
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

A tecnologia de hidrogénio: estudo de um sistema de propulsão alternativo para o futuro do setor logístico.

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energias

Cátia Azevedo Moura

Orientador: Professor Doutor Eurico Vasco Ferreira Amorim



Vila Real, 2017

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

A tecnologia de hidrogénio: estudo de um sistema de propulsão alternativo para o futuro do setor logístico.

Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energias

Cátia Azevedo Moura

Orientador: Professor Doutor Eurico Vasco Ferreira Amorim

Composição do Júri:

Doutor José Manuel Ribeiro Baptista

Doutora Ana Filipa da Silva Ferreira

Doutor Eurico Vasco Ferreira Amorim

Vila Real, 2017

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO
para obtenção do grau de
MESTRE
em Engenharia de Energias
de acordo com o disposto no
DR – I série – N.º 151, Decreto-Lei n.º 115/2013 de 7 de agosto e no
Regulamento de Estudos Conducente ao Grau de Mestre da UTAD
DR – 2.ª série – N.º 133 de 13 julho de 2016

Orientação científica:

Eurico Vasco Ferreira Amorim

Professor Auxiliar do

Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologias

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Agradecimentos

Durante a realização deste trabalho existiram algumas pessoas que me foram acompanhando e apoiando e às quais eu não podia deixar de agradecer de uma forma especial.

Inicialmente queria agradecer ao meu orientador Professor Doutor Eurico Vasco Ferreira Amorim pela paciência e vontade que demonstrou em me orientar ao longo de todo este período de trabalho. Queria agradecer mais uma vez pela disponibilidade e apoio prestado, mas sobretudo pelos conhecimentos, e novos métodos de trabalho que me instruiu, que me irão ajudar certamente no meu futuro profissional.

Aos meus pais, pelos esforços que fizeram ao longo da vida para que eu conseguisse estudar e acabar um curso superior, e ao meu irmão pelo apoio e segurança que me transmitiu desde que entrei no meio universitário.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam durante os últimos 5 anos de jornada nesta instituição, pelos momentos de diversão, e obviamente de árduo estudo e dedicação ao curso.

A todos os restantes docentes e funcionários da UTAD, que também fizeram parte do meu percurso académico, sempre com um sorriso e com vontade de ajudar, quando me deparei com diversas dificuldades.

Os meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada.

Resumo

A utilização de hidrogénio como combustível está atualmente em constante expansão, em diversos países. Vários órgãos internacionais de estudo de mercado, como a U.S Department of energy (DOE), identificaram recentemente mercados promissores para a implementação de células de combustível, e num desses mercados está presente a utilização de células de combustível em empilhadores. A utilização deste tipo de tecnologia neste ramo, está a ser aplicada com grande ênfase principalmente na América, onde existem também grandes incentivos monetários.

Durante a realização desta dissertação foi feita uma revisão do estado da arte da tecnologia de células de combustível. Também se efetuou uma caracterização dos mercados, bem como das condições técnicas e de funcionamento. Na parte final da dissertação é apresentado um estudo viabilidade da implementação da tecnologia de hidrogénio, tanto a nível energético, como a nível económico. Tendo em conta que o desempenho deste tipo de veículos é modulado através de estudos paramétricos, foi criado um modelo em função do número de viagens diárias realizadas por empilhador, que caracteriza o seu gasto energético. Os nossos resultados mostram que de acordo com a carga de trabalho que a cada empresa exige, deve-se dimensionar a frota de empilhadores de forma correta, sendo necessário, em algumas ocasiões escolher o sistema de propulsão que permita obter a maior produtividade. Lembre-se que neste trabalho apenas são abordadas soluções elétricas, ou seja, só são abordados os sistemas de propulsão utilizando baterias e células de combustível.

Palavras-chave: Energias Renováveis; Empilhadores elétricos; Energia; Hidrogénio; Células de combustível.

Abstract

The use of hydrogen as a fuel is currently expanding, in several countries. The U.S. Department of Energy (DOE) recently identified promising markets for the implementation of fuel cells, and in one of these demands, the use of fuel cells in forklifts is present. The use of this type of technology in this field is being applied with great emphasis mainly in America, where there are also significant monetary incentives.

In this dissertation, a review of the state of the art of fuel cell technology was carried out. We also made a characterisation of the market, as well as the technical and operating conditions. In the final part of this study is presented a feasibility study of the implementation of hydrogen technology, both energetically and economically. Taking into account that the performance of this type of vehicle is modulated through parametric studies, a model was created that, based on the number of daily trips performed by forklift, characterises its energetic expenditure. Our results show that according to the workload that each company requires, we must scale the forklift fleet correctly, if necessary, on occasion choose the propulsion system so as to achieve the highest productivity. Remember that in this work only electrical solutions are addressed, that is, only the propulsion systems are approached using batteries and fuel cells.

Keywords: Renewable Energy; Electric forklift; Hydrogen energy; Fuel cell.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento.....	2
1.2.	Motivação e contribuições	3
1.3.	Estrutura da dissertação.....	4
2.	Propriedades do hidrogénio	5
2.1.	O hidrogénio no estado gasoso.....	6
2.2.	A combustão do hidrogénio.	7
2.3.	O hidrogénio no estado líquido.	10
2.4.	O hidrogénio é ou não perigoso?.....	11
3.	Produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio	15
3.1.	Métodos de produção de hidrogénio	15
3.1.1.	Hidrogénio a partir da reforma a vapor (SR).....	16
3.1.2.	Hidrogénio a partir da oxidação parcial (POX)	16
3.1.3.	Reforma Auto Térmica (ATR).....	17
3.1.4.	Hidrogénio a partir da gaseificação de carvão (CG).....	17
3.1.5.	Hidrogénio a partir da biomassa	18
3.1.6.	Hidrogénio a partir da água.....	19
3.1.7.	Hidrogénio a partir da energia nuclear.....	20
3.1.8.	Hidrogénio biológico	20
3.2.	Armazenamento do hidrogénio	23
3.2.1.	Armazenamento do hidrogénio no estado líquido	23
3.2.2.	Armazenamento de hidrogénio na forma gasosa (gás comprimido).....	24
3.2.3.	Armazenamento químico de hidrogénio	25
3.3.	Distribuição de hidrogénio	28
3.4.	O mercado do hidrogénio.....	31
3.4.1.	Estações.....	31
3.4.2.	A economia do hidrogénio no mundo.....	34
3.4.3.	Os empilhadores com células de combustível.	38
4.	Células de combustível	43
4.1.	Funcionamento	43
4.2.	Breve história	45
4.3.	Diferentes tipos de células de combustível	45

4.3.1.	Células de combustível alcalinas (Alcaline fuel cell)	46
4.3.2.	FC's de ácido fosfórico ou PAFCs (Phosphoric acid fuel cells)	46
4.3.3.	FC's de carbonatos fundidos ou MCFCs (Molten carbonate fuel cells).....	46
4.3.4.	FC's de óxidos sólidos ou SOFCs (Solid oxide fuel cells)	47
4.3.5.	FC's de membrana protónica ou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) 47	
4.3.6.	FC's de metanol ou DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	47
4.4.	Pontos positivos das células de combustível	51
4.4.1.	Reduzidas emissões nocivas para o ambiente	51
4.4.2.	Elevada eficiência	52
4.4.3.	Dispositivos estáticos	53
4.4.4.	Elevada gama de aplicações/modularidade e flexibilidade de combustível	54
4.5.	Pontos negativos das células de combustível	54
4.5.1.	Elevado custo	54
4.5.2.	Susceptíveis a contaminação	55
4.5.3.	Infraestrutura de hidrogénio requerida	55
4.5.4.	Balanço hídrico	55
4.5.5.	Consencialização da sociedade	56
4.6.	As PEMFC	56
4.6.1.	Características	57
4.6.2.	Os fatores que afetam o desempenho das membranas	58
4.6.3.	Fatores a melhorar	58
4.7.	Diferentes aplicações das células de combustível	61
4.7.1.	Aplicações nos transportes	61
4.7.2.	Aplicações portáteis	62
4.7.3.	Aplicações estacionárias	63
5.	Tipos, tamanhos e utilizações dos empilhadores	65
5.1.	Movimentação de materiais	65
5.2.	Veículos industriais	67
5.2.1.	Veículos não motorizados	67
5.2.2.	Veículos motorizados	67
5.2.3.	Usos, tamanhos e tipos existentes de empilhadores motorizados	69
5.3.	Fatores a ter em conta quando se pretende adquirir um empilhador	74
5.4.	Sistemas de propulsão existentes	78

5.4.1.	Empilhadores movidos a combustíveis fósseis.....	78
5.4.2.	Empilhadores movidos a bateria.	79
5.4.3.	Empilhadores com célula de combustível.....	81
5.4.4.	Requisitos de infraestruturas.....	83
5.4.4.1.	Empilhadores elétricos com baterias (carregamento convencional).	83
5.4.4.2.	Empilhadores elétricos com baterias (carregamento rápido).	84
5.4.4.3.	Empilhadores com células de combustível	85
5.5.	Estabilidade	86
5.5.1.	Estabilidade estática.....	89
5.5.2.	Estabilidade dinâmica	90
5.5.3.	Estabilidade longitudinal	90
5.5.4.	Estabilidade lateral.....	92
6.	Estudos realizados.....	93
6.1.	Modulação dos gastos energéticos dos empilhadores	93
6.1.1.	Metodologia e análise	95
6.1.2.	Cenários	99
6.2.	Análise económica	100
6.2.1.	Baterias vs FC	100
6.2.2.	Baterias vs FC (com eletrólise).....	104
7.	Discussão dos resultados.....	107
7.1.	Estudo energético	107
7.1.1.	Diferentes cargas de trabalho.....	107
7.1.2.	Influência do peso da carga a transportar	111
7.1.3.	Influência da utilização de empilhadores de classes diferentes e inclinações	115
7.2.	Análise económica	119
7.2.1.	Células de combustível e baterias	119
7.2.2.	Células de combustível (com eletrólise) e baterias.....	124
8.	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	129
8.1.	Conclusões	129
8.2.	Trabalho futuro.....	130
	Referências bibliográficas.....	133

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Coeficiente de difusão em cm ² /s de vários combustíveis gasosos (HyResponse, 2016).	6
Figura 2.2 Densidade de alguns combustíveis gasosos em relação ao ar (HyResponse, 2016).	7
Figura 2.3 – Gamas de inflamabilidade de alguns combustíveis gasosos (HyResponse, 2016).	7
Figura 2.4 - Energia de ignição mínima (H ₂ tools, 2016a).	8
Figura 2.5 – Temperatura de ignição de combustíveis gasosos (H ₂ tools, 2016a).	9
Figura 2.6 - Perceção da chama do hidrogénio pelo olho humano (H ₂ tools, 2016a).	9
Figura 2.7 - Processo de análise e avaliação de riscos (H ₂ tools, 2016b).	14
Figura 3.1 – Representação do armazenamento de hidrogénio na forma de hidreto metálico (Niaz <i>et al.</i> , 2015).	26
Figura 3.2 – Volume relativo ao armazenamento de 4kg de hidrogénio sob diferentes formas: 1 - Hidreto de Mg ₂ NiH ₄ ; 2 - Hidreto de NaLi ₅ H ₆ ; 3 - H ₂ líquido; 4 - H ₂ comprimido a 200 bar (Santos, 2009).	27
Figura 3.3 – Formas de produção, armazenamento e distribuição de Hidrogénio. (Nunes <i>et al.</i> , 2010).	30
Figura 3.4 – Elementos constituintes de uma estação de hidrogénio tipo 1 (Alazemi & Andrews, 2015).	32
Figura 3.5 - Elementos constituintes de uma estação do tipo 2 (Alazemi & Andrews, 2015).	33
Figura 3.6 – Representação de um bocal/mangueira (nozzle) de hidrogénio (Cal State L.A., 2017).	34
Figura 3.7 – Distribuição das estações de hidrogénio pelo mundo no 1º semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017).	35
Figura 3.8 - Distribuição das estações de hidrogénio na Europa no 1º semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017).	36
Figura 4.1 – Funcionamento de uma célula de combustível (Wang <i>et al.</i> , 2011).	44
Figura 4.2 – Transformações de energia requeridas pelos diferentes tipos de tecnologias. Fonte: Sharaf <i>et al.</i> , 2014.	53
Figura 4.3 – Evolução dos custos de diversos componentes que constituem uma célula de combustível (Papageorgopoulos, 2010).	59
Figura 4.4 – Expedições de células de combustível, por tipo de aplicação e por região (Fuel cell today, 2012).	62
Figura 5.1 - Equação do manuseamento dos materiais (Ray, 2008).	66
Figura 5.2 - Carrinhos de mão hidráulicos, sem e com elevação (Ray, 2008).	68
Figura 5.3 – Representação de um Straddle Carrier (Ray, 2008).	69
Figura 5.4 – Comercialização de empilhadores feitas no mundo, entre 2009 e 2011 (Industrial Truck Association - ITA, 2016).	73

Figura 5.5 - Tipo de empilhadores comercializados, nos Estados Unidos (Rider, 2015).	74
Figura 5.6 – Componentes básicos de um empilhador (Adaptalift Hyster, 2011).....	77
Figura 5.7 – Exemplo da constituição de um empilhador a bateria e de um empilhador a célula de combustível (Rogers, 2010).....	83
Figura 5.8 – Esquema simplificado da infra-estrutura de abastecimento de hidrogénio (Rogers, 2010).....	85
Figura 5.9 – Triângulo de estabilidade de um empilhador (Sousa, 2012).	88
Figura 5.10 - Representação de um empilhador nas várias ações durante o seu funcionamento (Sousa, 2012)	89
Figura 5.11 - Momentos que atuam no empilhador (Sousa, 2012).....	90
Figura 5.12 - Variação da estabilidade com a altura da carga (Sousa, 2012).	91
Figura 5.13 - Variação da estabilidade com a inclinação do mastro (Sousa, 2012).	91
Figura 5.14 - Momentos adicionais gerados pela carga em movimento (Sousa, 2012). ..	91
Figura 5.15 - Momentos gerados com as mudanças de direção (Sousa, 2012).	92
Figura 6.1 - Comparação entre o Sistema de baterias e de células de combustível (Ballard, 2013).	94
Figura 6.2 – Representação de um ciclo completa de descarga e carga de uma bateria convencional de chumbo-ácido (Rogers, 2010).....	99
Figura 7.1 – Energia consumida em Wh, por cada empilhador em apenas uma viagem.	108
Figura 7.2 – Resultados do período de inatividade relativos à elevada carga de trabalho.	108
Figura 7.3 – Resultados do período de inatividade relativos à carga de trabalho intermédia.	109
Figura 7.4 – Resultados do período de inatividade relativos à reduzida carga de trabalho.	109
Figura 7.5 – Número de empilhadores a bateria, necessários para diminuir o tempo de inatividade dos empilhadores com células de combustíveis considerados. Caso de carga de trabalho reduzida.	110
Figura 7.6 – Número de empilhadores e a bateria, necessários para diminuir o tempo de inatividade dos empilhadores com células de combustíveis considerados. Caso de carga de trabalho elevada.	111
Figura 7.7 – Energia consumida em Wh, por empilhador em apenas uma viagem, reduzindo o peso da carga a transportar. Empilhador standard.	112
Figura 7.8 – Energia consumida em Wh, por empilhador em apenas uma viagem, reduzindo o peso da carga a transportar. Empilhador menor.....	112
Figura 7.9 – Horas de inatividade verificadas quando efetuamos uma redução da carga a transportar pelo empilhador, mantendo o volume entregue ao armazém. Reduzida carga de trabalho.....	113
Figura 7.10 – Horas de inatividade verificadas quando efectuamos uma redução da carga a transportar e do volume entregue ao armazém. Reduzida carga de trabalho.....	114
Figura 7.11 – Hoars de inatividade verificadas em carga de trabalho reduzida com utilização de duas classes de empilhadores. 1 – Empilhador de classe I a percorrer o percurso inclinado; 2 – Empilhador de classe II a percorrer o percurso inclinado.....	118

Figura 7.12 – Resultados económicos para FC vs Baterias, 30 empilhadores.	121
Figura 7.13 – Resultados económicos FC vs Baterias, 50 empilhadores.	123
Figura 7.14 – Resultados económicos FC (eletrolise) vs Baterias, 40 empilhadores.	126
Figura 7.15 – Resultados económicos FC (eletrólise) vs Baterias, 80 empilhadores.	127

Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Comparação entre o combustível Hidrogénio e os combustíveis convencionais (HyResponse, 2016).	11
Quadro 3.1 – Vantagens e desvantagens dos processos de SR e POX.....	17
Quadro 3.2 – Informações básicas sobre os métodos de produção de Hidrogénio mais comuns (Alazemi & Andrews, 2015).	22
Quadro 3.3 – Características dos diferentes tipos de armazenamento (Niaz <i>et al.</i> , 2015). 28	
Quadro 3.4 – Distribuição Global das estações de hidrogénio, no primeiro semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017).	36
Quadro 3.5 – Distribuição das estações de hidrogénio na Europa, no primeiro semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017; Alazemi & Andrews, 2015).	37
Quadro 3.6 – Principais compradores e fabricantes de FC's para empilhadores (Curtin & Gangi, 2014; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015).	39
Quadro 3.7 – Implementações de empilhadores a FC, ocorridas durante o ano de 2015 em vários países da Europa (Curtin & Gangi, 2015a; Curtin & Gangi, 2015; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015).	40
Quadro 4.1 – Reações envolvidas no funcionamento de uma célula de combustível (Wang <i>et al.</i> , 2011)	44
Quadro 4.2 – Tipos de células de combustível (Sharaf & Orhan, 2014).	49
Quadro 4.2 – Tipos de células de combustível, continuação (Sharaf & Orhan, 2014)	50
Quadro 4.3 – Principais características das células de combustível tipo PEM (Sharaf & Orhan, 2014)	60
Quadro 4.4 - Tipos de aplicações das células de combustível (Fuel cell today, 2012). ...	64
Quadro 5.1 - Classes dos empilhadores (Gaines. <i>et al.</i> , 2008).	72
Quadro 5.2 - Quantidade de trabalho exigido a um empilhador (Adaptalift Hyster, 2011b). 75	
Quadro 5.3 – Requisitos de infra-estrutura para cada tecnologia (Rogers, 2010).	86
Quadro 5.4 – Movimento do centro de gravidade em função das Ações do empilhador (Washington State Departement of LAbor&Industries, 2015).	89
Quadro 6.1 – Fórmulas utilizadas para o cálculo da energia consumida por cada empilhador em uma viagem (Ray, 2008).	96
Quadro 6.2 – Análise dimensional das variáveis utilizadas.	96
Quadro 6.3 – Energia (Watt-hora) estimada para a movimentação de um empilhador em função do peso (Ray, 2008).	97

Quadro 6.4 – Dados técnicos e de operação, por tipo de empilhador com célula de combustível (Garde & Santarelli, 2012).	98
Quadro 6.5 – Parâmetros constantes ao longo do estudo (Garde & Santarelli, 2012).	99
Quadro 6.6 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível.	101
Quadro 6.6 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível, continuação.	101
Quadro 6.7 – Dados económicos utilizados, para aplicação de baterias.	102
Quadro 6.8 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível.	104
Quadro 6.9 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível, continuação.	104
Quadro 6.10 – Dados económicos utilizados, para aplicação de baterias.	104
Quadro 7.1 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho elevada.	108
Quadro 7.2 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho intermédia.	109
Quadro 7.3 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida.....	110
Quadro 7.4 – Diferenças entre os dois tipos de empilhador de classe I utilizados.....	111
Quadro 7.5 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador standard, com redução apenas da carga a transportar.	113
Quadro 7.6 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador menor, com redução apenas da carga a transportar.	113
Quadro 7.7 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador standard, com redução da carga a transportar e do volume entregue ao armazém.	115
Quadro 7.8 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador menor, com redução da carga a transportar e do volume entregue ao armazém.	115
Quadro 7.9 – Dados mais relevantes para utilização no modelo relativos ao empilhador de classe II.	116
Quadro 7.10 – Valores de energia consumida por cada classe de empilhador considerada, quando o empilhador de classe I percorre o percurso inclinado.	117
Quadro 7.11 – Valores de energia consumida por cada classe de empilhador considerada, quando o empilhador de classe II percorre o percurso inclinado.	117
Quadro 7.12 – Horas de inatividade de acordo com a classe, dependendo do percurso considerado.	119
Quadro 7.13 - Parâmetros considerados no estudo económico.	120

Quadro 7.14 - Simulação de preços para uma frota reduzida em €.....	122
Quadro 7.15 - Simulação de preços para uma frota maior em €.	122
Quadro 7.16 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível.....	124
Quadro 7.17 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível, continuação.	125
Quadro 7.18 - Parâmetros considerados para a escolha do eletrolisador e armazenamento (Garde & Santarelli, 2012; Niaz <i>et al.</i> , 2015).....	125

1. Introdução

Na indústria de manuseio de materiais a produtividade é um motor vital de rentabilidade. A operação eficiente de uma frota de empilhadores é um fator importante para o aumento da produtividade de um armazém. Convencionalmente, as baterias têm sido largamente utilizadas como fonte de energia em empilhadores, sendo consideradas as melhores soluções quando estes veículos operam em ambiente fechado, pois estas evitam emissões de gases nocivos. Mais recentemente surgiu a aplicação de células de combustível neste tipo de veículos. A utilização de células de combustível como fonte de energia em empilhadores tem vindo a demonstrar benefícios a nível operacional e ambiental, e são vistas como uma possível solução para o aumento de produtividade de um armazém. Neste tipo de atividades o aumento da produtividade ocorre pelo aumento do tempo de operação do empilhador, sem necessidade de carregamento da bateria, assim como pela existência de uma potência constante ao longo de todo o ciclo de trabalho (Productivity, 2010), e através de órgãos de estudo internacionais, como a DOE (Mayyas, *et al.*, 2015) podemos ver que utilizando células de combustível como sistema de propulsão conseguimos de facto o aumento do tempo operacional do empilhador, com uma potência constante ao longo de todo o tempo de operação.

Com a realização desta dissertação pretendemos rever o estado da arte da tecnologia de células de combustível, efetuar a caracterização dos mercados, bem como das condições técnicas e de funcionamento. Posteriormente iremos estudar a viabilidade da implementação da tecnologia de hidrogénio, tanto a nível energético, através da criação de um modelo, como a nível económico. Para conseguir realizar todos estes estudos foi também necessário estudar os tipos de empilhadores existentes, assim como as suas condições ótimas de utilização.

Ainda nesta fase introdutória iremos apresentar um breve enquadramento do tema estudado, explicar as motivações e contribuições deste trabalho, e finalmente fazer uma descrição da estrutura desta dissertação.

1.1. Enquadramento

Com a crescente inquietação sobre as questões ambientais, devido às elevadas emissões de CO₂, assim como devido às mudanças climáticas que hoje se fazem sentir, existe uma maior preocupação em encontrar e utilizar novas fontes de energia renovável. Os países Europeus têm adotado políticas energéticas com o objetivo incrementar a produção e utilização de energias renováveis e, desta forma, contribuir para a descarbonização dos países, aumentando a cota da energia renovável no mix energético, de forma sustentável.

Nesta fase de transição energética, o hidrogénio é visto cada vez mais como um forte candidato, como vetor de energia. Entre os possíveis usos de hidrogénio, o que parece particularmente promissor é como combustível no setor dos transportes. Na verdade, os veículos alimentados a hidrogénio estão a ser testados em vários países do mundo. Quando nos referimos ao setor dos transportes temos tendência de associar exclusivamente ao transporte de pessoas, no entanto dentro deste setor existem muitos outros ramos importantes, como o da logística, onde normalmente se faz o transporte de grandes quantidades de materiais. Usualmente em armazéns fechados os empilhadores possuem um sistema propulsão acionado por uma bateria convencional de chumbo-ácido, devido à não libertação de poluentes.

Os sistemas de células de combustível são uma tecnologia promissora que podem substituir as baterias nestes equipamentos, preservando a qualidade do ar interior dos armazéns e para além disto, prometem aumentar a eficiência e a produtividade. A mudança do combustível convencional é muito mais urgente quando nos referimos aos empilhadores movidos a combustíveis fósseis, que além de prejudicar o ambiente de um eventual armazém também libertam gases que agravam o fenómeno de efeito de estufa.

Paralelamente a todos estes fatores positivos associados à utilização do hidrogénio também existe a vantagem de este poder ser produzido por processos simples (e alguns ainda dispendiosos) que utilizam fontes de energia renováveis, como por exemplo a eletrólise da água.

1.2. Motivação e contribuições

Atualmente considera-se que a utilização da tecnologia de células de combustível a hidrogénio, apresenta um elevado potencial para a substituição das fontes de energia convencionais. O mercado dos empilhadores é cada vez mais extenso, sendo por isso uma possibilidade de implementação desta nova tecnologia em grande escala. Têm sido por todo mundo apresentados projetos que demonstram os benefícios da utilização do hidrogénio como combustível no setor logístico existindo até agora diversas empresas que desenvolvem esta tecnologia no decorrer da última década.

Na Europa o mercado de empilhadores que possuem células de combustível é relativamente novo, sendo um dos principais fatores a falta de apoio financeiro, e sem este é muito difícil criar um plano de implantação para que esta tecnologia seja adequadamente desenvolvida e testada.

Apesar de na Europa este tipo de mercado de hidrogénio ser relativamente recente, existem outros países que já têm vindo a apostar no hidrogénio há algum tempo, sendo na América do Norte onde se verifica uma maior aposta neste tipo de soluções.

Todas estas perspetivas de crescimento da tecnologia do hidrogénio na Europa, no setor logístico, devem-se às vantagens já conhecidas face às formas de propulsão convencionais. O que se tem vindo a desenvolver, em concreto nos empilhadores, é a construção de células de combustível que permitam ser instaladas nos compartimentos das baterias convencionais, evitando assim um acréscimo de custos ao tentar alterar toda a frota.

O hidrogénio é visto também como uma forma de aproveitamento de eletricidade produzida em excesso por fontes renováveis intermitentes, ou seja, quando temos enormes quantidades de eletricidade produzidas por fontes renováveis e não temos um consumo suficiente podemos utilizar essa energia elétrica para produção de hidrogénio que será armazenado e disponibilizado posteriormente. Desta forma, o hidrogénio assume cada vez mais um papel importante na descarbonização, no entanto, são ainda necessários mais estudos e demonstrações para que estas novas tecnologias sejam reconhecidas e implementadas por toda a Europa.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é constituída por mais oito capítulos. Primeiro apresenta-se a Introdução, Enquadramento, Motivação e Estrutura.

No segundo capítulo é introduzido o hidrogénio, são apresentadas algumas das suas características principais enquanto elemento químico, e são também descritas algumas das suas propriedades nos vários estados físicos.

No terceiro capítulo são descritas as características da produção, armazenamento e distribuição do hidrogénio, assim como é também feita uma análise do mercado atual deste composto. Nesta análise tentamos perceber quais são os países que têm vindo a apostar na introdução do hidrogénio como combustível em automóveis. Foi também analisada a introdução do hidrogénio no setor logístico. Segue-se o quarto capítulo, o qual aborda as células de combustível. Nele é descrito o seu funcionamento, é apresentada também a sua história, assim como os diferentes tipos existentes. São apresentados os fatores positivos e negativos das células de combustível, por fim, este capítulo encerra com um breve resumo de alguns tipos de aplicações mais usuais.

No quinto capítulo já entramos no setor logístico, no qual são descritos os tipos de empilhadores existentes, assim como as especificações para a utilização de cada tipo de veículos. Este capítulo contém uma descrição dos diferentes sistemas de propulsão, que podemos encontrar associados a empilhadores. Nele também é abordado o conceito de estabilidade, que é um fator imprescindível neste tipo de aplicações. Após este capítulo descrevemos os dois tipos de estudo realizados. Assim o sexto capítulo contém todos os valores considerados, como as aproximações e metodologias. O texto foi concebido de uma forma detalhada para que sejam evitadas quaisquer dúvidas. Já a terminar este trabalho, no sétimo capítulo são apresentados os resultados de cada um dos estudos realizados, assim como algumas considerações importantes face aos resultados obtidos.

Finalmente, a dissertação é encerrada com o oitavo capítulo que apresenta as conclusões de todo o trabalho desenvolvido, e apresenta-se algumas sugestões para trabalho futuro.

2. Propriedades do hidrogénio

Foi no processo de decomposição da água que o hidrogénio foi descoberto. Este fato ocorreu em 1766 cuja experiência foi realizada pelo cientista Henry Cavendish. O hidrogénio é o elemento mais abundante no universo constituindo cerca de 76% da sua massa e 93% de suas moléculas, como exemplo temos a água (cujo símbolo químico é H_2O

) e as proteínas nos seres vivos. É considerado também um elemento simples pois é constituído apenas por um eletrão e um protão, sendo esta uma característica que o diferencia de todos os outros elementos. Apesar de muito abundante este não aparece naturalmente como um gás, está sempre associado a outros elementos, podendo ser encontrado em muitos compostos orgânicos, especialmente nos hidrocarbonetos, como gasolina, gás natural, metanol ou propano.

O hidrogénio é um elemento muito mais leve que o ar, e à temperatura e pressão normais (20 °C e 1 atm) este apresenta-se como um gás extremamente inflamável, inodoro, insípido (não tem gosto), incolor, e insolúvel em água. Apenas quando sujeito a um ambiente criogénico é que se pode encontrar no estado líquido, em temperaturas mais elevadas pode ser armazenado em forma de gás comprimido em sistemas pressurizados. É difícil decidir a posição do hidrogénio na tabela periódica, uma vez que não se encaixa em nenhum dos grupos que a dividem (Esmeralda & Estêvão, 2008). Como combustível, representa uma fonte de energia ambientalmente benigna (Ball & Wietschel, 2009). A relação entre a densidade energética e o seu peso, fazem com que este seja visto como uma opção rentável quando utilizado como combustível, além de contribuir para a redução da emissão dos gases com efeito de estufa (Miguel *et al.*, 2005). A quantidade de energia por unidade de massa que possui é superior a outros combustíveis, sendo 141,9 MJ/kg (1 kg de H representa a mesma quantidade de energia que 2,8 kg de gasolina).

Para o manuseamento e utilização deste composto, temos inicialmente de conhecer algumas das suas características, pois co.mo qualquer outro combustível tem de ser manuseado de forma responsável.

2.1. O hidrogénio no estado gasoso

O hidrogénio é incolor, inodoro, insípido, não tóxico e não venenoso. É também não-corrosivo, no entanto pode incorporar-se em certos metais, fragilizando-os. Em condições atmosféricas normais este é muito abundante na natureza, estando sempre associado com outros elementos.

Outros combustíveis gasosos como o gás natural e o propano, por exemplo, apresentam algumas características em comum com o hidrogénio no estado gasoso que dificulta o seu manuseamento. Estes gases, assim como o hidrogénio são inodoros, para que sejam utilizados na indústria são acrescentados odores aos gases de forma a deteta-los rapidamente. No entanto não é odorizar o gás hidrogénio, pois como ele tem uma densidade muito reduzida é muito difícil arranjar substâncias odoríferas com a mesma taxa de dispersão. Esta elevada taxa de dispersão, causada pela reduzida densidade deste gás face ao ar (14 vezes menor) e elevado coeficiente de difusão, faz com que o hidrogénio seja visto como um combustível seguro, pois se for libertado acidentalmente irá dispersar-se não criando o risco de uma explosão (H₂tools, 2016a), como mostrado na Figura 2.1 (HyResponse, 2016). Um outro fator que impossibilita a incorporação de substâncias odoríferas no gás hidrogénio prende-se com a facilidade de contaminação das células de combustível, que são uma das maiores aplicações do hidrogénio na atualidade.

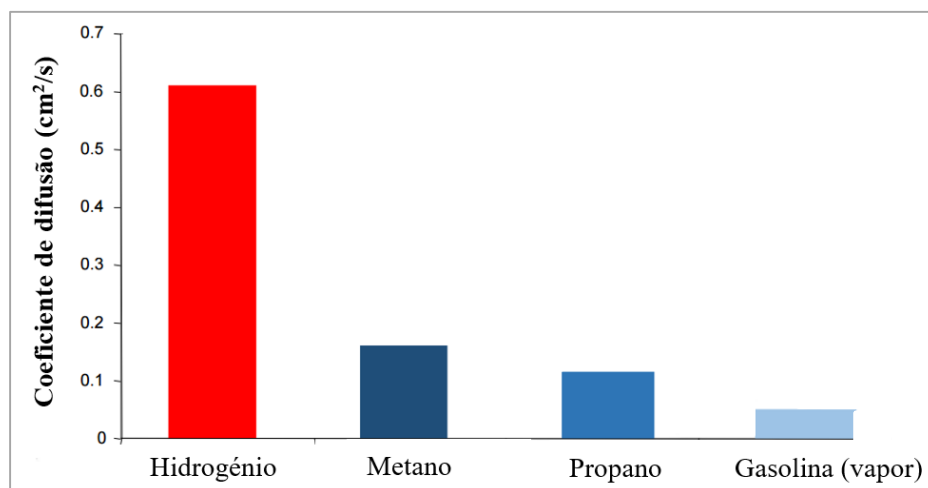


Figura 2.1 – Coeficiente de difusão em cm²/s de vários combustíveis gasosos (HyResponse, 2016).

A Figura seguinte mostra a densidade de alguns gases, em relação ao ar. Como podemos observar o hidrogénio é o que apresenta menor densidade, sendo por outro lado os combustíveis derivados do petróleo que apresentam maior densidade.

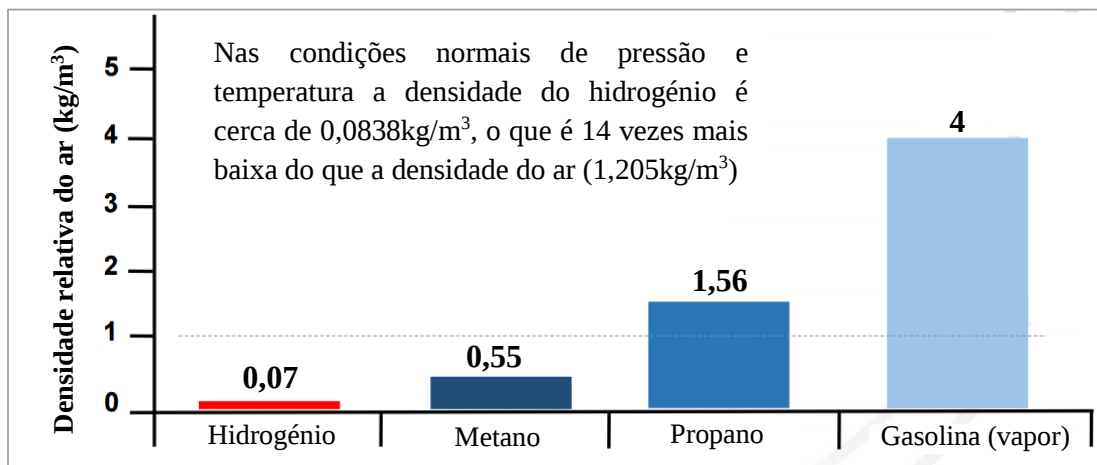


Figura 2.2 Densidade de alguns combustíveis gasosos em relação ao ar (HyResponse, 2016).

2.2. A combustão do hidrogénio.

O hidrogénio é uma molécula muito pequena, de baixa viscosidade, e, portanto, muito suscetível a libertação em casos de pequenas fugas. Ao contrário do que acontece em ambiente aberto, num espaço fechado um vazamento de hidrogénio é muito perigoso, pois além de este gás ser impercetível pelos sentidos humanos, é inflamável numa vasta gama de concentrações no ar (entre 4% e 75%), como mostrado na Figura 2.3.

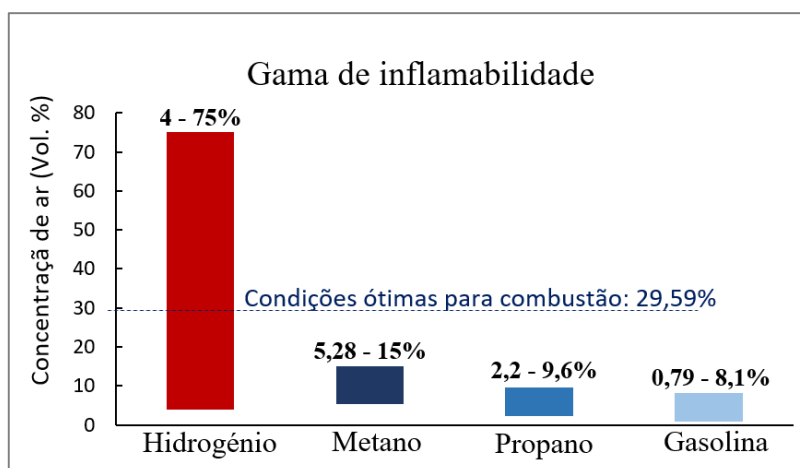


Figura 2.3 – Gamas de inflamabilidade de alguns combustíveis gasosos (HyResponse, 2016).

Os limites apresentados de inflamabilidade variam com a direção de propagação da chama. Numa propagação ascendente, e consequente aumento de pressão, o limite inferior de inflamabilidade sofre sempre um aumento, podendo chegar aos 5,6% para uma pressão de 15MPa. Por outro lado o limite superior de inflamabilidade não apresenta uma variação tão linear, no entanto pode variar entre os 71 e 75%, numa gama de pressões de 5MPa até 15MPa (HyResponse, 2016).

Um outro fator importante a considerar quando se manuseia o hidrogénio está relacionado com a energia necessária para iniciar a combustão (Energia de ignição, representada na Figura 2.4), apresentando-se muito mais baixa comparando com outros combustíveis:

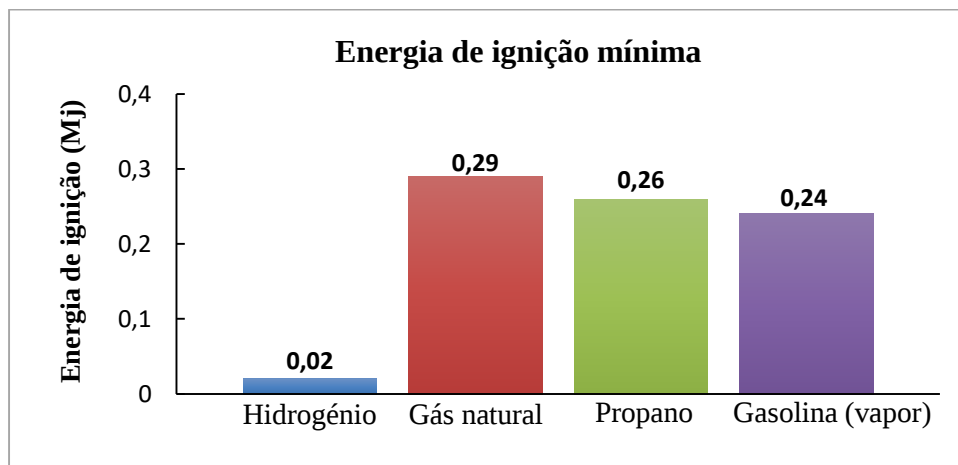


Figura 2.4 - Energia de ignição mínima (H₂tools, 2016a).

