da energia produzida chega realmente aos utilizadores finais, isto deve-se à baixa eficiência de conversão das centrais elétricas e às perdas nas redes de transporte e distribuição. Ao se optar pela utilização das pilhas neste tipo de aplicações iríamos aumentar a eficiência energética, reduzindo-se também as emissões para atmosfera.

Neste tipo de aplicações, mais propriamente em sistemas estacionários, estão a ser utilizadas pilhas de ácido fosfórico (PAFC). Isto resume-se ao facto de estas serem “amigas” do ambiente, terem sistemas simples, serem de confiança, serem silenciosas e necessitarem de pouca manutenção.

Mais recentemente estão a ser desenvolvidas pilhas PEM/PEFC de pequena potência (2 a 5 kW) para aplicações de uso doméstico e aquecimento. O que torna esta aposta viável, são os materiais utilizados no seu fabrico e o custo produção. No entanto os fabricantes não se ficam por pequenas aplicações e já estão a desenvolver projetos para a sua utilização em grande escala.

Outro tipo de aplicações que começaram a ser desenvolvidas são as unidades de produção distribuição de energia. Pois dada à pequena dimensão das unidades e à alta eficiência das pilhas, podem ser colocadas no próprio local em que são essenciais. Outra vantagem desta aplicação é o risco financeiro na instalação ser menor comparativamente com outras tecnologias, para além de que à medida que as necessidades energéticas aumentam é possível ir-se acrescentando módulos à unidade de produção.

Como se pode analisar, as pilhas de combustível estão a começar a ser uma alternativa para locais onde não existe rede elétrica, locais onde a fonte de energia é incerta e locais remotos não acessíveis para a instalação de linhas elétricas.

Ficam abaixo alguns exemplos de aplicações em diversos setores [4].

### 3.4.1. Centrais elétricas estacionárias

Como já foi referido, um dos subprodutos de algumas pilhas de combustível é o calor. Neste tipo de aplicação esse calor muitas das vezes é aproveitado, o que torna mais elevada a eficiência do sistema (menos desperdícios).

Uma vantagem da utilização das células de combustível neste tipo de centrais é o tamanho das centrais ser mais reduzido do que se fosse uma central convencional, o que leva por sua vez a uma redução de custos. Isto deve-se ao facto do tamanho das células não ter influência quase nenhuma na eficiência das mesmas.

Outra vantagem importante é o impacto que estas têm no meio ambiente, pois as centrais com células de combustível poluem menos o ar devido às baixas emissões e ao baixo nível de CO<sub>2</sub> produzido. Para além disso também o ruído é atenuado, em comparação com as centrais termoelétricas. Por último e não menos importante, o consumo de água também diminui visto que a quantidade de água produzida por uma célula é muito mais baixa. Na Figura 14 é possível observa-se o esquema de uma central estacionária aplicada a uma casa [3] [9].

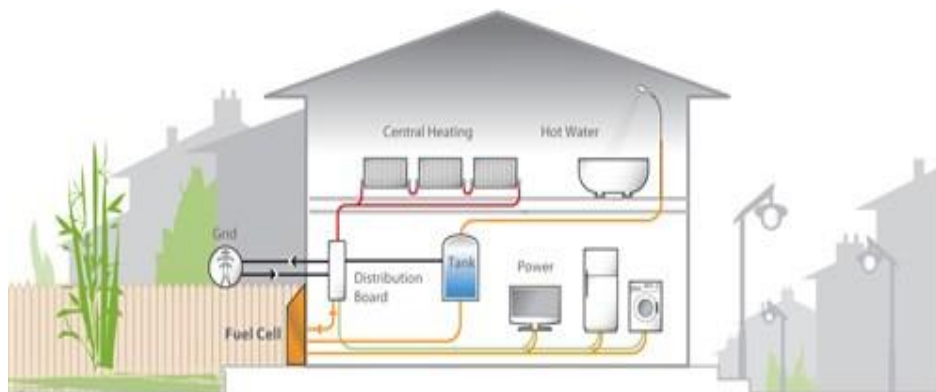


Figura 14 - Esquema de uma central estacionária [9]

### 3.4.2. Veículos motorizados

A aplicação das pilhas de combustível nos veículos motorizados tem vindo cada vez mais a aumentar, tendo já sido lançados diversos modelos no mercado. Algumas dessas aplicações são: automóveis, scooters, bicicletas, carrinhos de golf, veículos públicos, barcos, etc.

A grande motivação deste desenvolvimento reside no facto de se conseguir ter veículos mais eficientes e menos poluentes.

A Toyota, uma das grandes marcas de carros, tem desenvolvido vários protótipos de carros com pilhas de combustível, sendo o mais recente o FCV-R com intenção de comercialização em 2015. Este carro reflete o novo design da Toyota. O carro tem 4,745 m de comprimento, 1,510 m de altura e 1,790 m de largura, sendo que a pilha de combustível se encontra instalada debaixo dos bancos juntamente com os depósitos de hidrogénio. Os depósitos de hidrogénio projetados para este carro permitem uma condução de aproximadamente 700 km. Outra vantagem do carro é o facto de não emitir nem CO<sub>2</sub> nem NO<sub>x</sub>. Na Figura 15 temos o protótipo da Toyota [10].



*Figura 15 – Protótipo FCV-R da Toyota [10]*

A Renault-Nissan, a Daimler e a Ford juntaram-se este ano para desenvolver um sistema comum com células de combustível, sendo o objetivo começar a comercializar carros com este sistema a partir de 2017.

“O verdadeiro laboratório sobre rodas” é como chamam ao protótipo F125 *Concept* da Mercedes. Este carro tem cerca de 5m de comprimento e o grande atrativo são as suas portas que abrem tipo “asa”. O carro está equipado com quatro motores elétricos alimentados por baterias de iões de lítio e por uma célula de combustível funcionando como suplemento de autonomia. Este carro chega aos 100 km/h em 4,9 s e atinge velocidades da ordem dos 220 km/h, consumindo 0,79 kg de hidrogénio contra 2,7 litros de gasóleo para um mesmo percurso de 100 km. Na Figura 16 temos o protótipo da Mercedes [11].



*Figura 16 – Protótipo F125 Concept da Mercedes [11]*

No entanto, não foram apenas os automóveis que começaram a utilizar as pilhas de combustível, também os barcos já aderiram a esta tecnologia.

O Frauscher Riviera 600 é sinónimo disso mesmo. Este barco apenas utiliza hidrogénio como fonte de energia e foi a criado pelas empresas Fronius (responsável pela pilha de combustível), Bitter (responsável pelo depósito de hidrogénio) e Frauscher (responsável pela parte elétrica). Estas três empresas não se ficaram apenas pelo projeto do barco em si a funcionar com a pilha de combustível, como também criaram um sistema para a produção de hidrogénio. “The Clean Power” é uma estação projetada para distribuir e produzir hidrogénio, pois seria equipada com cerca de 250 m<sup>2</sup> de células fotovoltaicas capazes de produzir hidrogénio através da eletrólise. Na Figura 17 temos o Fraucher Riviera 600 [12].



*Figura 17 - Frauscher River 600 [12]*

Como último exemplo, temos a aplicação de uma pilha de combustível numa bicicleta elétrica que proporciona um aumento de autonomia por parte da bicicleta.

O sistema é constituído pela pilha de combustível, o reservatório de hidrogénio e a parte de controlo. Na Figura 18 é possível observar-se um esquema exemplificativo do sistema.



Figura 18 - Esquema exemplificativo do sistema na bicicleta elétrica (Modelo HMX) [13]

A título de exemplo da autonomia da bicicleta podemos dizer que para uma bicicleta que ande cerca de 2 horas continuamente com a bateria, se lhe colocarmos a pilha de combustível passa a andar 7 horas com apenas um depósito de hidrogénio, com dois reservatórios aumentaríamos o tempo para 12 horas.

Passamos agora às características do sistema:

<b>Potência da pilha</b>	100W
<b>Peso da pilha</b>	0,95kg
<b>Capacidade do reservatório</b>	350NL e 500NL
<b>Peso do reservatório</b>	3,1kg
<b>Tempo de recarregamento do reservatório</b>	1h

Tabela 2 - Características do sistema na bicicleta elétrica (Modelo HMX) [13]

Relativamente à capacidade do reservatório é importante frisar que a unidade NL “Normal Liter” tem como condição padrão 0°C e 1 atm (1,01325 bar).

O primeiro modelo desta bicicleta foi desenvolvido pelos engenheiros da empresa Horizon HQ (Figura 19) [13].



*Figura 19 - Bicicleta elétrica com pilha de combustível (Modelo HMX) [13]*

### **3.4.3. Equipamentos portáteis**

Em termos de equipamentos portáteis as aplicações são diversas também, temos então por exemplo lanternas, telemóveis, computadores portáteis, entre outros equipamentos. Por forma a se ter uma melhor ideia dos desenvolvimentos nestas áreas, serão ilustrados alguns exemplos deste tipo de aplicações.



*Figura 20 - Lanterna desenvolvida pela Angstrom (A2 micro hydrogen<sup>TM</sup> - 2006) [14]*

Esta lanterna (LED) usa como combustível o hidrogénio (armazenado no punho da lanterna) e como oxidante o ar, tem 1 W e funciona em contínuo mais de 24 horas apenas com uma carga de hidrogénio. Esta lanterna substitui as lanternas convencionais

com pilhas descartáveis (que são mais dispendiosas e prejudiciais ao ambiente), sendo que ao contrário das outras esta conserva a emissão de luz constante durante toda a sua carga, desta forma garante que a luminosidade não baixa com o uso (Figura 20).

Em termos de armazenamento é feito através de um sistema de hidreto metálico, sendo que o seu reabastecimento demora sensivelmente 10 min., porém, no futuro, esse será através de um cartucho portátil. Na Figura 21 e Figura 22 é possível ver outras aplicações da empresa Angstrom [14].



*Figura 21 - Capacete equipado com lanterna da Angstrom [14]*



*Figura 22 - Estação de reabastecimento portátil e lanterna para bicicleta da Angstrom [14]*



*Figura 23 - Carregador portátil com células de combustível (Minipak) [13]*



Na Figura 23 temos então um carregador universal portátil de 1,5 W com uma interface USB compatível com vários equipamentos portáteis eletrônicos tais como: telemóvel, iphone, GPS, leitor MP3 e todos os equipamentos que possuam uma ligação USB (lanternas, ventoinhas, etc.).

Em termos de características, pode-se dizer que é um equipamento barato para a energia que armazena; tem mais energia disponível do que grande parte dos dispositivos existentes; é fácil de usar devido à porta USB; é amigo do ambiente; pode ser usado para diversas aplicações; ele não descarrega sozinho ao longo do tempo (podendo mesmo a energia ser armazenada em estado sólido durante anos) e pode ser transportado em aviões devido à aprovação da legislação acerca dos dispositivos de hidreto de metal. Na Figura 24 temos outros exemplos de aplicações [13].



*Figura 24 - Câmara de vídeo alimentada com células de combustível [3]*

#### **3.4.4. Outras aplicações possíveis**

Um exemplo de outra aplicação é a utilização das pilhas de combustível para reduzir o lixo produzido nas habitações e produzir eletricidade.

O lixo é produzido em grandes quantidades sendo necessário efetuar o seu tratamento de forma adequada e é considerado muitas das vezes como um problema devido ao seu impacto no ambiente.

Porém este tem uma quantidade significativa de energia que poderia ser aproveitada para gerar eletricidade, para além disso diminuíam-se o problema do seu impacto ambiental. Um exemplo disso seria utilizar biogás numa pilha de combustível. Como o biogás é uma fonte de energia renovável, o dióxido de carbono emitido pela pilha não seria prejudicial pois seria neutro. Na Figura 25 temos um esquema de princípio da transformação do lixo em eletricidade.

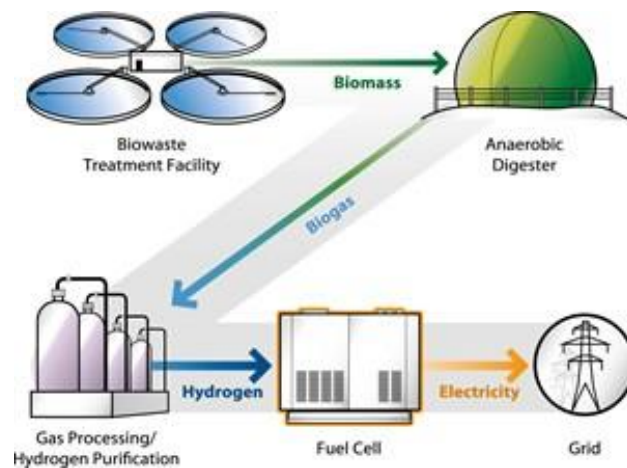


Figura 25 - Esquema de princípio da transformação do lixo em eletricidade [9]

### 3.5. Desafios

Esta tecnologia tem vários desafios, sendo que dois deles são: reduzir o custo para que esta seja competitiva com outras, e melhorar a durabilidade para que esta seja tão boa ou melhor do que as tecnologias tradicionais.

O elevado custo das pilhas de combustível deve-se ao seu fabrico e aos materiais utilizados, sendo que apenas com um grande volume de produção é que o custo destas se torna competitivo no mercado.

Quando à durabilidade esta tem de ser similar à dos automóveis atuais, desta forma tem de ter um tempo de vida de 5000 horas operacionais e tem de funcionar em toda a gama de variações dinâmicas de um veículo em funcionamento (incluindo temperaturas e climas).

Para além destes, outros grandes desafios já foram enunciados anteriormente, tais como a produção, distribuição e armazenamento de hidrogénio.

## 4. Comparação com outras tecnologias

### 4.1. Comparação com o motor de combustão interna

Neste capítulo foi feita uma breve comparação entre a pilha de combustível e outras tecnologias, nomeadamente o motor de combustão interna.

O melhor exemplo para a comparação com o motor é o carro. O motor basicamente converte a energia química do combustível em energia térmica, que por sua vez converte em energia mecânica (energia elétrica). No caso da pilha esta converte diretamente energia química em energia elétrica, o que torna o processo de conversão mais eficaz que o do motor visto ter menos perdas. Temos então aqui a primeira diferença entre o motor e a pilha.

Colocando agora o exemplo do carro ser alimentado por energia elétrica proveniente de uma pilha de combustível, deixaríamos de ter combustão. Essa mudança iria traduzir-se num rendimento superior ao carro com o motor de combustão interna e iria eliminar as emissões gasosas durante todo o seu funcionamento. Este aspeto tem vindo visto a ser cada vez mais importante devido à grande preocupação com o meio ambiente e os problemas causados por estes gases. Como tal esta segunda diferença entre utilizar o motor e a pilha é bastante benéfica (Figura 26) [5].

