

## **CARROS MOVIDOS A CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL: A NOVA APOSTA AUTOMOTIVA**

**Discente: Gabriel S. Borges<sup>1</sup>**

**Orientador: Júlio C. Câmara<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>SENAI – Cimatec, E-mail: [gabrielsb@gmail.com](mailto:gabrielsb@gmail.com)

<sup>2</sup>SENAI – Cimatec, E-mail: [jcamara@cimatec.fieb.org.br](mailto:jcamara@cimatec.fieb.org.br)

### **RESUMO**

*Devido à forte demanda atual por automóveis mais eficientes, visando redução de consumo e emissões de CO<sub>2</sub>, cada vez mais as fabricantes automotivas estão investindo em novas tecnologias e meios de propulsão capazes de fornecer ao consumidor melhores resultados de desempenho e eficiência.*

*O presente trabalho tem por objetivo analisar os veículos movidos a célula de combustível (com foco no Toyota Mirai), descrever seu funcionamento, as características da infraestrutura necessária para tornar viável a sua utilização, bem como comparar este com outros veículos híbridos, e de combustão interna visando esclarecer as vantagens e desvantagens de cada tipo.*

*Conclui-se que, apesar do alto custo atual, os modelos de célula a hidrogênio já representam um grande avanço na tecnologia automotiva, e a medida em que os projetos e a infraestrutura das cidades sejam amadurecidos, estes poderão se tornar muito mais vantajosos.*

**Palavras-chaves:** *Hidrogênio; Híbridos; Célula de combustível*

### **ABSTRACT**

*Due to the currently strong demand for more efficient vehicles in order to reduce consumption and CO<sub>2</sub> emissions, more and more automotive manufacturers are investing in new technologies and propulsion alternatives able to provide best performance and efficiency to the customer.*

*This study aims to analyze the fuel cell vehicles (focusing on Toyota Mirai), to describe its operation, the needed infrastructure to make it feasible, and to compare it with other hybrid vehicles, and combustion internal aiming to clarify the pros and cons of each. It was concluded that, although the high H<sub>2</sub> costs, the FCEVs already represent a major breakthrough in automotive technology, and as soon as the projects and the infrastructure of cities become mature, FCEVs may worthwhile.*

**Keywords:** *Hydrogen; Hybrids; Fuel Cell;*

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à forte demanda atual por automóveis mais eficientes, visando redução de consumo e emissões de poluentes, cada vez mais as fabricantes automotivas estão investindo em novas tecnologias e meios de propulsão capazes de fornecer ao consumidor final os mesmos, ou até melhores, resultados de desempenho aliados a excelentes taxas de consumo e autonomia.

A redução de cilindradas do motor e a sobrealimentação através de turbo compressores são bons exemplos do conceito *downsizing*, que hoje já está sendo aplicado globalmente, em veículos movidos por motores de combustão interna, pela maioria das grandes fabricantes a fim de cumprir com as legislações e requisitos de cada mercado, notoriamente mais rígidos com o passar dos últimos anos à exemplo das normas Euro 5/6 e do Proconve L6, regulamento europeu e brasileiro, respectivamente.

No entanto, a preocupação ambiental com as emissões de gases poluidores da atmosfera e com a provável escassez das reservas de petróleo, acabaram abrindo a porta também para o aparecimento de novas fontes de propulsão, como por exemplo os veículos movidos à energia elétrica, híbridos (motor de combustão interna aliado a motores elétricos ou hidráulicos/pneumáticos) e também à célula de combustível (hidrogênio), sendo este último o principal foco de estudo deste trabalho.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo analisar os veículos movidos a célula de combustível (com foco no recém lançado Toyota Mirai), descrever seu funcionamento, as características da infraestrutura necessária para tornar viável a sua utilização, bem como comparar estes com outros veículos híbridos, elétricos e de combustão interna já disponíveis no mercado vislumbrando esclarecer para os consumidores as vantagens e desvantagens de cada tipo.