Tendo este gás um elevado teor de energia por peso, e não por volume, o seu armazenamento é verdadeiro desafio. De modo a armazenar uma quantidade suficiente de gás hidrogénio, este tem de ser comprimido e armazenado em altas pressões. Por segurança, tanques de hidrogénio estão equipados com dispositivos de alívio de pressão, sensores, e sistemas de ventilação cuja função é a prevenção de possíveis acidentes.

A temperatura de autoignição é outra propriedade importante quando nos referimos a combustíveis, esta consiste na temperatura mais baixa a que uma substância se inflama espontaneamente, sem necessidade de chama ou faísca, sendo importante conhecer em casos de acidentes. As temperaturas de autoignição de hidrogénio e gás natural são muito semelhantes, no entanto bastante mais elevadas que o vapor de gasolina, tal como mostrado na Figura seguinte.

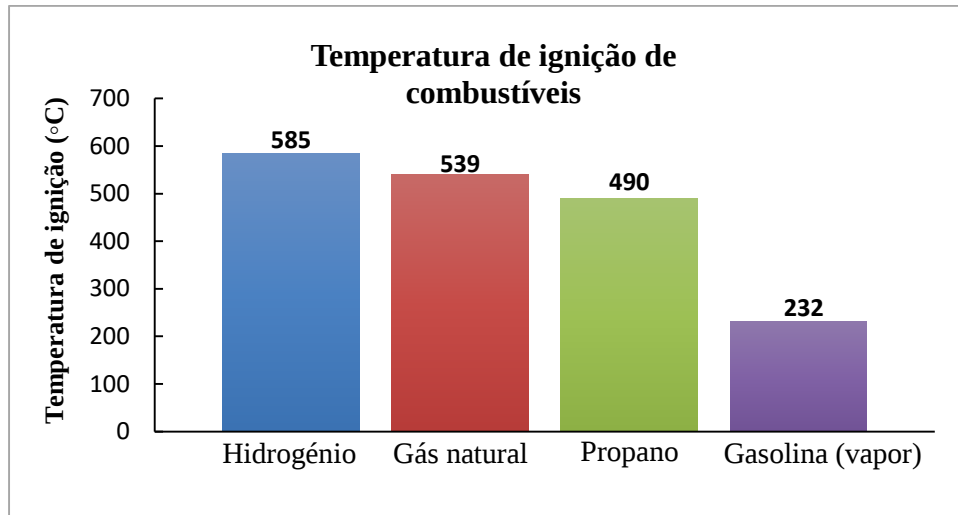


Figura 2.5 – Temperatura de ignição de combustíveis gasosos (H₂tools, 2016a).

Durante a combustão a chama do hidrogénio é quase impercetível para o olho humano durante o dia devido à sua reduzida emissividade na região do visível, ao contrário do que acontece com a queima de outros gases. No entanto durante a noite, apesar de reduzida o olho humano já consegue ter a perceção da presença da chama, como pode ser visto na Figura 2.6. Assim, mais uma vez é importante a utilização de sensores para identificar quaisquer vazamentos e minimizar o risco de uma combustão não controlada (H₂tools, 2016a).

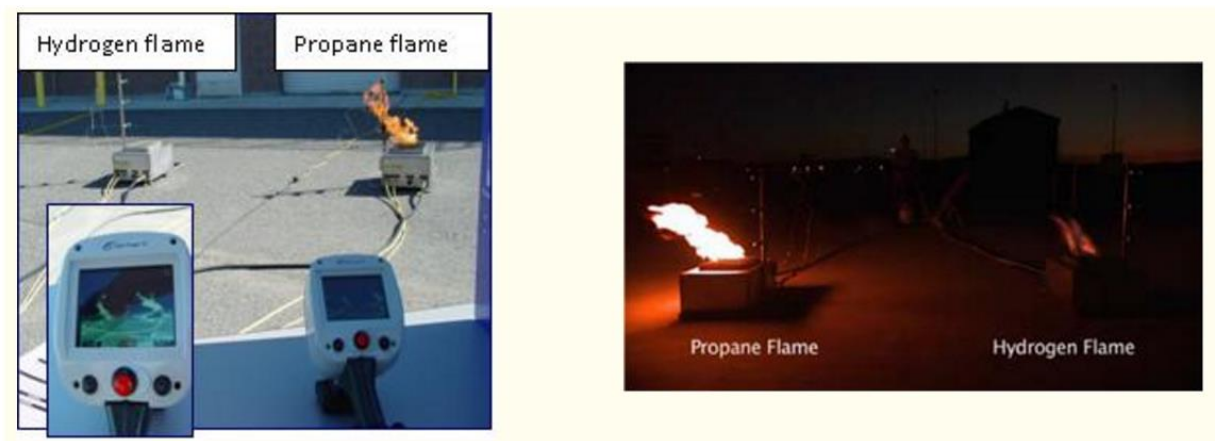


Figura 2.6 - Perceção da chama do hidrogénio pelo olho humano (H₂tools, 2016a).

Um outro facto interessante sobre a queima deste gás prende-se com o calor irradiado na sua combustão. O calor irradiado na combustão do hidrogénio é substancialmente na região do ultravioleta (UV), isto significa que quando alguém está muito perto de uma chama de hidrogénio, há pouca sensação de calor, podendo culminar num contato acidental com a chama, provocando danos na integridade física de uma pessoa. A sobre-exposição à radiação UV é também uma preocupação, uma vez que pode

resultar em queimaduras muito parecidas a queimaduras solares. Por estes motivos, com a introdução de veículos a hidrogénio na sociedade, é necessário criar e por em prática formações, nomeadamente dos bombeiros, para que estes não corram perigo quando se deparam com um acidente envolvendo libertação e/ou combustão de hidrogénio (HyResponse, 2016).

2.3. O hidrogénio no estado líquido.

O hidrogénio líquido além de ser também incolor, tem características e riscos diferentes quando comparado com o hidrogénio gasoso, e por isso as técnicas utilizadas para a manutenção da segurança são também diferentes. No estado líquido o hidrogénio é armazenado num estado a que chamamos de criogénico, ou seja a temperaturas muito inferiores a 0°C. A quantidade de hidrogénio contido numa porção de hidrogénio líquido é muito superior a quantidade de hidrogénio contido numa porção equivalente de hidrogénio gasoso. A proporção entre volume de líquido para gás é de cerca de 1:700. Portanto, como termo de comparação podemos dizer que 1 porção de hidrogénio no estado líquido equivale a 700 porções de hidrogénio no estado gasoso (Esmeralda & Estêvão, 2008).

Tal como ocorre com o hidrogénio no estado gasoso, também no estado líquido oferece mais riscos quando confinado do que em ambientes abertos. Se derramado à temperatura ambiente o hidrogénio líquido vai rapidamente ferver e seus vapores irão expandir-se rapidamente. Se o hidrogénio líquido está confinado (por exemplo, entre as válvulas ou tubagens) e por qualquer motivo começa a aumentar a sua temperatura, irá expandir, resultando num aumento de pressão, aumentando o risco de ignição e explosão.

Para a conclusão do estudo comparativo entre o hidrogénio e os combustíveis convencionais é apresentado o Quadro seguinte (Quadro 2.1), este resume algumas das principais características dos combustíveis considerados.

Quadro 2.1 – Comparação entre o combustível Hidrogénio e os combustíveis convencionais (HyResponse, 2016).

	H₂	Gás natural	Derivados petrolíferos
Cor	Não	Não	Sim
Toxicidade	Nenhuma	Media	Elevada
odor	Sem odor	Odor sintético	Com odor
Densidade em relação ao ar	14 vezes menor	2 vezes menor	3,75 vezes maior
Energia específica em relação aos derivados de petróleo	2,8 vezes maior	1,3 vezes maior	43MJ/kg
Energia por volume em relação aos derivados de petróleo	4 vezes menor	1,5 vezes menor	120MJ/Gallon

2.4. O hidrogénio é ou não perigoso?

Para que seja usado em larga escala, o hidrogénio terá de ser manuseado com o mesmo nível de confiança que os combustíveis convencionais. As propriedades físicas relevantes para a segurança do hidrogénio são comparadas com as da gasolina, GPL, e o metano (Esmeralda & Estêvão, 2008), quando nos referimos às práticas de segurança que devem existir no manuseamento do hidrogénio, estas passam por utilizar um equipamento de proteção adequado. Usualmente não há requisitos de segurança específicos para trabalhar com hidrogénio gasoso, exceto o uso de óculos de proteção quando se trabalha com um gás comprimido. No entanto, quando se trabalha com hidrogénio líquido, luvas de isolamento e calçado de proteção devem ser usados, além de proteção para os olhos. Uma particularidade deste elemento que o torna sim muito perigoso é, como já foi referido, que ao contrário de outros combustíveis a sua chama ser quase impercetível pois a sua emissividade é muito baixa na região do visível, no entanto esta contém elevadas quantidades de energia quando comparada com outros combustíveis. Uma vantagem de incêndios de hidrogénio com ar é o facto de que não há nenhuma produção de fumo

(assumindo que não há outro material ser incinerado), evitando assim a libertação de substâncias nocivas para o meio ambiente. Uma outra característica que pode ser perigosa prende-se com a elevada inflamabilidade da mistura hidrogénio/ar, associada com a reduzida energia necessária para autoignição (Esmeralda & Estêvão, 2008; Miguel *et al.*, 2005). O hidrogénio é também muito explosivo em espaços confinados, devido à velocidade de queima da sua chama. Por isso, o local onde o hidrogénio é armazenado ou transportado tem de ser construído de forma a minimizar este risco. Uma das principais preocupações quando se fala de armazenamento e transporte prende-se com a capacidade do hidrogénio se incorporar nos metais, que expostos a altas temperaturas e pressões sofrem descarbonização e fragilização. A seleção do material adequado, por exemplo, aços especiais de liga leve e tecnologia são necessários, para evitar esta fragilização. A reduzida densidade do hidrogénio faz com que este se possa difundir e dispersar mais rapidamente, o que permite que não sejam possíveis explosões em ambientes abertos e como à pressão e temperatura ambiente ele é um gás, caso ocorra algum vazamento não controlado não vamos ter um acumular de combustível como acontece com os restantes combustíveis líquidos (Ball & Wietschel, 2009). A única exceção é para libertações criogénicas, onde o vapor muito frio que inicialmente se forma, pode ser mais denso que o ar circundante. Além disso, o hidrogénio não é tóxico nem corrosivo, e o vazamento durante o seu transporte não causaria uma catástrofe ambiental, como podemos observar toda vez que há vazamento de óleo em navios petroleiros.

O hidrogénio é então um composto como qualquer outro que possui vantagens e desvantagens na sua utilização sendo necessário estudá-lo para poder usufruir das suas mais valias de forma eficiente e segura. Qualquer pessoa que trabalhe com o hidrogénio deve submeter-se a um treinamento básico de segurança para que esteja familiarizado com as suas propriedades básicas (H₂tools, 2016c). Após conhecerem as propriedades e riscos reais os funcionários devem então aprofundar o conhecimento dos riscos e boas práticas para a função específica que irão realizar (H₂tools, 2016d). Independentemente do tipo de projeto, deve ser feito um planeamento de segurança e dos riscos com base nas quantidades de hidrogénio envolvidos. O Planeamento de segurança deve ser uma parte integrante do projeto e de manutenção do sistema. Os principais objetivos do planeamento de segurança centram-se na identificação dos perigos, avaliação dos riscos, considerando a probabilidade e gravidade/consequência de um incidente, e na minimização dos riscos associados a um projeto. Para atingir estes objetivos, diversas técnicas de análise e avaliação de risco são utilizadas, em conjunto com avaliações de segurança.

Uma análise de perigos, assim como uma avaliação de riscos são então imprescindíveis quando se pretende criar um sistema, que para o seu funcionamento necessita de alguma forma de armazenamento de hidrogénio. Usualmente a análise de perigos assim como a avaliação de riscos é feita segundo o procedimento apresentado:

1. Definir o objetivo do trabalho e descrever o sistema e seus componentes;
2. Identificar os perigos;
3. Avaliar a probabilidade, gravidade de cada risco e o impacto dos perigos em:
 - a. Meio ambiente e população;
 - b. Instalação e instituição;
 - c. Equipamento e o pessoal.
4. Identificar o risco existente e aplicar normas de correcção.
5. Identificar e verificar os equipamento de proteção individual exigido (PPE), e/ou controlos administrativos, e determinar se o risco foi reduzido para um nível aceitável. Repetir a etapa 1 para garantir que não haja riscos adicionais que foram introduzidos pelos controlos ou alterações no sistema e seus componentes.
6. Segue-se ativamente com revisão periódica do âmbito dos trabalhos e perigos (H₂tools, 2016b).

O processo de análise e avaliação de riscos deve ser realizado por equipas que incluam membros com experiência em diversas áreas, como por exemplo, em substâncias químicas perigosas, sistemas elétricos, gestão de resíduos, etc. Durante todo o período de vida das instalações devem ser mantidas inspeções regulares para que novos perigos possam ser identificados, avaliados e resolvidos. A Figura seguinte representa todo este processo de análise e avaliação de riscos.

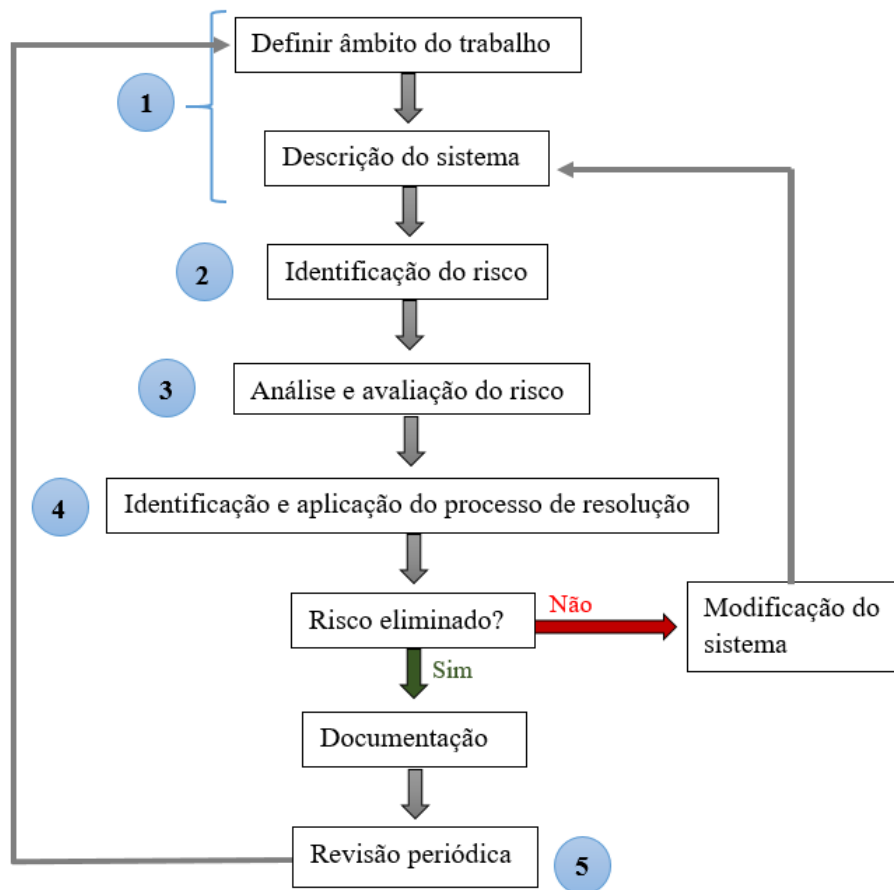


Figura 2.7 - Processo de análise e avaliação de riscos (H₂tools, 2016b).

3. Produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio

3.1. Métodos de produção de hidrogénio

Como já foi referido anteriormente, apesar do hidrogénio ser o elemento mais simples e abundante do universo (Kalamaras & Eftathiou, 2013), este não se encontra na forma de gás, ou líquido nem isolado na natureza, ele aparece sempre associado a outros compostos como hidrocarbonetos, água, materiais orgânicos, e álcoois (Alazemi & Andrews, 2015; Kalamaras & Eftathio, 2013). Para a utilização de hidrogénio como combustível temos a necessidade de o produzir. Atualmente existem inúmeras formas de produção de hidrogénio, que utilizam também inúmeras fontes de energia, podendo estas ser renováveis ou não. É no entanto importante salientar que o hidrogénio é somente considerado um combustível de emissão zero, apenas se produzido utilizando energias renováveis.

A nível não renovável, o hidrogénio pode ser produzido diretamente a partir de combustíveis fósseis através de vários processos, sendo os mais conhecidos: a reforma a vapor (SR), oxidação parcial (POX), e gaseificação. A utilização deste tipo de combustíveis na sua produção faz com que seja necessário o processamento dos produtos gerados, devido às elevadas quantidades de CO produzido (Dincer & Acar, 2014). A produção de hidrogénio a partir da biomassa é feita por processos bioquímicos ou termoquímicos, baseados principalmente em processos semelhantes à gaseificação. Este composto pode também ser produzido a partir da água por vários processos como a eletrólise (HE), foto eletrólise (PHE), termólise (ou separação termoquímica da água (WT)), ou por processos fotobiológicos (Alazemi & Andrews, 2015). Estes métodos que utilizam a água como matéria-prima estão atualmente a ser muito utilizados, devido á sua elevada disponibilidade (Dutta, 2014). Além da água também podemos utilizar outras fontes renováveis como a energia solar ou a energia eólica para a sua produção. O que se faz a maioria das vezes é a produção de eletricidade a partir destas fontes renováveis para posterior utilização no processo de eletrólise (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Seguidamente iremos abordar alguns dos métodos de produção de hidrogénio mais conhecidos.

3.1.1. Hidrogénio a partir da reforma a vapor (SR)

A Reforma a vapor é atualmente o método de produção de hidrogénio, através de combustíveis fósseis, mais utilizado (Alazemi & Andrews., 2015) e menos dispendioso. As matérias-primas mais usuais são o gás natural, os hidrocarbonetos, e o metanol (Kalamaras & Efstathiou, 2013). A reforma de metano a vapor (SMR) é um processo no qual a matéria-prima utilizada reage com o vapor na presença de um catalisador para produzir hidrogénio e dióxido de carbono (Sharma & Ghoshal, 2015), sendo necessária uma fonte de energia térmica no início do processo (Dincer & Acar, 2014). Este processo é constituído por duas partes: primeiro a produção de algum hidrogénio mais monóxido de carbono por meio da reação do metano com o vapor, seguida da produção de mais hidrogénio e dióxido de carbono quando o monóxido de carbono reage com o vapor. A eficiência do processo de energia pode variar de 85% a 90%, dependendo se o calor utilizado inicialmente é ou não recuperado (Alazemi & Andrews, 2015). As suas principais vantagens são devidas à elevada eficiência e baixos custos operacionais e de produção, no entanto não é vista como uma opção viável devido às reservas finitas das matérias primas utilizadas.

3.1.2. Hidrogénio a partir da oxidação parcial (POX)

O processo de oxidação parcial denominado vulgarmente por "gaseificação" gera hidrogénio a partir de uma vasta gama de hidrocarbonetos, incluindo carvão, óleos residuais pesados e produtos de refinaria de baixo valor. Neste processo, o hidrocarboneto sofre uma reação na presença do oxigénio, produzindo monóxido de carbono e hidrogénio, utilizando elevadas temperaturas (Sharma & Ghoshal, 2015). Ao contrário do que acontece no processo de SMR, no processo de POX não é necessário a utilização de catalisadores (Dincer & Acar, 2014). Com este processo a produção de hidrogénio é mais rápida, embora em menores quantidades a partir da mesma quantidade de matéria-prima (Alazemi & Andrews, 2015). O Quadro 3.1 refere algumas das vantagens e desvantagens destes dois processos descritos até agora.

Quadro 3.1 – Vantagens e desvantagens dos processos de SR e POX (Dincer & Acar, 2014).

Processo	Vantagens	Desvantagens
Reforma de vapor	Processo industrial mais desenvolvido. Baixa temperatura de operação. Não é utilizado o oxigénio. Bom rácio H_2/CO .	Elevadas emissões nocivas para o ambiente.
Oxidação parcial	Não são utilizados catalisadores. Baixa produção de metano.	Elevadas temperaturas de operação. Processo complexo. Mau rácio H_2/CO .

3.1.3. Reforma Auto Térmica (ATR)

A reforma auto térmica é mais um tipo de produção a partir de hidrocarbonetos. É uma técnica que está agora em fase de desenvolvimento, e que apresenta algumas vantagens em relação ao processo SMR e POX. Elevadas eficiências, assim como baixa produção de monóxido de carbono são duas tarefas também conseguidas com este processo, no entanto por ser endotérmico é então necessário um gasto de energia adicional. As principais vantagens do processo ATR é ser mais simples e menos dispendioso do que SMR de metano, assim como o facto de este poder ser desligado e iniciado muito rapidamente, aliada a uma produção de maiores quantidades de hidrogénio, relativamente ao processo POX.

O processo de ATR consiste numa combinação de reações de reforma a vapor (endotérmicas) e oxidações parciais (exotérmicas), e é visto como uma opção viável para a substituição dos dois processos descritos anteriormente, pois apesar das vantagens descritas, são também conseguidas eficiências bastante próximas dos processos de SMR e POX (Kalamaras & Efstathiou, 2013).

3.1.4. Hidrogénio a partir da gaseificação de carvão (CG)

A gaseificação de carvão é o método químico mais antigo de produção de hidrogénio (Alazemi & Andrews, 2015), portanto é também o processo mais simples de realizar

(Dincer & Acar, 2014). Neste processo o carvão é parcialmente oxidado com vapor e oxigénio em um reator de alta temperatura e alta pressão, na presença de um catalisador de níquel (Alazemi & Andrews, 2015) sendo os produtos desta reação constituídos principalmente por H_2 , CO, vapor e CO_2 (Dincer & Acar, 2014). Apesar de algumas vantagens deste processo em relação a outros, devido ao elevado teor de carbono do carvão, este método provoca emissões de CO_2 mais elevadas em comparação com outras tecnologias disponíveis para produção de hidrogénio, sendo 11 kg de CO_2 libertado para 1 kg de hidrogénio produzido (Alazemi & Andrews, 2015). Considerando o estado atual da tecnologia e as reservas mundiais de carvão, a utilização deste composto para produção de hidrogénio é uma opção económica e tecnicamente interessante (Dincer & Acar, 2014). No entanto sendo a vertente ambiental muito importante nos dias de hoje, esta técnica está cada vez mais em declínio.

3.1.5. Hidrogénio a partir da biomassa

Os processos de conversão da biomassa em hidrogénio podem ser agrupadas em duas categorias: processos termoquímicos (gaseificação) e bioquímicos. Os processos termoquímicos são realizados com temperaturas elevadas e, portanto, conseguem taxas de reação mais altas. Estes envolvem gasificação ou pirólise (aquecimento da biomassa na ausência de oxigênio) para a produção de um gás rico em hidrogénio, conhecido como "syngas" (Sharma & Ghoshal, 2015). A biomassa contém cerca de 6-6,5% em massa de hidrogénio, o que provoca uma eficiência que pode variar entre 41 e 59%. Processo de produção bioquímica apresenta vantagens relativas à manobrabilidade e armazenamento dos produtos da reação, quando comparados com os processos termoquímicos, no entanto a produção de hidrogénio através destes processos ainda não é aplicada em grande escala (Alazemi & Andrews, 2015).

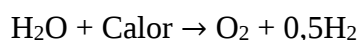
3.1.6. Hidrogénio a partir da água

3.1.6.1. Eletrólise

A eletrólise é um dos métodos mais básicos e promissores para a produção de hidrogénio (Dincer & Acar, 2012), sendo usado pela primeira vez no ano de 1890. Basicamente a eletrólise consiste na separação da molécula de água em hidrogénio e oxigénio, através da passagem de uma corrente contínua (Kalamaras & Efstathiou, 2013; Dincer & Acar, 2014), utilizando um dispositivo chamado eletrolisador. Estes dispositivos podem usar qualquer fonte de energia elétrica para desempenhar a sua função (Alazemi & Andrews, 2015). Para que a reação se desenvolva temos necessariamente de usar um eletrólito (usualmente o ácido sulfúrico) e catalisadores de platina. Este processo é considerado ecologicamente limpo, pois não provoca a libertação de gases com efeito de estufa, e o oxigénio que se forma pode também ser utilizado em inúmeras aplicações (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Existem duas principais tecnologias que podem ser usadas na eletrólise: através do processo alcalino, ou do processo com membrana de troca iónica. Usando em eletrolisador alcalino conseguimos uma pureza de 99.8%, com uma eficiência energética de cerca 70-80 %, por outro lado a pureza do hidrogénio conseguida através de um eletrolisador com membrana pode atingir os 99,9%, com até 89% de eficiência energética (Alazemi & Andrews, 2015). Assim podemos afirmar que pureza do hidrogénio obtida por este processo é elevada, independentemente da tecnologia utilizada, portanto o hidrogénio produzido por este método pode ser utilizado maioritariamente em células de combustível, visto que o grau de pureza exigido para o seu funcionamento também é muito elevado.

3.1.6.2. Termólise

A termólise da água ocorre quando a água é aquecida até atingir a sua temperatura de dissociação (geralmente 1927 °C), no entanto este valor de temperatura pode ser reduzido (até 1000°C) utilizando catalisadores de enxofre-iodo ou bromo-cálcio. Este processo é representado apenas por uma equação:



O processo de termólise não emite gases com efeito de estufa, desde que se utilize

uma fonte renovável para fornecer o calor necessário. O grande desafio deste processo consiste em evitar a recombinação do hidrogénio e oxigénio, que se verifica muito rapidamente com uma diminuição mínima da temperatura (Alazemi & Andrews, 2015). Para evitar esta recombinação são geralmente utilizadas membranas de paládio (Alazemi & Andrews, 2015; Kalamaras & Efstathiou, 2013).

3.1.6.3. Foto eletrólise

A foto eletrólise consiste no aproveitamento direto das radiações solares para a produção de energia elétrica. Esta energia elétrica vai então ser utilizada para separação da molécula da água, por eletrólise já referida anteriormente. Este processo é uma das formas renováveis de produção de hidrogénio, apresentando elevada eficiência e custos reduzidos, no entanto está ainda em fase de desenvolvimento experimental (Kalamaras & Efstathiou, 2013; Alazemi & Andrews, 2015).

3.1.7. Hidrogénio a partir da energia nuclear

Na verdade quando falamos da produção de hidrogénio a partir da Energia nuclear, estamos a falar da possibilidade de associar tanto o calor produzido pela produção de energia elétrica, como a própria energia elétrica aos processos de termólise e eletrólise. Embora a utilização da energia nuclear para a produção de hidrogénio seja atraente devido inexistência de libertação de carbono, gera outras preocupações ambientais graves relacionadas com a extração e tratamento do urânio, o risco de potenciais acidentes, e a gestão e a eliminação de resíduos radioativos (Sharma & Ghoshal, 2015).

Esta ideia de aproveitar o calor e eletricidade produzidas por outras fontes para posteriormente utilizar na termólise e eletrólise não é exclusiva da energia nuclear, como exemplo, o calor e eletricidade também podem ser produzidos por células de combustível que funcionem com elevadas temperaturas (Lipman, 2011).

3.1.8. Hidrogénio biológico

O hidrogénio é chamado ‘hidrogénio biológico’ quando é obtido a partir da matéria orgânica, por meio de outros seres vivos. A energia bioquímica, que é armazenada na

matéria orgânica, pode ser usada por seres vivos para extrair o hidrogénio na presença ou na ausência de luz.

3.1.8.1.Processos fotobiológicos

Neste tipo de processos são utilizadas determinadas comunidades de bactérias ou algas para a produção de hidrogénio por processos parecidos com a fotossíntese. Na verdade não é produzido somente o hidrogénio, o que conseguimos obter por estes processos consiste numa mistura de hidrogénio e oxigénio, a partir da qual o hidrogénio deve ser separado. As eficiências destes processos não conseguem atingir os valores teóricos de 25%, por isso consideram-se processos não eficazes. Além disto a utilização destes seres faz com que tenhamos de limitar a quantidade de radiação solar que lhe incide, tornando-se um processo pouco prático (Alazemi & Andrews, 2015).

3.1.8.2.Fermentação escura

A fermentação escura consiste na conversão da energia bioquímica, armazenada na matéria orgânica, em outras formas de energia na ausência da luz. A produção de hidrogénio por este processo elimina a necessidade de controlo da luz solar, como verificado no processo descrito anteriormente, tornando-se portanto um processo bastante mais prático. A produção de hidrogénio por este processo tem várias outras vantagens, tais como controlar e estabilizar os resíduos biológicos que apresentam potencial perigo de contaminação, pois pode ser integrada nos sistemas de tratamento de águas residuais. Os custos deste tipo de fermentação são reduzidos, visto que os resíduos orgânicos são abundantes. No entanto, tal como acontece nos processos fotobiológicos, para uma grande quantidade de resíduos é produzida uma pequena quantidade de hidrogénio, sendo esta a principal desvantagem (Dincer & Acar, 2014).

De entre todos estes processos de produção de hidrogénio mencionados, existem alguns que são mais utilizados que outros, assim como uns mais recentes e outros já mais desenvolvidos. Apesar disto é importante reter algumas das características relativamente a cada um deles. O Quadro 3.2 resume algumas das características mais importantes, dos métodos de produção de hidrogénio mais utilizados atualmente.

Quadro 3.2 – Informações básicas sobre os métodos de produção de Hidrogénio mais comuns (Alazemi & Andrews, 2015).

Processo	Recursos	Energia primária	% de H ₂ por kg da matéria prima	Temperatura do processo (°C)	Pureza do H ₂ obtido	kg de CO ₂ libertado por kg de H ₂ *	Eficiência do processo
Reforma a vapor de Metano	Vapor + CH ₄	Térmica	25%	700-1000	70-75%	≅ 7	60-85%
POX	Hidrocarbonetos	Química	25%	1200-1500	ND**	≤ 3	71-89%
Gasificação do carvão	Vapor + carvão	Térmica	13%	900	90%	≅ 11	60-67%
H ₂ a partir da biomassa	Biomassa	Térmica	6,5%	600	ND**	≅ 5	30-59%
Eletrólise	Água	Elétrica	11,2%	80-150	>99%	0	25-38%
Termólise	Água	Elétrica	ND**	2000-2500	>99%	Depende da fonte de calor	≈ 50%

*Não é contabilizado o CO₂ emitido na construção dos equipamentos, nem na instalação dos mesmos, so é contabilizado o CO₂ libertado durante a produção de H₂.

** Informação não disponível.

3.2. Armazenamento do hidrogénio

Dentro do setor dos transportes existem duas formas principais de armazenamento de hidrogénio, sob a forma de hidrogénio líquido, ou sob a forma de gás comprimido, sendo consideradas também as formas mais disseminadas e económicas para o seu armazenamento. Existem ainda outros métodos de armazenamento, chamado armazenamento químico, mas que atualmente ainda não se encontram numa fase de desenvolvimento suficiente para aplicações em larga escala (Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia – LAMTec, 2012). A questão do armazenamento de hidrogénio é ainda hoje um problema, principalmente devido às características deste elemento, sendo a sua reduzida densidade e ao seu ponto de fusão reduzido, os principais fatores para que o seu armazenamento seja uma tarefa difícil. A baixa densidade do hidrogénio, seja no estado líquido ou gasoso, também resulta em uma baixa densidade de energia. Por isso, certo volume de hidrogénio contém menos energia que o mesmo volume de qualquer combustível perante as mesmas condições de pressão e temperatura.

3.2.1. Armazenamento do hidrogénio no estado líquido

O hidrogénio encontra-se no estado gasoso à pressão e temperatura normais. Ao nível de pressão normal a sua temperatura de condensação é de $-252,8^{\circ}\text{C}$ (Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia – LAMTec, 2012). No estado líquido é possível armazenar mais quantidade de hidrogénio por unidade de volume, podendo facilitar também o seu transporte, no entanto, mesmo neste estado é mais volumoso que a gasolina. Como termo de comparação, os recipientes de hidrogénio podem ser de 4 a 10 vezes maiores do que recipientes de gasolina, para as mesmas quantidades de energia armazenadas (Augusto, 2013). No caso de aplicações nos transportes o interessante é armazenar o máximo de hidrogénio possível num reservatório leve e com elevada segurança (Stetson, 2017).

Neste processo de liquefação (arrefecimento) do hidrogénio é gasta cerca de 40% da energia contida no hidrogénio, sendo este fator um dos grandes inconvenientes deste tipo de armazenamento (Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia – LAMTec, 2012).

Relativamente à segurança, a manipulação do hidrogénio no estado líquido já se encontra bem desenvolvida, sendo considerado um armazenamento mais seguro quando comparado com o armazenamento de hidrogénio sob a forma de gás comprimido. Este tipo de armazenamento já se encontra aplicado a algumas situações nos transportes, no entanto é utilizado quando se requerem grandes quantidades de hidrogénio, pois a estrutura requerida é bastante complexa e apresenta elevados custos (Renquist *et al.*, 2012).

3.2.2. Armazenamento de hidrogénio na forma gasosa (gás comprimido)

O Hidrogénio comporta-se como um gás ideal, por esta razão neste tipo de armazenamento este é tratado como todos os outros gases e armazenado normalmente em recipientes tipo botijas ou tanques que suportam altas pressões (Stetson, 2017). Este método de armazenamento é utilizado quando são necessárias poucas quantidades de hidrogénio, normalmente em aplicações estacionárias onde o fator peso não é relevante (Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia – LAMTec, 2012). A tecnologia utilizada neste tipo de armazenamento é idêntica à tecnologia utilizada para armazenamento de gás natural, podendo os recipientes ser construídos em aço ou alumínio, quando as pressões requeridas são da ordem dos 200 a 250 bar. No entanto na maioria das aplicações o hidrogénio é armazenado a 350 bar, o que requer um pouco mais de gastos com tecnologias mais resistentes (Augusto, 2013). Para uma compressão de 350 bar, é gasta cerca de 10% da energia contida no gás armazenado, o que é uma vantagem em relação ao armazenamento apresentado anteriormente (Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia – LAMTec, 2012). O armazenamento de hidrogénio está constantemente a ser estudado e já existem tecnologias que englobam fibras de carbono reforçadas, que permitem o aumento de pressão para o armazenamento de hidrogénio de até 700 bar, logicamente um fator não favorável é o custo dos materiais utilizados. Armazenar o hidrogénio como gás comprimido apresenta como principais vantagens a simplicidade e a inexistência de perdas energéticas com o decorrer do tempo, sendo também uma forma de armazenamento mais barata (Renquist *et al.*, 2012).

Apesar deste tipo de armazenamento também já ser bem estudado, a segurança é ainda um dos fatores mais preocupantes (Sirosh, 2013), sendo os principais perigos associados à compressão do hidrogénio, assim como à reutilização dos reservatórios (Stetson, 2017).

3.2.3. Armazenamento químico de hidrogénio

O armazenamento químico do hidrogénio surge na tentativa de aproveitar a capacidade do hidrogénio se agregar a outros compostos sólidos ou líquidos, de modo a armazenar a maior quantidade possível num tamanho reduzido (Ball & Wietschel, 2009a).

O hidrogénio pode ser agregado a outros sólidos, por adsorção ou absorção. No caso da adsorção o hidrogénio adere à superfície de um material, quer na forma de molécula (H_2), quer na forma de átomo (H). Na absorção as moléculas de hidrogénio dissociam-se em átomos que são incorporados na estrutura molecular do sólido, com este método é possível armazenar grandes quantidades de hidrogénio em pequenos volumes a baixa pressão e temperaturas próximas da temperatura ambiente (Jain, 2009). Todos estes fatores fazem com que este tipo de armazenamento seja visto como uma das possíveis soluções para os problemas de armazenamento convencionais, além disso alguns dos problemas de segurança também seriam resolvidos.

Existem varias tecnologias que atualmente estão em desenvolvimento, como os nanotubos de carbono, microesferas de vidro, hidretos metálicos, etc (Jain, 2009). O principal desafio é precisamente encontrar um material capaz de apresentar elevada capacidade de armazenamento de hidrogénio, e reversibilidade do ciclo de carga/descarga a temperaturas moderadas (inferiores a $100^\circ C$), para que sejam compatíveis com as aplicações nos transportes, e com elevada cinética para efetuar estes ciclos com alguma rapidez. Obviamente o material deve ser capaz de reter o hidrogénio sem permitir fugas. Além de todos estes fatores os materiais utilizados para armazenamento do hidrogénio devem ainda preencher os requisitos de peso e custo reduzidos, vida útil e segurança elevadas (Crabtree & Dresselhaus, 2008).

Entre todas as opções para este tipo de armazenamento, a que parece mais promissora é a incorporação de hidrogénio em estruturas metálicas, ou seja, os chamados hidretos metálicos (Stetson, 2017; Singh *et al.*, 2015), representados na Figura 3.1. Estes são classificados segundo a temperatura que requerem para a libertação do hidrogénio. São então divididos em duas categorias: Hidretos de alta e de baixa temperatura. Os hidretos de alta temperatura podem absorver maiores quantidades de hidrogénio, no entanto requerem grandes quantidades de calor para a libertação do gás o que faz com que a aplicação em

automóveis, por exemplo, não seja muito interessante, pois para que o hidrogénio seja libertado é necessário uma fonte adicional de energia. Por outro lado os hidretos de baixa temperatura não necessitam de tantas quantidades de calor para libertar o hidrogénio, mas também não apresentam taxas de libertação de hidrogénio satisfatórias à temperatura ambiente. Para contornar este problema os hidretos de baixa temperatura precisam ser pressurizados, aumentando a complexidade do processo. Estes reservatórios são considerados muito seguros, pois, em caso de perfuração acidental, a perda de pressão no interior resulta em uma diminuição da temperatura, parando o vazamento do hidrogénio (Sarkar & Banerjee, 2005).