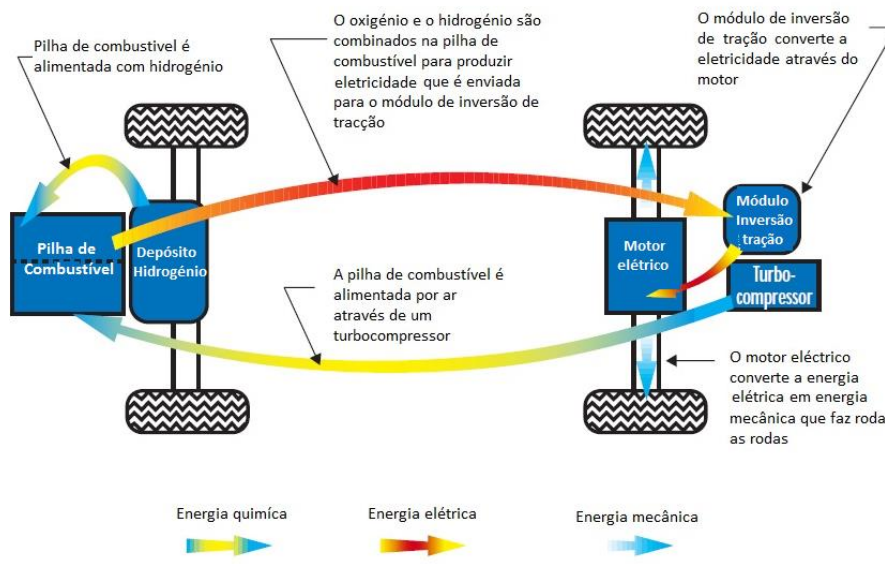


Figura 26 - Esquema exemplificativo do funcionamento de um carro com pilha de combustível

[5]

## 4.2. Comparação com a bateria

Para que se entendam os conceitos que foram abordados abaixo é importante perceber-se primeiro o que é uma bateria. Uma bateria é uma unidade que armazena energia química e converte-a em energia elétrica quando necessário. Existem 3 tipos de baterias:

- Baterias que quando descarregam deixam de ter utilidade e são descartadas;
- Baterias recarregáveis que após descarregarem conseguem ser novamente carregadas através da inversão de sentido da corrente elétrica;
- Baterias especiais projetadas para um determinado objetivo, é por exemplo o caso das baterias médicas no entanto também são bastante utilizadas para fins militares.

Como já foi referido a pilha e a bateria são muito idênticas: ambas convertem energia química em elétrica diretamente e de forma eficiente, ambas necessitam de pouca manutenção visto não terem partes móveis na sua constituição.

A bateria é composta por um polo negativo ou um ânodo, um condutor iónico puro ou um eletrólito e um polo positivo ou um cátodo. Para além do que já foi dito, podemos também afirmar que a constituição da bateria e da pilha de combustível é bastante semelhante.

No entanto a grande diferença entre as duas reside na forma como armazenam e libertam a energia.

Na bateria a energia é armazenada internamente e a partir do momento em que começa a consumir essa energia ela deve ser recarregada ou substituída. É por esta razão que nos carros elétricos se usam baterias recarregáveis.

Já na pilha o combustível é armazenado num depósito e o ar é proveniente da atmosfera. Isso resulta no facto de que desde que o depósito contenha combustível, a pilha está sempre a produzir energia elétrica e calor. Esta é a grande diferença entre a pilha e a bateria.

Sendo que para grandes aplicações a pilha tem imensas vantagens comparativamente à bateria, tais como: dimensão menor, peso menor, rápido abastecimento, maior alcance, entre outras [5] [15].

### 4.3. Comparação com células fotovoltaicas

Passando agora para as células fotovoltaicas, estas convertem energia solar em energia elétrica.

Estas células fotovoltaicas são constituídas por materiais semicondutores, normalmente silício, que absorvem parte da energia emitida pelo sol. Para além disso as células fotovoltaicas também têm campos elétricos de forma a forçar os eletrões, provenientes da energia absorvida, a circular em numa determinada direção e criando assim a corrente elétrica. No entanto é importante frisar que o silício existente nestas células contém “impurezas”, ou seja outros átomos misturados com os átomos de silício, que o tornam benéfico neste tipo de aplicações, isto porque o silício puro não é um bom condutor de eletricidade pois não tem nenhum eletrão livre para se mover devido à sua estrutura.

Denomina-se “doping” ao processo de introduzir “impurezas” no silício. Normalmente adicionam fósforo ao silício e este passa-se a chamar silício tipo N (negativo) devido aos seus eletrões livres. No entanto apenas uma parte da célula fotovoltaica é constituída por silício tipo N, isto porque à outra parte é lhe adicionada boro que forma o silício tipo P (positivo) que é exatamente o oposto do tipo N pois este não tem eletrões livres mas sim espaços livres (ausência de eletrões).

Estes dois tipos N e P são colocados lado a lado criando um campo elétrico, que origina uma movimentação dos eletrões livres do tipo N para os espaços vazios do tipo P. Temos então assim o princípio de funcionamento destas células.

A grande desvantagem desta aplicação é a baixa energia absorvida pela célula, que varia entre os 15% e os 25%. Para além disso estas células apenas conseguem produzir energia durante o dia e a produção/instalação destas células é bastante caro face ao retorno que conseguem retirar da energia produzida.

Após o exposto é possível agora fazer uma comparação entre as duas tecnologias:

- A energia criada por uma célula fotovoltaica pode ser armazenada numa bateria, enquanto a célula de combustível foi criada para substituir as baterias e os motores;
- A célula fotovoltaica converte luz em energia elétrica enquanto a célula de combustível converte hidrogénio em energia elétrica;
- A constituição das duas células é diferente, enquanto a célula fotovoltaica é constituída pela camada N, P e pela junção das duas a célula de combustível é constituída pelo ânodo, o catalisador, o cátodo e o eletrólito;

- Ambas as células são benéficas para a diminuição da poluição, visto não libertarem componentes poluentes;
- Ambas as células produzem eletricidade em corrente direta;
- Ambas as células funcionam com fontes de energia renovável, no entanto o custo inicial é bastante elevado [16].

## 5. Aplicação portátil – Modelo 3D

### 5.1. Introdução

As estações de rádio fazem bastantes reportagens e transmissões sobre inúmeros eventos tais como jogos de futebol. Muitas destas estações utilizam um transmissor portátil para realizar essas reportagens, visto ser um equipamento leve e fácil de ser transportado (Figura 27).

Desta forma é perceptível que a aplicação portátil escolhida por mim foi um transmissor portátil. Esta escolha recai sobre o fato de ser interessante estudar as vantagens e desvantagens da substituição das pilhas tradicionais alcalinas pelas inovadoras pilhas de combustível a hidrogénio. Para além disso esta aplicação tem tudo o que era necessário para este projeto, ou seja, é portátil e a utilização da pilha de hidrogénio com 10 W de potência é suficiente para o transmissor funcionar.



*Figura 27 - Transmissor portátil*

Como já referi, este transmissor é alimentado com pilhas alcalinas ou por uma bateria externa no entanto é poucas vezes utilizada a última opção.

Para cada transmissão as pilhas alcalinas são todas trocadas por novas mesmo que estas não tenham descarregado tudo na última transmissão, este procedimento garante que não haja falhas na transmissão. Como tal é fácil de imaginar a quantidade de pilhas alcalinas que são gastas nesta aplicação; para combater este excessivo uso de pilhas alcalinas a solução da utilização da pilha de combustível a hidrogénio é uma boa opção a considerar.

A informação captada pelo transmissor é então emitida para a unidade estacionária que estará na estação emissora de rádio (Figura 28).



*Figura 28 – Recetor*

A opção de utilizar, nesta aplicação, pilhas de combustível ao invés de pilhas alcalinas convencionais deve-se a vários fatores que irão ser explicados, de uma forma genérica, de seguida.

Começando por fatores relacionados com as características e funcionamento das mesmas, é de salientar o facto de as pilhas de combustível a hidrogénio serem de pequenas dimensões, o que as torna propícias para a utilização em pequenas aplicações dada a sua facilidade de transporte. Para além disso o seu princípio de funcionamento é bastante simples, não havendo qualquer tipo de movimento mecânico no seu interior, este aspeto influencia positivamente a segurança e a duração destas.

Falando em termos gerais, estas também são uma mais-valia no que toca ao seu rendimento pois as perdas de energia associada são menores visto transformarem diretamente a energia química em elétrica. De salientar que a sua qualidade de energia é elevada, possibilitando-lhes o funcionamento ininterrupto durante um intervalo de tempo superior ao de outras tecnologias.

Um tópico que nos dias de hoje é extremamente importante é a poluição, e quanto ao tipo de pilhas utilizado nesta aplicação a emissão de gases é praticamente nula pois os subprodutos da reação química são apenas calor e água pura.

Em suma, a utilização de pilhas de combustível a hidrogénio em pequenas aplicações tem as suas vantagens, podendo constituir no futuro uma solução se continuarem a surgir novos desenvolvimentos e estudos acerca das mesmas.

Para uma mais fácil análise e compreensão, podemos observar a tabela abaixo com as vantagens e desvantagens.



<b>Vantagens desta aplicação</b>	<b>Desvantagens desta aplicação</b>
Funcionamento fora da rede	Elevado custo de fabrico
Funciona durante mais tempo comparado com as baterias	Dificuldades no armazenamento do hidrogénio
Recarga fácil	Necessidade de utilizar metais nobres, como a platina (são caros)
Opção confiável	-
Custos operacionais reduzidos	-
Rendimento elevado	-

*Tabela 3 - Vantagens e desvantagens desta aplicação*

Nesta altura ainda não é correto afirmar que as pilhas de combustível são uma opção viável, pois ainda enfrentam grandes desafios no que toca ao seu elevado custo de produção, materiais utilizados e aprovisionamento do combustível (hidrogénio), sendo, no entanto, uma ótima aposta a longo prazo.

## **5.2. Características do equipamento**

Este equipamento pode ser alimentado por 10 pilhas ou então por uma alimentação externa, sendo que a bateria dura 4 horas de trabalho contínuo.

O que se pretende é fazer um estudo de uma pilha de combustível que substitua as pilhas convencionais, como tal esta tem de fornecer a mesma energia que as pilhas convencionais e garantir que o equipamento trabalhe as mesmas horas.

<b>Dimensões</b>	160x50x280 mm
<b>Peso</b>	2700 g (c/ pilhas)
<b>Tensão de alimentação</b>	11 a 16 Vdc
<b>Intensidade de alimentação</b>	600 mA

*Tabela 4 – Características do transmissor*

## **5.3. Cálculo da energia primária necessária**

As características das pilhas alcalinas utilizadas são:

- Tipo: IEC-LR14;
- Voltagem: 1,5 V;
- Peso médio: 70 g;

- Capacidade: 6700 mAh (condições de teste: resistência 10  $\Omega$ ; tempo: 4 h/d; temperatura 20 $\pm$ 2  $^{\circ}$ C).

A partir da capacidade e admitindo que ela descarrega em 10 h é possível calcular-se a corrente elétrica:

$$\frac{6700 \text{ mAh}}{10\text{h}} = 670 \text{ mA}$$

Como foi referido acima o recetor também pode trabalhar com uma alimentação externa em vez das pilhas alcalinas, alimentação essa que tem como corrente elétrica 600mA. Como se pode ver a aproximação que se fez para a corrente elétrica das pilhas alcalinas é aceitável para este estudo.

Desta forma consegue-se então calcular a potência de cada pilha (segundo a lei de Ohm):

$$P = U \cdot I \tag{5}$$

P – Potência [W]

U – Tensão [V]

I – Intensidade de corrente [A]

Temos então:

$$P = 1,5 \cdot 0,67 = 1 \text{ W}$$

Visto que o equipamento precisa de 10 pilhas, temos uma potência total de 10 W.

Pretende-se que a pilha de combustível tenha uma autonomia de 4 horas, calculou-se então a energia que é necessário produzir:

$$E_{produzida} = P \cdot \Delta t \tag{6}$$

$E_{produzida}$  – Energia produzida [Wh]

P – Potência [W]

$\Delta t$  – Variação do tempo [h]

Temos então:

$$E_{produzida} 10W \cdot 4h = 40 Wh$$

Conversão de Wh para J:

$$E_{produzida} = 40Wh \cdot 3600 = 144000 J$$

Através de uma tabela com a entalpia da água (H<sub>2</sub>O) foi retirado o calor da energia térmica libertada (Reação) e através de uma tabela com a energia livre de Gibbs da água (H<sub>2</sub>O) foi retirada a energia necessária para o trabalho (W<sub>e</sub>), na reação entre o oxigénio (O) e o hidrogénio (H<sub>2</sub>) (Fonte: First Year Chemistry – The University of Sydney).

Com estes dois valores foi possível calcular o rendimento teórico da reação:

$$\eta = \frac{W_e}{H_{reação}} \cdot 100\% \quad (7)$$

W<sub>e</sub> – Energia necessária [kJ/mol]

H<sub>reação</sub> – Energia térmica libertada [kJ/mol]

η – Rendimento teórico [%]

Temos então:

$$\eta = \frac{237 \text{ kJ/mol}}{286 \text{ kJ/mol}} \cdot 100\% \cong 83 \%$$

Agora que já se tem o rendimento, calculou-se a quantidade teórica necessária de energia de H<sub>2</sub>:

$$E_{H_2} = \frac{E_{produzida}}{\eta} \quad (8)$$

E<sub>H2</sub> – Energia necessária de H<sub>2</sub> [J]

E<sub>produzida</sub> – Energia produzida [J]

η – Rendimento teórico [%]

Temos então:

$$E_{H_2} = \frac{144000 J}{0,83} \cong 173494 J$$

Com a quantidade teórica necessária de energia de hidrogénio e a sua massa molar (M), já se pode calcular a massa de hidrogénio necessária (teórica):

$$m_{H_2} = \frac{M_{H_2} \cdot E_{H_2}}{H_{reacção}} \quad (9)$$

$m_{H_2}$  – Massa H<sub>2</sub> [g]

$M_{H_2}$  – Massa molar do H<sub>2</sub> [g/mol]

$E_{H_2}$  – Energia necessária de H<sub>2</sub> [J]

$H_{reacção}$  – Energia térmica libertada [kJ/mol]

Temos então:

$$m_{H_2} = \frac{2,02 \text{ g/mol} \cdot 173494 J}{285,5 \text{ kJ/mol}} \cong 1,23 \text{ g}$$

Os cálculos foram todos feitos com base no rendimento teórico da reação, porém na realidade o rendimento não é tão elevado, como tal ir-se-á calcular a massa de hidrogénio necessária com base num rendimento de 50% (visto o rendimento variar entre 40 e 60%, escolheu-se o valor médio) [7].

$$m_{H_2} = \frac{2,02 \text{ g/mol} \cdot 288000 J}{285,5 \text{ kJ/mol}} \cong 2,03 \text{ g}$$

Para o cálculo da densidade considerou-se a equação dos gases perfeitos, no entanto colocou-se um fator de compressibilidade visto que as pressões de armazenamento são muito elevadas, como já foi referido anteriormente, e o comportamento do gás afasta-se do de um gás perfeito. No caso de estarmos a falar de um gás perfeito o fator de compressibilidade seria 1.