## 3. ESTUDO DE CASO - TOYOTA MIRAI

Assim como o Toyota Prius - primeiro veículo híbrido do mundo produzido em massa, lançado ainda em 1997 e que em setembro de 2014 alcançou a marca de mais de 4 milhões de unidades vendidas [1] - e o puramente elétrico Tesla Roadster - um dos primeiros elétricos verdadeiramente esportivos produzido em série entre os anos de 2008 e 2011 (2.600 unidades), capaz de chegar aos 100km/h em 3,9 segundos e autonomia aproximada de 350km [2], o Toyota Mirai é um novo exemplo de “divisor de águas”.



Figura 1. Toyota Mirai. [5]

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

O Mirai é o primeiro veículo movido à hidrogênio (*Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV*) de produção em massa e pode alcançar impressionantes 502km [3], o que o classifica como o veículo do tipo zero-emissões de maior autonomia atualmente [4]. Além disso, seu reabastecimento poderá ser realizado em aproximadamente 5 minutos. Ainda segundo a fabricante, quanto aos outros números de desempenho, o veículo é capaz de acelerar de 0 à próximo dos 100km/h em 9 segundos.

### Funcionamento



Figura 2. Sub-sistemas do Toyota Mirai. [5]

A geração de energia elétrica para funcionamento do motor é proveniente de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio deve ser o combustível alimentado no sistema, enquanto o oxigênio é absorvido da atmosfera. Os únicos produtos da emissão da reação são calor e água. Para o perfeito funcionamento do sistema como um todo, este é compreendido de seis sub-sistemas básicos, como descritos a seguir:

### Unidade de célula à combustível (*FC Stacks*)

Essa unidade é a responsável por gerar eletricidade a partir de uma reação eletroquímica entre hidrogênio e oxigênio, gerando como único resíduo a água e calor.



Figura 3. Corpo da unidade de célula de combustível. [5]

A dita célula de combustível consiste de membranas trocadora de prótons que estão imprensadas entre separadores. Essa membrana é feita de polímero sólido com camadas de catalisador aplicadas. No entanto, como uma célula só é capaz de gerar menos de um volt, centenas dessas são necessárias e logo ligadas em série para aumentar a tensão. A combinação de cerca de 370 dessas células gera a chamada unidade de célula de combustível. Desenvolvida pela própria Toyota, essa unidade gera potência máxima de 114 kW (ou 155 cv) e possui densidade de potência de 3,1 kW/L, o que segundo a própria fabricante a torna líder

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

no segmento [5]. Diferentemente de unidades desenvolvidas anteriormente, essa não precisa de umidificador para as membranas (facilita o transporte de prótons) uma vez que usa a própria água gerada [6].

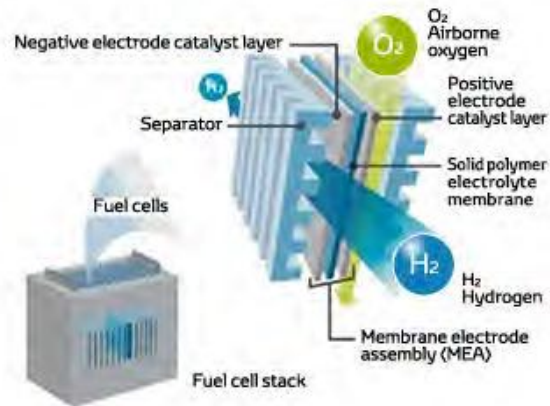


Figura 4. Representação do interior de uma unidade de célula de combustível. [5]

Para a geração efetiva de eletricidade, alguns passos são seguidos:

O hidrogênio armazenado nos tanques é direcionado para o eletrodo negativo (ânodo);

As moléculas de hidrogênio quando ativadas pelo ânodo liberam os seus elétrons;

Esses elétrons passam do ânodo para o cátodo e geram uma corrente elétrica;

As moléculas de Hidrogênio que perderam elétrons se tornam íons e se movem através da membrana eletrolítica para o eletrodo positivo (cátodo);

O ar ambiente (contendo Oxigênio) é orientado para o eletrodo positivo;

Esses mesmos íons se juntam com as moléculas de oxigênio e formam água;