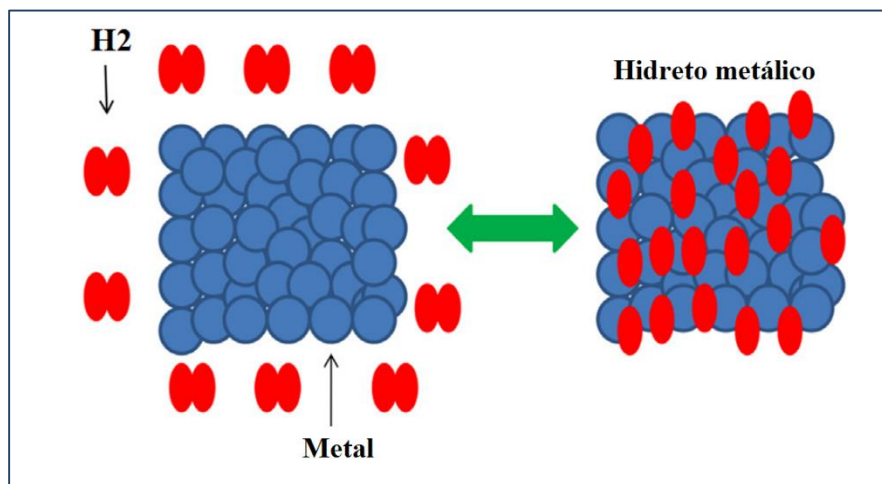


Figura 3.1 – Representação do armazenamento de hidrogénio na forma de hidreto metálico (Niaz *et al.*, 2015).

Podemos verificar então que existem vantagens inerentes ao uso dos hidretos metálicos, como a elevada estabilidade do hidrogénio, visto que este passa a fazer parte da estrutura química do metal, sem a existência de elevadas pressões. Além destes fatores os hidretos metálicos possuem elevado potencial para aplicações nos transportes, visto que ocupam pouco volume, facilmente conseguimos uma maior densidade de energia face ao armazenamento sob a forma de hidrogénio líquido e/ou gasoso, não necessitando de energia extra para manter o armazenamento. A Figura 3.2 representa a variação do volume de um reservatório de hidrogénio, dependendo do tipo de armazenamento considerado.



Figura 3.2 – Volume relativo ao armazenamento de 4kg de hidrogénio sob diferentes formas: 1 - Hidreto de Mg_2NiH_4 ; 2 - Hidreto de $NaLi_5H_6$; 3 - H_2 líquido; 4 - H_2 comprimido a 200 bar (Santos, 2009).

Existem no entanto alguns entraves à sua utilização. O grande impedimento consiste então no fato de a taxa de libertação de hidrogénio não ser satisfatória sem a utilização de uma fonte de calor externa (Singh *et al.*, 2015). Um outro fator prende-se com a pureza do hidrogénio, sendo os principais contaminantes o oxigénio e a água, pois quimicamente eles adsorvem na superfície do metal retirando potenciais ligações para o hidrogénio, diminuindo assim a capacidade de armazenamento. Por fim existe ainda o fator peso, atualmente apesar do volume ser reduzido o peso é bastante elevado para aplicações em automóveis (Niaz *et al.*, 2015). O Quadro 3.3 mostra algumas das características dos três tipos de armazenamento mais conhecidos.

Quadro 3.3 – Características dos diferentes tipos de armazenamento (Niaz *et al.*, 2015).

	Formas de armazenamento		
	Gás comprimido	Líquido	Químico
Pressão de armazenamento	Alta pressão (350-700 Mpa)	Pressão Normal	
Custo (€/kWh)*	~14	~5	~14
Método	Compressivo	Criogénico	Químico
Benefícios	Leve, ocupa pouco espaço e tem elevada energia efetiva.	Volumetricamente e gravimetricamente eficiente, pode ser utilizado para armazenamento de longo prazo.	Alta densidade de armazenamento e baixa reatividade
Limitações	Requer cilindro de alta pressão, volumetricamente e gravimetricamente não eficiente.	Requer tanques de elevado custo, grandes perdas de energia no processo de liquefação.	Reage violentamente com o ar úmido, elevado peso, absorção de impurezas, Libertação de H ₂ lenta.

*Os valores apresentados para o custo encontram-se com o sinal de ~ pois foram transcritos de dólares americanos para valores na moeda nacional.

3.3. Distribuição de hidrogénio

A distribuição de hidrogénio de forma eficiente, é logicamente um dos principais fatores para a sua entrada no mercado. Para a sua distribuição atualmente não existem muitas opções. Sempre que possível a sua distribuição é feita através de condutas (como no caso do gás natural), este pode ser também transportado por camiões cisterna quando falamos de hidrogénio líquido; ou então através de camiões em estruturas individuais sob a forma de gás comprimido. Nos casos de ser armazenado quimicamente, estes compostos sólidos também são transportados a partir de camiões. Para transportes internacionais o mais comum é a utilização de navios devidamente equipados com os reservatórios específicos (Singh *et al.*, 2015), tal como acontece com o petróleo e gás, por exemplo.

Nesta fase de introdução do hidrogénio em larga escala no mercado, conjugar as três formas de transporte mais desenvolvidas, seria um ponto interessante a considerar. Numa situação inicial o transporte de hidrogénio sob a forma de gás comprimido seria a forma mais eficiente devido à baixa procura, evitando assim os problemas da liquefação. O investimento em armazenamento líquido de hidrogénio viria numa fase posterior quando a

procura crescesse o suficiente, já que assim conseguiríamos transportar maiores quantidades de combustível num volume mais reduzido. A utilização das condutas implica a sua construção, e por isso seria necessário primeiro escolher os pontos de interesse, para adequar da melhor forma a produção à procura de hidrogénio numa determinada área. E portanto a construção destas infraestruturas é necessária apenas numa fase de maior desenvolvimento (Pudukudy *et al.*, 2014). Destas três formas abordadas a mais rentável é o transporte de hidrogénio através de condutas, sob a forma de gás, no entanto apresenta alguns problemas relacionados com a corrosão que os materiais sofrem quando expostos ao hidrogénio, problema esse agravado com o aumento da pressão de transporte. Por este motivo para pequenas distâncias e pequenas quantidades de hidrogénio, o seu transporte tanto na forma de gás comprimido ou líquido, torna-se ineficiente (Singh *et al.*, 2014). Temos portanto de avaliar, de acordo com a situação real, tendo em conta o consumo, a existência ou não de indústrias e veículos movidos a hidrogénio, etc, qual será o método de transporte de hidrogénio a utilizar, não podendo utilizar apenas um tipo de transporte isoladamente (Yang & Ogden, 2007).

Como já foi dito anteriormente o transporte de hidrogénio através de condutas é o sistema mais rentável, quando esta tecnologia já apresenta um estado de maturação elevado. Por isso em todo o mundo existe aproximadamente 16.000 km destas redes, situadas em países como a Bélgica, a França, Países Baixos, Alemanha, e Estados Unidos. As condutas apresentam um custo elevado para a sua implementação, devido aos materiais muito resistentes que requer. Estas devem ser feitas de materiais não porosos, de alta qualidade (aço inoxidável, por exemplo), acrescentando grandes camadas de revestimentos isolantes, para que suportem as adversidades causadas pelas propriedades físicas e químicas do hidrogénio. No entanto posteriormente requerem um custo baixo para manutenção. O transporte de hidrogénio na forma líquida apresenta-se como uma solução mais dispendiosa devido aos custos de eletricidade que engloba para a sua concessão. O custo de capital deste tipo de sistema depende da quantidade de hidrogénio a ser transportado. Este sistema torna-se útil em situações cuja distância necessária para a entrega é reduzida.

Todos os componentes utilizados para transporte e armazenamento de hidrogénio devem ser certificados por uma autoridade competente, como por exemplo a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) para aplicações estacionárias, ou pelo Departamento de Transporte dos EUA (DOT) para fins de transporte ou de entrega (Lipman, 2011).

Para aplicações nos transportes o hidrogénio é nos dias de hoje armazenado em veículos como um gás comprimido em cilindros de alta pressão (350 - 700 bar) ou como um líquido em reservatórios criogénicos. Uma desvantagem dos métodos atuais é o fato de existir um gasto de energia para se conseguir alterar a forma física deste composto. Por vezes essa penalização de energia pode ser significativa, podendo chegar até 10% do conteúdo energético do combustível a comprimir, e até 40% para liquefazer (Singh *et al.*, 2015).

O fato de na sociedade ainda existir o medo face a utilização do hidrogénio, por se considerar uma substância perigosa, associada a explosões e incêndios, é uma outra questão que precisa de ser resolvida, para que possamos vir a ter um setor dos transportes mais limpo (Singh *et al.*, 2015). A Figura 3.3 representa algumas formas de produção, armazenamento e distribuição de hidrogénio atuais.

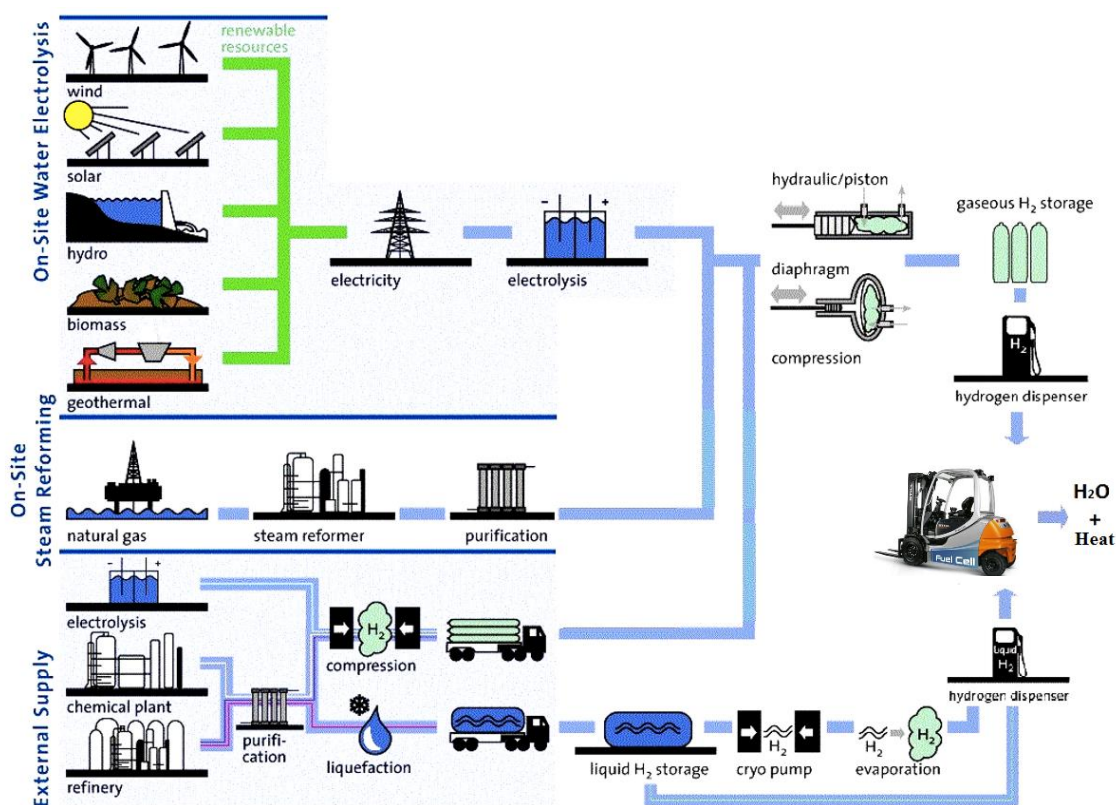


Figura 3.3 – Formas de produção, armazenamento e distribuição de Hidrogénio. (Nunes *et al.*, 2010).

3.4. O mercado do hidrogénio

O aumento da procura de energia em todos os setores, o crescimento da população mundial e a diminuição da disponibilidade de fontes de combustíveis fósseis de baixo custo são algumas das questões mais importantes que do século XXI. O hidrogénio produzido a partir de fontes de energia renováveis, é um potencial combustível de transporte alternativo. As estações de abastecimento de hidrogénio são uma das partes mais importantes da infraestrutura de distribuição necessária para suportar a operação de veículos elétricos que possuam células de combustível. Para que veículos que possuem células de combustível sejam produzidos em grande escala e distribuídos é necessário que haja um planeamento de estruturas de reabastecimento de hidrogénio por toda a Europa. Portanto é necessário estudar as tendências do mercado atual neste ramo.

No estudo de mercado realizado nesta dissertação vamos abordar duas vertentes diferentes. Numa primeira parte vamos estudar o infraestruturas de hidrogénio em todo o mundo aplicadas ao transporte em geral, e seguidamente faremos uma análise do crescimento do mercado no caso dos empilhadores. Esta primeira análise é importante visto que as estruturas e formas de abastecimento dos empilhadores com células de combustível é muito semelhante aos veículos comuns.

3.4.1. Estações de reabastecimento de hidrogénio

As estações de hidrogénio são elementos essenciais quando falamos do crescimento do número de veículos movidos a hidrogénio, pois elas têm de existir em número suficiente para assegurar a autonomia dos veículos, permitindo que eles percorram grandes distâncias, tal como acontece com os veículos com motores de combustão. Atualmente existem dois tipos de aproveitamento e construção destas estações:

1. Estações em que o hidrogénio é produzido noutro local, e depois transportado até a estação para armazenamento, para posterior distribuição.
2. Estações em que o hidrogénio é produzido no próprio local da estação, sendo armazenado e distribuído quando necessário (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2016; Alazemi & Andrews, 2015).

Em alguns casos podemos encontrar uma mistura destes dois tipos de estações, no entanto nesses casos são até agora apenas aplicadas em situações de estudo (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2016).

Nas estações do tipo 1 o hidrogénio é então produzido em instalações industriais (Alazemi & Andrews, 2015), tendo de se definir posteriormente o método de transporte mais rentável. No entanto apesar deste fator são as mais parecidas com as estações convencionais, usadas para os combustíveis fósseis, podendo ser facilmente integradas nas mesmas, o que pode resultar numa diminuição do custo de construção (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH-JU, 2016). Neste tipo de estações existem vários componentes importantes. Inicialmente o hidrogénio é recebido na forma de gás ou líquido, seguidamente existem vários componentes de controlo, como válvulas, bombas, sensores etc, para gerenciar as transferências e armazenamento de hidrogénio. No caso de o hidrogénio estar na forma líquida, usam-se permutadores de calor para o transformar em gás, e só depois é que passa pelo compressor, para ser armazenado em alta pressão, usualmente os valores de pressão verificados são 350 e 700 bar, e de acordo com a pressão verificada usualmente o hidrogénio é denominado por ‘H35’ ou ‘H70’, respetivamente. Como as altas pressões de armazenamento são também usadas para armazenamento do hidrogénio nos veículos, o processo de reabastecimento torna-se semelhante ao usado nos combustíveis tradicionais, com a utilização de dispensadores. Este processo é semelhante mesmo em relação ao tempo necessário, permitindo aos utilizadores reabastecerem os seus veículos em 5 minutos. Todos estes componentes para a realização do processo de armazenamento e distribuição está representado na Figura 3.4.

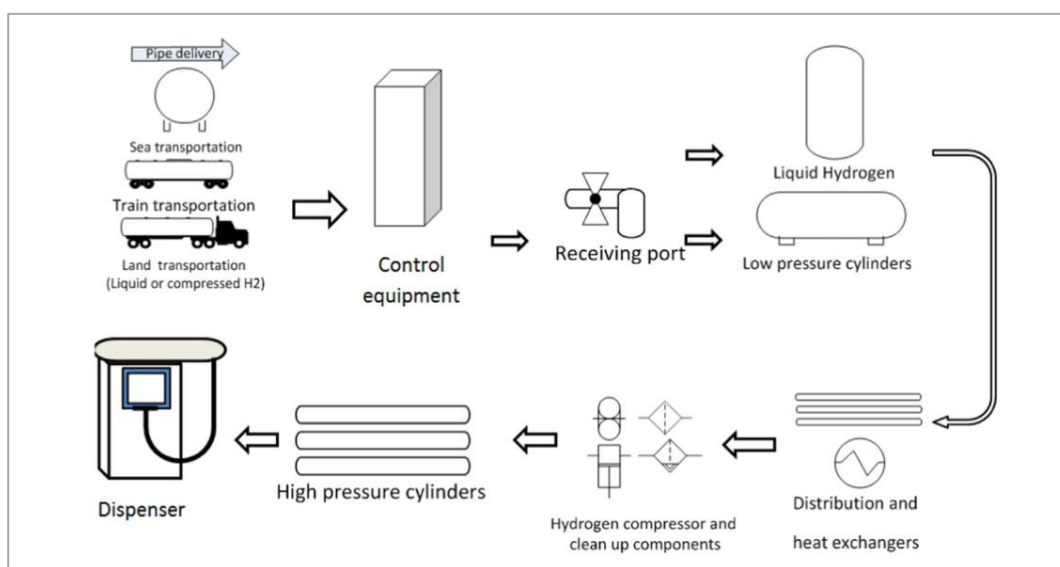


Figura 3.4 – Elementos constituintes de uma estação de hidrogénio tipo 1 (Alazemi & Andrews, 2015).

Nas estações do tipo 2, o hidrogénio pode ser produzido a partir de qualquer fonte de energia, ou técnica de produção existente. Os principais métodos de produção verificados são a eletrólise da água e a reforma do metano a vapor (Alazemi & Andrews, 2015). Estas apresentam-se como uma solução para a produção de hidrogénio através de fontes renováveis eliminando a necessidade de transporte (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH-JU, 2016). O princípio de funcionamento deste tipo de estações é semelhante ao funcionamento das estações anteriores. Como o hidrogénio é produzido no local temos alguns componentes que se alteram. Não existe, por exemplo a preocupação do armazenamento do hidrogénio no estado líquido, pois ele será produzido e armazenado sempre no estado gasoso, este facto também elimina a necessidade de permutadores de calor. A constituição de uma estação do tipo 2 está representada na Figura 3.5.

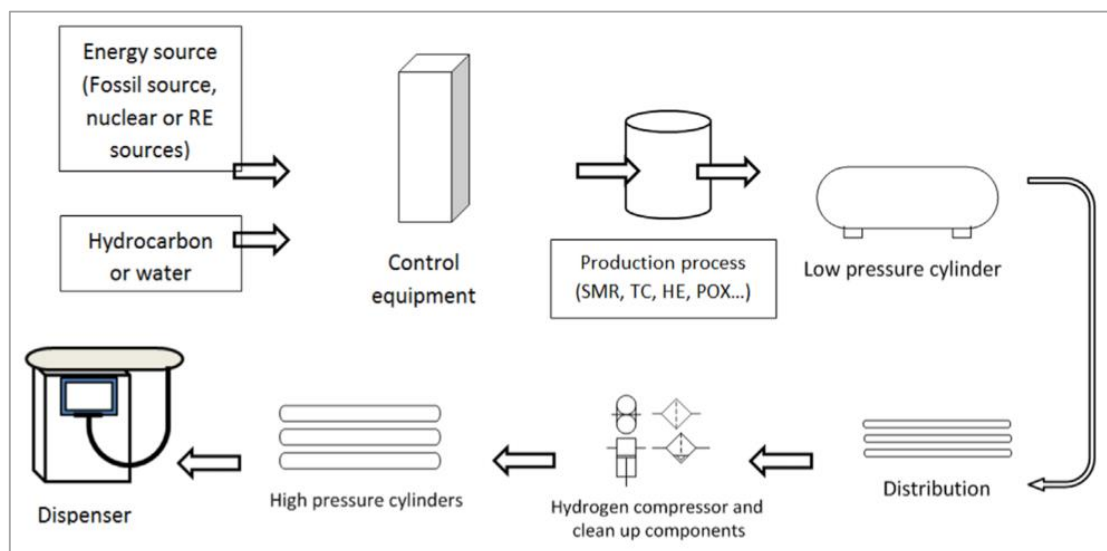


Figura 3.5 - Elementos constituintes de uma estação do tipo 2 (Alazemi & Andrews, 2015).

O processo de abastecimento de hidrogénio foi concebido para ser semelhante ao abastecimento com outros combustíveis convencionais, como pode ser visto na Figura 3.6, tornando-se mais fácil para o consumidor. O orifício do distribuidor é equipado com a tecnologia infravermelha que comunica os valores de pressão e temperatura do tanque de armazenamento do veículo a um controlador central, com estes valores o sistema monitoriza a taxa de abastecimento. Inicialmente o abastecimento começa sem o auxílio de compressores até que a pressão dos tanques de armazenamento e a pressão do tanque do veículo se igualem. A partir desse ponto os compressores são ativados. Neste processo o valor da pressão pode subir ligeiramente e ultrapassar os valores normalizados de pressão, pois o hidrogénio sofre um ligeiro aumento de temperatura, no entanto quando a sua

temperatura baixa no tanque de armazenamento do veículo, a pressão também diminui, garantindo aproximadamente 95% da capacidade máxima. Para o controlo do aumento de temperatura, o hidrogénio é arrefecido antes de ser dispensado no veículo. Este pré-arrefecimento é usado também para o controlo da velocidade do abastecimento, pois um maior arrefecimento possibilita maiores velocidades de abastecimento. Estas unidades são construídas para funcionar com -36°C ou com -40°C , sendo reconhecidos como unidades de abastecimento do tipo B e A, respetivamente. O principal objetivo é que o hidrogénio seja fornecido ao veículo com temperaturas compreendidas entre -17°C e -20°C (Cal State L.A., 2017).



Figura 3.6 – Representação de um bocal/mangueira (nozzle) de hidrogénio (Cal State L.A., 2017).

3.4.2. A economia do hidrogénio no mundo

Esta recente tecnologia está agora nos primeiros estágios da introdução no mercado. Assim sendo, e como todas as tecnologias, irá crescer lentamente ao longo do tempo. No entanto prevê-se que esta fase de introdução seja até 2020, e que se obtenha um mercado maduro de fornecimento e distribuição de hidrogénio até 2025. Nesta perspetiva de crescimento inicialmente os investidores precisam de alguns incentivos, devido ao custo elevado da tecnologia. Custo este, que será posteriormente amortizado com a crescente implementação da mesma. A prioridade atual é então a introdução de veículos nos

mercados onde existe uma estratégia para apoiar a sua utilização com uma infraestrutura adequada. Com o aumento do nº de veículos e com o crescente aumento da procura de hidrogénio o número de estações também tem obrigatoriamente de crescer para responder adequadamente a todas as necessidades (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH-JU, 2016).

A maioria das estações atuais de hidrogénio em todo o mundo foram construídas, gerenciadas e projetadas por universidades, centros de pesquisa, acionistas da indústria, governos ou órgãos não-governamentais. O principal objetivo destas estações é contribuir para uma rede de distribuição prática para o fornecimento de hidrogénio para veículos e, portanto, contribuir para o aumento da sua implantação. Na literatura apenas se encontram resumidos dados sobre as estações de hidrogénio até ao ano de 2015 (Alezemi & Andrews, 2015). Na tentativa de perceber se esta tecnologia está num estado de expansão, foi então necessário atualizar esta informação.

Globalmente as estações de hidrogénio encontram-se mais concentradas na América do Norte, Europa, e Ásia, como é visto na Figura 3.7. Todos estes possuem estações em operação, planeadas, ou fora de serviço, como mostrado no Quadro 3.4.

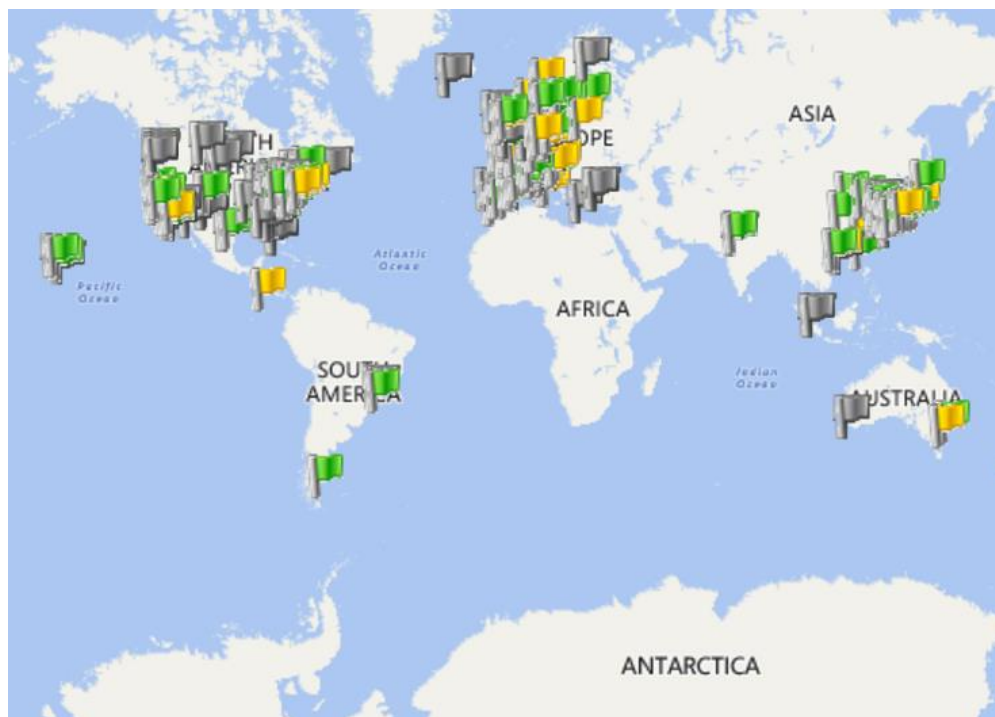


Figura 3.7 – Distribuição das estações de hidrogénio pelo mundo no 1º semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017).

Quadro 3.4 – Distribuição Global das estações de hidrogénio, no primeiro semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie serviço, 2017).

Continente	Estações			
	Em funcionamento	Planeadas	Fora de funcionamento	Total
Oceânia	1	1	1	3
Ásia	102	4	30	136
América	65	25	74	164
Europa	97	56	56	209
Antártida	-----	-----	-----	0
África				

Foi feito um estudo mais detalhado no caso da Europa, como podemos ver pela Figura 3.8, nesta a maior concentração de estações ocorre na Alemanha. Esta informação é confirmada pelos resultados presentes no Quadro 3.5, sendo qu

e a Alemanha no total possui quase metade das estações implementadas em toda a Europa.

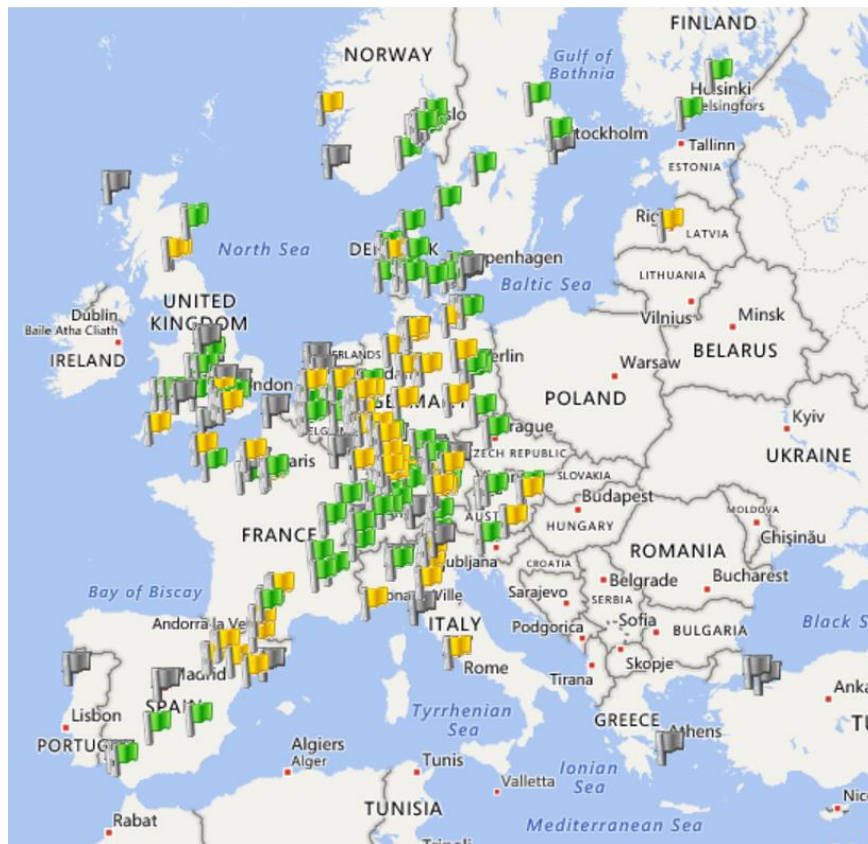


Figura 3.8 - Distribuição das estações de hidrogénio na Europa no 1º semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie serviço, 2017).

Quadro 3.5 – Distribuição das estações de hidrogénio na Europa, no primeiro semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017; Alazemi & Andrews, 2015).

	2015	2017			
	Em funcionamento	Em funcionamento	Planeadas	Fora de serviço	Total
Portugal	-----	-----	-----	1	1
Espanha	1	5	5	3	13
França	3	12	7	2	21
Suíça	-----	4	-----	3	7
Itália	3	2	5	6	13
Áustria	2	4	2	1	7
Eslovénia	-----	1	-----	-----	1
Luxemburgo	1	-----	-----	1	1
Bélgica	2	3	-----	2	5
Países baixos	2	2	2	4	8
Islândia	-----	-----	-----	2	2
Dinamarca	3	11	1	-----	12
Suécia	2	4	-----	2	6
Noruega	3	6	2	3	11
Letónia	-----	-----	1	-----	1
Finlândia	-----	2	-----	1	3
Grécia	1	-----	-----	1	1
Turquia	-----	-----	-----	2	2
Republica Checa	1	1	-----	-----	1
UK	4	14	5	9	28
Alemanha	22	40	31	23	94
Total	53	111	61	66	238

No Quadro 3.5 encontra-se também uma das colunas destacadas a laranja, que como a mesma sugere, diz respeito ao nº de estações existentes na Europa, em funcionamento, no ano de 2015. Esta coluna permite averiguar o atual crescimento da implementação de estações de hidrogénio. Mais uma vez a Alemanha ocupa um lugar de destaque, com a implementação de 18 estações de hidrogénio entre 2015 e 2017, seguindo-se a França com 9 novas estações, e a Dinamarca com 3 novas estações, considerando o mesmo período temporal. Temos também casos de regressão, ou seja em 2015 tinham mais estações em funcionamento do que em 2017, sendo esses casos relativos à Itália, Luxemburgo, e Grécia. Nestes casos a falta de financiamento, e o encerramento dos centros de estudos são os

principais fatores que levam a esta regressão (TÜV SÜD – Industrie service, 2017). Existem ainda casos em que não há evolução, como em Portugal, Países Baixos, Letónia, Turquia e Republica Checa. Em Portugal houve apenas uma estação implementada no decorrer do projeto CUTE (Contestabile, 2003), no entanto no fim do projeto esta foi encerrada, mais precisamente em 2007. No caso da Turquia e da Islândia, todas as estações que possuíram foram encerradas em 2013 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017), pelos motivos já referenciados anteriormente. Na República Checa a única estação contruída continua ainda nos dias de hoje em operação, no entanto não são vistas possíveis evoluções, visto que não existem estações planeadas. Pelo contrário na Letónia existe apenas uma estação planeada desde 2016, espera-se que possa entrar em operação no segundo semestre de 2017 (TÜV SÜD – Industrie service, 2017). O caso dos Países Baixos é extremamente curioso, pois possui o mesmo número de estações operacionais em 2015 e 2017, no entanto possui mais 2 planeadas e 4 fora de serviço, 2 delas foram encerradas entre 2009 e 2013, e as outras 2 foram encerradas em 2016 e 2017. No caso das estações encerradas em 2016 e 2017, existe uma nota que se prevê uma entrada em funcionamento num futuro próximo (TÜV SÜD – Industrie service, 2017), por isso podemos afirmar que também neste país existe uma aposta para o crescimento e expansão desta tecnologia.

Como podemos ver globalmente existe uma aposta cada vez mais relevante na expansão e implementação do hidrogénio como combustível, pois em apenas 2 anos o número de estações implementadas na Europa mais do que quadruplicou.

3.4.3. Os empilhadores com células de combustível.

Nos últimos 7 anos tem sido estudada a implementação de células de combustível em empilhadores, dentro de grandes armazéns. Em relatórios anuais sobre o mercado dos diferentes tipos de energias renováveis existentes atualmente, apresentados por grandes instituições como a U.S Department of energy, podemos verificar que este tipo de utilização só é mencionada em relatórios a partir de 2010 (Fuel Cell technologies office, 2017). Neste mesmo ano começou um dos projetos mais importantes para o impulsionamento da aplicação de células de combustíveis no setor da logística, chamado HyLIFT-DEMO. Este projeto durou cerca de 4 anos, e ainda mesmo antes de terminar já teria sido criado um outro com o nome de HyLIFT-EUROPE, iniciado em 2013. Ambos os projetos foram

fundados pela companhia Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU). Durante o decorrer do projeto HyLIFT-DEMO ficou claro que os incentivos existentes nos EUA que suportam a aplicação de células de combustíveis provocam uma penetração mais rápida destes dispositivos no mercado. Os EUA estão atualmente em avanço no que respeita à implementação de células de combustível em empilhadores, com mais de 11,000 casos em operação em todo o país (Curtin & Gangi, 2016). Segundo o relatório de 2015, em apenas 1 ano houve um crescimento de implementações de pelo menos 4,000 células de combustível em empilhadores. Posto isto podemos então averiguar que este mercado está a crescer numa velocidade bastante elevada (Curtin & Gangi, 2015).

Com o HyLIFT-EUROPE o principal objetivo é provocar essa mesma penetração de mercado na Europa, sendo que os primeiros países a implementar células de combustível no setor da logística foram a Bélgica e a França. Em 2013 foram identificados os dez principais fabricantes e compradores de empilhadores com células de combustível, apresentados no Quadro 3.6. Apesar de existirem vários produtores de células de combustível, a empresa Plug Power é a que apresenta maior destaque, apresentando cerca de 80% de cota no mercado (Curtin & Gangi, 2014).

Quadro 3.6 – Principais compradores e fabricantes de FC's para empilhadores (Curtin & Gangi, 2014; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015).

Principais compradores	Principais fabricantes de FC's para empilhadores
Sysco	Plug Power (U.S.)
Walmart	Ballard Power Systems (Canada)
ACE Hardware	H ₂ Logic (Dinamarca)
P&G	Hydrogenics (Canada)
BMW	Nuvera Fuel Cells (U.S)
Central Grocers	
Winco Foods	
Lowe's	
Kroger	
Wegmans	

Como podemos ver os 10 principais compradores de empilhadores a FC, correspondem a empresas Americanas, o que explica o crescimento deste mercado nesse mesmo país. No entanto existem marcas que se difundiram pela Europa, como é o caso da BMW e P&G. O crescimento do interesse neste mercado de outras marcas, ou até a introdução de novas marcas na Europa, irá certamente contribuir para o crescimento deste mercado (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015; Curtin & Gangi, 2015a; Curtin & Gangi, 2015).

No Quadro 3.7 estão resumidas algumas das implementações ocorridas na Europa durante o ano de 2015. Existem ainda outros países que já possuem algumas implementações deste género, não aparecem neste Quadro, pois essas implementações foram feitas em anos anteriores a 2015, não sofrendo nenhuma alteração (Curtin & Gangi, 2015; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015).

Quadro 3.7 – Implementações de empilhadores a FC, ocorridas durante o ano de 2015 em vários países da Europa (Curtin & Gangi, 2015a; Curtin & Gangi, 2015; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015).

País da Europa	Implementações em 2015
Áustria	A empresa de logística DB Schenker implementou 10 empilhadores a FC na sede em Linz. O hidrogénio é produzido a partir do biogás, e fornecido por apenas uma estação. A Fronius, fabricante de sistemas de carregamento de baterias, tecnologia de soldagem e eletrônica solar, implementou 5 empilhadores a FC na sede em Sattledt. O hidrogénio é gerado no local da empresa por eletrólise da água, efetuada com recurso a energia solar.
Bélgica	A Colruyt (rede de supermercados), implementou 13 empilhadores a FC no centro de distribuição em Halle. O principal objetivo deste projeto é a implementação de 200 empilhadores a FC, estando dividido em 2 fases. Numa primeira fase pretende-se a instalação de 75 empilhadores, e 125 na segunda fase de projeto. O hidrogénio é produzido no local do centro de distribuição por eletrólise da água, recorrendo às energias eólica e solar.
	A FM Logistic, empresa de logística francesa, presente em 12 países, implantou 10 empilhadores a FC no seu centro de logística em Neuville aux Bois, através de uma colaboração com HyPulsion, Air Liquide, Toyota, Crown e Diagma. Possuindo uma frota mista de empilhadores a bateria e a FC. Esse projeto pode levar

França	à conversão de toda a frota de baterias para FC, no total a empresa possui 84 empilhadores. A empresa IKEA implementou 20 empilhadores a FC no seu centro de distribuição em Saint-Quentin-Fallavier. A estação de abastecimento de hidrogénio foi fornecida pela Air Liquide e as células de combustível pela Plug Power. A Freight and cargo company Prelodis implantou células de combustível na frota existente no seu novo projeto (armazém de alimentos) em Saint Cry en Val.
Alemanha	A empresa Automaker BMW, com parcerias como a Linde Material Handling e Universidade Técnica de Munique, iniciou um projeto de pesquisa de três anos para desenvolver e testar empilhadores a FC na fábrica em Leipzig. Até 2015 estavam em operação 11 empilhadores. A Daimler implantou 2 empilhadores a FC, na sua sede de produção em Düsseldorf.

O relatório da FCH JU de 2015 (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015), além de resumir alguns crescimentos deste mercado na Europa, assim como os projetos pioneiros, apresenta algumas conclusões relacionadas com diferentes aspetos importantes neste ramo. Em relação às condições de funcionamento mais favoráveis para implementação de células de combustível em empilhadores, temos, as empresas com uso intensivo destes veículos (3 turnos com alto consumo de energia) e que por isso apresentam paragens para mudanças de bateria frequentes, e altos custos em relação a operadores. Uma outra aplicação favorável de FC's consiste em empresas cujo ambiente possua uma temperatura baixa, por exemplo para conservação de alimentos. A utilização desta tecnologia em aeroportos também é viável devido às novas regulamentações da EU relativas à redução de emissões.

Relativamente aos esforços que existem para implementação desta tecnologia foi verificado que na Europa a produção de empilhadores alimentados por FC's ainda não está desenvolvida de uma forma eficiente, assim como a construção e desenvolvimento de estruturas de reabastecimento de hidrogénio. Existe também uma falta de incentivos e ajudas a nível monetário, sendo que o mercado dos EUA está avançando sobre o da Europa precisamente devido a esquemas de financiamento fácil de grandes frotas. Portanto pode ser verificado que até que seja ultrapassada a fase de implantação, até possuirmos uma

produção em massa, e a infra-estrutura de fornecimento H_2 estarem devidamente desenvolvidas e instaladas, as células de combustível competem com tecnologias mais baratas.

São ainda apresentados algumas sugestões para que o apoio à implementação de FC's seja ampliado a nível de financiamento e estratégias de produção: o financiamento deve ser direto e deve beneficiar o usuário final, podendo ser atribuído diretamente na compra de células de combustível (€/ kW por exemplo), ou relativo às necessidades de infraestruturas, sendo atribuído um montante fixo de acordo com o seu tamanho. A nível de estratégias de produção o fabricante de células de combustível deve ser capaz de as desenhar para que nos casos em que a frota já esteja em operação seja possível a substituição da bateria já existente por uma célula de combustível sem fazer alterações mais significativas (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2015).