Através da equação dos gases perfeitos, temos:

$$\rho = \frac{P}{Z \cdot R \cdot T} \quad (10)$$

P – Pressão [Pa] (considerou-se 50bar)

Z – Fator de compressibilidade (considerou-se 1,05)

R – Constante do hidrogénio (constante dos gases perfeitos/massa molecular H<sub>2</sub>)

T – Temperatura [K]

$\rho$  – Densidade [kg/m<sup>3</sup>]

Temos então:

$$\text{densidade } (\rho) = \frac{50 \cdot 100000}{1,05 \cdot \frac{8314}{2} \cdot (0 + 273,15)} = 4,19 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (11)$$

Temos então:

$$\text{volume} = \frac{\text{massa}}{\text{densidade } (\rho)} = \frac{2,03 \text{ g}}{4190 \text{ g/m}^3} = 0,000484 \text{ m}^3 = 0,49 \text{ l}$$

Passando agora para a questão do armazenamento, escolheu-se um reservatório cilíndrico com uma altura de 12 cm, falta agora saber que diâmetro terá de ter o reservatório.

$$\text{Volume} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (12)$$

Temos então:

$$r = \sqrt{\frac{\text{volume}}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{0,000484}{\pi \cdot 0,12}} = 0,036$$

Como se pode ver temos um diâmetro de aproximadamente 3,6 cm, o que é bastante aceitável para a aplicação em estudo.

#### **5.4. Armazenamento do hidrogénio (hidretos metálicos)**

Dos diversos métodos de armazenamento de hidrogénio já referidos, escolhi para este projeto os hidretos metálicos por serem a solução mais segura, não sendo necessário submeter o hidrogénio a altas pressões nem a métodos criogénicos.

O funcionamento dos hidretos metálicos baseia-se no princípio de certos metais terem capacidade de absorver hidrogénio no seu estado gasoso a alta pressão e a temperatura moderada. Após o armazenamento do hidrogénio, este é libertado quando os metais são aquecidos a alta temperatura e em condições de baixa pressão.

A grande vantagem deste método é o facto do hidrogénio ao ser absorvido passa a fazer parte da estrutura química do metal, não necessitando assim de funcionar a altas pressões e a baixa temperatura. Outro facto importante e vantajoso é que o hidrogénio é libertado para operar a baixa pressão, o que o torna o método mais seguro em relação aos outros.

O que determina o tipo de hidreto a utilizar é a sua capacidade de libertar hidrogénio. Estes podem ser de alta temperatura e baixa temperatura. Os de alta temperatura são mais baratos, absorvem mais hidrogénio que os outros mas necessitam de uma grande quantidade de calor para libertar o hidrogénio.

Tal como os outros, este método ainda não apresenta um perfeito desempenho. As grandes desvantagens são o facto de conseguirem absorver uma baixa quantidade de hidrogénio em relação ao seu peso, criando assim uma baixa densidade energética.

Uma outra desvantagem deste método de armazenamento é que se deve ser utilizar apenas com hidrogénio puro, evitando assim o risco de haver contaminação de impurezas e de perderem a capacidade de armazenamento.

Passando agora para a seleção da botija de hidreto e analisando as ofertas de mercado, escolheu-se o modelo MH10 da empresa Pragma Industries, no entanto terei de considerar duas botijas de hidretos pois cada uma apenas consegue armazenar 30 Wh e como se pode ver nos cálculos acima são necessário 40 Wh.

Em baixo temos as características da botija de hidretos escolhida.

<b>Dimensões</b>	Ø 19 x 82 mm
<b>Peso</b>	112 g
<b>Capacidade armazenamento</b>	10 l
<b>Material</b>	Alumínio
<b>Pressão de carregamento</b>	1 MPa
<b>Pressão de descarga</b>	0,2 MPa (@20°C)
<b>Caudal</b>	0,1 l /min (@25°C)

*Tabela 5 - Características da botija de hidretos MH10*

Outra solução para além de ter duas botijas de hidretos MH10 seria escolher uma botija de hidretos mas do modelo acima (MH20) que já consegue armazenar 60Wh, no entanto devido ao espaço disponível que tenho para colocar o sistema esta botija de hidreto não servia. Está então assim explicada a razão da escolha das botijas de hidretos.

Segundo o fornecedor, esta botija de hidreto "armazena 30Wh que é equivalente à energia de 10 pilhas AA, para além disso é recarregada em apenas 10 minutos, sendo que esse processo pode ser realizado mais de 2000 vezes."

Por fim saliento para as dimensões da botija de hidretos metálicos escolhida, pois como se pode analisar as dimensões reais são menores do que as calculadas mais acima. Este facto é completamente compreensível pois nos cálculos não foi possível considerar o princípio de funcionamento do hidreto, ou seja o facto de os hidretos metálicos conseguirem absorver o hidrogénio (Figura 29) [17].



*Figura 29 - Hidreto MH10 da Pragma Industries [17]*

## 5.5. Recarregamento das botijas de hidretos metálicos

Quando os hidretos metálicos libertam todo o hidrogénio armazenado, é necessário voltar a carregá-los. Como tal é necessário ligar a botija de hidretos metálicos a uma garrafa de hidrogénio pressurizada ou a um sistema de eletrólise da água. Para além disso é necessário arrefecer a botija de hidretos metálicos devido à reação exotérmica que ocorre.

Para o carregamento é necessário que a pressão de entrada seja entre 10 a 20 barg, dependendo do tamanho do hidreto.

Falando agora do tempo de carregamento, podemos dizer que este é bastante mais pequeno quando comparado com uma bateria convencional, como se pode ver nas características da botija de hidretos escolhido (MH10).

A Figura 30 representa o recarregamento de uma botija de hidretos.



*Figura 30 - Imagem exemplificativa do recarregamento de uma botija de hidretos [17]*

Como se pode ver na imagem acima, o material necessário para este processo é:

- 1 x Regulador de pressão para ligar à garrafa de hidrogénio;
- 2 x Manómetros para ligar ao regulador de pressão para medirmos a pressão na garrafa de hidrogénio e a pressão à saída do regulador;
- Tubo flexível para ligar o regulador de pressão aos hidretos;
- 1 x Tabuleiro com água fria para colocar os hidretos metálicos;
- 1 x Par de luvas de proteção;
- 1 x Óculos de proteção [17].



## 5.6. Características da pilha de hidrogénio

Após uma pesquisa pelo mercado de pilhas de hidrogénio, encontrei um fornecedor português e optei por escolher um dos vários modelos disponíveis.

Como tal a pilha de hidrogénio escolhida para este projeto é o modelo 10SR4 das Soluções Racionais de Energia (SRE), como indica a Figura 31. Sendo que o fator predominante para a escolha desta pilha de hidrogénio foi a sua potência que por imposição do tema teria de ser 10 W [18].

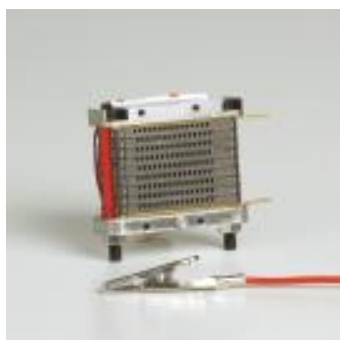


Figura 31 - Pilha de hidrogénio 10SR4 da SRE [18]

<b>Tipo</b>	Membrana de permuta protónica
<b>Combustível</b>	Hidrogénio de elevada pureza
<b>Oxidante</b>	Oxigénio
<b>Arrefecimento</b>	Ar (ventilação forçada)
<b>Ventilação</b>	Ventilador
<b>Pressão de H<sub>2</sub></b>	250 mbar relativos
<b>Temperatura de funcionamento</b>	30 a 40 °C

Tabela 6 - Especificações técnicas [18]

<b>Potência nominal</b>	10W (@2,5A)
<b>Tensão de saída</b>	3 a 7 V
<b>Densidade de potência</b>	330 mW/cm <sup>2</sup>
<b>Potência volúmica</b>	200 mW/cm <sup>3</sup>
<b>Tempo de vida útil (estimado)</b>	1000 h

Tabela 7 - Características elétricas [18]

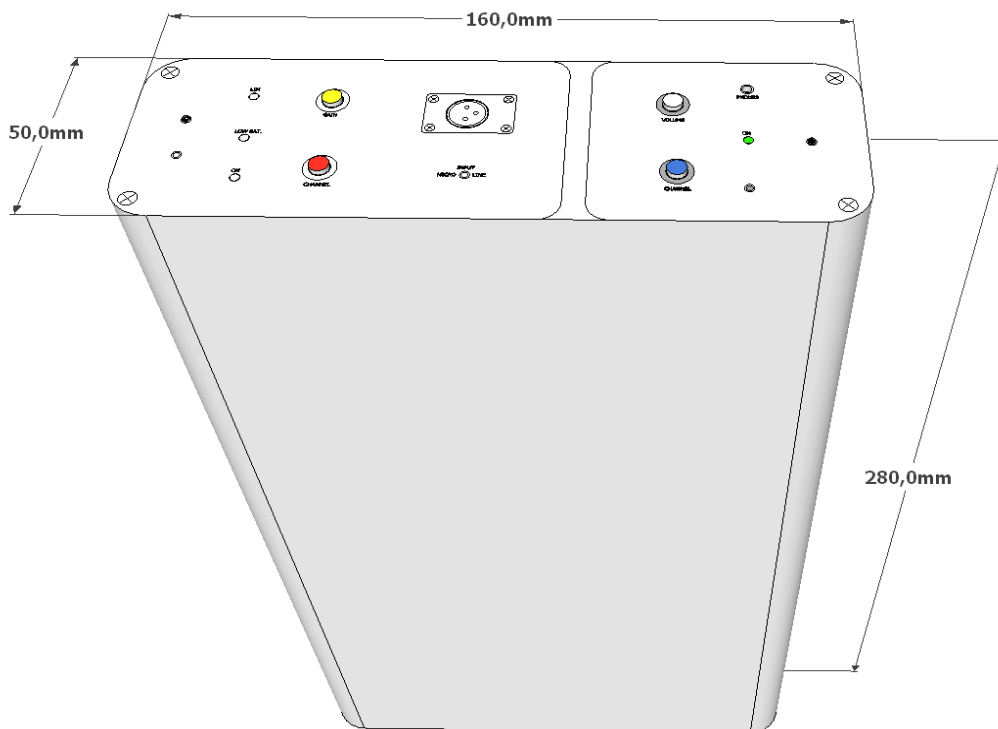
<b>Dimensões</b>	45x55x20 mm
<b>Peso</b>	132 g
<b>Condições ambientais de funcionamento</b>	Temperatura entre 5 e 40 °C

*Tabela 8 - Outras Características [18]*

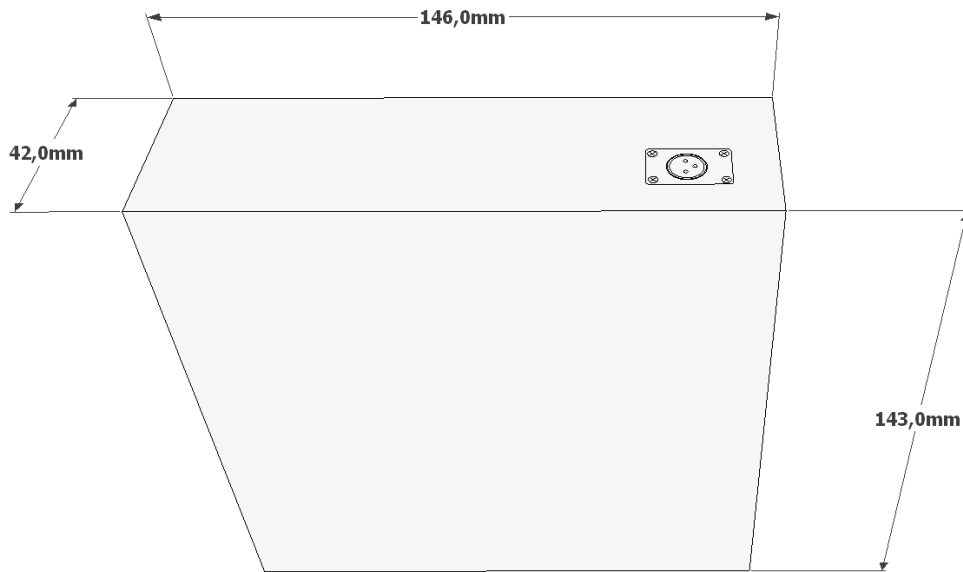
### 5.7. Modelo 3D da aplicação

Em primeiro lugar, é importante perceber-se quais os elementos necessários para o funcionamento da pilha de combustível na solução escolhida.

Começamos então pelo transmissor, as suas características já foram descritas acima no entanto falta explicar a sua constituição. O transmissor é constituído por duas partes: uma delas é onde se encontram todos os circuitos necessário para o seu funcionamento e a outra parte é a chamada "cassete" e é basicamente onde se encontravam instaladas as pilhas alcalinas convencionais (Figura 32).



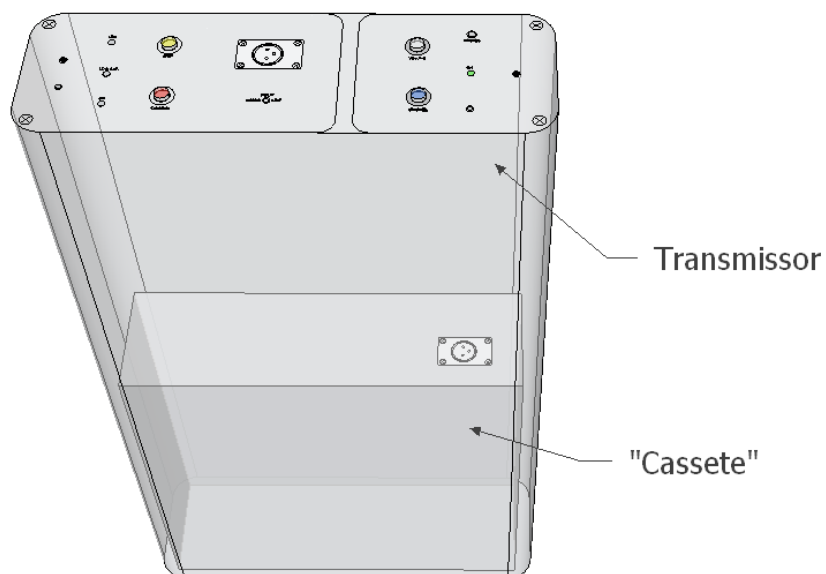
*Figura 32 - Transmissor*



*Figura 33 - "Cassete"*

Essa "cassete" tem uma ligação com a outra parte, pois caso contrário o transmissor não funcionaria. Para além disso a "cassete" é possível de se desmontar do transmissor e abrir para trocar as pilhas (Figura 33).

Na Figura 34 é possível observar-se o conjunto formado entre o transmissor e a "cassete".



*Figura 34 - Conjunto transmissor e "cassete"*

Visto que a "cassete" tem espaço no seu interior, decidiu-se colocar a pilha e os hidretos aí. Esta escolha foi feita a pensar na definição de solução portátil e como tal não o tornar mais difícil de transportar.