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

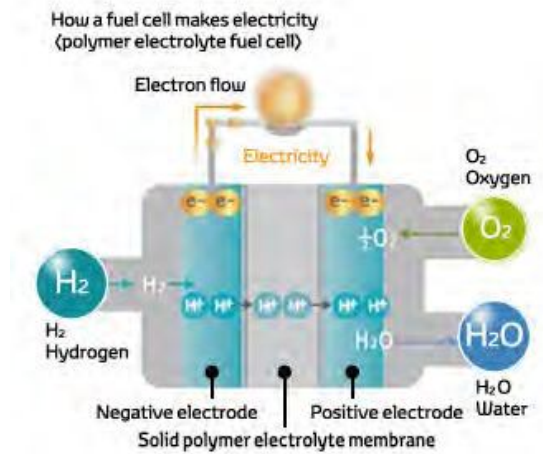


Figura 5. Representação do interior de uma unidade de célula de combustível. [5]

#### Conversor de tensão da unidade de célula de combustível

Este é responsável por possibilitar o aumento de voltagem de saída para 650V, reduzir o número de células de combustível da unidade e reduzir volume e peso do sistema como um todo. Permite ainda a utilização junto a sistemas dos veículos híbridos da marca, o que representa uma enorme redução de complexidade e custos.



Figura 6. Conversor de tensão da unidade. [5]

#### Bateria

A bateria recarregável, feita de níquel-hidreto metálico, alimenta o motor elétrico ligado as rodas dianteiras e pode armazenar energia durante a desaceleração deste. Fica localizada atrás dos bancos traseiros.



Figura 7. Bateria de níquel-hidreto metálico. [5]

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

### Motor elétrico

Foi utilizado um motor/gerador elétrico de corrente alternada que tanto pode receber energia da bateria como diretamente da unidade de célula de combustível. Este entrega uma potência máxima de saída de 113 kW (154 cv) e torque máximo de 34,2 kgf.m.



*Figura 8. Motor/ gerador elétrico. [5]*

### Unidade de Controle

Essa unidade corresponde a um inversor de frequência que pode converter corrente contínua (CC) em alternada (CA) para fornecedor energia ao motor ou mesmo entre CC/CC que pode consumir ou recarregar energia da bateria e outros sistemas. Exerce um controle de bastante precisão sobre a energia advinda das células de combustível e controla a carga/descarga da bateria sob variadas condições de uso.



*Figura 9. Unidade principal de controle. [5]*

### Tanques de hidrogênio

O Mirai possui dois tanques para armazenagem de hidrogênio sob alta pressão (700 bar ou 70MPa) [6]. O de maior capacidade (62,4 litros) se acomoda atrás do banco traseiro, e o outro (60 litros) fica sob o banco. Ambos possuem três camadas de proteção. A mais ao interior, revestimento de plástico que retém o gás, a intermediária de fibra de carbono e a mais externa feita de fibra de vidro para proteção de superfície. Em termos de massa de hidrogênio, como normalmente medido, podem ser armazenados aproximadamente 5 Kg [5].

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil



Figura 10. Tanque de hidrogênio sob o banco traseiro. [5]

#### 4. COMPARATIVO

Uma vez que a montadora Toyota foi a primeira a oferecer no mercado (Estados Unidos) um veículo movido a célula de combustível fabricado em série (Toyota Mirai), e além disso conta com o popular híbrido Prius plug-in na sua lista de modelos, esta foi então utilizada como referência para o comparativo a seguir, que descreve dados relativos a eficiência energética de três dos seus modelos.

Tabela 1. Comparativo da eficiência de modelos com diferentes meios de propulsão. [7]

Modelo	Toyota Corolla L 1.8 (automático)	Toyota Prius (plug-in)	Toyota Mirai
Propulsão	<b>Gasolina</b>	<b>Híbrido</b>	<b>Célula de combustível</b>
Potência combinada (cv)	<b>134</b>	<b>136</b>	<b>155</b>
Autonomia combinada (Km)	<b>679</b>	<b>869</b>	<b>502</b>
Consumo equivalente em modo combinado (Km/l-e)	<b>13,5</b>	<b>21,3</b>	<b>28,5</b>
Tempo de reabastecimento/recarga <sup>8</sup>	<b>3-5 min</b>	<b>1-3 h</b>	<b>3-5 min</b>
Emissões de CO2 (g/Km)	<b>171,5</b>	<b>82,6</b>	<b>0</b>
Capacidade do tanque	<b>50 l</b>	<b>40 l</b>	<b>5 kg</b>
Valor de compra (US\$)	<b>17.775</b>	<b>29.990</b>	<b>45.500<sup>13</sup></b>
Custo anual com abastecimento (US\$)	<b>1.510</b>	<b>906</b>	<b>1.920</b>