4. Células de combustível

Atualmente verificámos que existe no mundo uma grande dependência do petróleo e seus derivados. As mudanças climáticas globais têm suscitado interesse e preocupação por parte dos governos, organizações internacionais e da sociedade. Além disso, as indústrias têm procurado incrementar soluções que lhe permitam obter sustentabilidade ambiental e económica.

Assim, devido à preocupação com a preservação do meio ambiente e a necessidade de alternativas capazes de diminuir o impacto ambiental, têm sido estudadas novas fontes renováveis e limpas de energia (Jahnke *et al.*, 2016). Entre as alternativas estudadas destacam-se as células de combustível (FC), que apesar de não ser uma tecnologia recente, estas continuam a receber grande atenção, pois apresentam elevado rendimento energético (eficiência), como pode ser visto no Quadro 4.2 e 4.2.1.

Durante o seu funcionamento estas convertem energia química em energia eléctrica directamente do combustível a partir de uma reacção química com um oxidante (usualmente o oxigénio), e como subprodutos das reacções temos apenas água, energia e calor. Acredita-se que é com estas tecnologias que um dia iremos conseguir diminuir a dependência de combustíveis fósseis, podendo então aumentar a qualidade de vida das populações.

4.1. Funcionamento

As FC são então dispositivos que fazem a conversão de energia química em energia eléctrica pela combustão eletroquímica a frio de um combustível gasoso, geralmente hidrogénio. Esta energia eléctrica gerada apresenta-se na forma de corrente continua (DC) (Linardi *et al.*, 2000), que para ser utilizada usualmente é processada para obtermos corrente alternada.

Estes dispositivos são basicamente constituídos por 3 elementos: o Ânodo, o cátodo e o electrólito, este último, em todas as células está situado entre os outros dois componentes. A grande diferença entre as células de combustível e uma bateria é a necessidade de recarga, ao contrário das baterias que para funcionar exigem recarga as células de combustível produzem energia eléctrica assim que são alimentadas, sendo o combustível base o hidrogénio, que pode ser obtido directamente do ar ou através de

combustíveis ricos em hidrocarbonetos como o gás natural, metanol, etc. Muitas vezes o uso de metanol e outros combustíveis idênticos leva a necessidade de um pré-tratamento que possibilite a obtenção de hidrogénio puro que irá alimentar a célula de combustível.

O funcionamento básico de uma célula de combustível está ilustrado na Figura 4.1. Muito sucintamente o hidrogénio é fornecido ao ânodo onde é oxidado para formar electrões e iões, os iões atravessam o electrólito e os electrões são forçados a migrar por um circuito externo, gerando assim a corrente eléctrica. No cátodo os iões formados anteriormente vão reagir com o oxigénio que se encontra no ar, que se vai reduzir, formando água. As reações envolvidas em todos estes processos estão resumidas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Reações envolvidas no funcionamento de uma célula de combustível (Wang *et al.*, 2011)

Reações	Equação
Oxidação do hidrogénio (ânodo)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
Redução do oxigénio (cátodo)	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Reação geral	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + W_{elect} + Q$

O calor e a água formados tem de ser tratados/removidos para que a célula possa funcionar continuamente sem se danificar. O tratamento destes subprodutos constitui ainda outra área de pesquisa que esta atualmente em desenvolvimento, constituído uma área de elevada importância neste tema (Sharaf & Orhan, 2014)

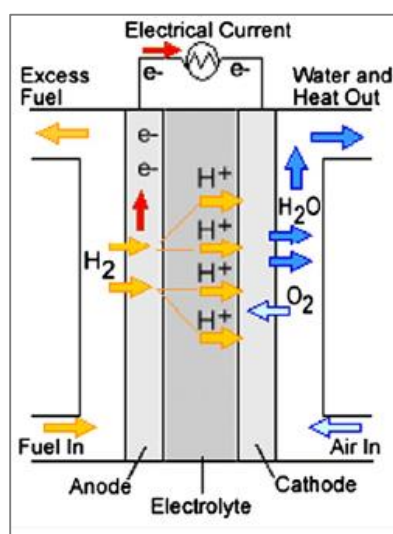


Figura 4.1 – Funcionamento de uma célula de combustível (Wang *et al.*, 2011).

4.2. Breve história

Apesar de serem estudadas intensamente nas últimas décadas as FC's foram descobertas há mais de 150 anos pelo advogado e cientista Willian Robert Grove (Perles, 2008), sendo, portanto, considerado o ancião de toda a tecnologia envolvida nas células de combustível. Willian Grove utilizou o contexto da electrólise da água, no qual se utiliza a eletricidade para separação da molécula de água produzindo-se hidrogénio e oxigénio (Esmeralda & Estêvão, 2008), criando o processo inverso, ou seja, tendo hidrogénio e oxigénio produzir electricidade. Inicialmente Grove chamou ao seu invento de 'bateria de gás' e o termo 'célula de combustível' apareceu alguns anos depois pelo contributo dos químicos Ludwig Mond e Charles Langer. Em 1959 foi criada a primeira FC totalmente operacional, sendo o seu autor Francis Thomas Bacon, a qual foi utilizada em projectos espaciais desenvolvidos pela NASA. Dessas aplicações destacam-se os projectos Gemini, onde era utilizada uma célula do tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane) que, mais tarde, foi substituída por uma célula do tipo AFC (Alkaline Fuel Cell) no programa Apollo (Perles, 2008).

O crescimento e desenvolvimento desta tecnologia ocorre nos meados do século XX após uma grave crise energética mundial, e as pesquisas sobre células de combustível ganharam força, principalmente em países onde a energia era principalmente de origem termoelétrica, altamente dependentes de derivados de petróleo. Esta era moderna foi iniciada pelo engenheiro Francis T. Bacon, associado à *Universidade de Cambridge*, iniciando os seus trabalhos de pesquisa em 1932 (Martins, 2003). No entanto nos dias de hoje ainda existem fatores que não permitem que a tecnologia das células de combustível seja competitiva no mercado face aos restantes tipos de energias renováveis que hoje conhecemos.

4.3. Diferentes tipos de células de combustível

No mercado actual existem muitos tipos de células de combustível. Estas são usualmente nomeadas de acordo com o tipo de electrólito com o qual funcionam, e diferenciadas devido à potência, eficiência, temperatura de operação e tipo de aplicações a que se destinam. De todos os tipos de FC's existentes as células de combustível com membrana permutadora de protões ou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell),

são as mais promissoras no setor dos transportes devido às potências elevadas que possibilitam, juntamente com um rápido arranque, alta eficiência, baixa temperatura de funcionamento e elevada segurança no manuseamento. No entanto as PEMFC são muito dispendiosas face às restantes alternativas existentes.

Seguidamente iremos abordar muito sucintamente vários tipos de células de combustível, referindo apenas o básico sobre cada uma delas.

4.3.1. Células de combustível alcalinas (Alkaline fuel cell)

Estas foram o primeiro tipo de FC's a ser construídas e utilizadas em missões espaciais, cujo seu objetivo era apenas produzir eletricidade e água potável. São ainda atualmente as que apresentam maiores rendimentos quando funcionam a baixas temperaturas, podendo funcionar entre os 50 e 200°C, com oxigénio e hidrogénio no estado puro. No entanto como desvantagens temos o curto período de vida e a enorme intolerância a poluentes que se formam no decorrer do ciclo de vida da célula

4.3.2. FC's de ácido fosfórico ou PAFCs (Phosphoricacid fuel cells)

São as células potencialmente mais desenvolvidas, estas funcionam a temperaturas consideradas intermédias sendo mais utilizadas em aplicações nas quais precisamos de calor e elevada eficiência energética. O seu eletrólito é constituído por ácido fosfórico concentrado. Uma das grandes vantagens na utilização deste tipo de células consiste na possibilidade de atingir 85% de eficiência em sistemas de cogeração, no entanto são utilizadas grandes quantidades de platina como catalisador (Serpa, 2004), que contribuem para o crescimento exponencial do custo deste tipo de tecnologias (Sharaf & Orhan, 2014).

4.3.3. FC's de carbonatos fundidos ou MCFCs (Molten carbonate fuel cells)

O eletrólito deste tipo de FC's consiste numa solução líquida de carbonatos (Lítio, Potássio e Sódio). São células maioritariamente usadas em sistemas de cogeração, podendo funcionar entre 600 e 700°C. Além disso em células deste tipo não é necessário a utilização de platina como catalisador, devido as altas temperaturas de funcionamento, podendo utilizar-se produtos mais baratos, como o níquel por exemplo. A sua eficiência varia entre

60% e 80% de acordo com o funcionamento em baixas e elevadas temperaturas, respetivamente (Serpa, 2004).

4.3.4. FC's de óxidos sólidos ou SOFCs (Solid oxide fuel cells)

Mais uma vez são células de funcionamento a elevadas temperaturas, mais utilizadas em circuitos de cogeração e de ciclo combinado para produção de eletricidade nas indústrias. Nestas o eletrólito é sólido, o que permite operações na ordem dos 1000°C. A sua eficiência é parecida com as MCFC's, atingindo valores de 65% até 85%, dependendo se quando operam em temperaturas mais baixas ou mais elevadas, respetivamente (Sharaf & Orhan, 2014).

4.3.5. FC's de membrana protónica ou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

O seu eletrólito é formado por uma camada de polímero sólido, usualmente o Nafion, que permite a passagem de prótons do ânodo para o cátodo da célula, impedindo a passagem dos neutrões. São células de funcionamento a baixas temperaturas (entre 50°C e 100°C), utilizando hidrogénio e oxigénio como combustível, no entanto este último pode ser substituído pelo ar. Como já foi referido apresenta algumas características que as torna bastante promissoras para a aplicação nos transportes. No entanto o seu preço revela-se elevado pelo fato de ser necessário a utilização de uma fina camada de platina no catalisador (Sharaf & Orhan, 2014).

4.3.6. FC's de metanol ou DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

Este tipo de células é muito parecido com as PEMFC, pois ambas têm o eletrólito composto por um polímero, diferenciando-se devido ao combustível utilizado. Este tipo de FC's é alimentado através de Metanol que é convertido em hidrogénio e oxigénio dentro da própria célula. As temperaturas de operação variam entre 60 e 120°C. O facto de não ser utilizado o hidrogénio como combustível elimina a necessidade de preocupação do

armazenamento do mesmo. No entanto por este mesmo motivo, têm de ser usadas grandes quantidades de platina como catalisador, o que como já foi referido, aumenta muito o preço desta tecnologia (Serpa, 2004).

Os Quadros 4.2 e 4.2.1 apresenta uma síntese das principais características de alguns tipos de células de combustível abordadas. Relativamente às células de combustível com membrana permutadora de protões (PEMFC), as suas características serão apresentadas mais a frente, mais precisamente na secção 4.6.

Quadro 4.2 – Tipos de células de combustível (Sharaf & Orhan, 2014).

Tipo	Eletrólito típico	Combustível típico	Maiores contaminantes	Temperaturas de funcionamento (°C)	Principais vantagens	Principais desvantagens	Eficiência (%)
Alcalina	Solução aquosa de Hidróxido de Potássio (KOH)	H ₂	Dióxido de carbono (CO ₂)	>0°C	Alta eficiência elétrica Catalisador barato Flexibilidade de catalisador Custos relativamente baixos	Sensibilidade elevada a contaminantes Densidade de baixa potência Eletrólito altamente corrosivo	60 - 70
Ácido fosfórico	Ácido fosfórico líquido concentrado (H ₃ PO ₄) em carboneto de silício (SiC)		Monóxido de carbono (CO) Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	160 – 220	Tecnologicamente mais desenvolvida Fácil gerenciamento da água Boa tolerância aos contaminantes Possibilidade de aproveitamento do calor gerado	Lançamento relativamente lento Elevado custo Baixa eficiência elétrica Tamanho do sistema relativamente grande	36 - 45

Quadro 4.2 – Tipos de células de combustível, continuação (Sharaf & Orhan, 2014).

Tipo	Eletrólito típico	Combustível típico	Maiores contaminantes	Temperaturas de funcionamento (°C)	Principais vantagens	Principais desvantagens	Eficiência (%)
Carbonato fundido	Carbonato alcalino líquido (Li ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃) em aluminato de lítio (LiAlO ₂)	Metano	Sulfetos Halogênios	600 - 700	Elevada eficiência elétrica Possibilidade de aproveitamento do calor gerado Elevada tolerância aos contaminantes Catalisador barato	Arranque lento Verifica-se elevada corrosão dos materiais Possibilidade de ocorrência de crossover	55 - 65
Óxidos sólidos	Zircônia estabilizada com itria sólida (YSZ)	Metano	Sulfetos	800 - 1000	Elevada eficiência elétrica Possibilidade de aproveitamento do calor gerado Elevada tolerância aos contaminantes Flexibilidade do combustível Catalisador barato	Arranque lento Requisitos de material estrito Alto estresse térmico Problemas de durabilidade Altos custos de produção	55 - 65
Metanol	Nafion sólido	Metanol líquido	Monóxido de carbono	Temperatura ambiente até 110°C	Tamanho reduzido Sistema simples Manuseamento de combustível fácil Gerenciamento térmico simples	Baixa eficiência elétrica Gestão da água complexa Alto custo Existência de crossover	35 - 60

4.4. Pontos positivos das células de combustível

As células de combustível têm muitas vantagens em relação aos sistemas baseados em combustão convencionais, tornando-se um dos mais fortes candidatos para os sistemas de conversão de energia do futuro. No entanto não apresentam apenas vantagens, e o fato de necessitarmos de muita pesquisa científica para ultrapassar as desvantagens, e sabendo que essa pesquisa demora algum tempo, faz com que essa mudança não seja imediata. Nesta secção vou abordar de uma forma geral tanto as vantagens como desvantagens, fazendo também um estudo sobre as barreiras que existem atualmente para a comercialização deste tipo de tecnologia.

4.4.1. Reduzidas emissões nocivas para o ambiente

Como já foi mencionado anteriormente os únicos produtos obtidos no funcionamento de células de combustível a hidrogénio são a água, calor e eletricidade na forma de corrente contínua (Linardi *et al.*, 2000). Com exceção da emissão controlável de NOx quando nos referimos a células de combustível de altas temperaturas (Sharaf & Orhan, 2014). Esta é uma das vantagens mais importantes de células de combustível em comparação com os tradicionais dispositivos a combustão, ou seja, as células de combustível são conversores de energia inerentemente limpa, quando alimentadas idealmente com hidrogénio puro. O Hidrogénio também pode ser obtido pela reforma de outras combustíveis ricos em hidrocarbonetos, no entanto dessa forma temos de contabilizar todos os gases libertados durante esse processo, e dependendo do tipo de combustível fóssil que tratamos, vamos ter libertação de diferentes gases, assim como quantidades também distintas.

No entanto foi demonstrado que não se torna economicamente viável a utilização de combustíveis fósseis para a produção de hidrogénio, uma vez que qualquer energia fóssil utilizada vai ser sempre mais do que o conteúdo energético obtido em hidrogénio (Gaines *et al.*, 2008). Então uma das formas viáveis para produção de hidrogénio é por exemplo

através da eletrólise da água, utilizando energia renovável para a produção de eletricidade utilizada neste processo.

4.4.2. Elevada eficiência

Usualmente a eficiência de um motor tradicional que funciona através do processo de combustão, esta relacionada com a eficiência do ciclo de Carnot (Lutz *et al.*, 2002). No entanto, numa célula de combustível a eficiência não é limitada pelo ciclo de Carnot, uma vez que se trata de um dispositivo eletroquímico, a sua eficiência está dependente do conteúdo energético presente no combustível utilizado (Sharaf & Orhan, 2014).

Uma das principais razões que leva a que as células de combustível tenham maior eficiência que um motor de combustão tradicional é o fato de o número de transformações de energia que ocorrem dentro de uma célula de combustível ser menor do que a de qualquer dispositivo baseado em combustão, como podemos ver na Figura 4.2. Consiste num fato muito fácil de perceber, pois como sabemos as perdas de energia estão associadas aos processos de transformação que a energia sofre, assim, a eficiência global de um sistema diminui à medida que o número de transformações de energia aumenta.

As células de combustível apresentam então essa vantagem quando se trata de obtenção de energia elétrica, pois quando pretendemos obter energia mecânica estas, a nível de n° de transformações estão em pé de igualdade tanto com as baterias comuns como com os motores de combustão (Sharaf & Orhan, 2014).

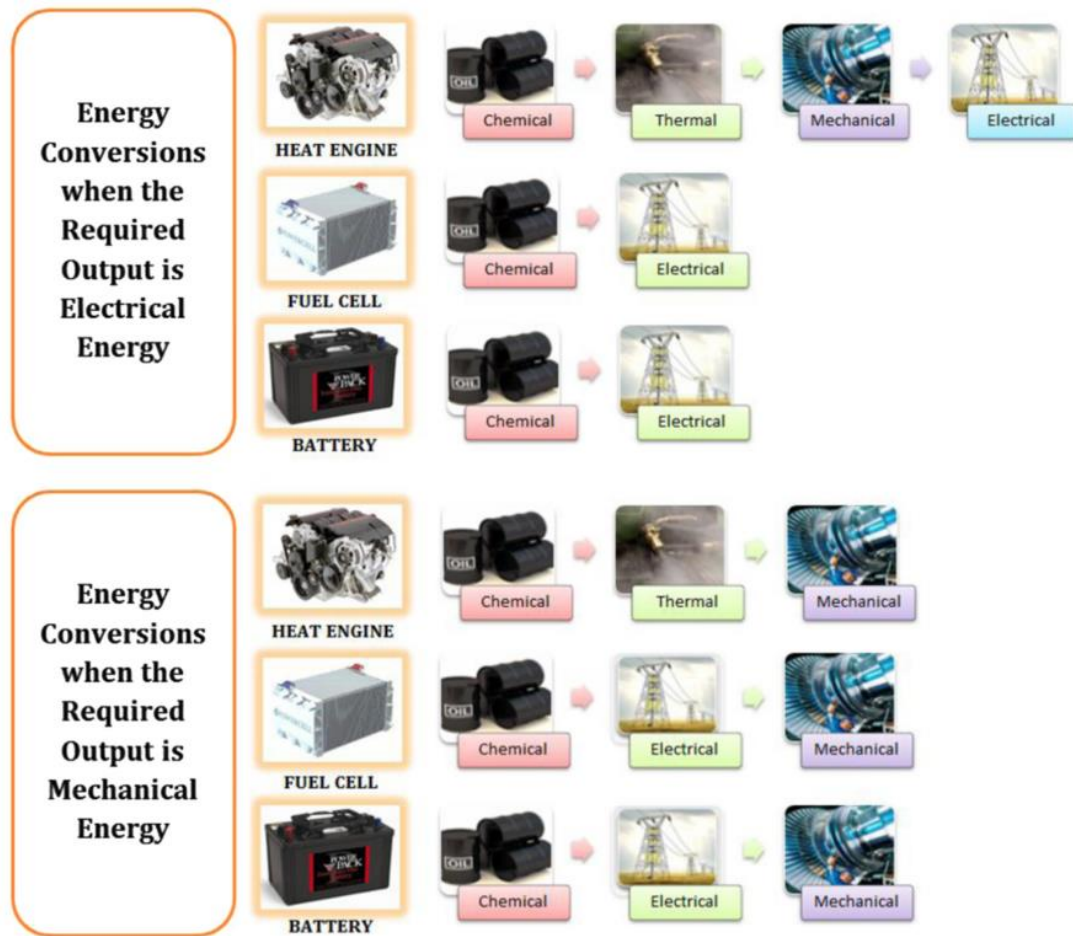


Figura 4.2 – Transformações de energia requeridas pelos diferentes tipos de tecnologias. Fonte: Sharaf *et al.*, 2014.

4.4.3. Dispositivos estáticos

O carácter estático de uma célula de combustível também traz algumas vantagens em relação aos restantes dispositivos de conversão de energia como motores de combustão. A principal vantagem consiste na produção de pouco ruído. Como as células de combustível não têm partes móveis na sua constituição, o ruído durante o seu funcionamento é reduzido, o que não acontece quando nos referimos a um motor de combustão (Engineering, 2002), por exemplo. Além deste fato temos também as vantagens de a sua conceção ser um pouco mais simples, e de não necessitarem de tanta manutenção durante o seu período de vida.

4.4.4. Elevada gama de aplicações/modularidade e flexibilidade de combustível

As células de combustível podem ser utilizadas em inúmeras aplicações. Graças à sua modularidade podemos controlar a potência de saída da célula, dependendo da quantidade de energia requerida numa aplicação específica. Atualmente existem células de combustível aplicadas tanto em situações que requerem grandes quantidades de energia como em aplicações em que a quantidade de energia requerida é muito reduzida. No que respeita ao combustível utilizado existem muitas soluções que se podem adotar. Combustíveis à base de reformação incluem metanol, metano, e hidrocarbonetos, tais como o gás natural e propano. Esses combustíveis são convertidos em hidrogénio através de um processo de reformação do combustível. Existem também as células de combustível alimentadas diretamente, por exemplo, células de combustível de metanol direto, nas quais o combustível é diretamente injetado na célula, e ainda aquelas que efetuam a reforma de gás natural e que possuem características favoráveis relativamente às tecnologias convencionais. Adicionalmente ainda podemos obter o hidrogénio necessário para o seu funcionamento através de eletrólise da água, como também já foi referido anteriormente (Sharaf & Orhan, 2014).

4.5. Pontos negativos das células de combustível

Apesar de todas as boas características apresentadas, e do crescimento desta tecnologia, as células de combustível têm obstáculos que impedem que esta tecnologia se difunda no mercado atual. Esses obstáculos estão relacionados com fatores técnicos e sociopolíticos, assim como com os custos de produção e dos materiais utilizados.

4.5.1. Elevado custo

A energia produzida utilizando células de combustível é mais cara do que a energia produzida por outras tecnologias já implementadas em grande escala no mercado. As principais razões que levam ao elevado custo são: a dependência de catalisadores à base de platina, técnicas delicadas de fabricação, e os materiais utilizados. No entanto, se as células

de combustível fossem produzidas em massa, obviamente o seu preço decaia, assim como acontece com todas as outras tecnologias.

4.5.2. Suscetíveis a contaminação

A durabilidade das pilhas de combustível atuais é elevada, quando comparada às baterias convencionais. Um dos principais problemas, que tem ainda de ser resolvido, está relacionado com a contaminação da célula com impurezas presentes no ar e combustíveis utilizados. As células de combustível são altamente suscetíveis a contaminação, o que afeta negativamente a sua performance, devido a este fator, o hidrogénio requerido como combustível tem de ter um elevado grau de pureza, e por conseguinte um preço muito elevado.

4.5.3. Infraestrutura de hidrogénio requerida

Como já foi dito anteriormente ainda hoje se tenta desenvolver e construir um tipo de armazenamento de hidrogénio mais eficiente e seguro. Por ser recente a utilização de hidrogénio como combustível, e por este ser um pouco diferente de todos os combustíveis usados até agora as infraestruturas requeridas tanto para o seu armazenamento, como para distribuição apresentam um desenvolvimento tecnológico maior e por consequência um preço também maior. O fato de quase a totalidade do hidrogénio utilizado em células de combustível ser obtido através de fontes fósseis (nomeadamente gás natural), constitui uma enorme barreira à sua comercialização (Sharaf & Orhan, 2014).

4.5.4. Balanço hídrico

Um dos fatores que condicionam o funcionamento das células de combustível, principalmente das células que contêm membranas, ou seja as PEMFC, que iremos abordar mais à frente, é o nível de hidratação da própria célula, ou, o fluxo de água existente entre os diferentes compartimentos da célula durante a sua operação. Para o funcionamento correto de uma célula de combustível é necessário existir uma boa estratégia de gestão da

água que se forma durante o seu funcionamento. Se não existir essa manutenção adequada pode ocorrer a inundação de compartimentos importantes da célula, acumulação de água nos poros e canais de fluxo, entre outros. Uma má gestão da água dentro de uma célula de combustível leva a uma posterior degradação da mesma, reduzindo drasticamente o seu desempenho e a sua durabilidade (Jiao & Li, 2011; Arcoumanis, 2013)

Assim, a compreensão dos modelos globais de transporte de água e dos restantes fenómenos dentro de uma célula de combustível são extremamente importantes, a fim de desenvolver projetos otimizados, de acordo com os tipos de aplicações e condições de operação.

4.5.5. Consciencialização da sociedade

A sociedade atual ainda não reconhece o hidrogénio como um potencial substituto dos combustíveis convencionais, e além disto é ainda considerado um combustível perigoso, muitas vezes associado a explosões. O público em geral precisa de ser informado de que o hidrogénio é similar aos combustíveis convencionais, e que não representa um problema de segurança se for manuseado e regulado corretamente, assim como qualquer outro combustível. A mentalidade da sociedade representa por si só um entrave ao crescimento desta nova tecnologia, no entanto, atualmente as comunidades Europeias estão a criar cada vez mais códigos e normas, baseados em resultados obtidos em programas que se desenvolvem pelo mundo, com intuito de criar e alargar os horizontes para possibilitar a entrada do hidrogénio no mercado (Sharaf & Orhan, 2014).

4.6. As PEMFC

O motor de combustão é ainda hoje amplamente utilizado como fonte de energia para veículos terrestres, embarcações marítimas, produção de eletricidade, etc. Devido aos problemas ambientais causados pelos combustíveis fósseis, por todo o mundo têm vindo a desenvolver-se tecnologias baseadas em fontes de energia limpas para eventualmente substituir motores de combustão. As células de combustível, são apresentadas como o método mais promissor para fontes de energia alternativas, pois convertem diretamente a

energia química de um combustível em energia elétrica de uma forma eficiente, através de uma reação química envolvendo: simplicidade, baixas emissões, e livre de ruídos.

Como já foi referido anteriormente as células de combustível que utilizam membranas como meio de transporte das substâncias entre o ânodo e o cátodo de uma célula, são aquelas que chamam mais a atenção dos cientistas, sendo, portanto, o tipo de células mais estudado atualmente. Não só porque, como todas os outros tipos de células de combustível, nos ajudam a reduzir as emissões de gases nocivos para o meio ambiente, mas também porque são consideradas células de funcionamento a baixas temperaturas e têm elevado interesse para aplicações no setor dos transportes, devido ao arranque rápido e elevada potência de arranque que possibilitam (Jahnke *et al.*, 2016; Awang *et al.*, 2015; Wu, 2016). A utilização de membranas na constituição de uma célula de combustível torna-se interessante pois permite reduzir problemas de corrosão que existiam antes da sua aplicação, elas também mostram alguma tolerância, o que lhe confere uma longa vida útil, e sua operação exige apenas hidrogénio, não necessitando de possuir um grau de pureza tao elevado, como no caso den outras células. As membranas também permitem que a densidade elétrica obtida seja elevada com uma boa relação peso/simplicidade (Abdin *et al.*, 2015).

4.6.1. Características

Existem inúmeros tipos de membranas utilizadas para a construção de PEMFC diferentes. Atualmente a membrana mais utilizada é constituída por Nafion, uma espécie de polímero, mas com elevada resistência, quer térmica, química ou mecânica (Awang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2011).

Independentemente do tipo de membrana utilizado, existem algumas propriedades básicas que todas elas devem possuir, sendo:

- Elevada condutividade protónica, a fim de suportar elevadas correntes com o mínimo de perdas;
- Condutividade eletrónica nula, evitando a troca de hidrogénio a partir do ânodo e oxigénio a partir do cátodo;
- Capacidade de evitar o fenómeno de cross-over (Wang *et al.*, 2011);
- Elevados níveis de hidratação;

- Termicamente estáveis durante todo o processo operacional;
- Resistência mecânica;
- Estabilidade eletroquímica;
- Custos de produção compatíveis com a aplicação pretendida (Wang *et al.*, 2011) (Smitha *et al.*, 2005).

4.6.2. Os fatores que afetam o desempenho das membranas

Existem 2 fatores importantes para o desempenho da membrana durante o seu funcionamento numa PEMFC:

- Hidratação - O desempenho da membrana depende da sua condutividade protónica, que por sua vez depende dos níveis de hidratação prevalente, isto é, maior condutividade é suportada pelos elevados níveis de hidratação.
- Espessura - Uma menor espessura torna a membrana menos resistente mecanicamente o que por sua vez aumenta a condutividade da membrana e implica um menor custo. Contudo existe um limite mínimo de espessura devido às dificuldades de durabilidade (Smitha *et al.*, 2005; Wu, 2016).

4.6.3. Fatores a melhorar

Apesar de todos os pontos positivos que esta tecnologia apresenta, a verdade é que ainda temos que melhorar alguns aspetos para que esta seja implementada no mercado sem restrições. Os dois principais fatores de pesquisa são a durabilidade e o custo (Zhang *et al.*, 2009). No entanto atualmente as células de combustível apresentam uma durabilidade muito superior ao que apresentavam há 5 anos atrás (Wang *et al.*, 2011). O custo é também um fator preocupante e não está apenas relacionado com o custo de fabricação e montagem da célula, que engloba metais nobres que são bastante caros, como o exemplo da platina que é usada como catalisador, mas também com o custo da energia produzida por cada kW. O que se vem tentando reduzir, como se mostra na Figura 4.3. Apesar de todos os esforços e avanço das tecnologias que se verificam ao longo dos anos, novas descobertas científicas

são necessárias para superar todas as barreiras existentes, para permitir a comercialização de células de combustível (Papageorgopoulos, 2010).

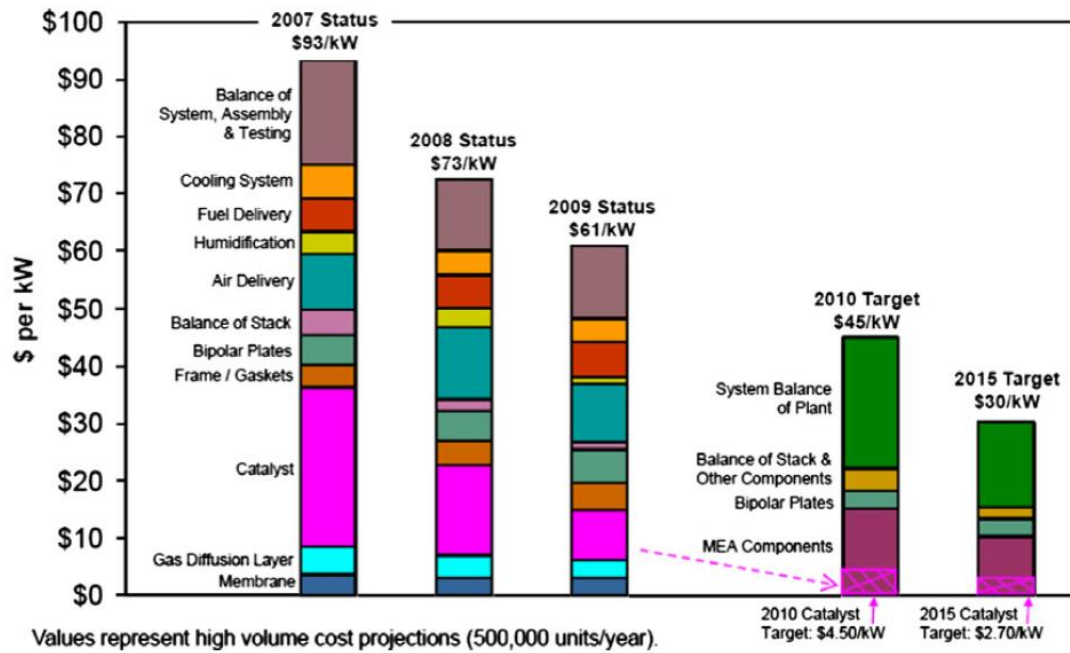


Figura 4.3 – Evolução dos custos de diversos componentes que constituem uma célula de combustível (Papageorgopoulos, 2010).

Tal como já foi referido na secção 4.3, vamos agora apresentar o Quadro 4.3 que resume as principais características das células do tipo PEM, igualmente como foi feito para os outros tipos de células de combustíveis descritas anteriormente.

Quadro 4.3 – Principais características das células de combustível tipo PEM (Sharaf & Orhan, 2014).

Tipo	Eletrólito típico	Combustível típico	Maiores contaminantes	Temperaturas de funcionamento (°C)	Principais vantagens	Principais desvantagens	Eficiência (%)
PEM Baixas temperatura	<u>Nafion</u> sólido	H ₂	Monóxido de carbono (CO) Sulfureto de hidrogénio (H ₂ S)	60 - 80	Rápido arranque Tamanho reduzido Elevada modularidade e adaptabilidade	Sensibilidade elevada a contaminantes Gestão complexa da água Não é possível o aproveitamento de calor Catalisador caro (platina)	40 - 60
PEM Altas temperaturas			Monóxido de carbono (CO)	110 – 180	Fácil gerenciamento da água Boa tolerância aos contaminantes Possibilidade de aproveitamento do calor gerado	Elevada degradação Problemas de humidificação Catalisador caro (platina)	36 - 45

4.7. Diferentes aplicações das células de combustível

Apesar de todos os aspetos positivos ou negativos, que existiram e continuam a existir, a verdade é que a aplicação das células de combustível tem tendência a crescer ao longo dos anos (Wang *et al.*, 2011).

4.7.1. Aplicações nos transportes

As células de combustível são consideradas como a fonte de energia mais limpa e eficiente para veículos. Em particular, as PEMFC constituem a opção mais promissora para aplicações no setor dos transportes devido ao rápido arranque a baixas temperaturas, com elevada densidade de energia. Avanços significativos têm surgido, fruto de uma vasta e extensa pesquisa sobre esta tecnologia nas últimas décadas. Em 2014, veículos alimentados através de células de combustível foram introduzidos no mercado. No entanto, o elevado custo dos sistemas PEMFC era, e ainda continua a ser um dos principais obstáculos para a industrialização em larga escala desta tecnologia (Wang *et al.*, 2016).

A aplicação desta tecnologia nos transportes tem sido testada ao longo dos anos tanto em veículos ligeiros como em veículos pesados de transporte público, ou autocarros, através da criação de projetos adotados, por várias marcas de automóveis internacionais, em vários países (Wang *et al.*, 2011). Portugal fez parte de um projeto, conhecido como projeto CUTE, que se realizou entre os anos de 2002 e 2004 na cidade do Porto, nele foi estudada a viabilidade de utilizar hidrogénio como combustível em autocarros, em 10 cidades Europeias (Contestabile, 2003). Como podemos verificar na Figura 4.4, apesar de ser em porções muito pequenas, comparando com as outras aplicações, a aplicação de células de combustível no setor dos transportes também tem vindo a aumentar ao longo dos anos, principalmente na Ásia.

Mais recentemente, quando se fala de setor dos transportes, não se associa apenas aos automóveis. Com o passar dos anos foram-se abrindo mentalidades surgindo os novos mercados (os conhecidos como *early markets*), que abrangem outros tipos de veículos, como bicicletas a motor, empilhadores, veículos de aeroportos, etc. Nos últimos anos tem-

se apostado também no estudo da viabilidade económica e funcional, da aplicação de células de combustível nestes novos mercados (Mayyas *et al.*, 2015; Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU, 2011).

4.7.2. Aplicações portáteis.

Cada vez mais as populações se tornam dependentes de dispositivos portáteis, seja para comunicação, entretenimento ou aprendizagem. No entanto, com o aumento das taxas de uso destes equipamentos, a bateria, que funciona como fonte de energia, não tem autonomia suficiente para satisfazer essas crescentes taxas de utilização. Esta baixa autonomia conjugada com o grande período de tempo necessário para recarregar totalmente leva a necessidade de procura de soluções que se adequem mais as nossas necessidades.

Estes dois pontos podem ser resolvidos utilizando células de combustível. Consequentemente, a produção global de células de combustível para aplicações portáteis tem crescido continuamente (Fuel cell today, 2012), como mostrado também na Figura 4.4, sendo a gama de potências requerida entre 5W e 50W (Wang *et al.*, 2011). Ao analisar a Figura 4.4, percebemos que o número de expedições realizadas aumenta ao longo dos anos, podendo afirmar que as aplicações portáteis são as que apresentam maior crescimento na Europa.

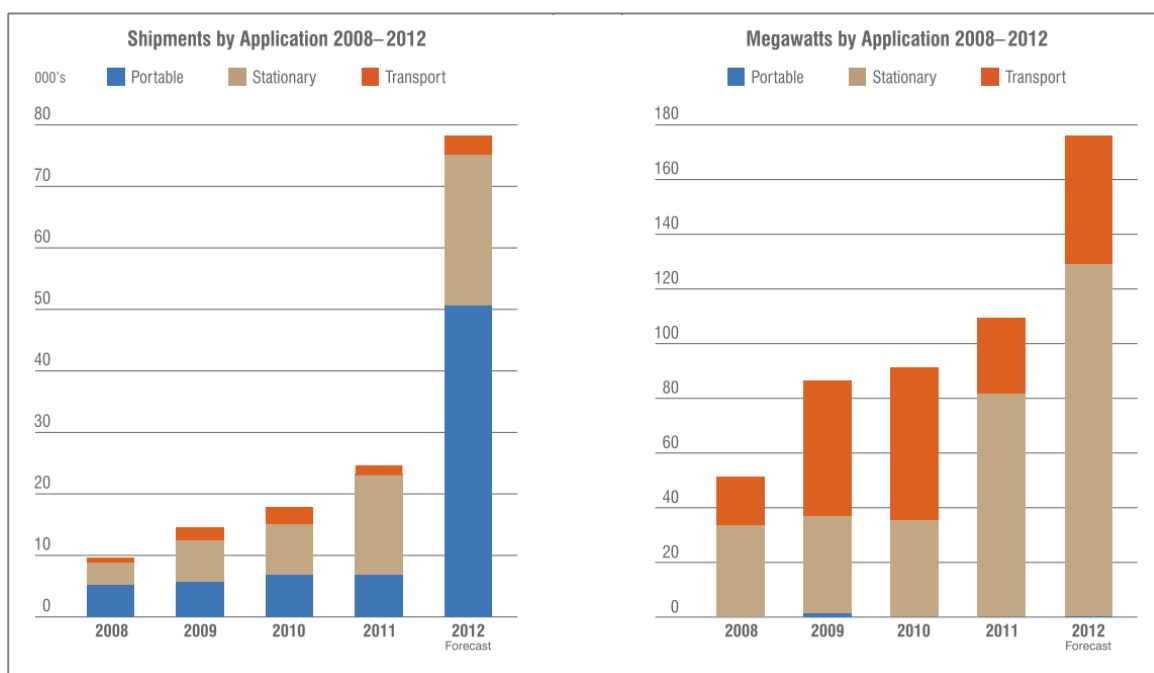


Figura 4.4 – Expedições de células de combustível, por tipo de aplicação e por região (Fuel cell today, 2012).