Nesta altura, com a pilha e os hidretos metálicos já seleccionados é altura de vermos os outros componentes necessários. Esses componentes são:

- Regulador de pressão do hidrogénio, é um redutor de pressão para 250mbar relativos;
- Electroválvula de purga de hidrogénio;
- Válvula manual de admissão de hidrogénio;
- Sistema de ventilação que assegura o fornecimento de oxigénio à pilha, ajuda ao arrefecimento da pilha de combustível e ainda ajuda a remover o excesso de água resultante das reacções químicas.

Na Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38 é possível observar-se imagens dos vários componentes descritos.



*Figura 35 - Regulador de pressão da empresa Pragma Industries [17]*



*Figura 36 - Electroválvula de purga da empresa Pragma Industries [17]*



Figura 37 - Válvula manual de admissão da empresa Pragma Industries [17]



Figura 38 - Sistema de ventilação (FP-108-S/DC S-2) [19]

<b>Voltagem</b>	5 V
<b>Caudal ar</b>	0,088 m <sup>3</sup> /min
<b>Intensidade de corrente</b>	0,20 A
<b>Potência</b>	0,60 W
<b>Velocidade rotação</b>	6000 rpm
<b>Pressão estática</b>	697 Pa

Tabela 9 - Características do sistema de ventilação (FP-108-S/DC S-2) [19]

Agora que já conhecemos todos os componentes, é altura de perceber como é que os devemos interligar, para tal temos na Figura 39.

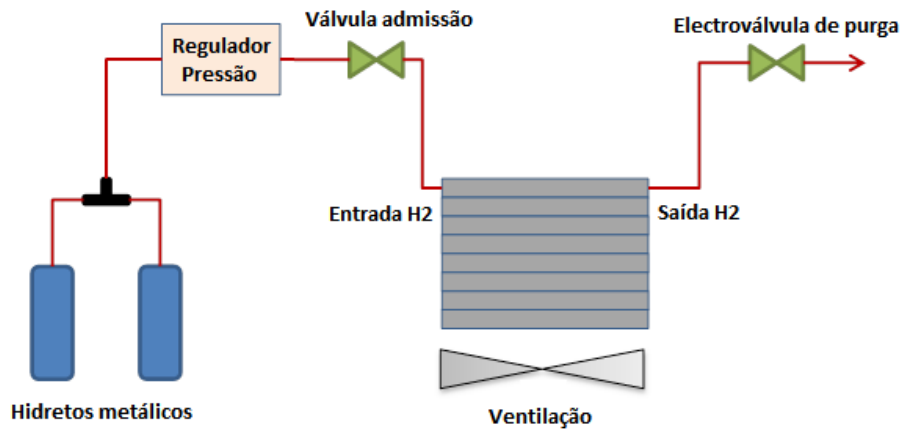


Figura 39 - Esquema de ligação dos vários componentes à pilha

Há um aspeto na figura acima que é necessário realçar, que é a posição do regulador de pressão. O regulador de pressão encontra-se antes da válvula de admissão por forma a evitar o dano da pilha de combustível, isto porque caso a válvula estivesse antes do regulador de pressão iríamos ter grandes variações de pressão na entrada do regulador (sempre que a válvula abria ou fechava). Como a pressão à saída do regulador de pressão demora algum tempo a estabilizar poderíamos ter altas pressões na sua saída e consequentemente na entrada da pilha, ora isso poderia danificar a pilha de hidrogénio. Na Figura 40 e na Figura 41 é possível ver a ligação dos vários componentes em 3D.

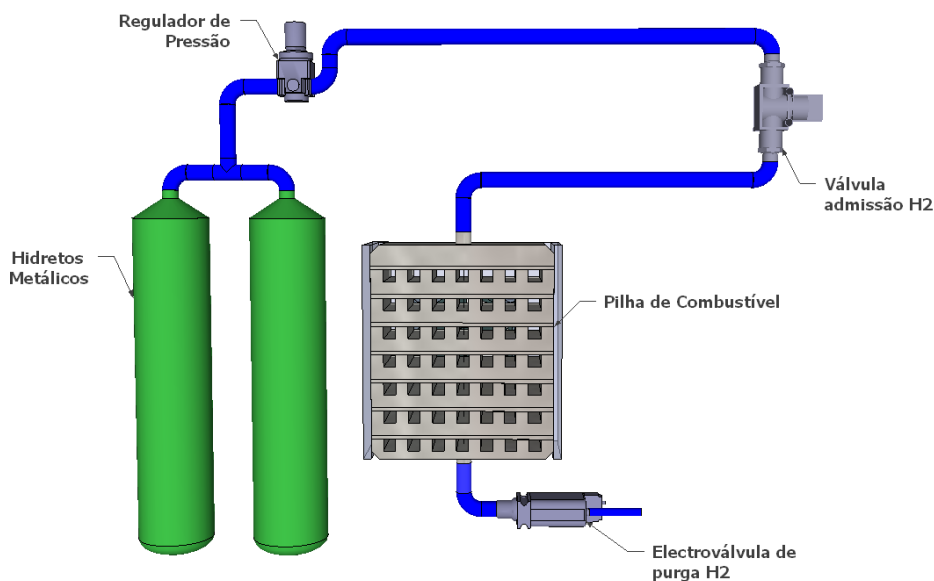


Figura 40 - Esquema de ligação 3D dos vários componentes (vista frontal)

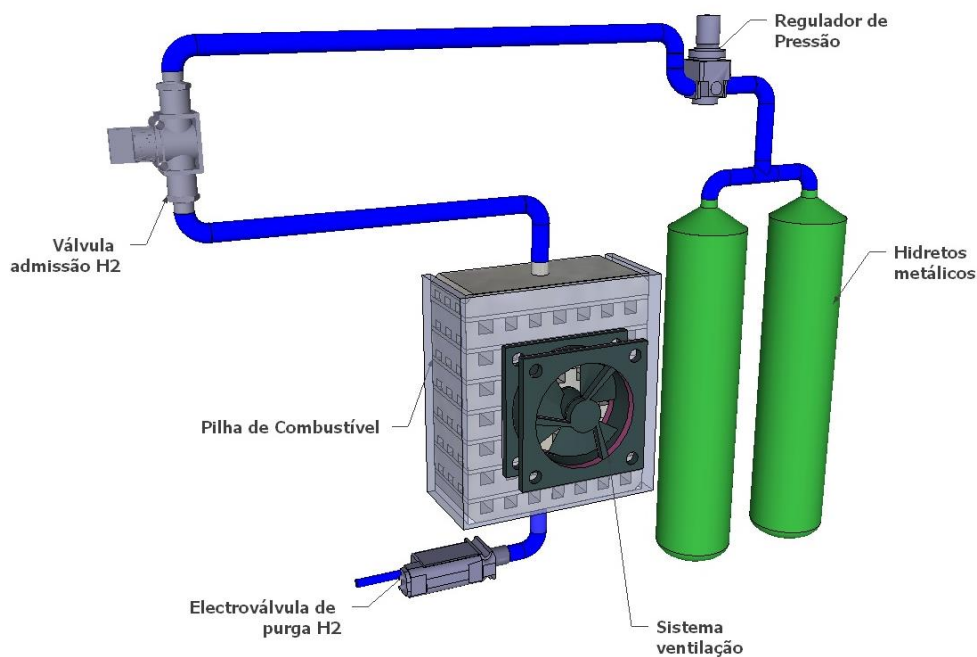


Figura 41 - Esquema de ligação 3D dos vários componentes (vista posterior)

No esquema de ligação teve-se em atenção o espaço disponível do interior da “cassete”, deixando apenas a válvula manual de admissão de hidrogénio da parte de fora por forma a facilitar a sua abertura ou fecho por parte do utilizador.

Na Figura 42 e na Figura 43 pode-se observar os vários componentes representados na figura acima inseridos na “cassete”.

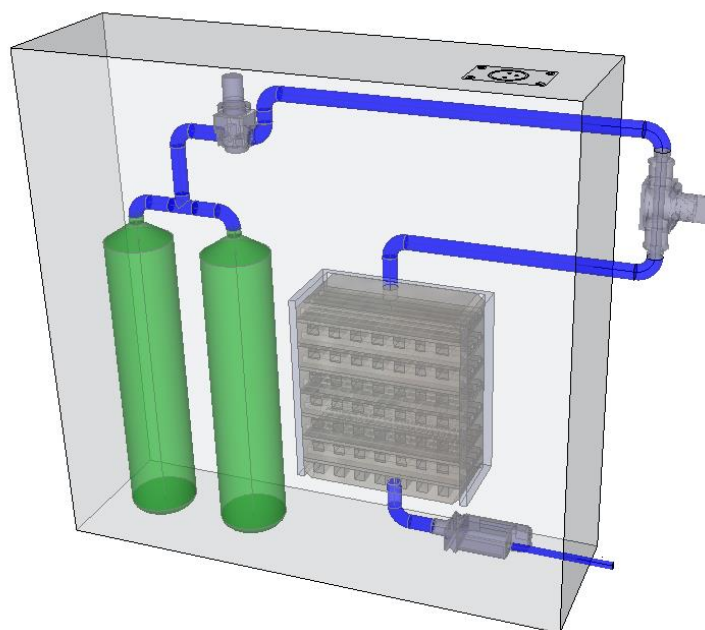
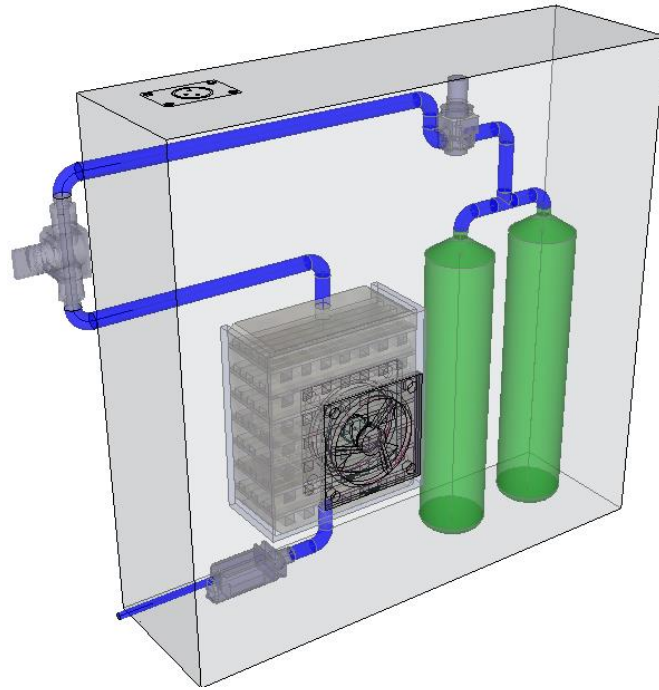
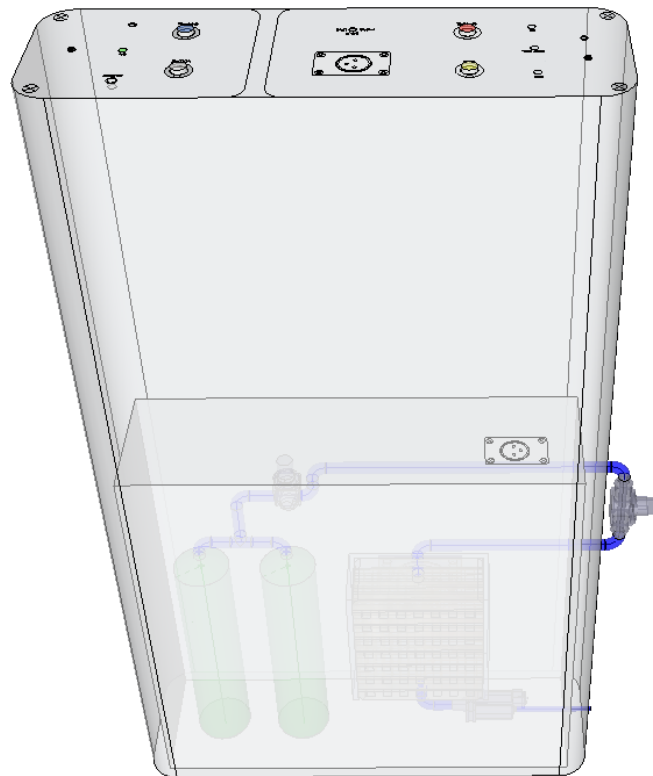


Figura 42 - Esquema 3D do conjunto "cassete" e dos vários componentes (vista frontal)



*Figura 43 - Esquema 3D do conjunto "cassete" e dos vários componentes (vista posterior)*

Por fim podemos ver na Figura 44 o modelo completo.



*Figura 44 - Esquema 3D completo (vista interior)*



A forma de transportar o transmissor é dentro de uma capa com alça para que o utilizador possa colocar a tiracolo.

Existe no entanto um fator importante nesta solução que é necessário verificar, ou seja, o peso da aplicação. Na tabela abaixo temos o resumo dos pesos:

<b>Item</b>	<b>Peso Parcial</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Peso Total</b>
Hidreto	112 g/un	2	224 g
Pilha combustível	132 g	1	132 g
		<b>TOTAL</b>	<b>356 g</b>

*Tabela 10 - Pesos da solução proposta*

<b>Item</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Peso Total</b>
Pilhas alcalinas	10	<b>700 g</b>

*Tabela 11 - Peso da aplicação inicial*

Como se pode ver pelas tabelas acima, a solução proposta com a pilha de combustível é mais leve do que a aplicação inicial com as pilhas alcalinas. Estes valores são apenas estimados para que se perceba que a aplicação não deixa de ser portátil com a troca das pilhas convencionais.

### **5.8. Comparação de custos**

Neste ponto irá ser dada uma ideia dos custos que estão associados a esta pilha de combustível em questão.

<b>Material</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Preço un.</b>	<b>Preço Total</b>
Pilha de combustível	1	280 €	280 €
Hidretos metálicos	2	135 €	270 €
Válvula admissão manual	1	25 €	25 €
Válvula de purga H2	1	55 €	55 €
Redutor de pressão H2	1	98 €	98 €
Kit de recarga	1	458 €	458 €

*Tabela 12 - Custo associados à aquisição da pilha de combustível*

Pela tabela de cima é possível analisar-se os custos associados à aquisição de uma pilha de combustível. Em termos gerais essa aquisição teria um custo de aproximadamente 1200 €. De salientar que os valores foram dados por empresas no mercado e servem apenas para dar uma ideia do valor.

<b>Material</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Preço Un.</b>	<b>Preço Total</b>
Pilha IEC-LR14	10	1,495 €	14,95 €

*Tabela 13 - Custo associado à aquisição de pilhas alcalinas*

Na tabela acima podemos observar o custo associado à aquisição das pilhas alcalinas e este seria de aproximadamente 15 €, o preço unitário das pilhas foi visto no mercado.

Numa primeira abordagem podemos chegar à conclusão que a aquisição da pilha de combustível é bastante mais cara que as pilhas alcalinas convencionais.

No entanto existem outros aspetos que temos de ter em conta nesta comparação, sendo que um deles é a autonomia de cada uma das soluções. No caso das pilhas após as 4h de funcionamento normal do transmissor estas terão de ser substituídas para que não haja falha de energia no próximo funcionamento do transmissor. Quanto à pilha de combustível esta não terá de ser substituída no entanto é necessário fornecer mais hidrogénio para que ela funcione durante o tempo pretendido.