4.7.3. Aplicações estacionárias.

As centrais elétricas ocupam o lugar de excelência no que diz respeito à produção centralizada de energia elétrica. Estas apresentam elevada eficiência na produção, no entanto apresentam algumas desvantagens, como a grande quantidade de perdas verificadas na transmissão da energia, assim como a baixa eficiência na utilização do calor gerado. Devido principalmente a estes dois fatores, a produção de energia descentralizada é vista como uma forma de evitar todas estas perdas. A utilização de células de combustível neste tipo de aplicação apresenta algumas vantagens em relação ao uso de combustíveis fósseis, como a elevada eficiência de conversão, baixo nível de ruído, e emissão zero, podendo ser atingidos uma vasta gama de valores de potências. Mais uma vez o fator que inviabiliza a utilização de células de combustível é o custo, que é bastante mais elevado que as tecnologias convencionais. Para aplicações estacionárias usualmente temos de garantir pelo menos 40 000h de funcionamento contínuo, sendo as potências requeridas superiores a 100 kW.

Consequentemente um dos mercados promissores para esta tecnologia é o da energia de backup, sendo os hospitais, bancos e empresas de telecomunicações indicados como potenciais clientes uma vez que necessitam de garantir o funcionamento mesmo que existam interrupções inesperadas do fornecimento de energia da forma convencional (Wang *et al.*, 2011; Fuel cell today, 2012). O Quadro 4.4 resume os vários tipos de utilizações de células de combustível, assim como os vários tipos de células que eventualmente podem ser utilizados. Vale a pena frisar que as PEMFC são referenciadas em todos os tipos de aplicações.

Quadro 4.4 - Tipos de aplicações das células de combustível (Fuel cell today, 2012).

Tipo de aplicação	Portátil	Estacionária	Tranporte
Definição	Dispositivos que são incorporadas ou que carregam outros dispositivos, projetados para serem movidos.	Dispositivos que fornecem eletricidade (ou por vezes calor), mas não são projetados para serem movidos.	Dispositivos que servem como motor de propulsão para veículos.
Gama de potências mais utilizadas	5 – 20 kW	0,5 – 400 kW	1 – 100 kW
Tecnologia que pode ser utilizada	PEMFC DMFC	MCFC PAFC PEMFC SOFC	PEMFC DMFC
Exemplos	Dispositivos portáteis como carregadores de telefones, ou dispositivos electrónicos pequenos (mp3, mp4, cameras...)	Produção contralizada de eletricidade ou calor.	Veículos.

5. Tipos, tamanhos e utilizações dos empilhadores

5.1. Movimentação de materiais

Ao longo de toda a história, verificamos que o homem sempre projetou e desenvolveu meios para se mover ou para transportar materiais, com o objetivo de tornar a sua sobrevivência mais simples e cômoda possível. A necessidade de transportar materiais pesados vem desde a antiguidade, com ênfase no Egito, onde o transporte de estruturas de grande porte marcou a sua civilização. Com a evolução e crescimento das indústrias, o homem foi desenvolvendo equipamentos para reduzir os esforços físicos e aumentar a produtividade, e desde que os homens primitivos descobriram o uso das rodas e das alavancas, a movimentação de materiais faz-se quase totalmente de forma mecânica (Sousa, 2012).

Em linguagem corrente, a movimentação de materiais é o carregamento, movimentação e descarga de materiais. No entanto, para a engenharia este termo é usado com referência a uma atividade industrial. Não sendo um processo de produção esta atividade não adiciona nenhum valor ao produto final, no entanto os equipamentos requeridos têm um custo que tem de ser posteriormente amortizado o mais depressa possível. Como consequência da sua elevada aplicabilidade não existe uma definição universal para a atividade de movimentação de materiais. Uma das definições adotada pela ‘American Materials Handling Society’ é: Manipulação de materiais é a arte/ciência que envolve o movimento, proteção, armazenamento e controle de materiais e produtos em todo o processo de sua fabricação e distribuição, consumo e eliminação (Material handling industry - MHI, 2016). Um bom sistema de manipulação de materiais tem de possuir no mínimo os quatro requisitos seguintes:

- (i) Movimentação eficiente e segura de materiais para o local desejado;
- (ii) Movimentação apropriada dos materiais quando necessário;
- (iii) Fornecimento de materiais à taxa desejada;
- (iv) Armazenamento de materiais utilizando espaço mínimo, e com o custo mais reduzido possível.

O principal objectivo da manipulação de materiais é o aumento de produtividade. Como todas as partes constituintes de uma indústria, para ser rentáveis estas têm de ser planeadas e projetadas de uma forma correta. Uma maneira simples e útil de planejar e projetar um

problema de manipulação de materiais é descrita pela chamada ‘equação de manuseio de materiais’, que é explicada pela Figura seguinte:

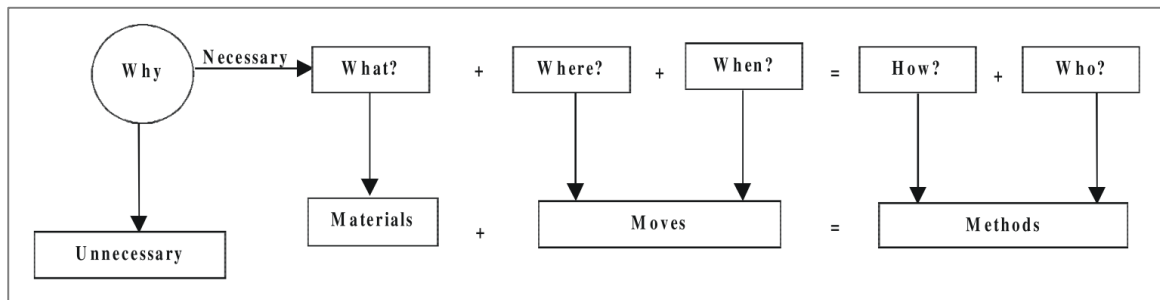


Figura 5.1 - Equação do manuseamento dos materiais (Ray, 2008).

Se a Manipulação de Materiais for necessária, então materiais + movimentos = MÉTODOS, como, representado na Figura anterior. O planeamento começa com a pergunta "por quê" em todos os materiais contemplados o manuseio é necessário? A próxima pergunta é "que" tipo de materiais a serem movidos para "onde" e "quando"? A resposta a esta pergunta leva ao método a ser implementado, isto é, "como" e por "quem" (mão-de-obra / operador) o manuseio de materiais será efetuado. Com efeito, a equação enfatiza a necessidade de analisar cuidadosamente os materiais a serem tratados, assim como os movimentos necessários para a posterior conceção do método mais adequado (Ray, 2008).

Um sistema de manipulação de materiais bem projetado tenta alcançar os seguintes objetivos:

- (i) Melhorar a eficiência de um sistema de produção garantindo a quantidade dos materiais entregues no lugar certo e no momento certo, de uma forma não dispendiosa.
- (ii) Reduzir o custo indireto da mão-de-obra.
- (iii) Reduzir os danos dos materiais durante o armazenamento.
- (iv) Maximizar a utilização do espaço por meio do armazenamento adequado de materiais e assim reduzir o custo do mesmo.
- (v) Minimizar acidentes durante a manipulação e armazenamento
- (vi) Melhorar o atendimento ao cliente fornecendo materiais de maneira conveniente.
- (vii) Aumentar a eficiência de comercialização das empresas.

Todos os pontos acima mostram claramente a importância da existência de um sistema de manipulação de materiais dentro de uma empresa, no entanto, a existência desse mesmo sistema irá provocar despesas adicionais, não só através da aquisição de equipamentos por parte das empresas, mas também devido a paragens não previstas, e devido à manutenção dos equipamentos que tem de ser realizada periodicamente (Ray, 2008).

5.2. Veículos industriais

Existem inúmeros tipos de veículos que efetuam o transporte e o armazenamento de materiais dentro de armazéns. Neste trabalho iremos incidir apenas no estudo de um tipo de veículos, os Empilhadores.

Todos os veículos industriais são geralmente classificados em dois grandes grupos, os vulgarmente chamados ‘carrinhos de mão’ ou não motorizados, e os veículos motorizados.

5.2.1. Veículos não motorizados

Nesta categoria são abrangidos todos os veículos industriais que não têm nenhuma fonte de energia motriz associada, estes são movidos manualmente ou então são ligados a outros equipamentos que a possuem. Estes são agrupados dependendo do número de rodas que possuem. Podem ser então chamados de veículos de 2 rodas, logicamente quando são construídos com 2 rodas, ou veículos de rodas múltiplas, quando possuem 3 ou mais rodas (Ray, 2008). Este tipo de veículos não irá ser abordado no decorrer desta dissertação.

5.2.2. Veículos motorizados

5.2.2.1. Empilhadores

Os empilhadores são veículos manuais ou motorizados, cujas funções principais são manobrar e transportar materiais de um lado para o outro, através da movimentação física do mesmo, junto com as cargas que transporta. É um dos equipamentos mais comuns para

o transporte de materiais utilizados na indústria, bem como na distribuição diária de mercadorias em armazéns (Sousa, 2012).

5.2.2.2. Empilhadores manuais

Os empilhadores manuais, representados na Figura 5.2, são utilizados em transportes de cargas menores, sendo também os mais simples. Dependendo do sistema de elevação que os constitui, estes são classificados como mecânicos ou hidráulicos. Os empilhadores hidráulicos têm a particularidade de poderem elevar mais carga (até 10 toneladas), em comparação com os empilhadores mecânicos (até 1 tonelada). Este tipo de empilhadores são ainda classificados de acordo com as suas características construtivas como porta paletes ou plataforma elevadora.



Figura 5.2 - Carrinhos de mão hidráulicos, sem e com elevação (Ray, 2008).

5.2.2.3. Empilhadores motorizados

Nesta categoria são introduzidos todos os veículos de movimentação de materiais que possuam uma fonte de força motriz. Além dos empilhadores comuns existem muitos outros, que não sendo menos importantes devem também ser referidos:

- Empilhador com plataforma fixa:

Estes são veículos industriais movidos, usualmente a bateria, diesel ou a gás, que como o nome indica, têm uma plataforma de nível fixo, o que os impossibilita de fazer o trabalho de elevação de cargas. Os materiais a serem movidos têm de ser carregados e descarregados manualmente, no caso de serem em pequena quantidade, ou com recurso a outros veículos, como guias por exemplo. No entanto são muito utilizados para o transporte de grandes cargas, pois a sua capacidade pode atingir as 40 toneladas. O operador usualmente fica na posição vertical sobre o veículo.

- Empilhador com plataforma móvel

Este tipo de veículo constitui uma variante do anteriormente descrito. Sendo a única diferença a capacidade de elevação de cargas a um nível mais alto.

- Porta-paletes

Estes veículos são também muito parecidos com os descritos anteriormente, no entanto neste caso as plataformas responsáveis pela movimentação e elevação das cargas são substituídas por uns ‘garfos’ próprios para manobrar paletes. Estes são construídos de diversas formas de modo a desempenhar o seu papel dentro de espaços limitados ou estreitos.

- Straddle Carrier

Este é um veículo utilizado para o transporte de cargas longas e pesadas. Consiste numa estrutura em "U" invertida com rodas no exterior da estrutura, como pode ser visto na Figura 5.3. O sistema de acoplamento de cargas é hidráulico montado dentro da própria estrutura. A sua capacidade pode atingir as 40 toneladas.

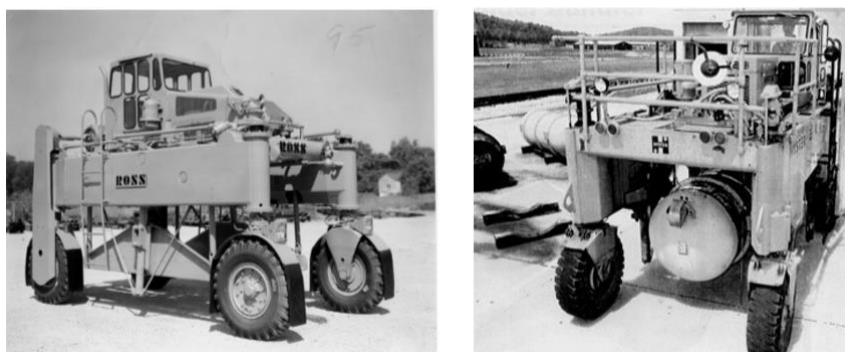


Figura 5.3 – Representação de um Straddle Carrier (Ray, 2008).

5.2.3. Usos, tamanhos e tipos existentes de empilhadores motorizados

Empilhadores são utilizados numa grande variedade de aplicações comercial e/ou industrial para transporte de materiais, em norma pesados. Estes facilitam o transporte de

materiais ao nível do solo, ou então com elevação ou descida dos mesmos. Usualmente são manobrados por um operador, que dependendo do tipo de empilhador pode ou não ter lugar dentro do próprio veículo. A carga que cada empilhador pode transportar também depende do tipo que estamos a utilizar, no entanto existem empilhadores que possibilitam o transporte de carga entre 1 e 20 toneladas. A utilização dos empilhadores dentro de uma empresa também pode variar muito, podemos ter empresas nas quais os empilhadores são utilizados 24h por dia, 7 dias por semana, podemos encontrar casos em que são apenas utilizados durante um turno de 8h durante um dia, ou ainda podemos ter casos de utilização de apenas algumas horas durante a semana. O período de utilização influencia não só o tipo de empilhador como o período de vida do mesmo. Estes são também construídos para movimentar materiais não só dentro de armazéns, mas existem alguns tipos de empilhadores adaptados para o transporte de carga em ambientes exteriores (Elgowainy *et al.*, 2009), logicamente o clima da região na qual se vão utilizar estes dispositivos influencia o tipo de tecnologias que se podem ou não aplicar. Existe atualmente dois grandes grupos de empilhadores, aqueles que possuem um motor elétrico alimentado usualmente a baterias de chumbo-ácido e aqueles que possuem um motor de combustão interna. A grande inovação que se tenta implementar em grande escala nos empilhadores é basicamente a substituição das baterias de chumbo-ácido, por células de combustível. Um relatório do departamento de energia (DOE - Department of Energy) identificou as células de combustível do tipo PEM como as mais promissoras para este tipo de aplicações industriais (Mahadevan *et al.*, 2007), e estudos relacionados com poupança de energia e redução de emissões de gases com efeito de estufa indicam o mercado dos empilhadores como uma aposta com grande potencial (Elgowainy *et al.*, 2009).

De um modo geral, os empilhadores estão divididos em 7 classes. Esta classificação é universal, e aplicada tendo em conta as características construtivas e de utilização destes equipamentos. Estas classes foram então determinadas em função da posição do manobrador, altura de elevação de carga, posição da carga e ao tipo de motor (U.S. Department of Labor, 2010; Sousa, 2012). As classes I, II e III referem-se a empilhadores com motor elétrico, e nas restantes são englobados os empilhadores com motor de combustão interna, alimentados a combustíveis fósseis. Os empilhadores com motor elétrico, são o foco do estudo realizado nesta dissertação.

Nos empilhadores de classe I, ou vulgarmente chamados de empilhadores elétricos contrabalançados, o manobrador está na posição sentado e usualmente são empilhadores

largos que requeem elevado espaço para manobras. Este tipo de empilhadores tem os garfos na parte dianteira do motor e este é concebido com um peso na parte de trás, para gerar um equilíbrio entre a carga da parte dianteira e a parte traseira do empilhador. Podem ser constituídos por 3 ou 4 rodas, podendo ser usados tanto em operações interiores como exteriores. A questão do nº de rodas é importante pois quando o espaço de manobra é limitado temos obrigatoriamente de utilizar um empilhador apenas com 3 rodas porque lhe confere maior manobrabilidade. Este tipo de empilhadores são o tipo mais utilizado dentro do setor da logística (Murray, 2016).

Na classe II são englobados os empilhadores chamados de ‘estreitos’, nestes o manobrador pode estar na posição em pé ou sentado, a sua envergadura é feita para que possa se movimentar em zonas mais estreitas, usualmente em ambientes interiores, onde as empresas têm de aproveitar bem o espaço. Possuem ainda uma espécie de mastro que pode aumentar de tamanho para podermos alcançar zonas mais altas (Murray, 2016). O equilíbrio é conseguido através do suporte dado pela envergadura do empilhador conjugado com a altura do mastro e, portanto, não é necessário a existência de um contrapeso. Dentro desta classe são construídos também os chamados empilhadores duplos, que possuem dois mastros, que conseguem atingir o dobro da altura suportando o dobro do peso quando comparados com os empilhadores construídos apenas com um mastro (Admin, 2015). Os empilhadores que constituem a classe III são chamados de empilhadores elétricos manuais e pedonais (conhecidos vulgarmente por porta-paletes ou Walkies) são por norma mais pequenos que os empilhadores mencionados anteriormente. Este tipo de empilhadores é usado principalmente em funções interiores, em funções realizadas a nível do pavimento.

Existem empilhadores deste tipo que possuem um mastro o que nos permite alcançar alguma altura adicionalmente à sua função de arrumar e transportar (ProLift Industrial equipment, 2014). É muito utilizado devido à sua elevada manobrabilidade que permite mover todas as paletes de forma mais eficiente. São controlados usando um acelerador de mão dando ao operador total controlo sobre o seu movimento. Apesar de existir uma grande variedade porta-paletes, estes são construídos apenas para a posição vertical do manobrador e em alguns casos este não tem lugar no próprio empilhador, ou seja, o manobrador tem de caminhar atrás do veículo. Há também porta-paletes duplos, que permitem que os operadores transportem duas paletes ao mesmo tempo (Admin, 2015; U.S. Department of Labor, 2010).

No caso dos empilhadores com motor de combustão interna são normalmente todos do tipo contrabalançados (idênticos aos elétricos de classe I), de classe para classe alteram alguns aspetos como a posição, tipos de rodas (pneumáticas ou almofada rígida), entre outros. Neste tipo de empilhadores quanto maior for o n° da classe a que pertencem maior é a carga que podem transportar, coisa que não acontece com os empilhadores com motor elétrico (Gaines *et al.*, 2008). O Quadro 5.1 mostra algumas das características fundamentais de cada classe de empilhado.

Quadro 5.1 - Classes dos empilhadores (Gaines. *et al.*, 2008).

Classe	Motor de propulsão	Descrição	Ilustração
I	Elétrico	Vulgarmente chamados empilhadores contrabalançados; Manobrador tem lugar no veículo; Podem ser constituídos por 3 ou 4 rodas.	
II		Manobrador pode ter 2 posições no veículo: sentado ou de pé; Utilizado em ambientes interiores onde é necessário alcançar alturas elevadas; Função de arrumação.	
III		Vulgarmente chamados Porta-paletes. Manobrador pode não ter lugar no veículo, ou então apenas tem a posição vertical; Função de arrumação interior.	

IV V VI VII	Combustão	Empilhadores do tipo contrabalançados; Neste tipo de empilhadores quanto maior for o nº da classe a que pertencem maior é a carga que podem transportar.	
----------------------	-----------	--	--

Atualmente vemos uma tendência crescente para este mercado dos empilhadores em todo o mundo, sendo um mercado com um potencial muito elevado (Industrial Truck Association - ITA, 2016), como podemos ver na Figura 5.4. A tentativa de associar a energias limpas ganha ainda mais força, e pelo que podemos ver na Figura 5.5, que se refere aos Estados Unidos, a compra de empilhadores em geral continua a aumentar desde 2011, sendo que os empilhadores eléctricos tem vindo a se destacar, em detrimento de soluções tradicionais.

2009										
	Class 1		Class 2		Class 3		Cls. 4/5		Total	
	Orders	Ship.	Orders	Ship	Orders	Ship	Orders	Ship	Orders	Ship
Europe	35,749	37,435	21,776	23,339	110,153	111,357	32,633	35,760	200,311	207,891
America	21,456	22,857	12,728	14,706	40,888	42,244	43,857	48,439	118,929	128,246
Asia	34,017	33,536	19,897	20,895	16,312	16,192	136,305	136,584	206,531	207,207
Africa	1,079	1,027	610	596	1,339	1,384	6,693	6,946	9,721	9,953
Oceania	1,296	1,297	1,734	1,916	2,781	3,119	5,529	6,119	11,340	12,451
World	93,597	96,152	56,745	61,452	171,473	174,296	225,017	233,848	546,832	565,748

2010										
	Class 1		Class 2		Class 3		Cls. 4/5		Total	
	Orders	Ship.	Orders	Ship	Orders	Ship	Orders	Ship	Orders	Ship
Europe	49,509	44,770	27,787	26,329	137,782	133,138	52,358	48,053	267,436	252,290
America	28,943	23,801	20,190	16,135	53,629	47,763	78,298	64,461	181,060	152,160
Asia	47,275	45,607	26,898	26,148	22,846	22,118	218,430	213,656	315,449	307,529
Africa	1,926	1,634	970	858	1,927	1,737	10,711	10,014	15,534	14,243
Oceania	1,573	1,429	2,117	1,845	3,404	3,144	7,879	8,050	14,973	14,468
World	129,226	117,241	77,962	71,315	219,588	207,900	367,676	344,234	794,452	740,690

2011										
	Class 1		Class 2		Class 3		Cls. 4/5		Total	
	Orders	Ship.	Orders	Ship	Orders	Ship	Orders	Ship	Orders	Ship
Europe	61,897	60,100	33,728	32,956	162,792	160,460	72,199	70,557	330,616	324,073
America	33,642	32,380	25,665	23,466	63,387	60,463	102,039	91,176	224,733	207,485
Asia	57,020	55,917	32,129	31,592	34,154	32,753	256,666	253,435	379,969	373,697
Africa	1,691	1,760	936	870	2,137	2,123	12,823	12,441	17,587	17,194
Oceania	2,516	2,114	3,289	2,540	5,075	4,187	10,797	10,518	21,677	19,359
World	156,766	152,271	95,747	91,424	267,545	259,986	454,524	438,127	974,582	941,808

Figura 5.4 – Comercialização de empilhadores feitas no mundo, entre 2009 e 2011 (Industrial Truck Association - ITA, 2016).

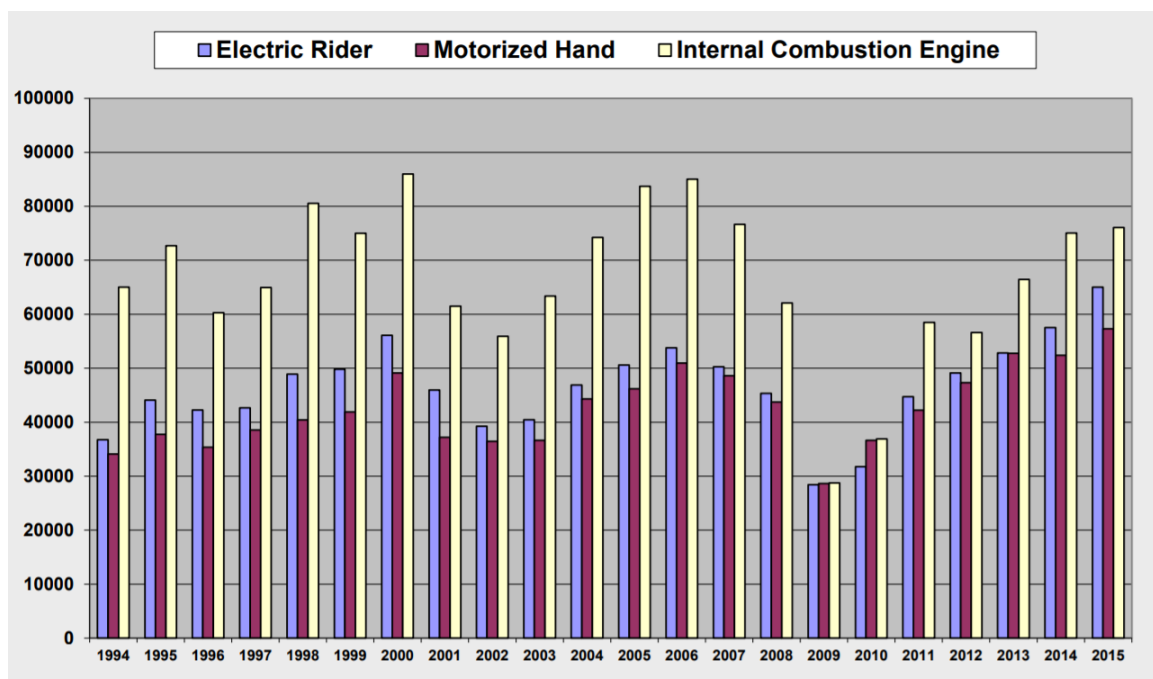


Figura 5.5 - Tipo de empilhadores comercializados, nos Estados Unidos (Rider, 2015).

5.3. Fatores a ter em conta quando se pretende adquirir um empilhador

Como foi visto anteriormente existem muitos tipos de empilhadores, todos eles construídos para desempenhar uma ou outra função em especial. Ao adquirir um empilhador existem alguns fatores importantes que devemos ter em conta na hora de compra.

Em todos os processos de compra temos de ter uma estratégia que nos permita realizá-la com o maior nível de satisfação possível. No caso dos empilhadores utilizamos esse mesmo princípio, assim nesse processo os principais pontos a considerar são:

- Conhecimento das suas características básicas;
- Saber quais são exatamente os requisitos que procura;
- Pesquisa;
- Contacto com o comerciante.

1) Conhecimento das suas características básicas

Esta fase de pesquisa inicial varia de pessoa para pessoa, estando relacionada com o nível de conhecimento da pessoa neste tipo de mercados. Ao pesquisar, uma dica geral seria a de tentar adquirir o máximo de informações possível para uma compreensão geral destas tecnologias.

2) Requisitos que procura

Existem inúmeros requisitos possíveis, dependendo da aplicação pretendida. No entanto existem 3 requisitos muito importantes que devem estar sempre presentes:

2.1) Orçamento: ter uma ideia clara de quanto pode investir na compra de um equipamento, seja ele novo ou usado;

2.2) Tamanho do empilhador: nesta secção são abordadas 4 perguntas essenciais: Qual o tipo de trabalho, este é realizado em ambiente interior ou exterior? Qual o tamanho dos corredores que o empilhador terá de percorrer? Qual Tamanho e peso de carga? Qual a altura que é necessário levantar a carga?

2.3) Uso: Este parâmetro aplica-se maioritariamente quando estamos a pensar adquirir um empilhador em segunda mão. Nestes casos consideramos baixo uso quando falamos em apenas algumas horas de funcionamento do empilhador por semana, uso médio quando o empilhador é utilizado apenas algumas horas por dia, e finalmente uso elevado quando o empilhador funciona mais de 10 horas por dia. Caso esteja a pensar adquirir um empilhador usado existem alguns cuidados relativamente a quantidade de trabalho que lhe é requerido. O Quadro 5.2 mostra a diferença entre as quantidades de trabalho (uso) que devemos considerar.

Quadro 5.2 - Quantidade de trabalho exigido a um empilhador (Adaptalift Hyster, 2011b).

Uso	
Baixo	Quando a Empresa utiliza os seus empilhadores durante 2 a 4 horas semanais.
Médio	Quando a empresa utiliza os seus empilhadores diariamente, não sendo utilizados durante a duração de um turno completo.
Elevado	Quando as empresas apresentam grandes propulsões e necessitam dos empilhadores a trabalhar mais de 8 horas diariamente.

Uma vez estabelecidos todos os requisitos pretendidos, passamos à fase de pesquisa, para averiguação das possibilidades existentes. No caso de querermos adquirir um empilhador novo apenas temos de decidir qual a classe que pretendemos de acordo com os requisitos pré-estabelecidos, no caso de pretendermos adquirir um empilhador usado temos de ter em atenção mais alguns aspetos, que irão ser abordados seguidamente.

Se apostar na compra de um empilhador usado, depois de ver algum anúncio que lhe interessa deve ir ao local da venda e pedir para ver os registos de todas as inspeções realizadas, assim como o registo de reposição de peças e avarias. Deve também fazer uma inspeção física, na qual deve averiguar o estado de conservação de alguns componentes mais importantes:

- ✓ Pneus: Certifique-se de que eles ainda estão em bom estado caso contrário as manobras não serão executadas da melhor forma o que pode ser perigoso.
- ✓ Mastro: verifique que não tem danos externos graves (por exemplo, cortes, ou grandes desigualdades) e garantir que ele se move para cima e para baixo de acordo com o que as especificações dizem.
- ✓ Contrapeso: certifique-se o peso é apropriado em termos de tamanho e peso de acordo com a classe do empilhador.
- ✓ Assento: verifique a aparência física do mesmo, verifique também se é confortável para o tamanho do operador e para a quantidade de horas passadas sobre ele a cada dia.
- ✓ Engrenagens / controles: certifique-se que as engrenagens e controles estão em bom estado, e se permitem efetuar manobra de forma suave e segura.
- ✓ Travões: verifique o estado dos travões, eles têm de funcionar corretamente para permitirem a paragem do empilhador quando ele estiver com cargas elevadas.
- ✓ Pintura: Este fator é um pouco menos importante quando pretendemos ter qualidade de serviço, mas ainda assim procure verificar o estado exterior do veículo e procurar por ferrugem, pintura descascando ou bolhas sob a pintura, que podem informar sobre o ambiente no qual o empilhador desempenhou a sua função anteriormente.
- ✓ Motor: verifique se o motor está em bom estado.

- ✓ Chassi: tome nota do número do chassi, o que permite que verifique o ano de fabricação do empilhador.
- ✓ Documentos de Registo: confira se todas as informações sobre o empilhador estão corretas, como por exemplo o número do modelo, capacidade, etc.
- ✓ Contador: procure estudar a viabilidade do contador de horas de funcionamento do veículo que quer adquirir.

Se todos os parâmetros anteriores estiverem revistos é uma boa ideia verificar a disponibilidade de algumas peças disponíveis no mercado, assim como o custo associado as mesmas. Segue-se então a fase em que se experimenta o veículo e ver se tudo funciona corretamente (Adaptalift Hyster, 2011c). A Figura 5.6 mostra alguns dos componentes dos empilhadores referidos anteriormente.

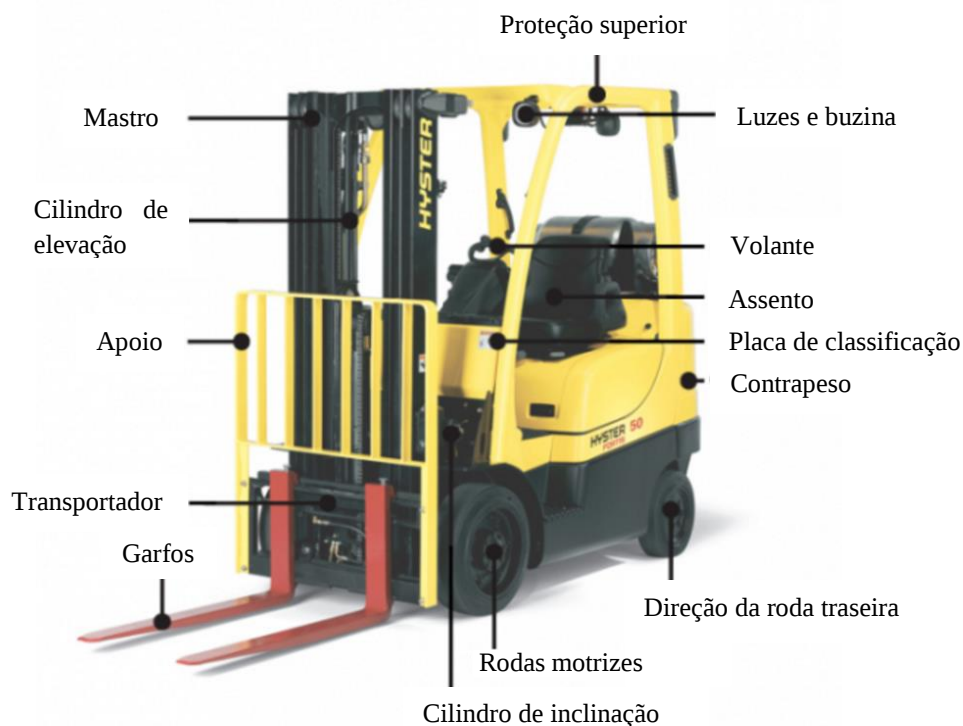


Figura 5.6 – Componentes básicos de um empilhador (Adaptalift Hyster, 2011).

No caso de os empilhadores serem usados existem fatores a favor e contra a sua compra. O fato de não ser novo automaticamente baixa o preço total do empilhador pois são eliminados os custos associados a seguros e/ou garantias alargadas, pagas durante os primeiros anos de utilização, se ainda se fabricarem equipamentos da mesma marca de

certeza que caso exista uma avaria irá ser bastante fácil encontrar uma peça para reparação, estes são os dois grandes fatores a favor da compra de empilhadores usados. Os factores contra estão relacionados com o nível de desgaste que algumas peças possam apresentar, não garantido os mesmos níveis de confiança de um empilhador novo, além de, se não estiver já ultrapassado, o período de garantia está mais perto do fim. Além destes dois fatores, obviamente o nível de estética terá decaído devido ao seu normal funcionamento, o que para efeitos operacionais este ultimo fator não tenha grande importância (Adaptalift Hyster, 2011a).

5.4. Sistemas de propulsão existentes

5.4.1. Empilhadores movidos a combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis encontrados usualmente para empilhadores são o diesel, a gasolina e GPL. Apesar de serem mais utilizados para aplicações exteriores, os empilhadores alimentados a gás podem eventualmente ser também usados em aplicações interiores. Atualmente existem também opções que permitem que, o mesmo empilhador possua dois tipos distintos de sistema de propulsão (ou seja, híbridos), o que pode ser utilizado caso se pretenda alterar o tipo de trabalho (de interior para exterior, ou vice-versa) durante a utilização do empilhador em apenas um turno.

Com este tipo de propulsão são construídos empilhadores numa vasta gama de potências, podendo ser fabricados desde os 25 até aos 300 CV (18,64 kW até 223,71 kW) (The engineering toolbox, 2014) de potência, de acordo com a capacidade de elevação que se pretende, que pode até chegar a 8 toneladas. O Diesel é geralmente usado em máquinas maiores que são projetadas para ter o poder de movimentar até 20 toneladas, o que implica a construção de motores com até 700 CV (524,85 kW) (The engineering toolbox, 2014; Elgowainy *et al.*, 2009).

A principal vantagem deste tipo de empilhadores face aos elétricos com baterias, e com células de combustível, é a rapidez e facilidade do reabastecimento, que em média é inferior a 1 minuto, e não existe a necessidade de troca de tanque ou outro componente. Podemos ainda referir o fato de ser menos dispendioso no ato de compra, no entanto a manutenção acaba também por ter um valor elevado (Mahadevan *et al.*, 2007).

5.4.2. Empilhadores movidos a bateria.

Os empilhadores a bateria são um pouco mais caros, quando comparados com os empilhadores a combustão interna, no entanto fatores como os menores custos de manutenção, e a redução de fumos e ruídos, fazem com que estes sejam cada vez mais procurados (Ray, 2008).

Num empilhador elétrico (classes I, II e III) a bateria não serve apenas para alimentar o sistema de propulsão, existem casos em que além de ter de alimentar todos os restantes circuitos, servem ainda para aumentar a estabilidade do empilhador devido ao seu peso. Daí o fato de ainda hoje se usarem as baterias de chumbo-ácido neste tipo de aplicações, pois apesar destas serem mais baratas, as potências que se conseguem atingir são elevadas e ainda apresentam um elevado peso, o que ajuda na estabilidade do empilhador. Este tipo de propulsão é mais utilizado em ambientes interiores, devido a não libertação de gases tóxicos, onde o espaço é mais confinado, as cargas usualmente não são tão excessivas e as alturas requeridas são menores. As baterias utilizadas neste tipo de veículos são chamadas de baterias de tração e semi-tração, ou bateria de ciclo profundo (Deep Cycle). Estas são construídas para fornecer quantidades baixas de intensidade elétrica durante longos períodos de tempo (horas) enquanto suportando descargas até 80%, e posterior carga (Ecobatería sistemas de regeneración, 2015). Apesar de existirem empilhadores elétricos que suportem uma vasta gama de cargas, a capacidade verificada na maior parte dos casos não ultrapassa as 3 toneladas. A aplicação deste tipo de empilhadores é exigida normalmente em ambientes fechados e obviamente em instalações refrigeradas, ou seja, empresas que fazem conservação de bens alimentares a baixas temperaturas. Neste tipo de aplicações onde as temperaturas são reduzidas as baterias de tração e semi-tração perdem alguma da sua eficiência, devido ao electrólito que apresentam ser líquido, o que implica o aumento das tarefas de manutenção (Elgowainy *et al.*, 2009). No entanto este tipo de baterias também apresenta algumas perdas de eficiência quando expostas a temperaturas elevadas, sendo a temperatura de funcionamento recomendada entre 25 e 30°C (Ecobatería sistema de regeneración, 2015; Elgowainy *et al.*, 2009). Os empilhadores elétricos também podem ser usados em ambiente exterior, mas têm de ser sujeitos a algumas mudanças como,

a utilização de pneus a ar para permitir o uso em superfícies rugosas, impermeabilização do compartimento eletrônico e além disso, o uso de motores de corrente alternada (AC) para conseguirmos obter maior potência e maior velocidade de elevação (Mahadevan *et al.*, 2007).

Usualmente as baterias que se utilizam nos empilhadores são as de chumbo-ácido, que são fabricadas com tensões entre 24 e 80 V, sendo o valor de 36V o mais comum.

A bateria além de ser a peça chave para o funcionamento do empilhador é também o componente que confere algumas desvantagens ao funcionamento do mesmo. A principal desvantagem deve-se ao tempo de troca ou recarga de uma bateria convencional de chumbo-ácido. Usualmente uma bateria não deve descarregar até um limite inferior a 20% da sua carga total, pois se isso ocorrer temos o risco de provocar danos na bateria diminuindo o seu período de vida. No entanto uma bateria carregada deve garantir um funcionamento contínuo de 6 a 8h, após esse período temos de trocar ou recarregar a bateria. Para uma troca automática perdemos em média de 10 a 15 minutos, já uma troca manual demora em média cerca de 45 minutos, mesmo assim a troca é a solução mais rápida visto que o tempo medio de recarga de uma bateria é de 8h, com um carregador convencional de 5kW. Além de ter de ficar 8h a carregar, após esse tempo a bateria tem de estar em repouso durante aproximadamente 8h para dissipar o calor gerado durante a recarga, o que faz com que para uma utilização de 24h, 7 dias na semana temos de possuir 3 baterias para cada empilhador para tentar garantir um funcionamento contínuo. Existem também baterias de rápido carregamento, no entanto são apontadas como perigosas a nível ambiental, devido à instabilidade do ácido, e baterias com este tipo de carregamento sofrem uma degradação mais acentuada tendo um período de vida mais curto. (Gaines *et al.*, 2008). Uma outra desvantagem prende-se com a perda de potência com a descarga da bateria, para não falar que o uso de baterias obriga a empresa a reservar um espaço tanto para o armazenamento como para a troca e recarga das baterias, o que acarreta também custos adicionais para a empresa (Renquist *et al.*, 2012). Todos os investimentos, quer em baterias como plataformas de carregamentos ou tecnologias de carregamento rápido, devem ser projetados de acordo com o tipo e carga de trabalho requerido pela empresa (Rogers, 2010).

5.4.3. Empilhadores com célula de combustível

Se vamos substituir uma tecnologia por outra mais recente é importante que a tecnologia que se impõe substitua a antiga da melhor forma possível. Empilhadores alimentados a células de combustível comercialmente disponíveis são idênticos aos empilhadores que possuem baterias convencionais. No entanto como a tecnologia tem modos de funcionamento diferentes é sempre necessário recorrer a algumas adaptações. Em primeiro lugar, a bateria padrão é muito mais pesada do que uma célula de combustível, por isso deve ser adicionada à célula de combustível um peso extra para conseguirmos manter a estabilidade e fornecer o mesmo nível de funcionalidade e segurança. Em segundo lugar, com a existência de dois componentes separados (contrapeso e célula de combustível) podem mudar os requisitos de travagem do empilhador, fazendo com que sejam necessários testes de modo a garantir que o empilhador com célula de combustível execute as suas tarefas com a mesma segurança que possuem os sistemas alimentados a baterias (Rogers, 2010).

Nos sistemas de células de combustível que a Plug Power fornece aos seus clientes é construída uma carcaça de aço ou ferro fundido envolvendo o sistema da célula de combustível, este conjunto representa cerca de 50% do peso do produto. A célula de combustível representa apenas cerca de 10%, incluindo um tanque de hidrogénio, bateria, sistema de resfriamento, sistemas eletrónicos, etc. Esta necessidade de aumentar o peso é não só imposta por requisitos de estabilidade, mas também porque o que a Plug Power pretende criar um sistema que substitua integralmente a bateria convencional dos empilhadores, sem serem necessárias alterações adicionais na estrutura do veículo (Ponticel, 2011). Na Figura 5.7 podemos verificar as diferentes proporções dos componentes das duas tecnologias, assim como uma possível adaptação de empilhadores a bateria para empilhadores a células de combustível.

Além das mudanças que se poderão impor, a implementação de células de combustível tem alguns pontos que melhoram as falhas dos sistemas de baterias convencionais. O fato de não ser necessário a troca de bateria conjugado com os 5-6 minutos que demoram para abastecer, constituem os dois grandes pontos de interesse. Como consequências temos a redução do espaço necessário para fazer o abastecimento e consequente aumento do tempo de produtividade do empilhador. Outras vantagens prendem-se com o fato de as células de

combustível permitirem uma tensão de trabalho constante, mesmo quando se aproxima a hora de abastecer (Productivity, 2010), e sem perda de eficiência quando é necessário trabalhar em locais com temperaturas baixas. A vertente ambiental, que se revela cada vez mais importante também ajuda no crescimento desta tecnologia, uma vez que com células de combustível não há preocupações com escoamento de ácidos ou chumbo, ou de emissões de poluentes atmosféricos como no caso dos empilhadores com motores de combustão (Elgowainy *et al.*, 2009).

Apesar de todas estas vantagens, existem ainda barreiras à implementação desta tecnologia, principalmente relacionadas com o armazenamento do hidrogénio no local. Esta questão do armazenamento é muito complexa e pode variar de caso para caso. O hidrogénio pode ser armazenado de muitas formas, ou então ser produzido no local, através de energias renováveis, ou até por reforma de outros combustíveis e ser distribuído nas condutas como um gás normal. Temos, no entanto, de estudar caso a caso para saber qual a solução mais económica, não podendo descartar também a vertente ambiental. A criação de frotas de empilhadores a célula de combustível mostra-se como uma solução viável a longo prazo, no entanto, segundo estudos já realizados, a viabilidade desta tecnologia esta associada a grandes frotas de empilhadores, usualmente acima de 50 empilhadores (Renquist *et al.*, 2012), requerendo, portanto, um grande investimento inicial. Esse investimento é justificado pois um empilhador com célula de combustível é mais dispendioso do que um empilhador a bateria convencional, e também devido ao preço requerido para todas as estruturas necessárias para armazenamento, distribuição e possível produção de hidrogénio. Hoje em dia existem empresas que têm a possibilidade de aplicar células de combustível a toda a sua frota, isto ocorre, pois, as emissões de gases com efeito de estufa são mínimas, dando às células de combustível uma reputação "verde", e em vários países, como os EUA, existem enormes subsídios que também incentivam à mudança. Além destes fatos a manutenção programada associada às células de combustível é mínima, fazendo-se verificações a cada 500 horas de serviço. As células de combustível apresentam ainda um longo período de vida quando comparadas com as baterias convencionais, estas apresentam um período de vida de 10.000h de funcionamento, ou cerca de 7 a 10 anos, antes de exigir a substituição (Rogers, 2010).

Atualmente existem algumas empresas que se destacam neste novo ramo. No caso de fabricação dos empilhadores temos a Raymond Corporation, a Crown Equipment

Corporation e a Toyota. O principal fornecedor de células de combustível é a PlugPower, embora outras empresas tenham desenvolvido células de combustível também para este tipo de aplicações, sendo elas a Hydrogenics, Nuvera e Ballard (Rogers, 2010).

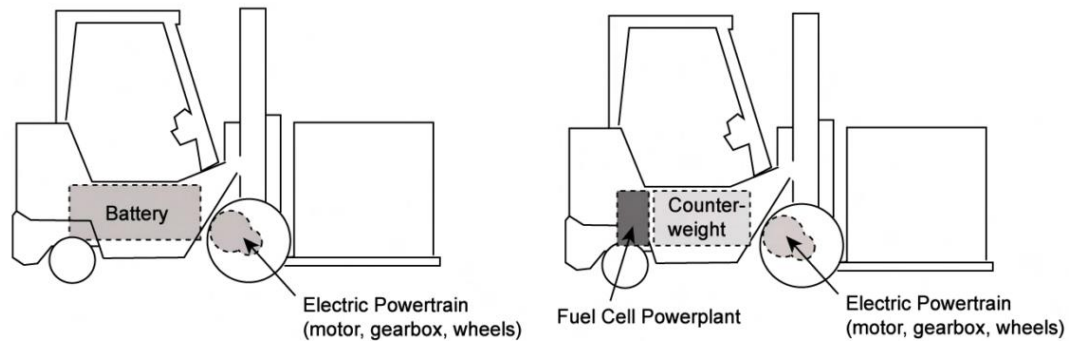


Figura 5.7– Exemplo da constituição de um empilhador a bateria e de um empilhador a célula de combustível (Rogers, 2010).

5.4.4. Requisitos de infraestruturas

Toda a implementação de diferentes tecnologias envolvem também a necessidade de infraestruturas para assegurar o seu funcionamento. No caso dos empilhadores, sejam eles a baterias ou a célula de combustível requerem a utilização de estruturas que permitam assegurar o seu reabastecimento para posteriormente realizarem as suas tarefas da melhor forma. Os requisitos de infraestrutura para os diferentes sistemas de empilhadores são resumidos seguidamente.

5.4.4.1. Empilhadores elétricos com baterias (carregamento convencional).

Este tipo de tecnologia requer a existência de infraestruturas que permitam o armazenamento, assim como a troca e recarga das baterias. Usualmente as empresas reservam um compartimento dos armazéns para realizar estas operações, reduzindo assim um pouco ao espaço que poderia ser eventualmente usado para aumento de produção. Os custos de mão-de-obra e associados à gestão da bateria constituem um dos principais fatores que explicam o elevado preço desta tecnologia.

5.4.4.2. Empilhadores elétricos com baterias (carregamento rápido).

Para reduzir os problemas logísticos e económicos dos carregadores convencionais, foram desenvolvidos carregadores capazes de recargar mais rapidamente uma bateria. Estes usam uma corrente mais alta do que os carregadores convencionais, para permitir um carregamento de duas a quatro vezes mais rápido (ou seja, entre 2h a 4h), podendo ser utilizado na maioria das baterias de chumbo-ácido sem modificações. Quando a utilização destes carregadores é adequadamente projetada e implementada, pode eliminar a necessidade de baterias adicionais e os custos de armazenamento e mão-de-obra. Com esta tecnologia os operadores podem ligar o carregador durante todos os períodos de inatividade, sendo possível manter a bateria entre os 30% e 80% de carga. No entanto este tipo de carregamento não podem ser usados infinitamente, não sendo aconselhado a sua utilização onde a demanda da empresa exija mais de 2 turnos de funcionamento seguidos, pois o calor gerado não tem tempo suficiente para ser dissipado podendo causar danos na bateria. As empresas que utilizam este tipo de carregadores têm também de possuir sistemas de arrefecimento de baterias.

A infraestrutura para carregadores rápidos é mais cara do que os carregadores convencionais, embora os custos sejam posteriormente compensados pelas reduções dos custos de gerenciamento e armazenamento de baterias, assim como pela manutenção reduzida que estes requerem.

Uma das desvantagens deste tipo de carregamento está no fato em que este reduz o tempo de vida das baterias, isto reflete-se também no período de garantia que o fabricante oferece: 3 anos para instalações de carregamento rápido, e 5 anos para carregadores convencionais. Outros problemas surgem quando a frota a alimentar é grande podendo requerer custos adicionais para o reforço das redes de energia elétrica da empresa, pois se vários operadores resolvem carregar os empilhadores ao mesmo tempo pode culminar num corte de energia não planeado. Portanto ao usar carregadores rápidos com uma frota maior de empilhadores, é necessária uma estratégia para evitar um aumento imprevisto no uso de eletricidade durante os horários de pico.

5.4.4.3. Empilhadores com células de combustível

Neste caso têm de existir infraestrutura que permitam armazenar o hidrogénio, usualmente do lado exterior, assim como infraestruturas que permitam recarregar os veículos no interior das instalações da empresa, como é representado na Figura 5.8. A manutenção dos equipamentos e os níveis de hidrogénio são monitorados pelo fornecedor e pagos através de contrato, este é entregue por camião na forma de gás comprimido ou líquido criogénico, dependendo das exigências do comprador. Usualmente o hidrogénio flui através de uma tubulação subterrânea, antes de poder ser utilizado este tem de ser pressurizado até à pressão de armazenamento do empilhador, normalmente 350 bar.

A principal vantagem desta tecnologia, já foi referida anteriormente, é a redução do tempo de inatividade requerido para abastecimento (apenas 5-6 minutos são necessários, face as 8h necessárias para um carregamento convencional e 2-4h necessárias para um carregamento rápido), e despesas associadas com a manutenção da bateria. Em adição temos o fato de a potência que a célula de combustível fornece se manter constante mesmo quando os níveis de carga são baixos (Rogers, 2010). O Quadro 5.3 apresenta um resumo das infra-estruturas mais importantes requeridas pelas diferentes tecnologias.

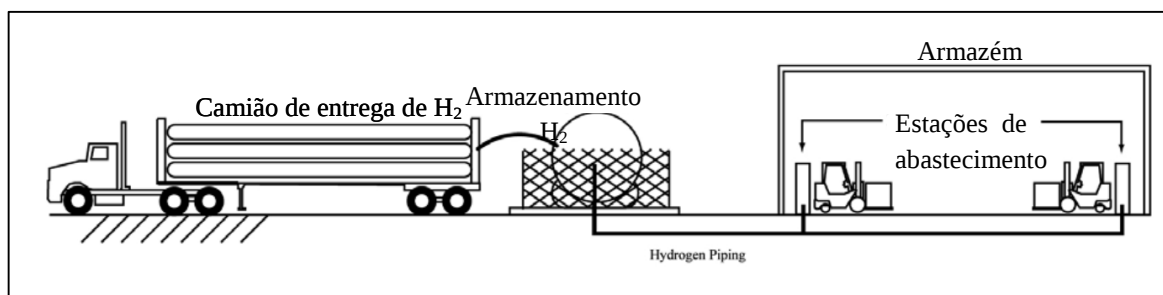


Figura 5.8 – Esquema simplificado da infra-estrutura de abastecimento de hidrogénio (Rogers, 2010).

Quadro 5.3 – Requisitos de infra-estrutura para cada tecnologia (Rogers, 2010).

Célula de combustível	Baterias (carregamento convencional)	Baterias (carregamento rápido)
1 - Estrutura de recapção e armazenamento de hidrogénio. 2- Tanques, compressores e sistema de ventilação. 3 – Sistema de distribuição de hidrogénio no interior. 4 – Estações de serviço interiores.	1 – Carregadores. 2 – Baterias extra. 3 – Salas de manutenção e armazenamento de baterias. 4 – Pessoal especializado para gerenciamento das salas de manutenção e armazenamento.	1 – Carregadores rápidos. 2 – Melhorias no sistema elétrico. 3 – Baterias melhoradas, no caso de elevada carga de trabalho. 4 – Gerenciamento dos períodos de carregamento, e demanda de eletricidade.

5.5. Estabilidade

Como tem vindo a ser frisado durante todo trabalho um empilhador é uma ferramenta muito útil que permite que uma pessoa levante, mova ou organize materiais/cargas pesadas com um esforço mínimo. No entanto, existe um grande risco de acidentes que podem ser provocados pelo operador quando este não for treinado, não estando familiarizado com os princípios físicos que estão na base do seu funcionamento (Washington State Departement of Labor&Industries, 2015).

Pela física, em todas as situações de movimento só existe equilíbrio entre duas extremidades se o momento das mesmas se igualarem. Quando se trata de movimentação de cargas pesadas a questão da estabilidade é obviamente muito importante, sendo o princípio referido também aplicado.

No caso dos empilhadores podemos falar em 2 tipos de estabilidade: a estabilidade estática e dinâmica. Sendo que a estabilidade estática está relacionada com a elevação da carga, avaliando a posição da mesma dependendo da altura e inclinação do mastro, e a estabilidade dinâmica está relacionada maioritariamente com os ângulos de viragem e velocidade do empilhador (Sousa, 2012). Dentro da estabilidade estática fala-se principalmente de estabilidade longitudinal, esta também aparece quando falamos de estabilidade dinâmica, no entanto dentro da dinâmica ainda temos um outro tópico de estabilidade lateral.

Para entendermos o conceito de estabilidade neste contexto é necessário ter em mente algumas definições de conceitos básicos:

- Centro de gravidade: é um ponto que representa a concentração de todo o peso de um objeto/corpo. No caso dos empilhadores para cargas simétricas o centro de gravidade encontra-se no meio da carga.
- Contrapeso: é o peso que é adicionado à estrutura do empilhador e é usado para compensar o peso da carga, e para maximizar a resistência do veículo à inclinação.
- Ponto de apoio: é o contacto das rodas dianteiras com o solo.
- Eixo de apoio: eixo de viragem do empilhador no sentido longitudinal.
- Grau é a inclinação: normalmente é a medida da subida ou descida de uma superfície horizontal.
- Linha de ação: linha vertical imaginária através do centro de gravidade de um objeto.
- Momento: produto entre o peso do objeto e a distância de um ponto fixo, geralmente o ponto de apoio. A distância é sempre medida perpendicularmente à linha de ação.
- Centro de carga: distância que existe em projeção ortogonal entre o centro de gravidade da carga e a sua extremidade lateral, ou braços de fixação dos garfos do empilhador.
- Distância entre eixos: distância entre a linha central das rodas dianteiras e traseiras do veículo (Occupational Safety and Health Administration – OSHA, 2008).

Estudar a estabilidade de um empilhador é agora uma tarefa simples, tendo presente os conceitos anteriores. Como podemos constatar existem diversos fatores que contribuem para a estabilidade de um veículo: distância entre eixos do veículo, largura e altura; distribuição do peso da carga; e a posição do contrapeso do veículo. A estabilidade deste tipo de veículos assenta, na maior parte dos casos, na chamada estabilidade triangular, representada na Figura 5.9.

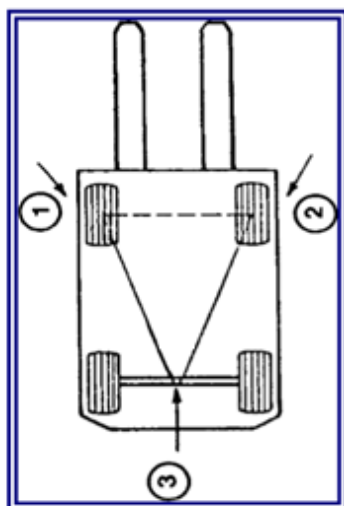


Figura 5.9 – Triângulo de estabilidade de um empilhador (Sousa, 2012).

O sistema representado na Figura 5.9 é então chamado sistema de suspensão de três pontos, ou seja, o veículo possui três pontos de apoio, que unidos formam então um triângulo. Um dos lados do triângulo coincide com o eixo das rodas dianteiras do empilhador, e a sua extremidade está posicionada no centro do eixo das rodas traseiras do mesmo. O centro de gravidade do empilhador é a única posição que interessa no caso de o empilhador estar sem carga. O equilíbrio após carregar o empilhador resulta da combinação do centro de gravidade do empilhador e carga. Esta posição é afetada por múltiplos fatores como, o peso e dimensões da carga, sua posição sobre a forquilha, a posição e inclinação do mastro, velocidade de arranque, de travagem, de viragem, etc. (Sousa, 2012). Não necessitamos de nos preocupar com a estabilidade de um empilhador contanto que a posição do centro de gravidade do conjunto se encontre dentro do triângulo de estabilidade (Occupational Safety and Health Administration – OSHA, 2008). Para evitar situações de perigo quando se fabricam os empilhadores os valores de carga e distância de carga máximos afixados já possuem alguma margem de segurança.

Existem, no entanto, algumas ações, que a partir delas já sabemos o que pode acontecer ao centro de gravidade do conjunto empilhador-carga, como podemos ver no Quadro 5.4 e na Figura 5.10.

Quadro 5.4 – Movimento do centro de gravidade em função das Ações do empilhador (Washington State Departement of LAbor&Industries, 2015).

Ação	Movimento do centro de gravidade
Inclinação da carga para a frente	Centro de gravidade desloca-se em direção ao eixo frontal
Condução num plano inclinado (descida)	
Travagem	
Inversão de marcha	
Inclinação da carga para trás	Centro de gravidade desloca-se em direção ao eixo traseiro
Condução num plano inclinado (subida)	
Aceleração	
Condução numa superfície inclinada lateralmente, ou numa superfície desigual	Centro de gravidade desloca-se para um dos lados do triângulo
Mudança de direção	

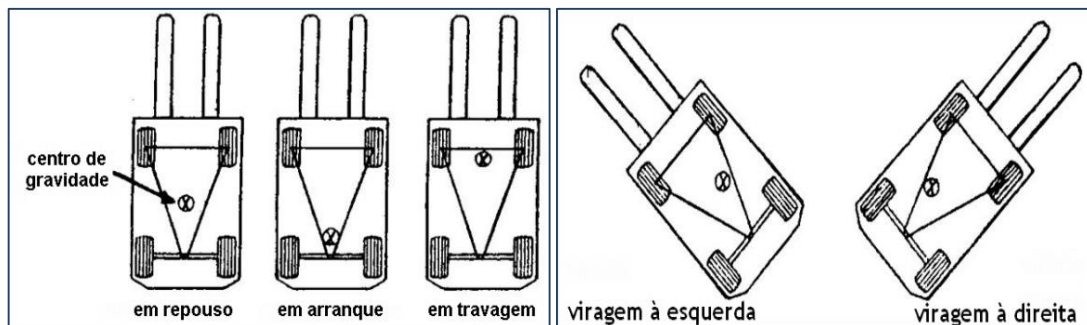


Figura 5.10 - Representação de um empilhador nas várias ações durante o seu funcionamento (Sousa, 2012)

5.5.1. Estabilidade estática

Todo o conjunto (empilhador e carga) permanecerá em equilíbrio se o ponto de atuação da resultante das forças se situar dentro do triângulo de estabilidade, conforme acautelado na tabela de limites de carga e distâncias, recomendado pelos diversos fabricantes (Sousa, 2012).

5.5.2. Estabilidade dinâmica

A estabilidade dinâmica resulta da combinação da estabilidade estática com a existência de forças que aparecem quando o veículo entra em movimento. O centro de gravidade resultante da combinação empilhador-carga pode mover-se devido à posição, inclinação e dimensões da carga (Washington State Departement of LAbor&Industries., 2015).

5.5.3. Estabilidade longitudinal

A estabilidade longitudinal de um empilhador contrabalançado depende do momento do mesmo e do momento da carga. Estamos perante uma situação estável se o momento do empilhador é superior ao momento da carga. Este momento calcula-se em relação ao ponto de equilíbrio do próprio empilhador. Se o momento da carga for maior que o momento do veículo, este forçará o empilhador a inclinar-se para a frente, ao contrário, se o momento da carga for menor que o momento do veículo, este forçará o empilhador a inclinar-se para trás (Occupational Safety and Health Administration - OSHA. 2008), como podemos perceber pela análise das Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 .

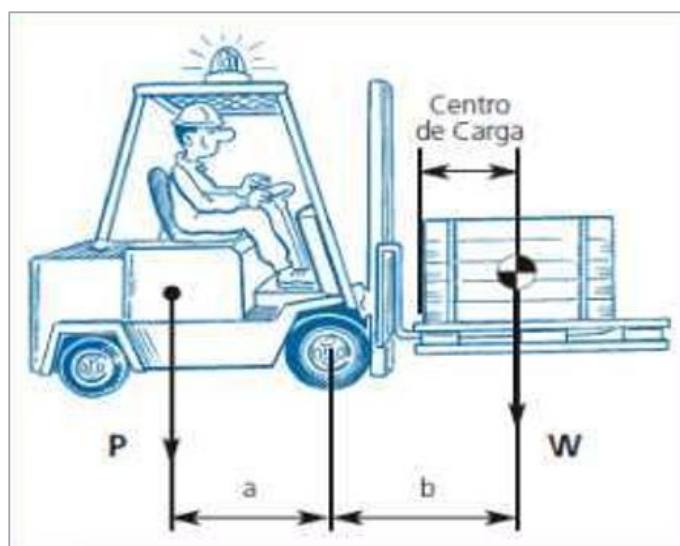


Figura 5.11 - Momentos que atuam no empilhador (Sousa, 2012).

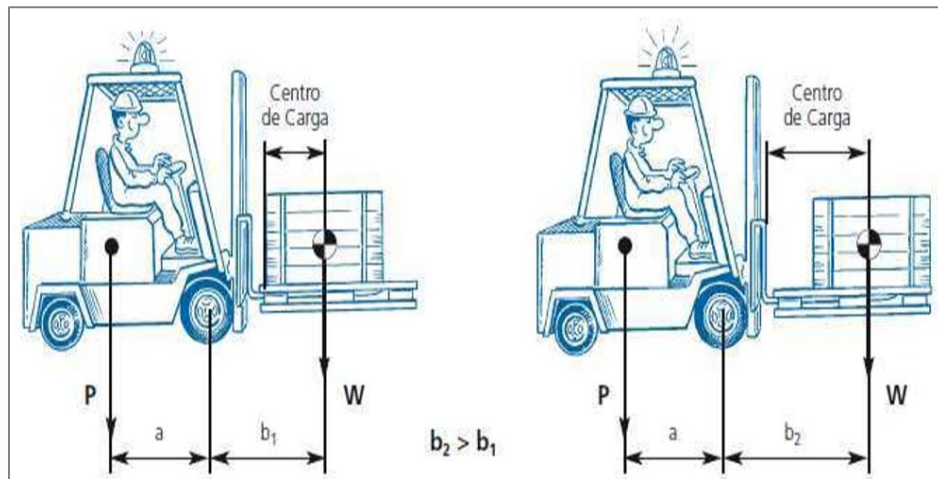


Figura 5.12 - Variação da estabilidade com a altura da carga (Sousa, 2012).

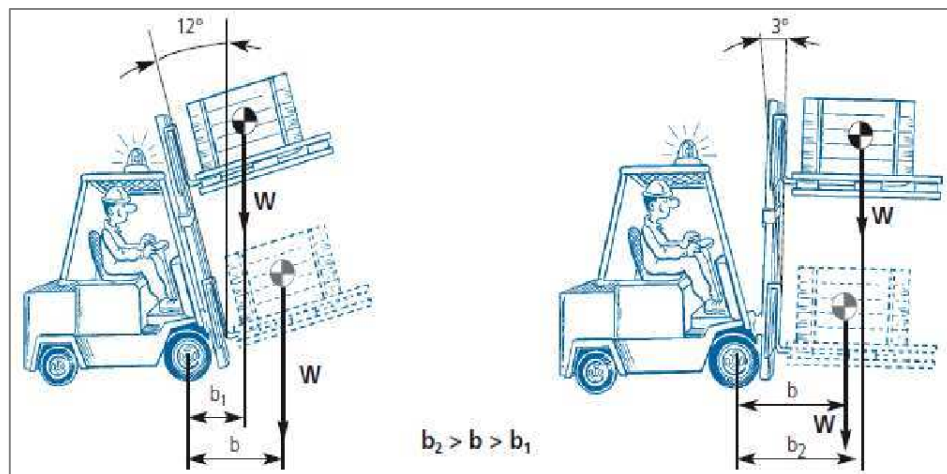


Figura 5.13 - Variação da estabilidade com a inclinação do mastro (Sousa, 2012).

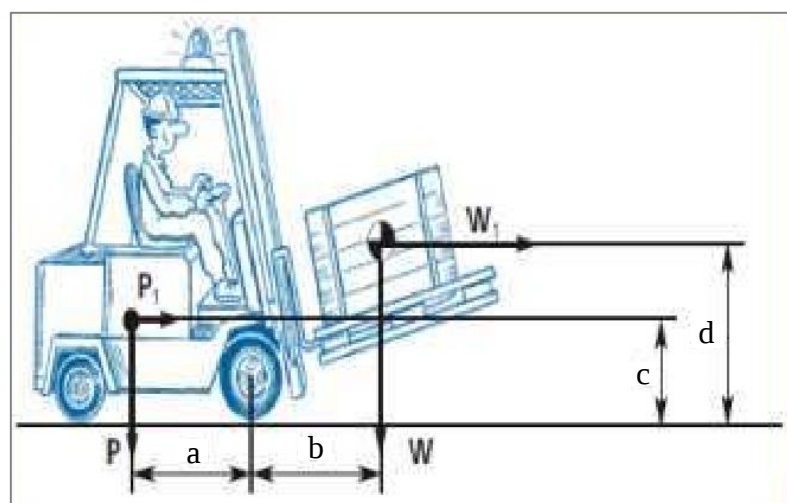


Figura 5.14 - Momentos adicionais gerados pela carga em movimento (Sousa, 2012).

5.5.4. Estabilidade lateral

A estabilidade lateral do veículo é determinada pela posição da linha de ação em relação ao triângulo de estabilidade. Os fatores que afetam a estabilidade lateral do veículo incluem a colocação da carga no caminhão, a altura da carga acima da superfície sobre a qual o veículo está operando e o grau de inclinação do veículo (Occupational Safety and Health Administration – OSHA, 2008). As mudanças de direção também têm influência na estabilidade lateral de um empilhador, como pode ser visto na Figura 5.15, gerando momentos laterais negativos ou positivos. Os Momentos negativos são os momentos a favor da instabilidade e estão relacionados com a atuação das forças centrífugas. Os momentos positivos são a favor da estabilidade, e estão relacionados com a atração terrestre sobre o conjunto.

A combinação de momentos de viragem com a inclinação da superfície, pode causar um grande risco de instabilidade, principalmente quando as forças resultantes dos momentos de viragem lateral e da inclinação da superfície atuam no mesmo sentido (Sousa, 2012).

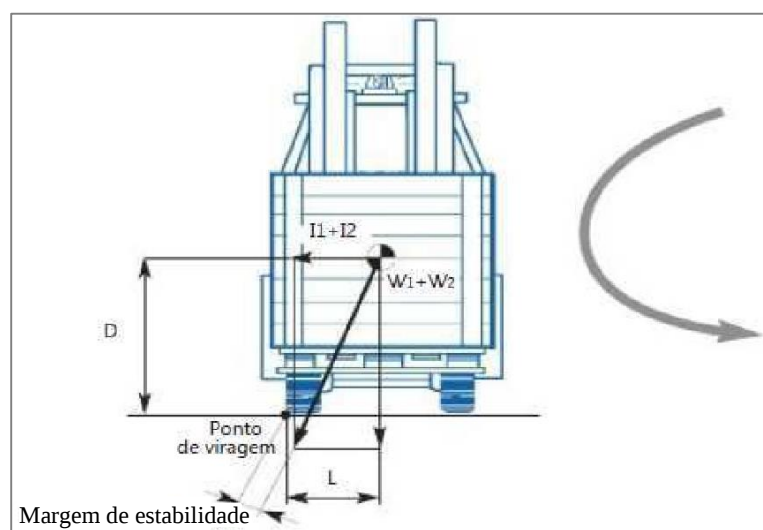


Figura 5.15 - Momentos gerados com as mudanças de direção (Sousa, 2012).

6. Estudos realizados

No decorrer desta dissertação foram realizados dois estudos de carácter distinto. Um primeiro estudo é relativo à modelação dos gastos energéticos. Este estudo é feito baseando-nos no número de viagens realizadas por um empilhador durante um determinado período de trabalho, contabilizando a energia gasta em cada uma delas, para perceber quantas paragens são exigidas nesse determinado tempo, apenas para troca de bateria ou reabastecimento de hidrogénio. Um outro corresponde a um estudo de carácter económico para avaliar a viabilidade de implementação da tecnologia de hidrogénio ao invés da tecnologia de baterias de chumbo-ácido, bastante utilizadas atualmente.

Durante a fase de pesquisa foi verificado que existem de facto alguns modelos relativos à quantificação das emissões durante a atividade dos empilhadores, como é o caso do modelo GREET (Rogers, 2010; Gaines *et al.*, 2008; Elgowainy *et al.*, 2009). No entanto não foi encontrado nenhum modelo que fizesse a análise dos valores de energia gastos durante o funcionamento dos empilhadores, sendo este fator inovador deste trabalho.

6.1. Modulação dos gastos energéticos dos empilhadores

Na logística a produtividade é o maior fator a considerar, quando queremos avaliar a rentabilidade. Por sua vez a produtividade varia linearmente com o nível de eficiência de operação de uma frota de empilhadores, de uma determinada empresa/armazém. Convencionalmente, as baterias de chumbo-ácido são mais utilizadas, quando as operações dos empilhadores se realizam em ambiente fechado. Mais recentemente surgiu a aplicação de células de combustível neste tipo de atividade, garantindo benefícios não só a nível ambiental, mas também a nível operacional, mostrando-se como uma solução viável para o aumento da produtividade (Elgowainy *et al.*, 2009). Neste tipo de serviços o aumento da produtividade ocorre pelo aumento do tempo de operação do empilhador, sem a necessidade de carregamento e/ou troca da bateria, assim como pela existência de uma potência constante ao longo do período de trabalho, como mostrado na Figura 6.1 é possível atingir tudo isso com o uso de células de combustível (Ballard, 2013).

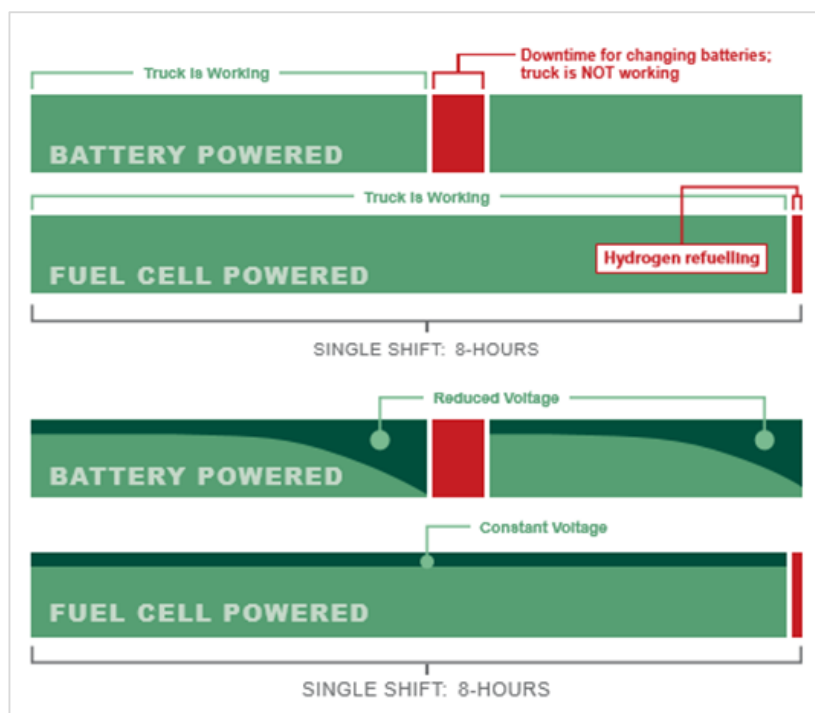


Figura 6.1 - Comparação entre o Sistema de baterias e de células de combustível (Ballard, 2013).

O departamento de energia dos EUA (DOE) realiza trabalhos de pesquisa sobre a viabilidade técnica e económica, resultante da aplicação de novas tecnologias, tendo recentemente reconhecido vários mercados nos quais seria viável a utilização de células de combustível. O setor da logística, nomeadamente na utilização de empilhadores para armazenamento e distribuição de cargas, faz parte desses mercados (Gaines *et al.*, 2008), contribuindo para o aumento do nº de estudos, e interesse nesta área. Outra evidência de que este mercado é rentável, é o crescimento da implementação desta tecnologia em diversos países, principalmente nos EUA e no Canadá (Garde & Santarelli, 2012), principalmente devido a incentivos financeiros existentes nesses países. Portanto, podemos constatar que, os fatores económicos são atualmente a maior barreira para a comercialização e implementação da tecnologia do hidrogénio (Renquist *et al.*, 2012). No entanto, como em todas as outras tecnologias, antes de ser comercializadas e implementadas em grande escala, estas têm de ser seriamente testadas, para um posterior crescimento no mercado. Este crescimento, para a tecnologia do hidrogénio é cada vez mais evidente (Mayyas *et al.*, 2015).

O desempenho de um empilhador é avaliado segundo estudos paramétricos (Hosseinzadeh *et al.*, 2013). No decorrer deste estudo e desenvolvimento da dissertação,

foi então criado um modelo em Excel cujo objetivo principal consiste no cálculo do gasto energético de um empilhador, em função no n° de viagens diárias.

No modelo referido podem ser introduzidos todos os tipos de classes de empilhadores existentes, podendo também trabalhar com uma vasta gama de valores de cargas. Utilizando então este modelo podemos, de acordo com a carga de trabalho, peso da carga, tipos de empilhadores, etc, calcular o gasto de energia, para que posteriormente seja calculado o n° de horas de trabalho perdidas apenas para troca de baterias e reabastecimentos de hidrogénio, ao longo de um determinado período de tempo.

6.1.1. Metodologia e análise

A metodologia proposta consiste numa comparação entre dois sistemas de propulsão diferentes, e para garantir que o serviço prestado ao utilizador pelas duas soluções seja idêntico, consideramos que os veículos e o local de trabalho são os mesmos para ambos os sistemas de propulsão. Existe, no entanto, uma dificuldade eminente quando tentamos dimensionar sistemas de energia, que se prende principalmente com a escassez e ambiguidade dos dados que aparecem na literatura (Gaines *et al.*, 2008). Neste caso a ambiguidade existe devido ao prematuro estado de desenvolvimento verificado na aplicação de células de combustível, em veículos de manuseamento de materiais, conjugado com a falta de dados experimentais obtidos em situações de verdadeiro funcionamento. No entanto as dificuldades têm de ser ultrapassadas, e, portanto, neste estudo vamos então ter em conta algumas aproximações, que irão ser descritas posteriormente.

O cálculo energético é baseado num estudo realizado por Siddhartha Ray, um aluno de doutoramento, no ano de 2008 (Ray, 2008). Para o cálculo mencionado, vários parâmetros foram determinadas separadamente, sendo a sua soma correspondente ao valor total de energia consumida numa viagem. Os parâmetros referidos são então: a energia necessária para a viagem com carga; energia necessária para levantar a carga; energia necessária para se mover sem carga; energia gasta devido à inclinação do mastro com e sem carga; e finalmente, a energia necessária para caminhos que eventualmente possuam alguma inclinação (Ray, 2008). As fórmulas utilizadas são apresentadas no Quadro 6.1 e a explicação das variáveis, assim como a análise dimensional estão representadas no Quadro

6.2. É importante referir que estas não têm uma dedução teórica, visto que foram criadas e ajustadas de acordo com os dados experimentais recolhidos por Siddhartha Ray numa situação real de funcionamento (Ray, 2008), durante a realização do seu doutoramento, em 2008, como já tinha sido referido. Apesar deste fato é também importante referir que duas das parcelas apresentadas, nomeadamente os valores da energia necessária para viajar com e sem carga, são obtidas a partir do Quadro 6.3 por interpolação.

Quadro 6.1 – Fórmulas utilizadas para o cálculo da energia consumida por cada empilhador em uma viagem (Ray, 2008).

Parcela	Fórmula
Energia para percorrer caminhos inclinados	$\left(\frac{P_{total} * 2,2046}{2000}\right) * (d * 3,2808) * (\alpha * 0,013)$
Energia para levantamento da carga	$\left(\frac{P_{carga} * 2,2046}{2000}\right) * (h * 3,2808 * 2)$
Inclinação do mastro com carga	$\left(\frac{P_{carga} * 2,2046}{2000}\right) * 1$
Inclinação do mastro sem carga	$\frac{1}{3} * \left(\left(\frac{P_{carga} * 2,2046}{2000}\right) * 1\right)$

Quadro 6.2 – Análise dimensional das variáveis utilizadas.

Representação	Significado	Unidade
P_{total}	Peso do empilhador + Peso da carga	kg
P_{carga}	Peso da carga	kg
d	Distância	m
α	Inclinação verificada	%
h	Altura de elevação	m

Como já foi referido anteriormente, estas fórmulas foram obtidas experimentalmente não existindo uma dedução teórica para elas. Todos os valores que aparecem nas equações são valores relativos a conversões, para adaptação do sistema de unidades americano, para o sistema nacional. O Quadro 6.3 apresenta então os valores utilizados para as interpolações também já referidas anteriormente.

Quadro 6.3 – Energia (Watt-hora) estimada para a movimentação de um empilhador em função do peso (Ray, 2008).

kg\m	0	100	200	300	400	500	1000	1500	2000	2500
1000	6,3	13,1	25,0	35,8	46,9	58,0	113,3	168,7	224,0	279,4
2000	10,9	26,1	50,0	71,7	94,7	117,3	230,7	344,0	457,4	570,7
3000	16,4	39,2	75,0	107,5	142,0	176,0	346,1	516,1	686,2	856,2
4000	21,8	52,2	100,0	143,4	189,3	234,6	461,3	688,0	914,7	1141,4
5000	27,3	65,3	125,0	179,2	236,6	293,3	576,7	860,1	1143,5	1426,9
6000	32,8	78,3	150,0	215,1	284,0	352,0	692,0	1032,1	1372,1	1712,2
7000	38,2	91,4	175,0	250,9	331,3	410,7	807,4	1204,2	1600,9	1997,7
8000	43,7	104,4	200,0	286,8	378,6	469,3	922,7	1376,1	1829,5	2282,9
9000	49,1	117,5	225,0	322,6	426,0	528,0	1038,1	1548,2	2058,3	2568,4

A utilização deste modelo pressupõe que o armazém tenha uma elevada organização, sabendo por exemplo as distâncias necessárias durante o período de utilização do empilhador, assumindo apenas um trajeto. Ou seja, consideramos que o empilhador percorre sempre o mesmo percurso, entre o ponto de entrega e o ponto de armazenamento, apenas em sentidos opostos.