Após uma pesquisa no mercado, foi possível concluir que em média as garrafas de hidrogénio puro têm 8,9 m<sup>3</sup> que equivale 50 L a pressão de 200 bar. Falta então saber quanto é que necessitamos para encher a botija de hidretos.

Através da Equação 13 da Linde é possível saber esse valor:

$$V = \frac{P \cdot C}{1000} \times 1,2 \quad (13)$$

V – Volume [m<sup>3</sup>]

P – Pressão [bar]

C – Capacidade [l]

1,2 – Coeficiente de segurança

$$V = \frac{10 \cdot 10}{1000} \cdot 1,2 = 0,12 \text{ m}^3$$

Como se pode ver, cada botija de hidretos terá armazenados 0,12 m<sup>3</sup>, como este sistema é composto por duas botijas iremos precisar de 0,24 m<sup>3</sup> de hidrogénio por cada vez que se faça a recarga.

Sabendo que as garrafas de hidrogénio puro têm 8,9 m<sup>3</sup>, temos então:

$$N^{\circ} \text{ recargas} = \frac{8,9}{0,24} = 37$$

Com estes valores é agora possível fazer uma comparação de custos entre as duas opções. Saliento que os valores foram dados por fornecedores neste mercado e são apenas indicativos dos valores em questão.

Item	Preço
Garrafa de hidrogénio puro	105,02 €
Taxa ambiental	1,20 €
Portes	19,30 €
Aluguer 1 ano	100 €
<b>TOTAL</b>	<b>225,70 €</b>

*Tabela 14 - Custo da garrafa de hidrogénio puro*

Passamos agora para a comparação de custos entre as pilhas convencionais e as pilhas de hidrogénio:

Condição	Custo pilha de hidrogénio	Custo hidrogénio	Total pilha hidrogénio	Custo pilhas convencionais	Diferença
37 Recargas	1.200,00 €	225,70 €	1.425,70 €	553,15 €	872,55 €
+37 Recargas	0	225,70 €	1.651,40 €	1.106,30 €	545,10 €
+37 Recargas	0	225,70 €	1.877,10 €	1.659,45 €	217,65 €
+37 Recargas	0	225,70 €	2.102,80 €	2.212,60 €	-109,80 €
+37 Recargas	0	225,70 €	2.328,50 €	2.765,75 €	-437,25 €

*Tabela 15 - Comparação de custos entre pilhas convencionais e a pilha de hidrogénio*

A tabela acima foi calculada com base no pressuposto de que a cada reportagem as pilhas convencionais são todas trocadas e as duas botijas de hidretos são recarregadas.

Como tal podemos ver que nas primeiras 37 recargas, o custo da pilha de hidrogénio é bastante maior (cerca de 872,55 €) visto que temos de considerar o valor de compra da pilha e as recargas.

O mesmo já não acontece nas 37 recargas a seguir pois deixamos de ter o custo da pilha e passamos a ter só o custo da recarga, como tal a diferença de custo entre as duas soluções já é mais baixo.

No entanto temos um ponto em que o custo da pilha de hidrogénio torna-se mais baixo que o das pilhas convencionais. Como tal podemos concluir que acima de 148 recargas as pilhas de hidrogénio são mais económicas que as pilhas convencionais, sem esquecer dos pressuposto considerados para este exemplo em questão.

## 6. Simulação em Matlab da pilha de hidrogénio

### 6.1. Introdução

Com o programa Matlab simulou-se a pilha de hidrogénio utilizada, por forma a se obter as suas curvas características e retirar-se daí algumas conclusões. No entanto em primeiro lugar vamos começar por alguns conceitos essenciais.

O rendimento da pilha de hidrogénio não é de 100 % pois o processo origina várias perdas irreversíveis, normalmente relacionadas com a polarização e a sobretensão porém apenas as perdas ohmicas se comportam como perdas resistivas. Uma curva típica de polarização tem três zonas distintas: zona de ativação, zona ohmica e a zona de transporte de massa, que estão inteiramente relacionadas com as várias perdas que a pilha sofre (Figura 45).

Passamos então a explicar os fenómenos que causam essas perdas irreversíveis:

- Perdas relacionadas com ativação - há uma queda da tensão de ativação devido às reações químicas no elétrodo serem lentas. Essa perda pode ser maior ou menor consoante a temperatura e pressão de operação, o tipo de elétrodo e o tipo de catalisador utilizado (zona ativação).
- Perdas ohmicas - são causadas pela resistência iónica no eletrólito e nos eléttodos, pela resistência eletrónica nos eléttodos, pelos coletores de corrente e ligações e pelas resistências de contacto. Estas perdas são proporcionais à densidade de corrente e dependem do tipo de material, da geometria da pilha e da temperatura (zona ohmica).
- Perdas relacionadas com o transporte de massa - resultam das variações na concentração dos reagentes enquanto o combustível é utilizado e dependem da densidade de corrente, da atividade do reagente e da estrutura dos eléttodos (zona transporte de massa) [6].

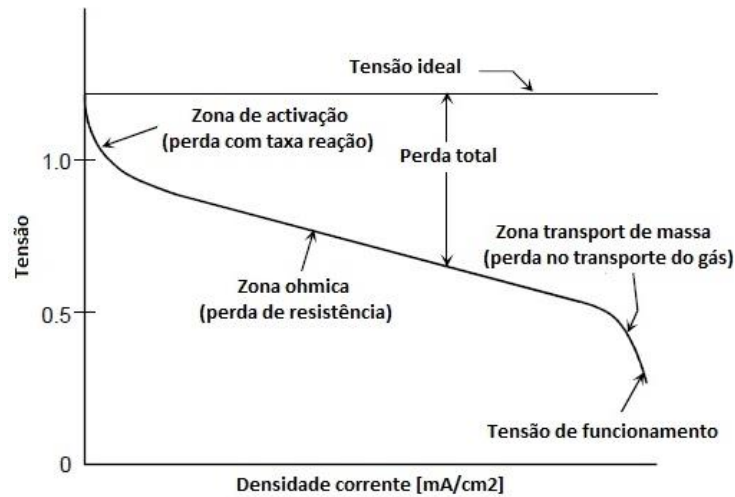


Figura 45 - Curva típica de polarização [6]

A distinção das três zonas na curva de polarização é mais fácil para pilhas com baixa temperatura de funcionamento. Isto porque nas pilhas com alta temperatura de funcionamento as perdas relacionadas com a ativação são menos significantes, de tal forma que naquela zona a curva deixa de ser tão acentuada tornando mais difícil a distinção entre essa zona e a zona ohmica. Por outro lado, as perdas relacionadas com o transporte de massa ganham maior relevância fazendo com que a curva nessa zona se estenda mais para a esquerda.

Desta forma é possível afirmar que o desempenho da pilha de combustível depende de vários fatores tais como:

- Densidade de corrente elétrica;
- Temperatura;
- Pressão;
- Composição do gás;
- Design da pilha;
- Outros.

Com uma densidade de corrente elétrica alta começa-se a notar uma baixa capacidade de difusão do reagente para os locais onde se dão as reações, daí resulta uma diminuição do desempenho da pilha devido à falta de reagente [6].

As perdas ohmicas são predominantes no normal funcionamento de uma pilha. Estas perdas podem ser expressas pela seguinte expressão:

$$Perdas_{ohmicas} = I.R \quad (14)$$

I – Intensidade de Corrente [A]

R – somatório das resistências internas da pilha [ $\Omega$ ]

Através da expressão é fácil perceber-se que as perdas ohmicas dependem diretamente da corrente, ou seja, dependem diretamente da densidade de corrente [6].

$$I = J.S \quad (15)$$

I – Intensidade de corrente [A]

J – Densidade de corrente [ $A/m^2$ ]

S – Área [ $m^2$ ]

Relativamente à temperatura, esta tem influência principalmente em dois fatores:

- Taxa de eficiência das reações no eletrodo;
- Perdas ohmicas.

Relativamente ao primeiro fator, sabe-se que as perdas diminuem exponencialmente com o aumento da temperatura. Quanto maior for a energia de ativação, maior serão as perdas e como tal maior impacto terá a temperatura.

Falando agora no segundo fator, como já se referiu essas perdas são causadas pela resistência interna na pilha e como tal essas perdas dependem do tipo de material. Caso o material seja metal a resistência interna aumenta com a temperatura, caso seja um material cerâmico eletricamente condutor a resistência interna diminui exponencialmente. Outro fator importante já referido no caso das pilhas PEM/PEFC é a membrana de permuta, pois as altas temperaturas podem provocar a sua desidratação e consequentemente perda de condutividade.

Relativamente à pressão, esta tem influência em vários fatores:

- Solubilidade do gás e a taxa de transferência de massa aumentam com o aumento da pressão de funcionamento, que se traduz numa vantagem;
- Perdas de evaporação no eletrólito diminuem com altas pressões de funcionamento;
- Aumento de pressão tende a aumentar a eficiência do sistema;

As vantagens que o aumento de pressão traz têm de ser bem medidas, pois nem tudo são vantagens e esse aumento pode trazer problemas nos materiais.

Tanto a utilização do reagente como a composição do gás têm grande influência na eficiência da pilha de combustível [6].

A utilização (U) é dada pelo total de combustível ou oxidante introduzido na pilha de combustível que reage electroquimicamente. Nas pilhas PEM/PEFC em que o combustível é hidrogénio é bastante simples calcular a utilização pois apenas existe um reagente, desta forma temos [6]:

$$U = \frac{\text{Hidrogénio consumido}}{\text{Hidrogénio introduzido}} \quad (16)$$

U – Utilização [%]

No entanto o hidrogénio pode ser consumido de várias formas: através de reações química com o oxigénio e os componentes da pilha ou então através de possíveis fugas. Estas formas de consumo do hidrogénio fazem com que o valor da utilização (U) passe uma ideia errada, pois parte dessa parcela não contribui para a produção elétrica da pilha.

A composição do gás não se mantém constante em todo o processo, devido às reações eletroquímicas que conduzem a uma redução da tensão da pilha [6].



## 6.2. Simulação Matlab

Este simulador tem um modelo de uma pilha de combustível que representa o tipo de pilha alimentada por hidrogénio e ar. O modelo representa uma pilha de combustível a hidrogénio, em que é possível alterar alguns parâmetros tais como a pressão, temperatura, caudal de combustível, caudal de ar, entre outros. Abaixo temos o circuito considerado neste modelo e alterado de acordo com as necessidades da aplicação (Figura 46).

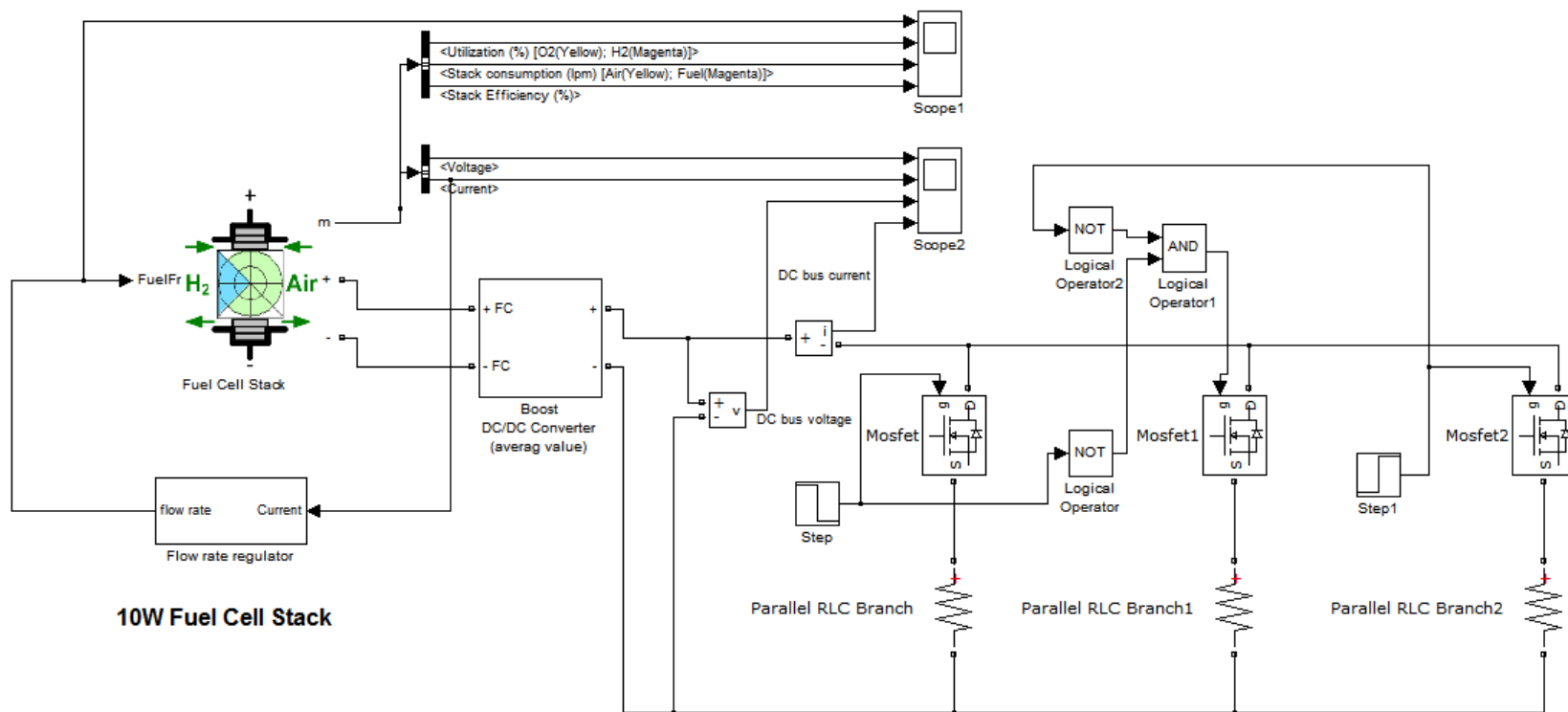


Figura 46 - Esquema do modelo matlab

Segue abaixo a descrição do esquema da figura anterior. Começamos então pela parte principal – a pilha de combustível.

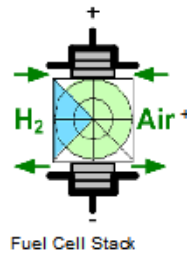


Figura 47 - Bloco representativo da pilha de combustível [20]

Na Figura 47 é possível ver o bloco que representa a pilha de combustível, será através desse bloco que iremos introduzir as características da pilha escolhida e referida acima.

Fuel Cell Stack (mask) (link)

Implements a generic hydrogen fuel cell model which allows the simulation for the following types of cells:

- Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)
- Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
- Alkaline Fuel Cell (AFC)

Parameters | Signal variation | Fuel Cell Dynamics

Preset model: No (User-Defined)

Model detail Level: Detailed

Voltage at 0A and 1A [V<sub>0</sub>(V), V<sub>1</sub>(V)]

[7.8 5.8]

Nominal operating point [Inom(A), Vnom(V)]

[2 5]

Maximum operating point [Iend(A), Vend(V)]

[4.5 3.1]

Number of cells

8

Nominal stack efficiency (%)

49

Operating temperature (Celsius)

65

Nominal Air flow rate (lpm)

2

Nominal supply pressure [Fuel (bar), Air (bar)]

[1.25 1]

Nominal composition (%) [H2 O2 H2O(Air)]

[99.95 21 1]

Figura 48 - Características da pilha introduzidas no modelo [20]

Estas características foram retiradas da curva característica da pilha escolhida e das suas características (Figura 48).

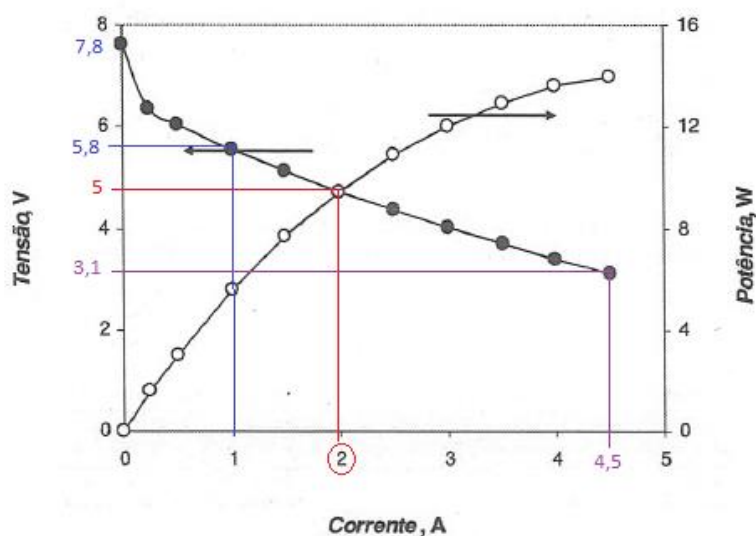


Figura 49 - Curva característica da pilha de combustível da SRE

Através da curva característica da Figura 49 é possível tirar informação para preencher as três primeiras linhas no bloco da pilha de combustível da Figura 48. A informação pode ser distinguida através das cores nas figuras.

O rendimento da pilha foi um valor estimado baseado na informação recolhida relativamente a esse aspeto.

O número de células foi calculado através da equação abaixo [20]:

$$N = \frac{2.96485 \cdot V_{nom}}{241,83 \cdot 10^3 \cdot \eta_{nom}} \quad (17)$$

N – Número de células

$V_{nom}$  – Tensão nominal [V]

$\eta_{nom}$  – Rendimento nominal [%]

De acordo com os valores já conhecidos, temos:

$$N = \frac{2.96485 \cdot 5}{241,83 \cdot 10^3 \cdot 0,49} \sim 8 \text{ células}$$

Relativamente à pressão do combustível, sabemos que temos uma pressão relativa de 250 mbar (controlada pelo regulador de pressão), o que se traduz numa pressão absoluta de 1,25 bar.

Após colocar todos os valores no bloco referido é possível ter-se a curva característica da pilha e as suas características.

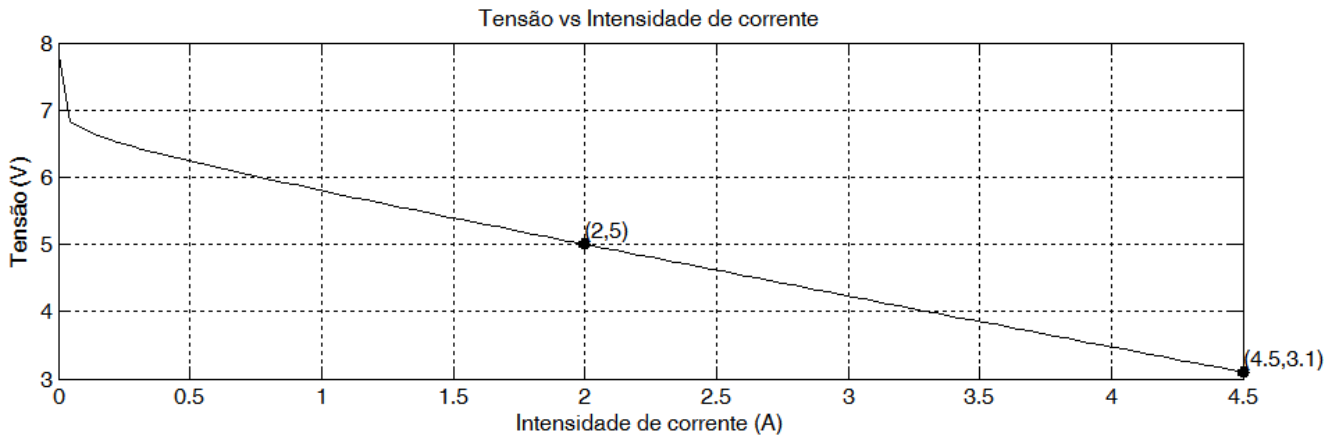


Figura 50 - Potência em função da intensidade de corrente

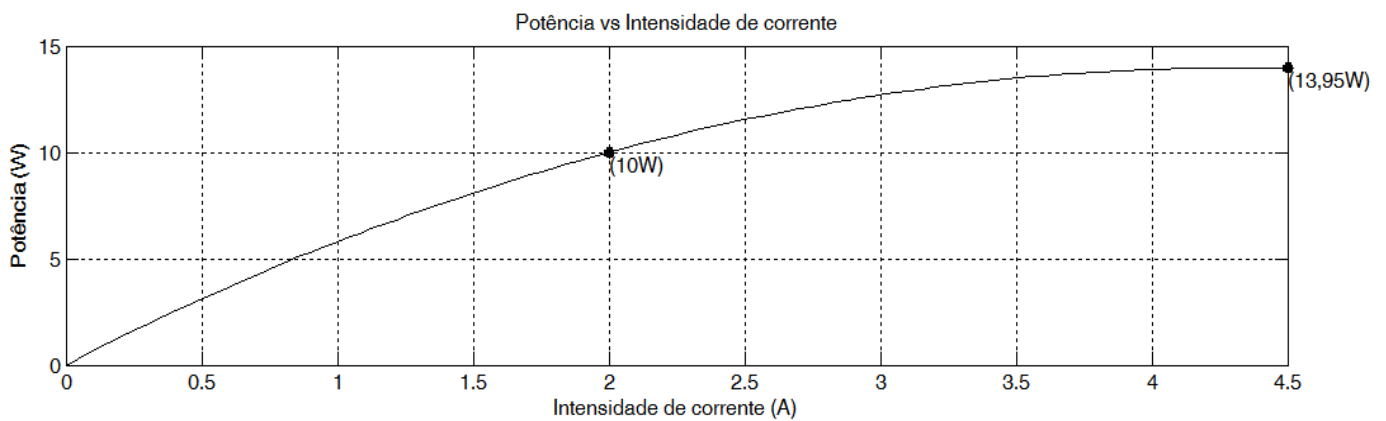


Figura 51 – Tensão em função da intensidade de corrente

Como se pode observar pela Figura 50 e Figura 51 podemos confirmar que os valores introduzidos no bloco referido estão corretos pois as curvas estão similares às representadas na Figura 49.

Na Figura 52 é possível observar-se os parâmetros da pilha que iremos simular.

```
Fuel cell nominal parameters:
Stack Power:
-Nominal = 10 W
-Maximal = 13.95 W
Fuel Cell Resistance = 0.72482 ohms
Nerst voltage of one cell [En] = 1.1515 V
Nominal Utilization:
-Hydrogen (H2)= 98.25 %
-Oxidant (O2)= 16.43 %
Nominal Consumption:
-Fuel = 0.1115 slpm
-Air = 0.2653 slpm
Exchange current [j0] = 7.839e-06 A
Exchange coefficient [alpha] = 1.0741

Fuel cell signal variation parameters:
Fuel composition [x_H2] = 99.95 %
Oxidant composition [y_O2] = 21 %
Fuel flow rate [FuelFr] at nominal Hydrogen utilization:
-Nominal = 0.1124 lpm
-Maximum = 0.2529 lpm
Air flow rate [AirFr] at nominal Oxidant utilization:
-Nominal = 2 lpm
-Maximum = 4.5 lpm
System Temperature [T] = 338 Kelvin
Fuel supply pressure [PFuel] = 1.25 bar
Air supply pressure [PAir] = 1 bar
```

Figura 52 - Parâmetros da Pilha [20]

Passamos agora para o bloco representativo do regulador de caudal representado na Figura 53.

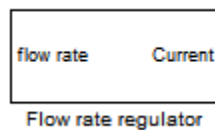


Figura 53 - Bloco representativo do regulador de caudal [20]

Subsystem (mask)	
Parameters	
Number of cells	<input type="text" value="8"/>
Nominal Hydrogen utilization (%)	<input type="text" value="99.56"/>
Operating temperature (Celsius)	<input type="text" value="65"/>
Fuel pressure (bar)	<input type="text" value="1.25"/>
H2 composition (%)	<input type="text" value="99.95"/>

Figura 54 - Parâmetros a introduzir no bloco regulador de caudal [20]

Na Figura 54 é possível observar-se os parâmetros a introduzir no bloco do regulador de caudal. Como se pode reparar estes dados são iguais aos já anteriormente introduzidos no bloco da pilha.

Passamos agora para o bloco representativo do conversor DC/DC representado na Figura 55.

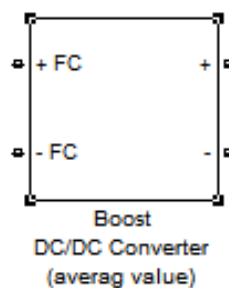


Figura 55 - Bloco representativo do conversor DC/DC [20]

O bloco no seu interior tem o circuito representado na Figura 56.

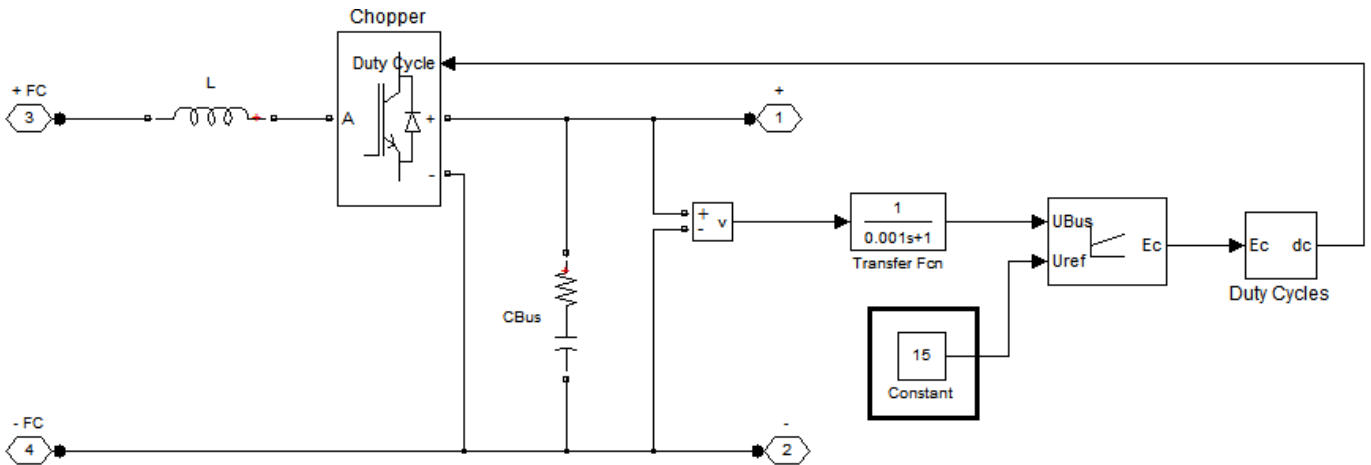


Figura 56 - Circuito inserido no bloco conversor DC/DC [20]

A função do conversor DC/DC é regular e manter a tensão para que a tensão DC do barramento seja igual á tensão de referência, que neste caso é 15 V (valor designado como “Uref” no circuito acima).

Essa tensão referência foi retirada das características do transmissor, visto que a alimentação do transmissor é feita através de 10 pilhas de 1,5 V de tensão, temos então aí a nossa tensão referência.

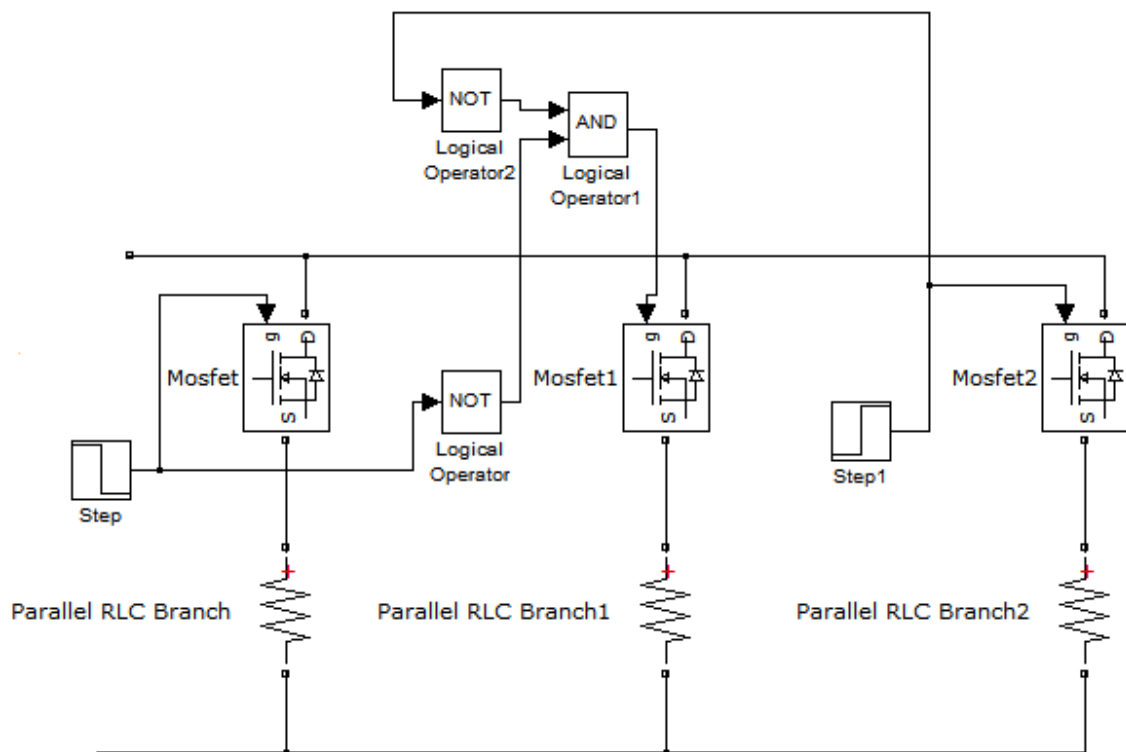


Figura 57 - Blocos representativos da variação de carga

O último bloco do simulador representa a variação de carga da pilha (Figura 57). Para que a simulação fosse o mais parecida a uma situação real acrescentou-se o circuito acima composto por três resistências distintas com valores diferentes de modo a criar a tal variação de carga.