Para o modelo, como já foi referido anteriormente, podemos englobar todos os tipos de classes, para isso é necessário definir, no caso das células de combustível, tanto a capacidade do tanque de armazenamento de hidrogénio do empilhador, como o tempo requerido para o seu reabastecimento. O valor da energia obtida por kg de hidrogénio é um fator importante a definir, e neste estudo foi considerado como sendo de 15kWh (Gaines *et al.*, 2008). No caso de empilhadores elétricos com baterias, também temos de assumir

alguns valores de tempo, nomeadamente o tempo requerido para troca de bateria, assim como para o seu carregamento. A capacidade da bateria utilizada no empilhador também constitui um valor muito importante para a realização deste estudo, e normalmente vem explícito nos catálogos do fabricante dos próprios empilhadores. Como o tipo de baterias mais utilizado são as de chumbo-ácido, para os cálculos consideramos apenas uma descarga de 80% da capacidade nominal máxima da mesma, uma vez que este tipo de baterias não pode sofrer uma descarga mais profunda sem se danificar (Garde & Santarelli, 2012). Todos estes parâmetros podem variar de acordo com o tipo de empilhador e, portanto, é necessário defini-los. Os valores utilizados estão resumidos no Quadro 6.4. Obviamente será nomeado como o melhor sistema de propulsão, aquele que para determinada carga de trabalho possibilitar menos horas de inatividade provocadas pelo reabastecimento de hidrogénio, ou troca de baterias.

Quadro 6.4 – Dados técnicos e de operação, por tipo de empilhador com célula de combustível (Garde & Santarelli, 2012).

	Capacidade do tanque de H ₂ (kg)	Tempo gasto para reabastecimento de H ₂ (min)	Tempo requerido para substituição da bateria (min)
Classe I	1.8	6	15 – 20
Classe II	1.2	5	15 – 20
Classe III	0.72	4.2	15

Durante o desenvolvimento deste estudo, sempre que nos referimos a carregamento convencional, consideramos que são necessárias 8h para o carregamento completo de uma bateria, assim como 8h de arrefecimento da mesma (Rogers, 2010), como ilustrado na Figura 6.2. Todas as especificações sobre os empilhadores necessárias para a utilização do modelo foram retiradas do catálogo da Toyota (Toyota - Material Handling, 2016).

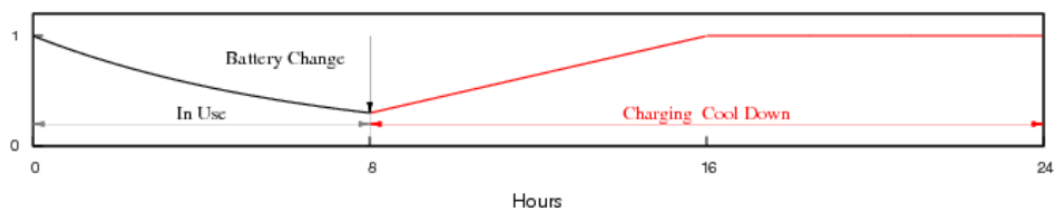


Figura 6.2 – Representação de um ciclo completa de descarga e carga de uma bateria convencional de chumbo-ácido (Rogers, 2010).

6.1.2. Cenários

Um cenário corresponde a uma hipotética representação da realidade, e serve para nos ajudar a estabelecer relações entre parâmetros diferentes de uma forma mais fácil e rápida. Como tal também neste estudo iremos abordar diferentes cenários tentando estabelecer relações entre eles, assim como destacar alguns pontos fortes de uns em relação a outros. No nosso caso foram criados diversos cenários com a intenção de avaliar não só a influência do tamanho da frota, na produtividade do armazém, mas também o impacto da utilização ou não de empilhadores de diferentes classes em simultâneo, assim como a influência da existência de possíveis inclinações no pavimento do próprio armazém. Em todos eles assumimos que as cargas chegam ao armazém através de camiões, tentando sempre ajustar o nº de empilhadores para que estes consigam no mínimo fazer 1 viagem completa por dia. Os diferentes cenários são distinguidos e agrupados em 3 categorias, de acordo com a carga de trabalho que se verifica, assim como a duração de cada turno, nº de turnos durante um dia, e o nº de dias de operação verificados em uma semana. Todos estes dados estão presentes no Quadro 6.5.

Quadro 6.5 – Parâmetros constantes ao longo do estudo (Garde & Santarelli, 2012).

Carga de trabalho	Nº de turnos por dia	Dias de trabalho por semana	Duração de cada turno	Nº de camiões	Carga de cada camião	Carga de cada empilhador	Distancia entre o ponto de entrega e de armazenamento
Reduzida	2	5	8 h	2 por dia	20000 kg	2000 kg	850 m
Intermédia	2	6		8 por dia			
Alta	3	7		4 por hora			

A influência do tamanho da frota foi avaliada, logicamente variando o nº de empilhadores, tendo sido testada sempre o caso do nº mínimo de empilhadores (1 empilhador). No caso do estudo das inclinações do piso foi sempre assumido que a inclinação se verificava ao longo de 150 m, sendo este valor retirado ao valor da distância entre o ponto de entrega e o ponto de armazenamento apresentado no Quadro 6.5, para manter constantes os 850 m no decorrer de todo o estudo.

6.2. Análise económica

Pela análise e modelação de energia feita anteriormente verificámos que a utilização de células de combustível apresenta uma melhor performance, em termos de produtividade, comparativamente com as baterias de chumbo-ácido. O que tentamos realizar agora consiste numa quantificação monetária desse aumento de produtividade, para tentar descobrir se esse aumento de produtividade conseguido com o uso de células de combustível, se reflete de forma positiva e relevante no interior de uma empresa.

6.2.1. Baterias vs FC

Os Quadros seguintes (Quadros 6.6, 6.6.1 e 6.7) resumem os valores monetários considerados na compra dos vários equipamentos necessários. Os valores apresentam casas decimais pois foram convertidos para euros a partir de estudos realizados noutra moeda, mais precisamente utilizando o dólar americano (Garde & Santarelli, 2012; Renquist *et al.*, 2012). É importante referir que os valores foram convertidos de dólares para euros no dia 15/06/2017, devido às constantes flutuações.

Quadro 6.6 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível.

Sistema		Armazenamento de H ₂ [1]		Operação [2]	
Classe I	31162 € [1]	Equipamentos	195967 €	Hidrogénio	8 €/kg
Classe II	24929 € [2]	Apoios	30099 €	Elettricidade	0,12 €/kWh
Classe III	12464 € [2]	Instalação	76426 €	Compressão do H ₂	0,20 €/kg
Estação	36326 € [2]				

Quadro 6.6 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível, continuação.

Manutenção	
Classe I	1923 €/ano [2]
Classe II	1923 €/ano [2]
Classe III	481 €/ano [2]
Estação	445 €/ano [1]
Armazenamento	11740 €/ano [1]

O preço do hidrogénio apresentado corresponde ao preço do mesmo quando entregue à empresa a partir de transporte externo, considerando que não existe qualquer tipo de produção de hidrogénio no local da empresa. É importante referir também que os preços relativos à eletricidade refletem os preços praticados em Portugal.

Quadro 6.7 – Dados económicos utilizados, para aplicação de baterias.

Sistema		Manutenção [2]		Operação	
Classe I	24039 € [1]	Classe I	1602 €	Eletricidade	0,12 €/kWh [2]
Classe II	17807 €	Classe II	1602 €	Operário de manutenção	9 €/h [4]
Classe III	8903 €	Classe III	192 €		
Carregador	2493 € [2]				
Eq. de troca	3383 € [2]				
Salas de carregamento	2671€/emp [1]				
Bateria classe I	4896,89 €				
Bateria classe II	4362,68 €				
Bateria classe III	2314,89 €				

Estes dois tipos de tecnologias apresentam, uma em relação à outra, fatores positivos e negativos, importantes para uma análise económica. Começemos por analisar as poupanças conseguidas por cada uma das tecnologias quando comparada com a outra.

No caso da aplicação de células de combustível, face à implementação de baterias iremos considerar poupanças nos seguintes parâmetros:

- Eletricidade consumida: no caso das células de combustível a quantidade de eletricidade usada é menor, sendo apenas utilizada uma pequena quantidade para a compressão do hidrogénio;
- Tempo de inatividade: como já foi visto no estudo de modelação de energia o tempo de inatividade do empilhador para reabastecimento de hidrogénio é inferior ao tempo de inatividade associado a trocas de bateria. Este tempo

[1] Renquist, J. V, Dickman, B., & Bradley, T. H. (2012). Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(17), 12054–12059.

[2] Garde, R., & Santarelli, M. (2012). Fuel cell early markets: Techno-economic feasibility study of PEMFC-based drivetrains in materials handling vehicles, 8, 0–10. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.048>

[4] Eurostat. (2014). Eurostat - Statistics Explained. https://doi.org/at/statistics-explained/index.php/Main_Page

de inatividade é contabilizado como horas de trabalho perdido, que são obviamente remuneradas;

- Salários: no caso da implementação de células de combustível não é necessário existirem salas de carregamento e manutenção de baterias, e portanto também não é necessário existirem operadores destas mesmas salas, o que constitui uma poupança.

No caso da aplicação de baterias, iremos também ter receitas, principalmente a nível de aquisição de equipamentos, pelo fato de as novas tecnologias possuírem um valor bastante mais elevado. Iremos então considerar receitas nos seguintes parâmetros:

- Aquisição de sistema: como já foi referido anteriormente a aquisição de novas tecnologias acaba sempre por ser mais dispendiosa no ato de compra. Neste sentido iremos ter receitas no que diz respeito à aquisição de todo o sistema, visto que com células de combustível este é bastante mais complexo e obviamente mais dispendioso. No entanto em outros estudos realizados refere a importância da aquisição de baterias sobresselentes, referindo que é importante a aquisição de 3 baterias por empilhador (Ballard, 2013). No nosso estudo foi considerada essa aquisição de três baterias por empilhador, e neste caso teremos receitas apenas relativas ao armazenamento de hidrogénio e aquisição da estação de reabastecimento, pois o sistema do próprio empilhador com 3 baterias acaba por ter um preço mais elevado, do que um empilhador apenas com uma célula de combustível. É importante também referir que no caso das baterias iremos considerar a renovação das mesmas ao fim de 5 anos de operação.
- Manutenção: como a manutenção anual requerida para células de combustível tem um valor mais elevado, iremos ter uma poupança anual neste contexto.
- Custos de combustível: apesar de no caso anterior termos uma poupança a nível de eletricidade, aqui comparando o preço da eletricidade com o do hidrogénio iremos também ter uma poupança em relação à quantidade de ‘combustível’ utilizado numa ou outra situação.

6.2.2. Baterias vs FC (com eletrólise)

Os custos associados aos sistemas e manutenção serão os mesmos do caso anterior. As mudanças são relativas ao dimensionamento de hidrogénio e dimensionamento do eletrolisador. Para este caso os valores monetários considerados estão apresentados nos Quadros 6.8, 6.9 e 6.10.

Quadro 6.8 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível.

Sistema		Operação [2]	
Classe I	31433 € [1]	Eletricidade	0,12 €/kWh
Classe II	25146 € [2]	Água	2,77 €/m ³
Classe III	12464 € [2]		
Estação + Compressor	36326 € [2]		
Eletrolisador	Variável [2]		
Armazenamento	14 €/kW h [3]		

Quadro 6.9 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível, continuação.

Manutenção	
Classe I	1923 €/ano [2]
Classe II	
Classe III	481 €/ano [2]
Estação	445 €/ano [1]
Eletrolisador	4% do investimento [2]
Armazenamento	5% do investimento [3]

Quadro 6.10 – Dados económicos utilizados, para aplicação de baterias.

Sistema		Manutenção [2]		Operação [2]	
Classe I	24039 € [1]	Classe I	1602 €	Eletricidade	0,12 €/kWh
Classe II	17807 €	Classe II	1602 €		
Classe III	8903 €	Classe III	192 €		
Carregador	2493 € [2]				
Eq. de troca	3383 € [2]				
Salas de carregamento	356 €/emp. [2]				

[3] Niaz, S., Manzoor, T., & Hussain, A. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives, 50, 457–469. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>

Tal como no caso anterior foram analisadas as poupanças de uma tecnologia em relação à outra, neste caso as poupanças são um pouco diferentes. No caso da aplicação de células de combustível com produção de hidrogénio por eletrólise, iremos ter poupanças apenas em dois parâmetros:

- Tempo de inatividade: como já foi dito o tempo de inatividade do empilhador para reabastecimento de hidrogénio é inferior ao tempo de inatividade associado a trocas de bateria. Este tempo de inatividade é contabilizado como horas de trabalho perdido, mas que também são obviamente remuneradas;
- Salários: no caso da implementação de células de combustível não é necessário existirem salas de carregamento e manutenção de baterias e, portanto, também não é necessário existirem operadores destas mesmas salas, o que constitui uma poupança.

Na aplicação de baterias, iremos também ter poupanças principalmente relativas ao elevado custo das novas tecnologias. Portanto são consideradas as seguintes parcelas:

- Aquisição de sistema: como já foi referido anteriormente a aquisição de novas tecnologias acaba sempre por ser mais dispendiosa no ato de compra. No entanto a consideração em relação à compra de baterias sobresselentes também foi considerada neste caso.
- Manutenção: como a manutenção anual requerida para células de combustível tem um valor mais elevado, iremos ter uma poupança anual neste contexto, tal como no caso anterior.
- Eletricidade: ao contrário do que acontecia anteriormente neste caso como o hidrogénio é produzido por eletrólise iremos ter um gasto superior em energia elétrica, o que representa poupanças para o caso da implementação de baterias.
- Água: como a produção do hidrogénio por eletrólise passa pelo uso da água, e no caso das baterias essa água não seria necessária, este fator também representa uma poupança para o caso das baterias.

7. Discussão dos resultados

Esta secção divide-se em duas partes. Inicialmente são apresentados os resultados referentes à análise dos gastos energéticos dos empilhadores (secção 6.1) e por fim serão apresentados os resultados referentes ao estudo económico, também realizado no decorrer desta dissertação (secção 6.2).

7.1. Estudo energético

Como já foi referido no capítulo 6, o estudo energético foi feito essencialmente para averiguar qual das tecnologias apresenta um período maior de inatividade, devido apenas à necessidade de troca de bateria, assim como reabastecimento de hidrogénio. É importante salientar que os valores de tempo presentes nos gráficos que irão ser apresentados, são valores calculados num período de 1 ano de funcionamento do armazém, e são valores por empilhador.

A distância entre o ponto de armazenamento e de entrega mantêm-se constante ao longo do estudo, ou seja 850 m. Como trabalhamos também com inclinações do pavimento, estas terão sempre um valor de 6% ao longo de 150 m.

7.1.1. Diferentes cargas de trabalho

Com carga de trabalho elevada é completamente absurdo utilizar apenas 1 empilhador, pois os tempos necessários para troca de bateria corresponderiam a cerca de 4 meses. Tentamos sempre estabelecer um número mínimo de empilhadores para que não sejam ultrapassadas as 100 horas de inatividade. Neste caso o número mínimo seria 30 empilhadores. No caso de carga intermédia são exigidos no mínimo 4 empilhadores de classe I, e no caso de carga reduzida apenas com um empilhador não são atingidas as 100h para troca e reabastecimento. Como pode ser verificado nas Figuras 7.2, 7.3 e 7.4. Os Quadros apresentados junto das Figuras (nomeadamente Quadros 7.1, 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8) apresentam os valores de energia em Ah gastos por viagem, é importante referir que os valores dados pelo modelo são em Wh, no entanto para converter em Ah basta apenas

fazer o quociente entre os valor em Wh pelos volts (V) que a bateria ou célula de combustível possui, que no nosso caso foi sempre considerado o valor de 48V. O valor de energia gasto por viagem está representado na Figura 7.1, este valor mantém-se o mesmo nas restantes simulações, alterando apenas o o nº de viagens e camiões durante um ano, dependendo da carga de trabalho verificada.

				Classe 1	
Energia para percorrer o caminho plano com carga:	kg:	5342		E1 (Wh):	434,49
	m:	700,0			
Energia extra para inclinado				E2 (Wh):	226,03
Energia para o retorno (sem carga)	kg:	3342		E3 (Wh):	271,83
	m:	700,0			
Energia de levantamento da carga				E4 (Wh):	17,36
Inclinação do mastro com carga				E6 (Wh):	2,20
Inclinação do mastro sem carga				E7 (Wh):	0,73
Energia total por viagem:				Etot (Wh):	956

Figura 7.1 – Energia consumida em Wh, por cada empilhador em apenas uma viagem.

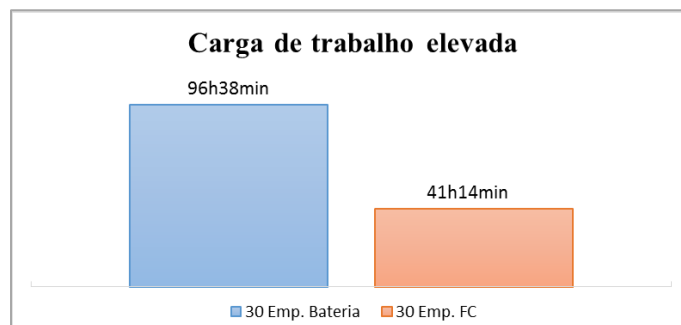


Figura 7.2 – Resultados do período de inatividade relativos à elevada carga de trabalho.

Quadro 7.1 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho elevada.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	19,9	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	412
Número de viagens por dia	32		
Energia gasta por dia (Ah)	637,06		
Dias de trabalho por ano	364		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	386		

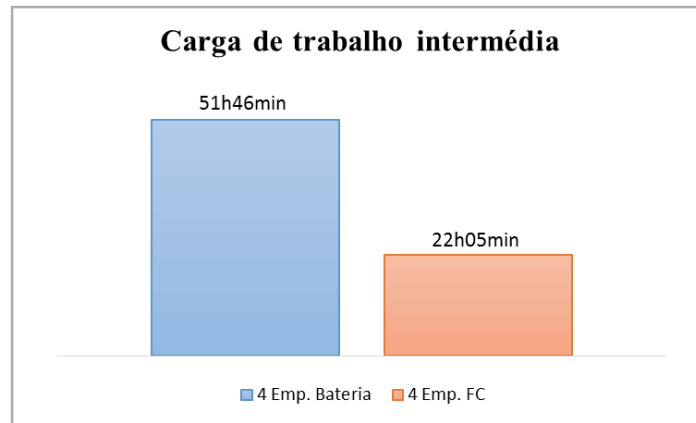


Figura 7.3 – Resultados do período de inatividade relativos à carga de trabalho intermédia.

Quadro 7.2 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho intermédia.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	19,9	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	221
Número de viagens por dia	20		
Energia gasta por dia (Ah)	398,16		
Dias de trabalho por ano	312		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	207		

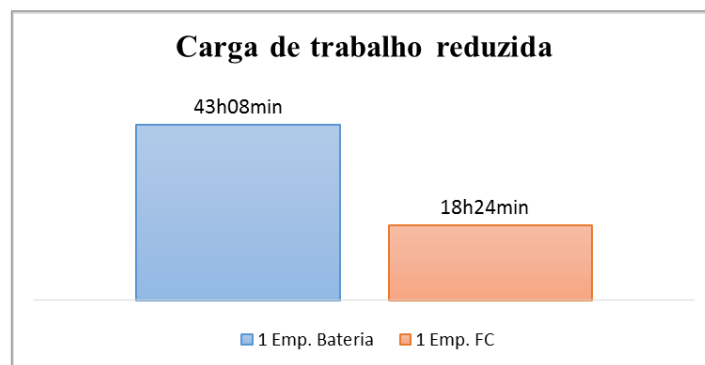
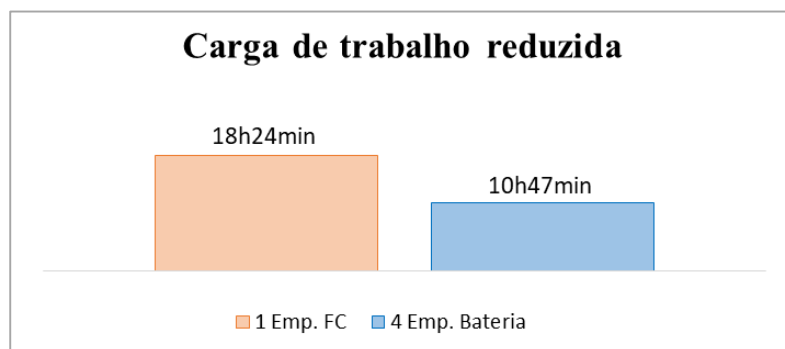


Figura 7.4 – Resultados do período de inatividade relativos à reduzida carga de trabalho.

Quadro 7.3– Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	19,9	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	184
Número de viagens por dia	20		
Energia gasta por dia (Ah)	398,16		
Dias de trabalho por ano	260		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	173		

Analisando os dados fornecidos pelo modelo, no caso da carga de trabalho reduzida serão necessários no mínimo 3 empilhadores a bateria para reduzir o tempo de inatividade de apenas 1 empilhador com células de combustível. No entanto com 3 empilhadores a bateria, e de acordo com as especificações consideradas, estes acabariam por não realizar viagens completas, por isso foi assumido o valor mínimo de 4 empilhadores, como mostrado pela Figura 7.5.

**Figura 7.5** – Número de empilhadores a bateria, necessários para diminuir o tempo de inatividade dos empilhadores com células de combustíveis considerados. Caso de carga de trabalho reduzida.

A mesma análise foi feita para o caso da carga de trabalho elevada, e neste caso os resultados são bem mais alarmantes, para reduzir o tempo de inatividade de 30 empilhadores com células de combustível, teríamos de possuir no mínimo 71 empilhadores a bateria. Pelo mesmo motivo descrito anteriormente será considerado o número mínimo de 80 empilhadores. Estes resultados são ilustrados na Figura 7.6.

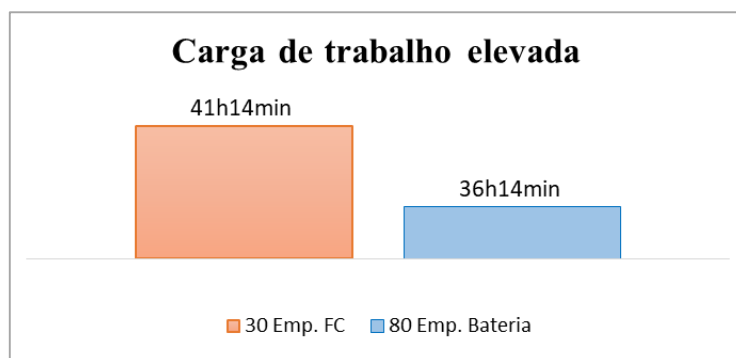


Figura 7.6 – Número de empilhadores e a bateria, necessários para diminuir o tempo de inatividade dos empilhadores com células de combustíveis considerados. Caso de carga de trabalho elevada.

7.1.2. Influência do peso da carga a transportar

Na tentativa de diminuir o consumo de energia foi testada a hipótese de reduzir o peso da carga, então a carga foi reduzida de 2000 kg para 1600 kg, mantendo o mesmo volume de materiais entregue ao armazém. No entanto quando reduzimos o peso da carga a transportar também podemos reduzir o tamanho, e consequentemente o peso, do empilhador. Foram consideradas estas duas opções e os resultados são apresentados na Figura 7.9. O Quadro 7.4 apresenta o peso de cada um dos empilhadores utilizados em cada simulação. As Figuras 7.7 e 7.8 apresentam os valores de energia calculados separadamente, para obtermos o valor gasto em cada viagem.

Quadro 7.4 – Diferenças entre os dois tipos de empilhador de classe I utilizados.

Empilhador de classe I	Peso (kg)	Cap. Nominal máxima da bateria (Ah)
Empilhador standard	3342	750
Empilhador menor	2981	

				Classe 1	
Energia para percorrer o caminho plano com carga:	kg:	4942		E1 (Wh):	401,97
	m:	700,0			
Energia extra para percurso inclinado				E2 (Wh):	209,11
Energia para o retorno (sem carga)	kg:	3342		E3 (Wh):	271,83
	m:	700,0			
Energia de levantamento da carga				E4 (Wh):	13,89
Inclinação do mastro com carga				E6 (Wh):	1,76
Inclinação do mastro sem carga				E7 (Wh):	0,59
Energia total por viagem:				Etot (Wh):	901

Figura 7.7 – Energia consumida em Wh, por empilhador em apenas uma viagem, reduzindo o peso da carga a transportar. Empilhador standard.

				Classe 1	
Energia para percorrer o caminho plano com carga:	kg:	4581		E1 (Wh):	372,60
	m:	700,0			
Energia extra para percurso inclinado				E2 (Wh):	193,83
Energia para o retorno (sem carga)	kg:	2981		E3 (Wh):	242,49
	m:	700,0			
Energia de levantamento da carga				E4 (Wh):	13,89
Inclinação do mastro com carga				E6 (Wh):	1,76
Inclinação do mastro sem carga				E7 (Wh):	0,59
Energia total por viagem:				Etot (Wh):	828

Figura 7.8 – Energia consumida em Wh, por empilhador em apenas uma viagem, reduzindo o peso da carga a transportar. Empilhador menor.

Como podemos ver, comparando as Figuras 7.7 e 7.8 com a Figura 7.1 o valor de energia gasto por viagem é menor, no entanto mantendo o mesmo volume de material entregue ao armazém vamos ter um número maior de viagens, o que resulta num agravamento das horas de inatividade como podemos ver na Figura 7.9. É importante não esquecer que foi apenas considerada 80% da capacidade máxima da bateria, é por este motivo que no Quadro 7.4 a capacidade máxima da bateria está apresentada como sendo 750 Ah, e nas tabelas de dados juntos dos gráficos este valor é reduzido para apenas 600 Ah.

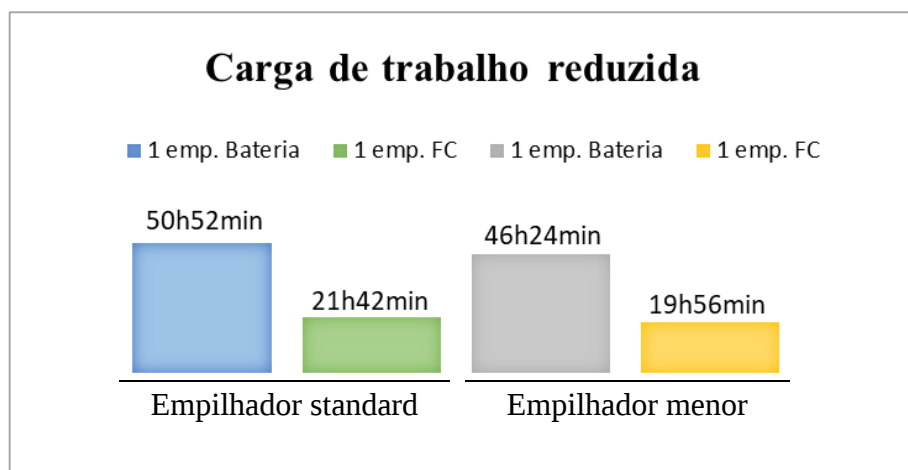


Figura 7.9 – Horas de inatividade verificadas quando efetuamos uma redução da carga a transportar pelo empilhador, mantendo o volume entregue ao armazém. Reduzida carga de trabalho.

Quadro 7.5 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador standard, com redução apenas da carga a transportar.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	18,77	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	217
Número de viagens por dia	25		
Energia gasta por dia (Ah)	469,53		
Dias de trabalho por ano	260		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	203		

Quadro 7.6 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador menor, com redução apenas da carga a transportar.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	17,25	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	199
Número de viagens por dia	25		
Energia gasta por dia (Ah)	430,99		
Dias de trabalho por ano	260		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	187		

Comparando os tempos representados na Figura 7.4 com os da Figura 7.9, podemos verificar que houve um ligeiro aumento das horas de inatividade. Este aumento é explicado pelo fato de se manter constante o volume de entregas ao armazém, visto que o empilhador acaba por realizar mais viagens, consumindo mais energia e agravando o período de inatividade. Mesmo com a utilização de um empilhador um pouco menor, as horas de inatividade face à hipótese anterior (Figura 7.4) apresentam um valor superior. Apesar deste fato podemos constatar que é sempre importante ajustar o peso da carga ao tamanho do empilhador.

Por curiosidade fizemos a mesma análise, mas mantendo a relação de 10 viagens do empilhador por cada caminhão, ou seja, reduzindo o volume de entrega ao armazém. Portanto o nº de camiões referentes aos cenários mantêm-se, mas ao invés de ter 20000 kg, passam a ter 16000 kg. No caso de carga de trabalho reduzida teremos uma penalização de cerca de 8000 kg diários. Os resultados obtidos com esta mudança de parâmetros estão representados na Figura 7.10.

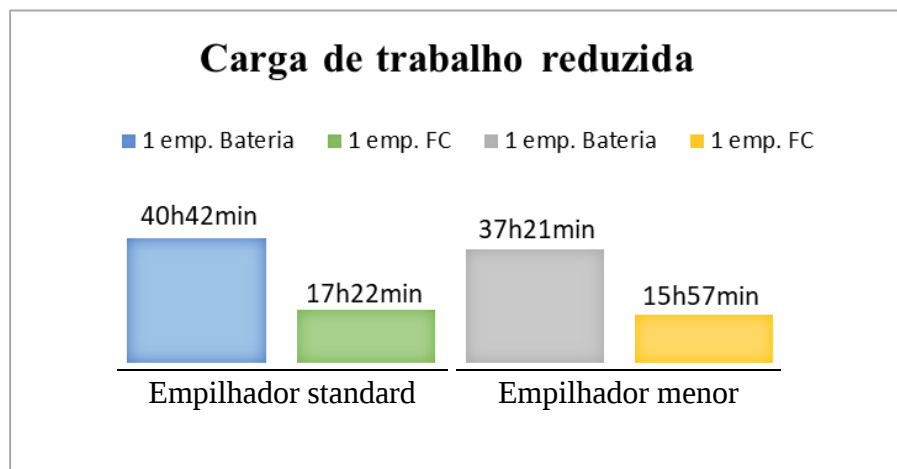


Figura 7.10 – Horas de inatividade verificadas quando efectuamos uma redução da carga a transportar e do volume entregue ao armazém. Reduzida carga de trabalho.

Neste caso os gastos de energia por viagens são os mesmos apresentados na fig 7.7e Fig 7.8, para os casos de empilhador standard e menor, respectivamente. Em relação ao caso anterior vemos que apenas se alteram o nº de viagens realizadas durante um dia, e consequentemente os valores de energia consumidos.

Quadro 7.7 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador standard, com redução da carga a transportar e do volume entregue ao armazém.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	18,77	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	174
Número de viagens por dia	20		
Energia gasta por dia (Ah)	375,62		
Dias de trabalho por ano	260		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	163		

Quadro 7.8 – Dados considerados para o cálculo das horas de inatividade. Carga de trabalho reduzida, empilhador menor, com redução da carga a transportar e do volume entregue ao armazém.

Cap. da bateria (Ah)	600	Cap. da célula de combustível (Ah)	562,5
Energia gasta por viagem (Ah)	17,25	Nº de reabastecimentos de H ₂ por ano, por empilhador	159
Número de viagens por dia	20		
Energia gasta por dia (Ah)	344,79		
Dias de trabalho por ano	260		
Nº de trocas de bateria por ano por empilhador	149		

Através de uma análise comparativa entre as Figuras 7.9 e 7.10 podemos concluir que para a tecnologia de baterias a redução do volume pode reduzir o tempo de inatividade do empilhador até quase 10h. Por outro lado, a redução de 8000 kg apenas diminui o tempo de inatividade até aproximadamente 4h, quando nos referimos a tecnologia de células de combustível. Existe de fato uma diminuição das horas de inatividade, o que se reflete num aumento de produtividade, no entanto este aumento de produtividade é considerado reduzido quando comparado à quantidade de material não entregue ao armazém.

7.1.3. Influência da utilização de empilhadores de classes diferentes e inclinações

Quando queremos conjugar duas classes de empilhadores diferentes, temos de ter em conta que o tamanho influencia a sua performance, já foi visto anteriormente. Além da

utilização de empilhadores da classe I, como tem sido feito até aqui, foram introduzidos empilhadores de classe II.

Foi verificado que a introdução de um empilhador de classe diferente para realizar o antigo trajeto de um empilhador de apenas uma classe, aumenta o valor das horas de inatividade, como pode ser visto na Figura 7.11.

Os empilhadores de classe II são geralmente construídos com um peso superior aos de classe I, por questões de equilíbrio, pois podem atingir maiores alturas. No entanto não é só este fator do peso que coloca entraves na sua utilização, geralmente este tipo de empilhadores também é construído com baterias de capacidade um pouco menor, comparando com os empilhadores de classe I. O Quadro 7.9 apresenta as características mais importantes do empilhador de classe II utilizadas no modelo. O empilhador de classe I utilizado corresponde ao denominado como standard, presente no Quadro 7.4.

Quadro 7.9 – Dados mais relevantes para utilização no modelo relativos ao empilhador de classe II.

	Peso (kg)	Cao. Máxima da bateria (Ah)
Empilhador Classe II	4046	620

Para esta secção verificamos que os valores de distância utilizados para o comprimento plano e comprimento inclinado, não são os mais apropriados, pois são muito distintos, sendo portanto necessário fazer um estudo mais profundo. Neste caso como são utilizadas duas classes de empilhadores distintos vamos averiguar quais são as situações em que se deve aplicar uma ou outra classe.

Como em todos os casos anteriores os Quadros 7.10 e 7.11 indicam os valores de energia gastos por viagem dependendo da classe de empilhador, e do troço que estes percorrem.

Quadro 7.10 – Valores de energia consumida por cada classe de empilhador considerada, quando o empilhador de classe I percorre o percurso inclinado.

	Classe I	Classe II
Energia para trajeto plano c/carga (Wh)	27,19	491,73
Energia para trajeto inclinado (Wh)	210,16	0
Energia de retorno s/carga (Wh)	16,27	329,07
Energia para levantamento de carga (Wh)	17,36	
Inclinação do mastro c/carga (Wh)	2,20	
Inclinação do mastro s/carga (Wh)	0,73	
Energia total (Wh)	277	844

Quadro 7.11 – Valores de energia consumida por cada classe de empilhador considerada, quando o empilhador de classe II percorre o percurso inclinado.

	Classe I	Classe II
Energia para trajeto plano c/carga (Wh)	405,14	33,01
Energia para trajeto inclinado (Wh)	0	255,82
Energia de retorno s/carga (Wh)	242,49	22,09
Energia para levantamento de carga (Wh)	17,36	
Inclinação do mastro c/carga (Wh)	2,20	
Inclinação do mastro s/carga (Wh)	0,73	
Energia total (Wh)	671	334

Como podemos ver pelos dados, temos um maior gasto de energia por viagem quando o empilhador de classe II percorre o percurso mais longo. Este fato era fácil de prever, devido às características construtivas destes empilhadores já referidas anteriormente (peso e a capacidade da bateria).

Fazendo então uma análise semelhante às anteriores, obtemos os seguintes resultados:

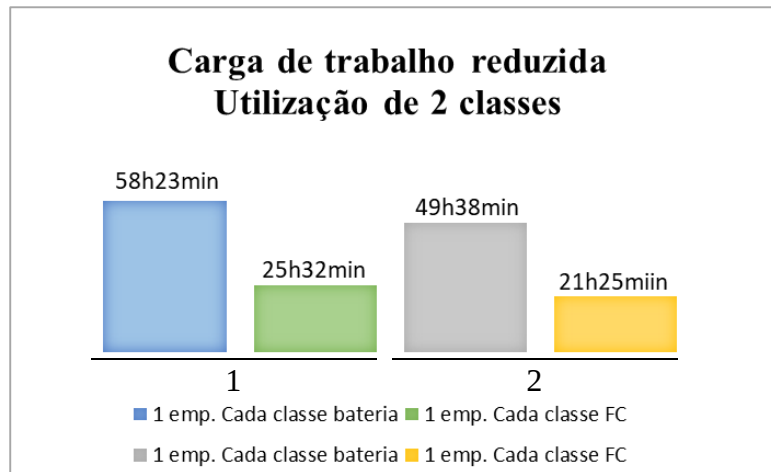


Figura 7.11 – Hoars de inatividade verificadas em carga de trabalho reduzida com utilização de duas classes de empilhadores. 1 – Empilhador de classe I a percorrer o percurso inclinado; 2 – Empilhador de classe II a percorrer o percurso inclinado.

Como podemos constatar as horas de inatividade são superiores quando o empilhador de classe I percorre o percurso inclinado, o que significa que o empilhador de classe II percorre o percurso mais longo. Quando o empilhador de classe II percorre o percurso inclinado (parte 2 da Figura 7.11) as horas de inatividade baixam, pois apesar de o empilhador de classe II ser mais pesado, o que levaria a um maior gasto de energia em subidas, a inclinação é verificada numa curta distância. Outro fator prende-se com o fato de considerarmos apenas gastos de energia em subidas sendo que em descidas com inclinação superior a 2% o consumo de energia foi considerado nulo (Ray, 2008). Neste caso como a inclinação considerada foi de 6% este fato também se aplica.

Para facilitar a compreensão de todos estes componentes, decidiu-se apresentar o Quadro 7.12.

Quadro 7.12 – Horas de inatividade de acordo com a classe, dependendo do percurso considerado.

Carga de trabalho reduzida			
Um Empilhador cada classe			
		Horas de inatividade	
		Classe I	Classe II
Percurso plano (700m)	Bateria	32h56min	46h06min
	Célula de combustível	14h03min	20h20min
Percurso inclinado (150m)	Bateria	12h18min	16h43min
	Célula de combustível	5h13min	7h23min

Pelo Quadro 7.12 podemos constatar que o empilhador de classe II, como era de esperar, apresenta um número maior de horas de inatividade sempre que percorre percursos muito longos (percurso plano), ou percursos inclinados, em comparação com um empilhador de classe I. O Quadro anterior mostra que para no mesmo percurso o empilhador de classe II acaba sempre por gastar mais energia do que um empilhador de classe I, devido ao peso e à bateria, como já foi referido anteriormente. Portanto quando utilizamos empilhadores de classes distintas temos sempre que ter em atenção as suas características construtivas para o adaptar da melhor forma à função dentro da empresa. Neste caso é de evitar que o empilhador de classe II percorra caminhos longos e com inclinações.