Para começar calculou-se o valor da resistência para a pilha a funcionar a plena carga, ou seja, a situação normal de funcionamento. Através das características do transmissor e já anteriormente referidas, sabemos que temos uma tensão de 15 V e uma intensidade de corrente de 600 mA. Com estes dados é possível calcular a resistência através da razão entre a tensão e a intensidade de corrente.

$$R = \frac{U}{I} \quad (18)$$

R – Resistência [ $\Omega$ ]

U – Tensão [V]

I – Intensidade de corrente [A]

Após o cálculo obteve-se uma resistência de 25  $\Omega$ , valor esse que foi introduzido na resistência 1 como se pode ver na Figura 58.

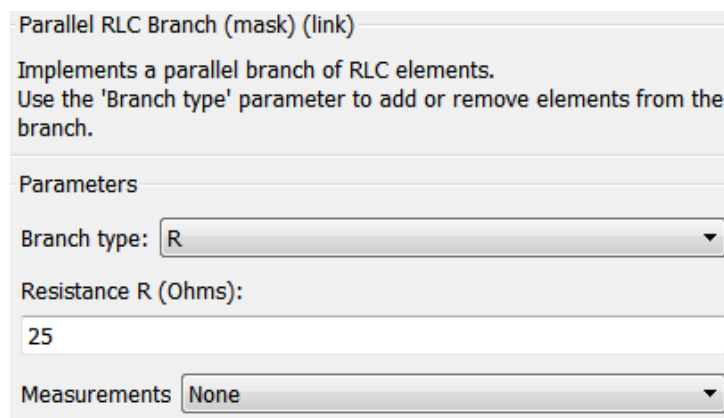
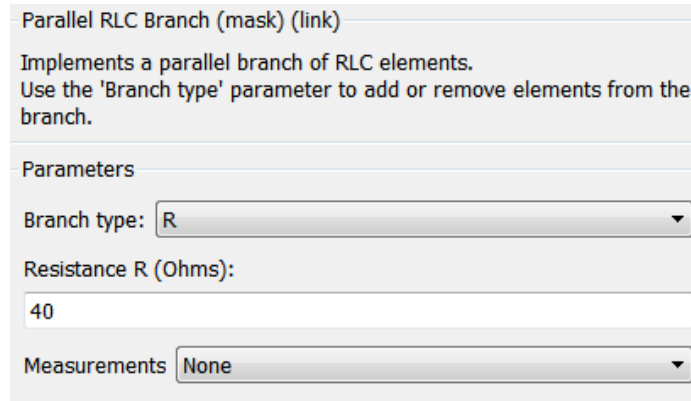


Figura 58 - Valor da resistência 1 [20]

Passemos então para a resistência 0, esta resistência foi colocada no circuito com o intuito de simular o arranque progressivo da pilha até estabilizar e ficar a funcionar a 100%. É por essa razão que essa resistência se encontra antes da resistência 1.

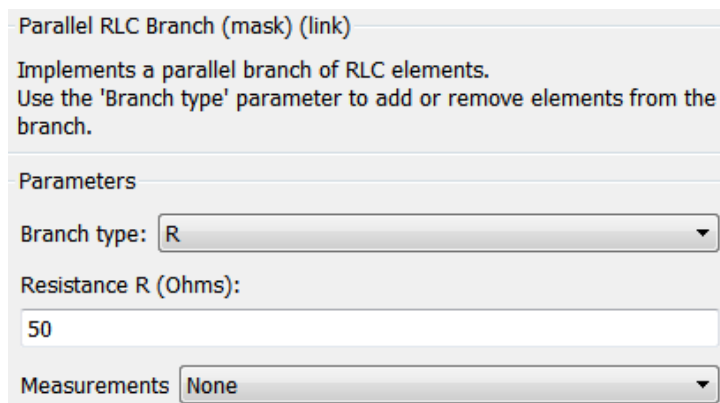


Para o valor da resistência usou-se um valor aleatório superior aos 25  $\Omega$  colocados na resistência 1, isto para que a intensidade de corrente seja inferior aos 600 mA. Na Figura 59 podemos ver o valor escolhido.



*Figura 59 - Valor da resistência 0 [20]*

Por fim temos a resistência 2, esta resistência foi colocada no circuito de forma a simular uma perda de carga proveniente da falta de combustível. Para tal na resistência 2 colocou-se uma resistência mais elevada que a da resistência 1, como podemos ver na Figura 60.



*Figura 60 - Valor da resistência 2 [20]*

É importante referir que cada variação de carga acontece passado 0,3 segundos.

Assim acabamos a explicação do circuito na base do simulador. É agora altura de fazer a simulação e apresentar os resultados.

O tempo de simulação considerado foi de 1segundo, tempo suficiente para se tirar conclusões.

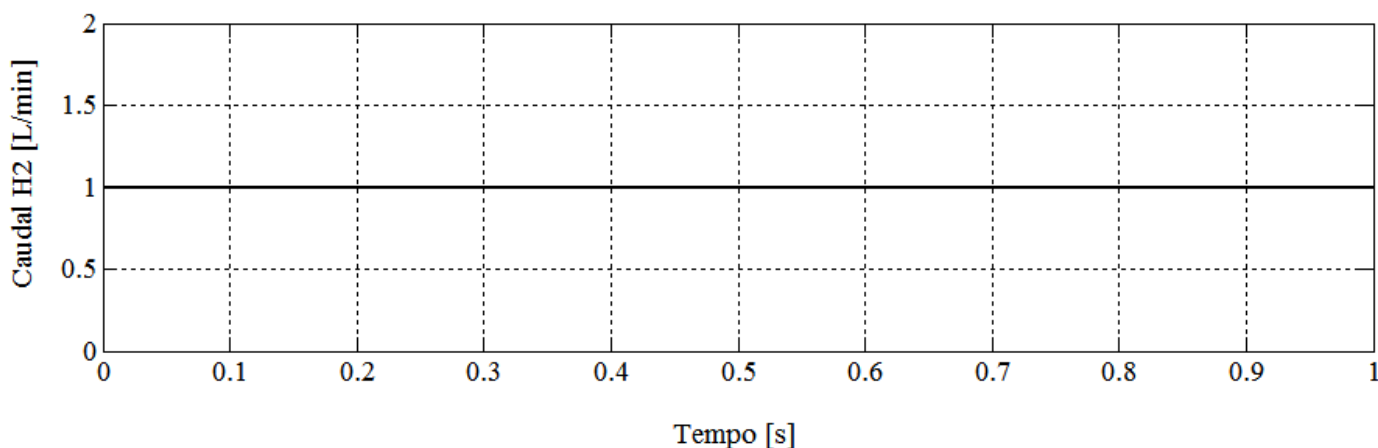


Figura 61 – Variação do caudal de combustível no tempo

Na Figura 61 é possível observar-se a variação do caudal de combustível no tempo e como se esperava este mantém-se constante no entanto nas figuras a seguir é possível concluir-se que nem todo o caudal de combustível é consumido pois vai variar com as cargas aplicadas na pilha.

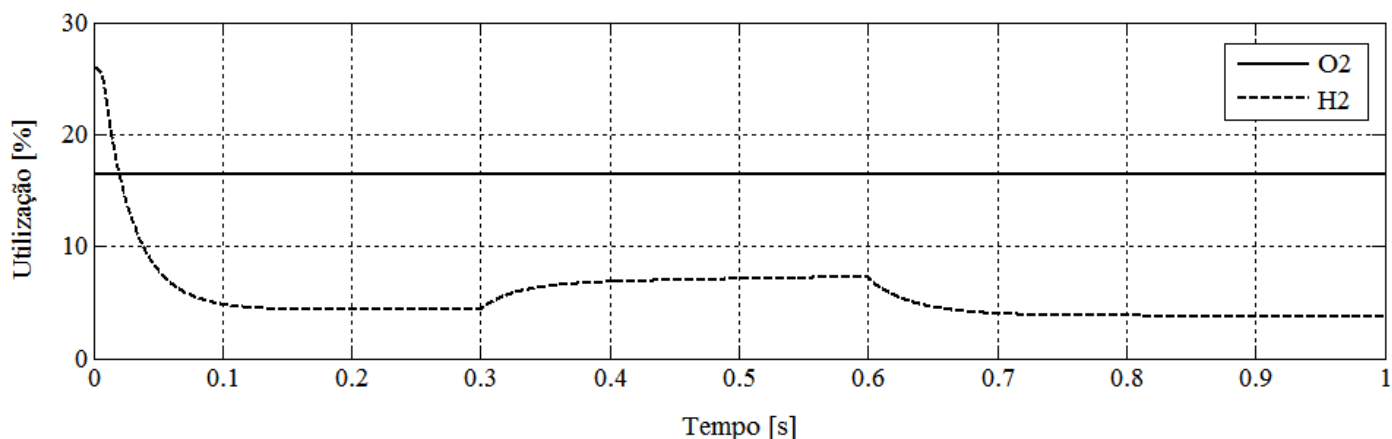


Figura 62 - Variação da utilização no tempo

Na Figura 62 é possível observar-se a variação da utilização do oxigénio e hidrogénio em função do tempo de funcionamento da pilha.

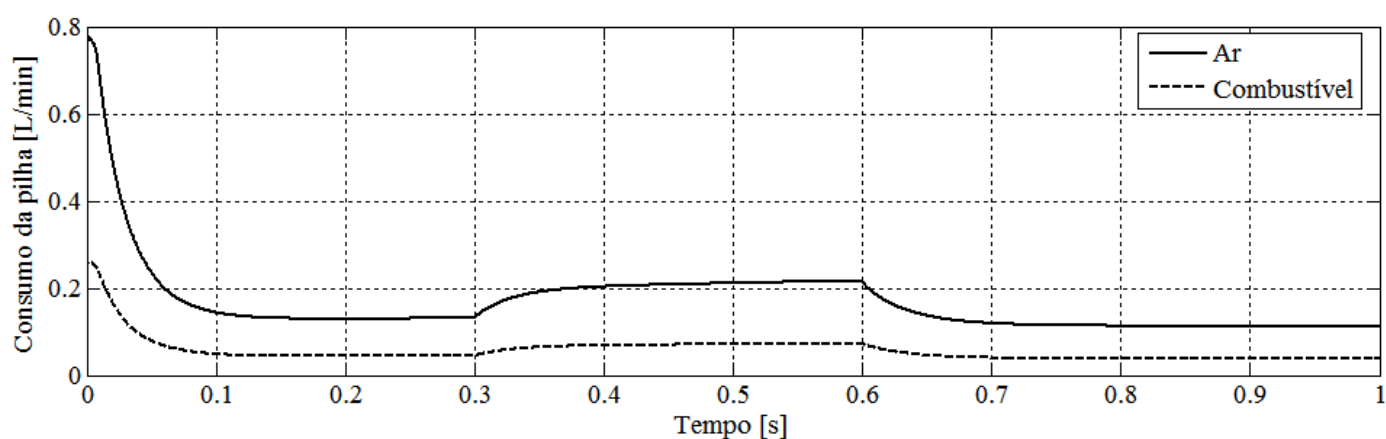
Apenas para relembrar a utilização é a razão entre o combustível consumido e o combustível introduzido.

Como se esperava nos segundos iniciais há uma grande utilização de hidrogénio devido às instabilidades da pilha, no entanto acaba por estabilizar. Até que aos 0,3 s essa

utilização volta a variar devido à variação de carga colocada propositadamente na pilha de forma a simular o seu funcionamento a 100%, como a utilização aumenta para o seu valor máximo.

Passado 0,3 s a utilização do hidrogénio volta novamente a variar propositadamente, de forma a simular a falta de combustível e então a utilização baixa.

Relativamente à utilização do oxigénio esta mantém-se constante, pois este gás é proveniente do ar que entra na pilha e que não varia com a carga da pilha.

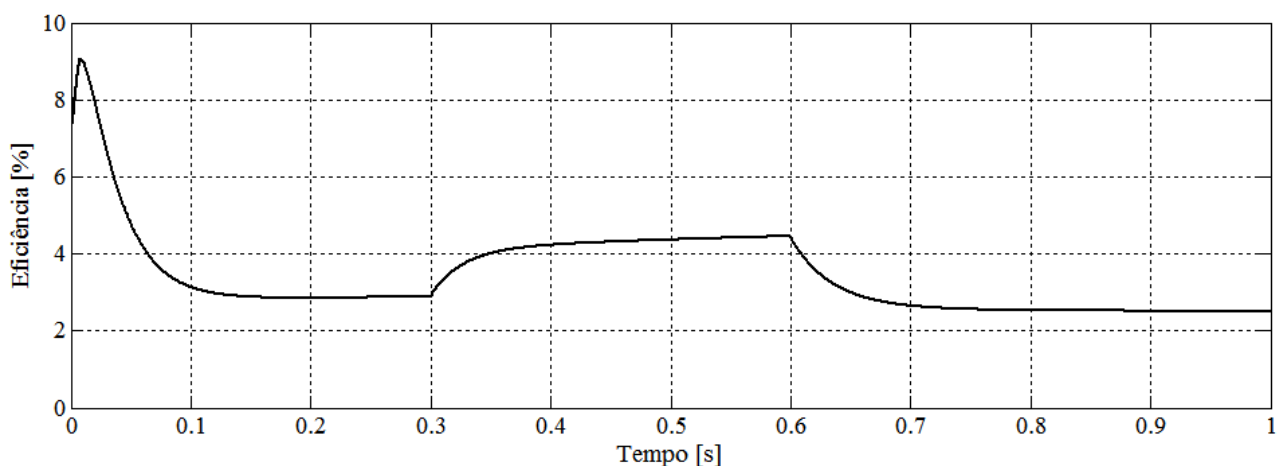


*Figura 63 – Variação do consumo da pilha no tempo*

Na Figura 63 podemos observar agora a variação do consumo de ar e de combustível em função do tempo.

A explicação do gráfico acima para o consumo de combustível é semelhante ao do gráfico anterior, pois à medida que a carga vai aumentando o consumo também aumenta.

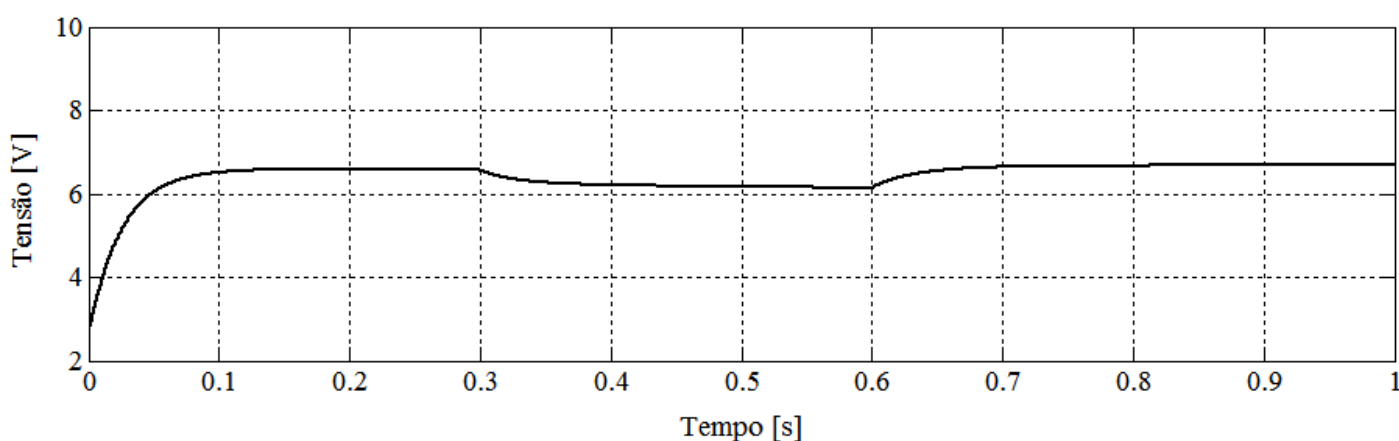
No entanto para o ar a explicação já não é semelhante, pois o consumo já não é constante como a utilização. Isto porque a pilha apenas consome o ar necessário para a reação com o hidrogénio, como tal o consumo de ar comporta-se da mesma maneira que o consumo de combustível.