7.2. Análise económica

7.2.1. Células de combustível e baterias

Neste estudo vamos analisar se conseguimos obter algumas poupanças pela implementação de células de combustível, quando comparada com uma implementação de

baterias, baseando-nos principalmente em 4 parâmetros: investimento inicial; manutenção; custos operacionais e perdas de produtividade. Todos estes parâmetros estão descritos no Quadro 7.13.

Quadro 7.13 - Parâmetros considerados no estudo económico.

	Células de combustível	Baterias
Investimento inicial	Veículos (Classes I, II, III); Estações de reabastecimento; Armazenamento de hidrogénio.	Veículos (Classes I, II, III); Carregadores; Equipamentos de troca de baterias; Salas de carregamento de baterias.
Manutenção		
Custos operacionais	Hidrogénio e electricidade consumidos.	Electricidade consumida. Operadores de sala de manutenção (1 operário por cada 10 empilhadores).
Perdas de produtividade	Horas de inatividade necessárias para reabastecimento de hidrogénio e troca de baterias.	

Nesta parte de análise económica iremos contabilizar somente o que temos vindo a chamar de carga de trabalho elevada, ou seja quando o armazém utiliza muitos empilhadores de uma forma exaustiva. Pela Figura 7.12 podemos ver que considerando apenas o número mínimo de empilhadores utilizado no estudo da modelação de energia (30 empilhadores) os resultados são bastante satisfatórios. Comparando as duas tecnologias vemos que com a implementação de células de combustível, ao final de um ano temos poupanças na ordem dos 86000 €.

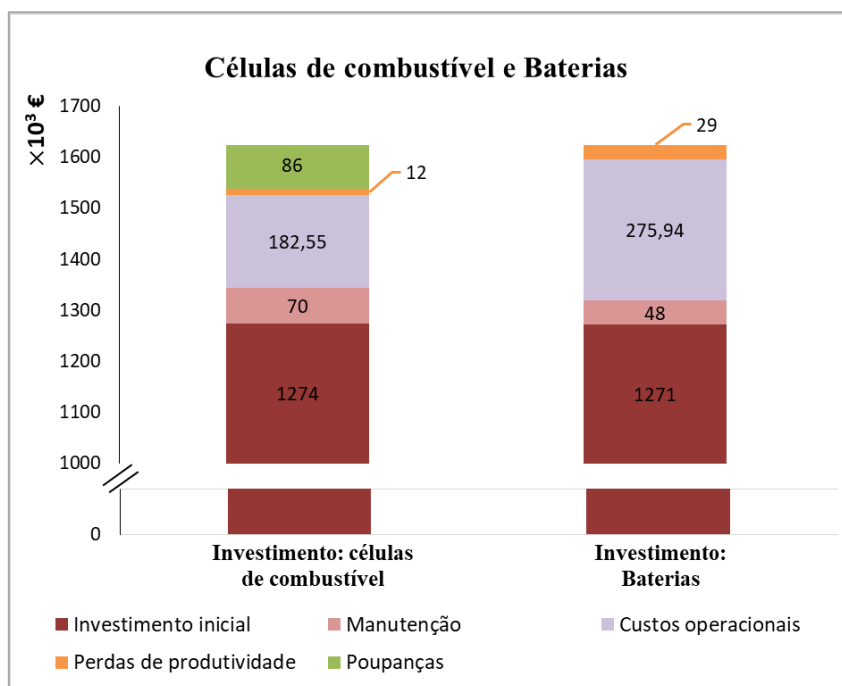


Figura 7.12 – Resultados económicos para FC vs Baterias, 30 empilhadores.

Foi também verificado que quando maior o número de empilhadores maiores serão as poupanças conseguidas, como pode ser visto na Figura 7.13.

Apesar de as células de combustível serem uma tecnologia recente, o investimento por empilhador apresenta-se mais baixo, quando comparado com a tecnologia convencional de baterias, pois como se trata de elevada carga de trabalho, para permitir um funcionamento contínuo do empilhador, durante 24h, foi considerada a compra de 3 baterias por empilhador. Um outro motivo prende-se com o número elevado de empilhadores. Com um número baixo de empilhadores o investimento inicial para células de combustível é mais elevado, devido as estruturas relacionadas com o hidrogénio, como a estação de reabastecimento e as estruturas de armazenamento. No entanto com o aumentar do número de empilhadores continuamos apenas com 1 estação e com 1 sistema armazenamento de hidrogénio, e por outro lado no caso das baterias temos de adquirir carregadores, equipamentos de troca de baterias, e contabilizar o espaço na sala de carregamento, para cada um dos empilhadores considerados. A título de exemplo, apresento os Quadros 7.14 e 7.15 servem para esclarecer um pouco como foram calculados todos estes valores.

Quadro 7.14 - Simulação de preços para uma frota reduzida em €.

Unidades: €	Células de combustível		Baterias	
Investimento inicial	20 Veículos	623 247, 2	20 Veículos + baterias	676 666, 2
	1 Estação de reabastecimento	36 326	20 Carregadores	49 859
	1 Armazenamento de hidrogénio	302 492, 96	20 Equipamentos de troca de baterias	67 666,8
			Salas de carregamento	53 420
Manutenção	38 463, 2		32 052,8	
Custos operacionais	182 553, 31		197 318, 72	
Perdas de produtividade	12 368		28 986	
Total	1 195 450, 67 €		1 108 969,52 €	

Quadro 7.15 - Simulação de preços para uma frota maior em €.

Unidades: €	FC		Batteries	
Investimento inicial	50 Veículos	1 558 118	50 Veículos + baterias	1 691 665, 5
	1 Estação de reabastecimento	36 326	50 Carregadores	124 649, 5
	1 Armazenamento de hidrogénio	302 492, 96	50 Equipamentos de troca de baterias	169 167
			Salas de carregamento	133 550
Manutenção	96 158		80 132	
Custos operacionais	182 553, 31		433 190, 72	
Perdas de produtividade	12 368		28 986	
Total	2 188 016,27 €		2 661 340,72 €	

Além do investimento inicial, podemos ver que as perdas de produtividade também são mais elevadas no caso das baterias, devido aos 15 – 20 minutos requeridos para troca de bateria, comparados com os 3 – 5 minutos requeridos para reabastecimento de hidrogénio. Os custos operacionais também se revelam bastante mais elevados no caso da implementação de baterias pois neles estão contabilizados os salários dos operadores de sala de manutenção, que não são necessários no caso da implementação a bateria. Nestas condições apenas o parâmetro relativo à manutenção é que se apresenta com um valor mais elevado no caso da implementação de células de combustível.

Com a introdução de 20 empilhadores as poupanças conseguidas pela tecnologia de células de combustível aumentam, como tinha sido referido anteriormente, e podemos ver que quase igualam os custos relativos à operação e perdas de produtividade apresentados para o caso das baterias.

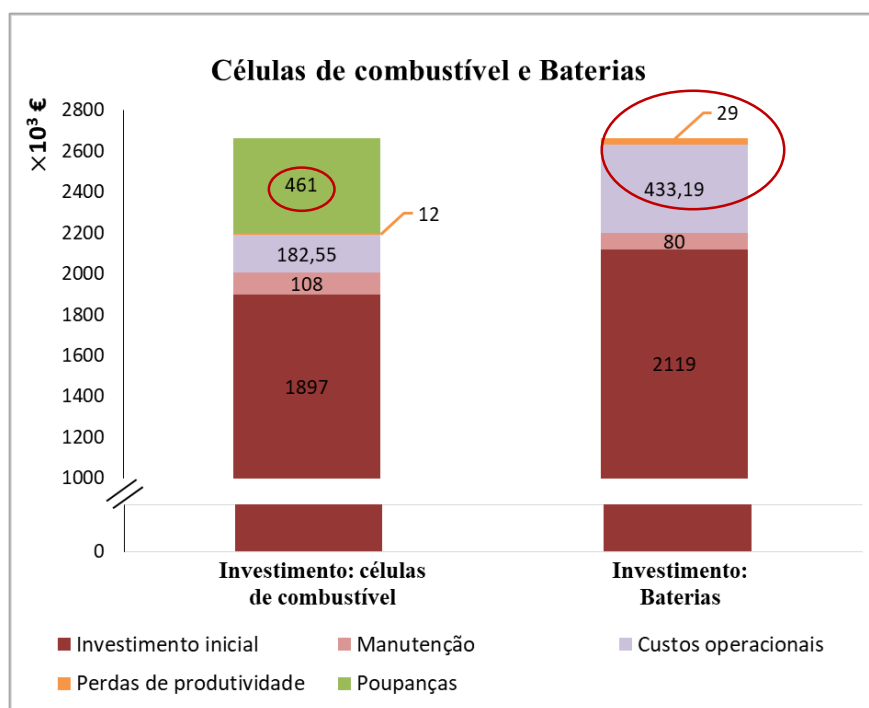


Figura 7.13 – Resultados económicos FC vs Baterias, 50 empilhadores.

Pelos resultados obtidos podemos afirmar então que apenas se justifica investir em células de combustível quando possuímos um armazém com elevado volume, ou seja, que exija um uso intensivo dos empilhadores. Todas as poupanças conseguidas devem-se principalmente a dois dos parâmetros considerados: ao investimento inicial e aos custos operacionais. Foi destacado o parâmetro relativo ao investimento inicial, pois como já foi dito anteriormente, como estamos a falar de elevada carga de trabalho são adquiridas 3

baterias por empilhador, o que acaba por aumentar muito a investimento na aplicação de baterias, e em contrapartida na aplicação de células de combustível, com apenas 1 estação de reabastecimento e 1 sistema de armazenamento de hidrogénio podemos abastecer um grande número de empilhadores. Em relação aos custos de operação estes apresentam um valor elevado pois além da electricidade consumida, são também contabilizados os salários dos operadores da sala de manutenção. Estes salários apresentam um valor elevado pois foi considerado um número mínimo de 1 funcionário para cada 10 empilhadores (que no caso mínimo correspondem a 3), e estes funcionários estão presentes no armazém 24h por dia, 364 dias por ano.

7.2.2. Células de combustível (com eletrólise) e baterias

Durante o estudo foi também considerada uma opção de produção de hidrogénio no local, utilizando eletrólise da água. Logicamente a aplicação de baterias mantém-se igual, e no caso da aplicação de células de combustível mudam apenas alguns parâmetros relativos ao investimento inicial, manutenção e custos de operação. Com a utilização da eletrólise o valor do investimento inicial vai subir substancialmente. Os preços utilizados estão descritos nos Quadros 7.16, 7.17 e 7.18.

Quadro 7.16 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível.

Sistema		Operação [2]	
Classe I	31162 € [1]	Electricidade	0,12 €/kWh
Classe II	24929 € [2]	Água	2,77 €/m ³
Classe III	12464 € [2]		
Estação + Compressor	36326 € [2]		
Eletrolisador	Variável [2]		
Armazenamento	14 €/kW h [3]		

Quadro 7.17 – Dados económicos utilizados, para aplicação de células de combustível, continuação.

Manutenção	
Classe I	1923 €/ano [2]
Classe II	
Classe III	481 €/ano [2]
Estação	445 €/ano [1]
Eletrolisador	4% do investimento [2]
Armazenamento	5% do investimento [3]

O preço do eletrolisador aparece como variável, no Quadro anterior, pois este foi calculado em função da potência em kW do mesmo, que por sua vez é determinada dependendo da rapidez de produção, associada à quantidade de hidrogénio necessárias para cada tipo de aplicação considerada.

Analizando a carga de trabalho elevada temos de considerar os seguintes parâmetros:

Quadro 7.18 - Parâmetros considerados para a escolha do eletrolisador e armazenamento (Garde & Santarelli, 2012; Niaz *et al.*, 2015).

Quantidade de H₂ armazenado (backup)	857 kg
Custo do armazenamento	179 805 €
Quantidade de H₂ produzido/dia	65 kg
Quantidade de H₂ gasto por dia	~61,2 kg
Custo eletricidade gasta por ano	172 972, 80 €
Potência do eletrolisador	165 kW
Preço do eletrolisador	393 536 €

Durante o estudo com eletrólise decidiu-se considerar um armazenamento suficiente para alimentar a frota considerada por pelo menos 2 semanas, caso haja algum problema com a produção de hidrogénio. É essa quantidade de H₂ armazenado a que se refere o Quadro 7.18. A potência do eletrolisador tem de ser tal que possibilite a produção de hidrogénio consumida por dia, para não ser necessário armazenamento adicional.

Como seria de esperar, como o investimento inicial é bastante mais elevado irá ser necessário um número maior de empilhadores para obter algumas vantagens. Após uma breve pesquisa chegamos à conclusão que para ser minimamente rentável a utilização de

eletrólise para produção de hidrogénio, teríamos de considerar no mínimo 40 empilhadores, como pode ser visto na Figura 7.14, apesar de ser bastante mais reduzidas do que no caso anterior (cerca de 10000 €). É importante também referir que estamos a falar sempre de carga de trabalho elevada, pois como acontece com o caso anterior não se verificam quaisquer mais valias quando o armazém não usa os seus empilhadores de forma contínua.

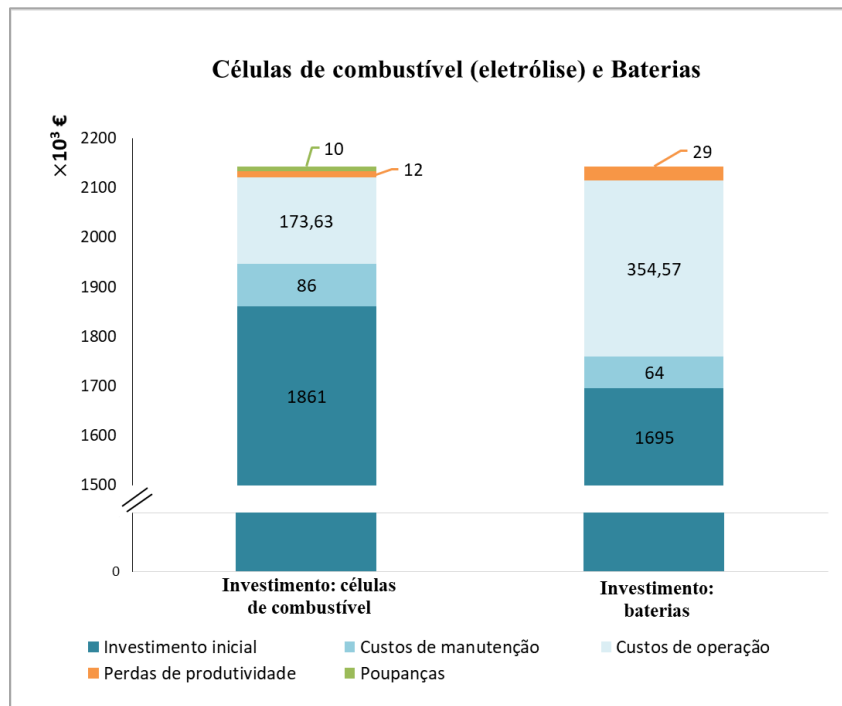


Figura 7.14 – Resultados económicos FC (eletrolise) vs Baterias, 40 empilhadores.

No entanto neste caso será necessária a introdução de 40 empilhadores para obter resultados semelhantes à situação anterior, ou seja, para tentar agualar, o valor das poupanças à soma dos custos de operação e das perdas de produtividade, como pode ser visto na Figura 7.15. Neste caso em específico o valor das poupanças ultrapassa o valor esperado, pois na realidade com 75 empilhadores este valor já estaria adequado ao que nós queríamos, no entanto como estamos a considerar 1 operário de manutenção para cada 10 empilhadores teríamos ou de contabilizar um operário a menos, ou um operário em excesso, portanto preferimos considerar 80 empilhadores.

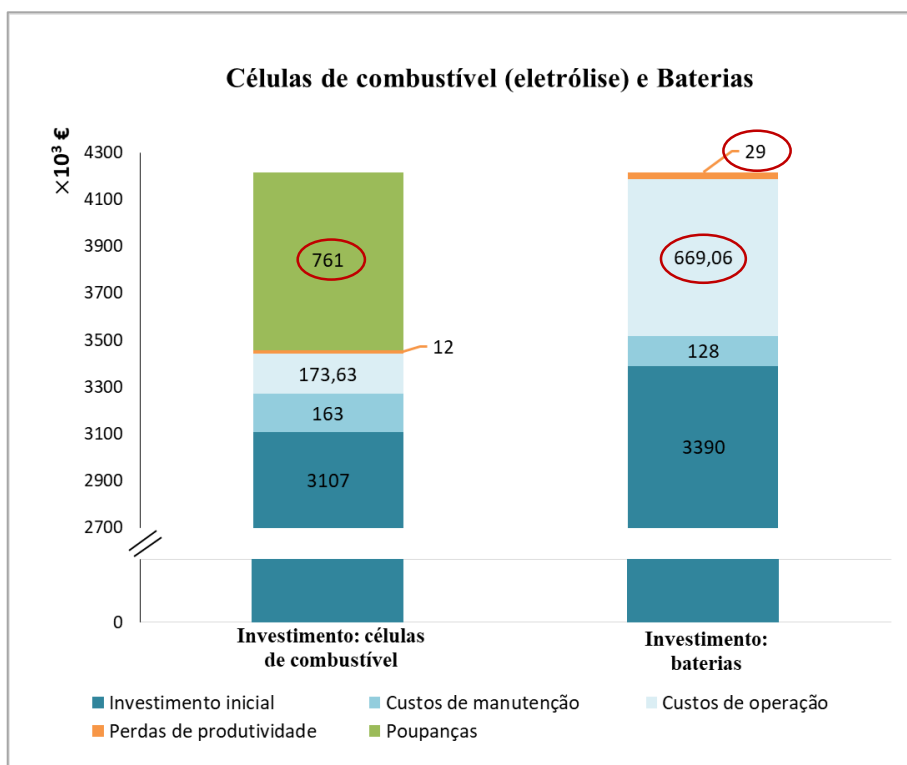


Figura 7.15 – Resultados económicos FC (eletrólise) vs Baterias, 80 empilhadores.

Tal como ocorre no estudo anterior os dois fatores mais importantes são o investimento inicial e aos custos de operação, também pelas mesmas razões já descritas anteriormente. O facto da implementação de células de combustível com produção do hidrogénio por eletrólise se apresentar menos rentável, deve-se principalmente à diferença de valores do investimento inicial, que é bastante mais elevado do que no caso anterior.

8. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

8.1. Conclusões

Esta dissertação consistiu principalmente na criação de um modelo que nos permiti-se calcular consumos energéticos de uma frota de empilhadores dependendo do número de viagens necessárias durante um dia útil de trabalho. Nele foram analisadas várias cargas de trabalho possíveis. O objetivo principal era compreender a influência da carga de trabalho e do tamanho da frota, nas horas de inatividade verificadas por ano apenas para substituição da bateria e/ou reabastecimento de hidrogénio. Pela análise dos resultados do estudo de modelação de energia podemos concluir que com um uso intensivo dos empilhadores (elevada carga de trabalho) o uso células de combustível traz aumentos eficazes na produtividade do armazém, devido principalmente aos seguintes pontos:

- Diminuição do tempo de inatividade: um empilhador com células de combustível é reabastecido em 2-3 minutos, em media, face aos 15-30 minutos de substituição de uma bateria ou então face às inúmeras horas de carregamento das baterias convencionais.

- Potência do empilhador constante durante todo o turno: um empilhador a bateria tende a perder potência ao longo do turno de trabalho, o que pode fazer com que se substitua a bateria mais cedo do que o esperado, ao paço que uma célula de combustível permite que o empilhador funcione sempre à mesma potência até que seja necessária outra recarga.

Em alguns casos de pequena a intermédia carga de trabalho, a diferença entre as tecnologias não é tão significativa, sendo nesses casos, os fatores económicos fundamentais para a adoção de uma ou outra tecnologia. Também foi verificado que a própria estrutura do armazém afeta muito o desempenho dos empilhadores, especialmente quando falamos de inclinação dos pisos. Outro fator que se mostrou essencial para uma maior eficiência da frota é a adaptação do tipo/tamanho do empilhador à função dentro do armazém, e ao tamanho/peso da carga a transportar.

Tal como ocorre no estudo de modelação de energia, também na componente económica a implementação de células de combustível mostra-se como uma opção viável em situações de grandes frotas com um uso intensivo das mesmas. Mais uma vez podemos concluir que quanto maior é a frota, mais rentável é a implementação de células de combustível, e mais benefícios trará quando comparada com uma implementação de baterias de chumbo-ácido.

Como podemos constatar a utilização do hidrogénio traz inúmeras vantagens. Com a utilização desta tecnologia podemos combinar vantagens económicas e ambientais, o que já para início se torna uma opção aliciante. No entanto a aplicação do hidrogénio no setor logístico, e em particular na Europa, ainda se encontra num estágio não desenvolvido sendo necessárias medidas de apoio e investigação que impulsionem o crescimento deste mercado.

Do ponto de vista em que se considera que o trabalho do engenheiro consiste em oferecer ao cliente a solução mais viável, este tem de recorrer obrigatoriamente a critérios de otimização. Atualmente a viabilidade de uma determinada aplicação é o fator mais importante na escolha de um sistema de energia. Existe felizmente uma constante mudança de mentalidades, na medida em que as pessoas envolvidas no meio empresarial têm vindo a interessar-se não só pelo valor do investimento inicial, mas pelos benefícios que poderão obter a longo prazo. Neste caso, as tecnologias caras, mas de longa duração, podem ser um investimento viável, independentemente dos elevados preços do sistema envolvidos na adoção de tecnologias novas e inovadoras. E é por este motivo que este tipo de modelação, tanto energética e económica, é muito importante e deve continuar a realizar-se noutros contextos, para permitir provar a viabilidade de novas tecnologias, e permitir que estas penetrem mais facilmente no mercado.

8.2. Trabalho futuro

Terminada a leitura desta dissertação, ficou bem claro que a produtividade é um fator chave para o desenvolvimento e sucesso das empresas. Os empilhadores são veículos muito utilizados para transporte de materiais, e quando a frota é bem dimensionados podem sim aumentar a produtividade da empresa à qual estão associados.

Ainda nesta perspetiva, penso que seria interessante estender um pouco o estudo e associá-lo ao fenómeno de travagem regenerativa. Com este sistema a travagem de um veículo é feita utilizando o motor, e não os travões tradicionais. Ao ser utilizado o motor, a energia libertada durante a travagem, pode, através de um dispositivo ser novamente convertida em energia elétrica, que por sua vez pode ser reaproveitada pela bateria (McLeod, S., 2010). Seria interessante perceber até que ponto este reaproveitamento da energia poderia estender o tempo de operação de um empilhador comum.

Ainda neste contexto existe outro tema de elevado interesse, que se prende à atual e crescente utilização de veículos guiados automaticamente (mais conhecidos por AGV's). A aplicação de células de combustível é também um ponto interessante a considerar pois a utilização deste tipo de veículos está a aumentar, e como vimos no caso do estudo dos empilhadores o número de operários dentro das empresas é um fator muito importante, pois pode afetar a rentabilidade de um projeto. E neste caso apenas iriam existir operadores de controlo do sistema, não sendo necessário um operador por veículo, o que é uma mais-valia, de acordo com o estudo realizado nesta dissertação.

Este tipo de veículos é atualmente muito utilizado em diversas áreas, desde a área automóvel, até à área alimentar, para funções de transporte dentro da empresa, desde que os trajetos sejam bem definidos (Egemin Automation Inc., 2017; JTB corporation, 2017). Os primeiros relatos sobre aplicação de células de combustível surgem nos anos de 2008 e 2009 (Barret, 2008). Podemos verificar que para este tipo de veículos pode ser feita uma análise muito semelhante da que foi feita para o caso dos empilhadores. A utilização de baterias vai provocar a existência de espaços relacionados com carregamento e manutenção, que não existirão no caso das células de combustível. Além deste fato o tempo de reabastecimento continua a ser menor do que o tempo de troca de uma bateria.

Deixando agora a vertente da produtividade, somos levados a analisar uma outra vertente muito importante: a vertente ambiental. Dentro do domínio ambiental seria interessante estudar o ciclo de vida do Hidrogénio, contabilizando as emissões durante a sua produção, para averiguar se realmente estas são ou não reduzidas comparadas com outros combustíveis fósseis.

Referências bibliográficas

- Abdin, Z., Webb, C. J., & Gray, E. M. (2015). Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), 13243–13257. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.07.129
- Adaptalift Hyster. (2011). Used Forklifts. Retrieved October 20, 2016, from <http://www.usedforklifts.com.au/buying-tips.aspx>
- Adaptalift Hyster. (2011a). Logistics & Materials Handling Blog. Retrieved October 26, 2016, from http://www.aalhysterforklifts.com.au/index.php/about/blog-post/Used_Forklifts_Buying_Guide_Tips_Part_1
- Adaptalift Hyster. (2011b). Logistics & Materials Handling Blog. Retrieved October 26, 2016, from http://www.aalhysterforklifts.com.au/index.php/about/blog-post/Used_Forklifts_Tips_Buying_Guide_Research_Part_2
- Adaptalift Hyster. (2011c). Logistics & Materials Handling Blog. Retrieved October 26, 2016, from http://www.aalhysterforklifts.com.au/index.php/about/blog-post/used_forklifts_tips_how_to_avoid_buying_a_lemon_part_3_physical_inspection
- Admin. (2015). BREAKAWAY Staffing Solutions inc. Retrieved July 11, 2016, from <http://breakawaystaffing.ca/5-most-common-types-of-forklifts/>
- Alazemi, J., & Andrews, J. (2015). Automotive hydrogen fuelling stations: An international review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 483–499. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.085>
- Arcoumanis C. (2013) Degradation aspects of water formation and transport in proton exchange membrane fuel cell: a review. *J Power Sources* 240: 558–582.
- Augusto, R. C. M. (2013). Preparação e caracterização de elétrodos de óxido níquel para eletrolisadores alcalinos de produção de hidrogénio, p.p. 126.
- Awang, N., Ismail, A. F., Jaafar, J., Matsuura, T., Junoh, H., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2015). Reactive & Functional Polymers Functionalization of polymeric materials as a high performance membrane for direct methanol fuel cell : A review. *Reactive and Functional Polymers*, 86, 248–258. <http://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.019>
- Ball, M. and Wietschel, M. (2009). *The Hydrogen Economy*. Cambridge: Cambridge University Press, New York.
- Ball, M., and Wietschel, M. (2009a). The future of hydrogen – opportunities and challenges 5. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 615–627. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014p>

- Ballard (2013). Economics of Fuel Cell Solutions for Material Handling, 5–6. Ballard Power Systems.
- Barrett, S. (2008). FMC trialing fuel cells for automatic guided vehicles, (July). [http://doi.org/10.1016/S1464-2859\(09\)70205-6](http://doi.org/10.1016/S1464-2859(09)70205-6)
- Cal State L.A. (2017). Hydrogen Research and Fueling Facility (H₂ Station). Retrieved March 20, 2017, from <http://www.calstatela.edu/ecst/h2station>
- Contestabile, M. (2003). “Analysis of the Demand for Hydrogen as a Transport Fuel in London” by, (September), 1–96.
- Crabtree, G. W., & Dresselhaus, M. S. (2008). The Hydrogen Fuel Alternative. *MRS Bulletin*, 33(4), 421–428. <http://doi.org/10.1557/mrs2008.84>
- Curtin S., & Gangi. J. (2014). *Fuel Cell Technologies Market Report 2013*. Washington.
- Curtin S., & Gangi. J. (2015a). *Fuel Cell Technologies Market Report 2015*. Washington.
- Curtin, S., & Gangi, J. (2015). The Business Case for Fuel Cells 2015: Powering Corporate Sustainability. *Fuel Cell & Hydrogen Energy Association*.
- Curtin, S., & Gangi, J. (2016). State of the States: Fuel Cells in America 2016. *Fuel Cells 2000 - Breakthrough Technologies Institute*, (December).
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971.
- Dincer, I., & Acar, C. (2014). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Directorate general for climate action - DG CLIMA. (2017). CLIMATE ACTION. Retrieved January 20, 2017, from http://ec.europa.eu/clima/policies/transport_en
- Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1148–1156. <http://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.07.037>
- Ecobatería sistemas de regeneración, (2015). ecoBaterias - sistemas de regeneración. Retrieved January 31, 2017, from <http://www.ecobateria.com/pt-pt/aplicacoes/tracao-e-semi-tracao/>
- Egemin Automation Inc. (2017). Dematic Egemin Automation. Retrieved July 7, 2017, from <http://egeminusa.com/automated-guided-vehicles/agv-industries>
- Elgowainy, A., Gaines, L., & Wang, M. (2009). Fuel-cycle analysis of early market applications of fuel cells: Forklift propulsion systems and distributed power

- generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), 3557–3570. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.075>
- Engineering, M. (2002). INTERIOR AND EXTERIOR NOISE EMITTED BY A FUEL CELL TRANSIT BUS, 251, 937–943. <http://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3908>
- Esmeralda, T., & Estêvão, R. (2008). *O Hidrogénio como combustível*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fontaras, G., Grigoratos, T., Savvidis, D., Anagnostopoulos, K., Luz, R., Rexeis, M., & Hausberger, S. (2016). An experimental evaluation of the methodology proposed for the monitoring and certification of CO₂ emissions from heavy-duty vehicles in Europe. *Energy*, 102, 354–364. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.076>
- Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2011). *Multi - Annual Implementation Plan*. <http://doi.org/10.2777/79943>
- Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2015). Results of a survey on current and future market status of fuel cell powered material handling vehicles, (303451).
- Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – FCH-JU. (2016). Hydrogen Mobility Europe. Retrieved March 20, 2017, from <http://h2me.eu/about/hydrogen-refuelling-infrastructure/>
- Fuel Cell technologies office. (2017). Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY.
- Fuel cell today. (2012). “The Fuel Cell Industry Review 2012.” *Platinum Metals Review*, 56(4), 272–273. <http://doi.org/10.1595/147106712X657535>
- Gaines, L.; Elgowainy, A. and Wang, M.Q. (2008). Full Fuel-Cycle Comparison of Forklift Propulsion Systems. Argonne National Laboratory.
- Garde, R., & Santarelli, M. (2012). Fuel cell early markets: Techno-economic feasibility study of PEMFC-based drivetrains in materials handling vehicles, 8, 0–10. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.048>
- H2tools. (2016a). Impact of Hydrogen Properties on Facility Design. Retrieved August 20, 2016, from <https://h2tools.org/bestpractices/design/properties/>
- H2tools. (2016b). Safety planning. Retrieved August 20, 2016, from https://h2tools.org/bestpractices/safety_planning/
- H2tools. (2016c). So You Want to Know Something about Hydrogen. Retrieved August 20, 2016, from <https://h2tools.org/bestpractices/h2introduction/>
- H2tools. (2016d). Trainning. Retrieved August 22, 2016, from https://h2tools.org/bestpractices/safety_culture/safety_training%20/

- Hosseinzadeh, E., Rokni, M., Advani, S. G., & Prasad, A. K. (2013). Performance simulation and analysis of a fuel cell/battery hybrid forklift truck. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(11), 4241–4249. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.168>
- HyResponse. (2016). *Basics of hydrogen for first responders - Hydrogen properties relevant to safety*. Retrieved from http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/Hydrogen_properties_relevant_to_safety_slides.pdf
- Industrial Truck Association (ITA). (2016). Retrieved October 25, 2016, from <http://www.indtrk.org/market-intelligence>
- Jahnke, T., Futter, G., Latz, A., Malkow, T., Papakonstantinou, G., Tsotridis, G., Kompis, C. (2016). Performance and degradation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: State of the art in modeling from atomistic to system scale. *Journal of Power Sources*, 304, 207–233. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.11.04>
- Jain, P. (2009). Hydrogen the fuel for 21st century. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17), 7368–7378. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.093>
- Jiao K. & Li X. (2011) Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Prog Energy Combust Sci.*, 37, 221.
- JTB corporation. (2017). Retrieved July 7, 2017, from <http://www.jbtc-agv.com/en/Solutions/Industries>
- Kalamaras, C. M., & Efstathiou, a. M. (2013). Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. *Conference Papers in Energy*, 2013, 9. <http://doi.org/10.1155/2013/690627>
- Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia - LAMTec. (2012). Retrieved March 17, 2017, from <http://www.lamtec-id.com/energias/hidrogenio.php>
- Lewis B., and G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 3rd ed., Academic Press, Orlando, 1987, pg. 717.
- Linardi, M., Pesquisas, I. De, Ipen, N., Universitária, C. C., & Sp, S. P. (2000). Figura 1, 23(4), 538–546.
- Lipman, T. (2011). An Overview of Hydrogen Production and Storage Systems with Renewable Hydrogen Case Studies. *Clean Energy States Alliance*, 32.
- Lutz, A. E., Larson, R. S., & Keller, J. O. (2002). Thermodynamic comparison of fuel cells to the Carnot cycle, 27, 1103–1111.
- Mahadevan, K. Judd, H. Stone, J. Zewatsky, A. Thomas, H. M. (2007). *Identification and Characterization of Near-Term Direct Hydrogen Proton Exchange Membrane Fuel Cell Markets*.

- Martins, L. (2003). Fuel Cells 2- Desenvolvimento Das Pilhas De Combustível. *Fuel Cells*, 2, 1–23.
- Mayyas, A., Wei, M., Chan, S. H., Lipman, T., Division, E. S., & Berkeley, L. (2015). Fuel Cell Forklift Deployment in the U. S., 1–7.
- McLeod, S. (2010). Fleetman consulting. Retrieved September 7, 2017, from <https://www.fleetmanconsulting.com/blog/why-consider-electric-forklifts/>
- Material handling industry - MHI. (2016). MHI (The industry that makes supply chains work). Retrieved October 20, 2016, from <http://www.mhi.org>
- Miguel, F., Mamede, S., Santos, D. O. S., António, F., Mamede, C., & Santos, D. O. S. (2005). O combustível “hidrogénio,” 19.
- Murray, M. (2016). The Balance. Retrieved July 8, 2016, from <https://www.thebalance.com/classification-of-forklift-trucks-2221172>
- Niaz, S., Manzoor, T., & Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457–469. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>
- Nunes, F., Costa, M., Neto, R., Azevedo, J. & Archila, C. (2010). Caracterização de pilha de combustível de hidrogénio e monitorização de célula individual. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Occupational Safety and Health Administration - OSHA. (2008). Retrieved November 19, 2016, from <https://www.osha.gov/SLTC/etools/pit/operations/loadcomposition.html#shifting>
- Papageorgopoulos, D. (2010). An Introduction to the 2010 Fuel Cell. *DOE 2010 Pre-Solicitation Workshop*, 20. Retrieved from http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fuelcell_pre-solicitation_wkshop_mar10_papageorgopoulos.pdf
- Perles, C. E. (2008). Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion® para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC. *Polímeros*, 18(4), 281–288. <http://doi.org/10.1590/S0104-14282008000400005>
- Ponticel, P. (2011). SAE INTERNATIONAL. Retrieved December 7, 2016, from <http://articles.sae.org/10289/>
- Productivity, D. (2010). Economics of Fuel Cell Solutions for Material Handling, 5–6.
- ProLift Industrial equipment (2014). Pro Lift. Retrieved July 8, 2016, from <http://www.proliftequipment.com/blog/2014/02/28/lift-truck-101-history-and-classification-of-lift-trucks/>

- Pudukudy, M., Yaakob, Z., Mohammad, M., Narayanan, B., & Sopian, K. (2014). Renewable hydrogen economy in Asia - Opportunities and challenges: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 743–757. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.015>
- Ray, S. (2008). *Introduction to Materials Handling*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers All. pp.229.
- Renquist, J. V, Dickman, B., & Bradley, T. H. (2012). Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(17), 12054–12059. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.06.070>
- Rider, E. (2015). United States Factory Shipments, 100000.
- Rogers, A., M. (2010). Economic and Environmental Analysis of Fuel Cell Powered Materials Handling Equipment 1022494.
- Santos, C. A. (2009). *Ciência Hoje*. Retrieved March 22, 2017, from http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/2999/n/o_combustivel_do_seculo_21
- Sarkar, A., & Banerjee, R. (2005). Net energy analysis of hydrogen storage options, 30, 867–877. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.021>
- Serpa, L. A. (2004). Estudo E Implementação De Um Sistema Gerador De Energia Empregando Células a Combustível Do Tipo PEM. *Leonardo Augusto Serpa*.
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810–853. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>
- Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151–1158. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>
- Singh, S., Jain, S., Ps, V., Tiwari, A. K., Nouni, M. R., Pandey, J. K., & Goel, S. (2015). Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport setor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 623–633. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>
- Sirosh, N. (2013). *Fuels – Hydrogen Storage | Compressed ☆. Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.01294-4>
- Smitha, B., Sridhar, S., & Khan, A. A. (2005). Solid polymer electrolyte membranes for fuel cell applications — a review, 259, 10–26. <http://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.01.035>
- Sousa, C. (2012). *Empilhadores – Avaliação de riscos e da fiabilidade humana na sua utilização*. Instituto superior de educação e ciências.

- Stetson, N. T. (2017). Hydrogen Storage. *Energy*, (June), 185–212. <http://doi.org/10.1002/9781118557808.ch5>
- The engineering toolbox. (2014). Retrieved September 27, 2016, from <http://www.engineeringtoolbox.com/index.html>
- TOYOTA - Material Handling. (2016). Empilhador Eléctrico 1.5 - 2.0 t. Traigo 48, 8. Retrieved from www.toyota-forklifts.pt
- TÜV SÜD - Industrie service. (2017). Hydrogen / Fuel Cells. Retrieved March 20, 2017, from <https://www.netinform.net/H2/H2Stations/H2Stations.aspx>
- U.S. Department of Labor. (2010). Occupational Safety & Health Administration. Retrieved July 8, 2016, from <https://www.osha.gov/SLTC/etools/pit/forklift/types/classes.html>
- Wang, C., Wang, S., Peng, L., Zhang, J., Shao, Z., Huang, J., He, X. (2016). Recent Progress on the Key Materials and Components for Proton Exchange Membrane Fuel Cells in Vehicle Applications. <http://doi.org/10.3390/en9080603>
- Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Chan, S., & Cordobes, X. (2011). A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 88(4), 981–1007. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>
- Washington State Department of Labor&Industries. (2015). Forklift Safety Guide. Director. Retrieved from www.Lni.wa.gov/Safety
- Wu, H. (2016). A review of recent development: Transport and performance modeling of PEM fuel cells. *APPLIED ENERGY*, 165, 81–106. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.075>
- Yang, C., & Ogden, J. (2007). Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2), 268–286. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.009>
- Zhang, S., Yuan, X., Wang, H., Me, W., Zhu, H., Shen, J., Zhang, J. (2009). A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells, 34, 388–404. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.012>