*Figura 64 - Variação da eficiência da pilha no tempo*

Na Figura 64 podemos observar a eficiência da pilha em função do tempo. Neste aspecto os valores não correspondem ao real, visto o rendimento de uma pilha é da ordem dos 40%. No entanto este gráfico serve para verificar o andamento da eficiência com as diferentes cargas impostas à pilha.

Temos no início uma eficiência maior até a pilha estabilizar, passados 0,3 s a eficiência aumenta para o seu valor máximo visto estar em plena carga. Passados outros 0,3 s começa a diminuir devido à falta de combustível.



*Figura 65 - Variação da tensão no tempo*

Na Figura 65 podemos observar a tensão de saída da pilha em função do tempo. No início, como já foi explicado, temos uma variação da tensão devido às instabilidades. A partir de 0,1 s a tensão mantém-se constante no regime que foi considerado como o

arranque da pilha de combustível. Aos 0,3 s a tensão desce até um certo valor, isto deve-se ao facto de a intensidade de corrente ter aumentado representando o funcionamento da pilha a 100% (Equação 18).

Por fim aos 0,6s temos um aumento de tensão devido à diminuição da intensidade de corrente representativa, por exemplo, da falta de combustível.

Relativamente aos valores, podemos concluir que estão dentro do que se esperava visto que as características da pilha escolhida indicam que a tensão de saída é de 3 a 7 V (Tabela 7).

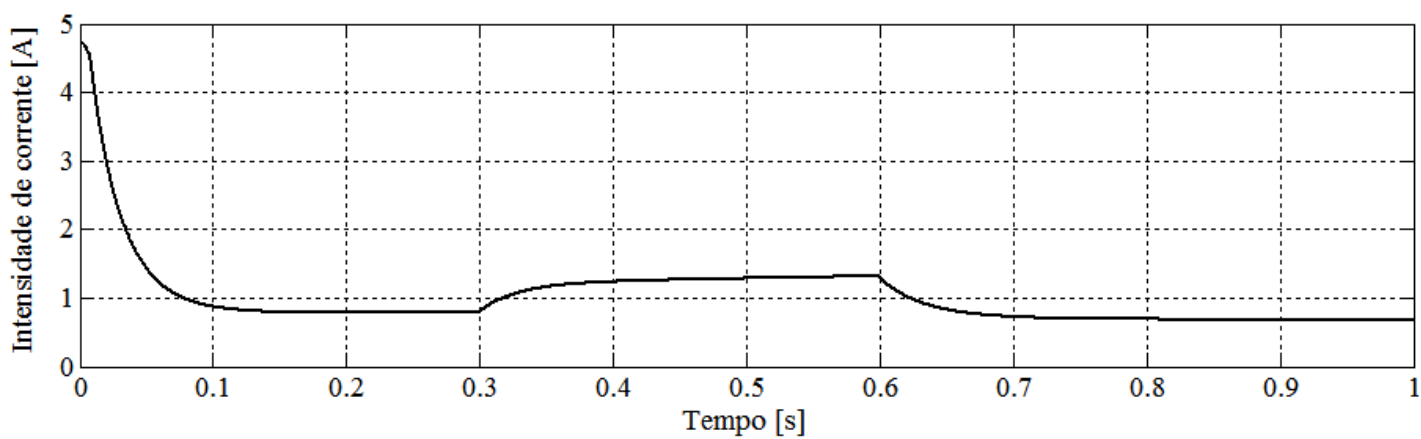


Figura 66 - Variação da intensidade de corrente no tempo

Na Figura 66 podemos observar a intensidade de corrente à saída da pilha em função do tempo. Como era de esperar este gráfico é simétrico ao gráfico anterior devido ao explicado anteriormente.

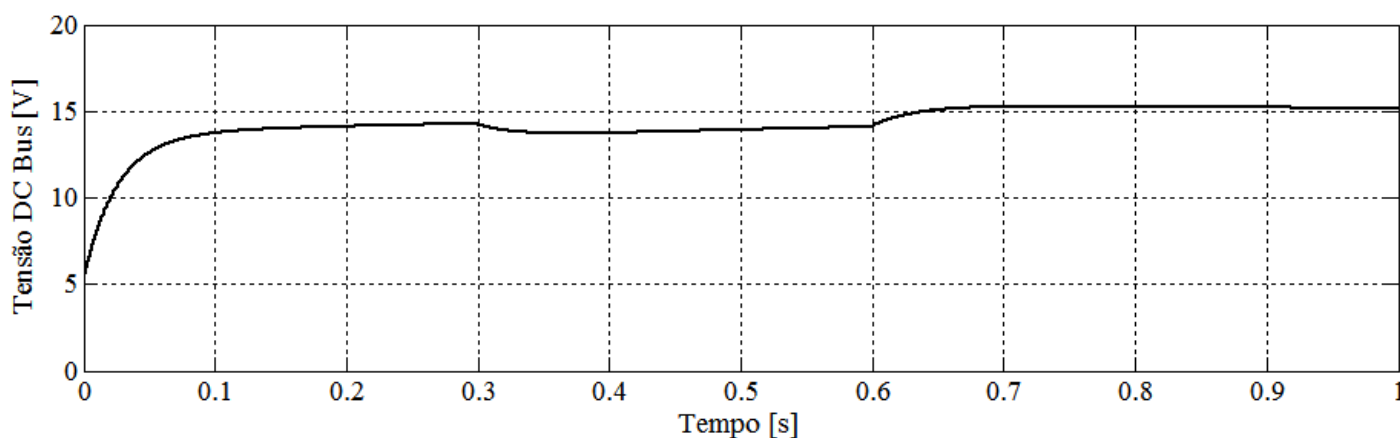
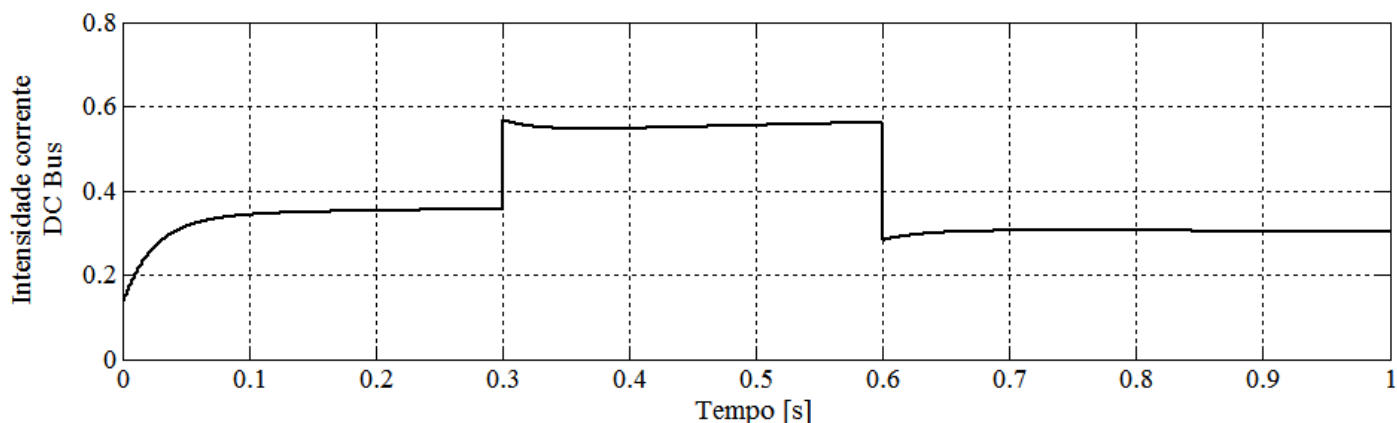


Figura 67 - Variação da tensão DC Bus no tempo

Na Figura 67 podemos observar a tensão após o conversor, ou seja, a tensão que o transmissor recebe em função do tempo. O andamento da curva é semelhante ao da tensão de saída da pilha, pela mesma razão já explicada.

Falando agora dos valores, podemos concluir que estão dentro do esperado pois as características do transmissor indicam que a tensão deve variar entre 11 e 16 V (Tabela 4).



*Figura 68 - Variação da intensidade de corrente DC Bus no tempo*

Na Figura 68 podemos observar a intensidade de corrente também após o conversor em função do tempo. O andamento da curva é semelhante ao da intensidade de corrente à saída da pilha de combustível.

Quanto aos valores podemos concluir que estão dentro do aceitável, pois as características do transmissor indicam que a intensidade deve ser aproximadamente 0,6A (Tabela 4).

É importante referir que o simulador não tem em conta a possibilidade de haver uma avaria no sistema de ventilação, desta forma seria um aspeto a melhorar em trabalhos futuros.

## 7. Conclusão

Da pesquisa bibliográfica efetuada é notório o grande avanço e desenvolvimento que tem havido em torno deste tema e penso que é fundamental que esse desenvolvimento continue pois como se percebe através das vantagens enunciadas esta tecnologia tem bastantes benefícios para oferecer.

Numa primeira abordagem foi possível perceber-se o funcionamento de uma pilha de combustível e todos os seus constituintes. Após esse conhecimento partiu-se para o estudo de um tipo de pilha mais específico que é o caso da pilha de combustível a hidrogénio, passando no entanto por uma breve explicação dos outros tipos de pilhas.

As grandes vantagens das pilhas de combustível a hidrogénio são visíveis através da pesquisa bibliográfica, no entanto os desafios e as desvantagens ainda são grandes e centram-se essencialmente no combustível, o hidrogénio. Foi também explicada a forma de produzir, transportar e armazenar o hidrogénio e através dessa informação é possível ter-se consciência das diversas dificuldades que daí advêm.

De forma a assentar ideias relativamente a este assunto, fez-se uma breve comparação entre as pilhas de combustível e outras tecnologias no mercado. Após esse estudo comparativo são notáveis as qualidades e mais-valias destas pilhas de combustível.

Por forma a completar a pesquisa bibliográfica, foi feito um estudo mais prático que teve como objetivos a integração da pilha de combustível a hidrogénio num equipamento portátil e a simulação dessa integração no Matlab.

Através da integração da pilha de combustível a hidrogénio num equipamento portátil foi possível perceber-se todos os componentes que fazem parte da pilha de combustível e a forma como eles se interligam. Essa integração é composta por um modelo 3D onde se pode observar todos os componentes da pilha de combustível. Posteriormente ao modelo 3D criado foi feita uma simulação em Matlab dessa aplicação onde é possível visualizar-se as curvas características desta pilha de combustível em funcionamento.

Cada vez mais o ambiente é um fator que tem de ser tomado em conta e preservado, desta forma as pilhas serão uma boa opção no futuro pois em termos de emissões estas são praticamente nulas, contrariamente muitas outras tecnologias que utilizam energia proveniente de combustíveis fósseis.

Nesta altura seria imprudente dizer que as pilhas de combustível são o novo futuro, contudo é importante frisar que estas estão a ter um grande desenvolvimento e um grande impacto no mercado também devido à grande diversidade de aplicações possíveis para além dos benefícios que se conseguem usufruir com a sua utilização.



## 8. Bibliografia

- [1] J. M., Andúrja e Segura, Francisca (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Fuell cells: History and updating. A walk along two centuries.*
- [2] U. S. Department of Energy. *Hydrogen & Our Energy Future.*
- [3] Silva, Vasco (2002-2003). *Células de combustível - Energia do futuro.* Consultado a 16/12/2013. Disponível em: <http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/index.html>.
- [4] Barbir, Frano (2005). *PEM Fuel Cells - Theory and Praticce.*
- [5] Thomas, Sharon e Zalowitz, Marcia. *Fuel Cells - Green Power.*
- [6] EG&G Technical Services, Inc. (2004). *Fuel Cell Handbook (seventh edition).*
- [7] Fuel Cells 2000 (2013). Consultado a 16/12/2013. Disponível em: <http://www.fuelcells.org/>.
- [8] Naveen, Gurrapu (17/04/2012). *High Temperature - PEM Fuel Cells: Development status and challenges.* Consultado a 16/12/2013. Disponível em: [High Temperature-PEM Fuel Cells: Development Status and Challenges | Gurrapu Naveen - Academia.edu.](#)
- [9] FuelCellToday (2013). *About fuel cells.* Consultado a 16/12/2013. Disponível em: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells>.
- [10] Toyota Motor Europe. *Concept Cars – Take a look FCV-R.* Consultado a 16/12/2013. Disponível em: [http://www.toyota-europe.com/innovation/design/concept\\_cars/fcv-r/index.tmex](http://www.toyota-europe.com/innovation/design/concept_cars/fcv-r/index.tmex).
- [11] Autoportal (2013). *Renault, Ford e Mercedes querem vender carros a hidrogénio em 2017.* Consultado a 16/12/2013. Disponível em: <http://www.autoportal.iol.pt/noticias/geral/renault-ford-e-mercedes-lancam-carros-a-hidrogenio-em-2017>.
- [12] Schubert, Michael (2003). *Hydrogen for Frauscher Riviera 600.* Consultado a 16/12/2013. Disponível em: <http://www.yachtonline.it/events/hydrogen-for-frauscher-riviera-600>.
- [13] Horizon Fuel Cell Technologies (2013). Consultado a 16/12/2013. Disponível em: <http://www.horizonfuelcell.com/#!home/mainPage>.
- [14] Hall, Brian (2006). *Angstrom Power develops commercially available micro hydrogen fuel cell flashlight.*
- [15] Winter, Martin e Brodd, Ralph (2004). *What are batteries, fuel cells and supercapacitors?*

- [16] Toothman, Jessika e Scott Aldous. *How Solar Cells Work*. Consultado a 16/12/2013. Disponível em:  
<http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell1.htm>.
- [17] Pragma Industries. Disponível em: <http://www.pragma-industries.com/>.
- [18] Soluções Racionais de Energia (SRE). *Ficha técnica 10SR4*.
- [19] EZ Fan & Blower Company (2000). *FP-108-S/DC*. Consultado a 16/12/2013.  
Disponível em:  
[http://www.ezcfn.com/dc\\_fan/fp\\_108s\\_dc.html](http://www.ezcfn.com/dc_fan/fp_108s_dc.html).
- [20] The Mathworks Inc. (1984-2010). *Implement generic hydrogen fuel cell stack model – Simulink*.