Fatores de conversão:

1 *horsepower* (hp) = 1,014 cv

1 galão = 3,785 litros

1 galão = 33.7 kWh de energia

1 milha (mi) = 1,609 km

1 milha por galão equivalente (mpg-e) = 0,43 km/l-e

1 grama/milha (g/mi) = 0,6 g/km

Premissas:

Custo (dólares) de 1 galão de gasolina = US\$3,25 [9]

Custo (dólares) de 1 kWh de energia elétrica = US\$0,12 [7]

Custo (dólares) de 1 kg de Hidrogênio = US\$7,99/kg [10]

Distância média percorrida anualmente = 24.140,2km [7]

Percurso combinado considera 45% de uso na cidade e 55% na estrada [7]

Com base na tabela 1, pode ser observado que o Toyota Mirai possui o melhor consumo equivalente entre os três veículos apresentados, porém quando considerado o custo atual do hidrogênio (US\$7,99/kg) [10] e o da gasolina (US\$3,25/galão) [9], o Corolla se mostra mais vantajoso quanto ao valor total anual para percorrer 15.000 milhas (24.140 km) [7] podendo chegar a aproximados \$400 dólares mais barato. Levando-se em conta que veículos movidos a célula de combustível são aproximadamente 2 a 2,5 vezes mais eficientes do que um motor de combustão interna a gasolina [11] pode ser concluído que o custo de US\$8/kg de hidrogênio possui uma energia equivalente a uma gasolina com custo variando entre US\$3-4/galão.

Mas, apesar da boa autonomia de 502 km atingida pelo Mirai, esta não supera a do seu “irmão” híbrido, o Prius plug-in com seus 869 km (modo elétrico mais motor à gasolina), que devido ao bom consumo equivalente (21,3 km/l) e a capacidade do seu tanque (40 litros) pode ir mais longe sem necessidade de parada para re-abastecimento. Sendo híbrido, e portanto permitindo o uso do motor elétrico associado ao motor de combustão (10 a 18 km de autonomia) [7], o Prius, suportado ainda pelo baixo valor considerado para o custo da energia elétrica (US\$0,12/kWh), consegue cumprir o mesmo percurso anual com o menor custo entre os três veículos apresentados.

## 5. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Observando-se do ponto de vista do consumidor e levando em conta somente o custo de compra bem como o custo atual de cada fonte de energia, ainda hoje o veículo de combustão interna possui melhor razão custo/benefício. Eliminando-se da análise os custos de manutenção, seguro, entre outros normalmente aplicados, levaria cerca de 25 anos para que o Prius plug-in fosse finalmente considerado como melhor custo/benefício [7].

Do ponto de vista ambiental, o Mirai, que possui maior eficiência energética entre os três veículos analisados, apresenta ainda o nível zero para emissões de carbono na atmosfera assim como os veículos puramente elétricos, no entanto, também dispõe de uma maior



autonomia. O tempo de recarga, quando comparado aos veículos elétricos também é um fator de vantagem para os carros movidos a hidrogênio (comparável aos de combustão interna).

O gás hidrogênio não é tóxico, é seguro e usado em larga escala industrial, podendo ser produzido a partir de uma variedade de fontes, como biomassa, gás natural, carvão ou através da própria eletrólise da água [8]. Além disso, ele também é considerado um excelente modo de armazenamento de energia obtida de fontes renováveis, como eólica ou solar [12].

No entanto, atualmente o hidrogênio possui custos de transporte, armazenagem e fornecimento bastante altos, associados a um reduzido tamanho da rede de abastecimento. Além disso, uma vez que nos Estados Unidos, a maior parte do gás ainda é obtida através da reforma de gás natural à vapor, o baixo impacto ambiental do combustível poderia ser questionado, segundo setores de oposição [13].

Com preços iniciais estimados entre US\$7/kg a US\$10/kg [11] para o consumidor final e conforme verificado na tabela 1, o combustível Hidrogênio ainda não se tornou definitivamente vantajoso frente aos atuais custos praticados da gasolina e eletricidade (considerando o mercado norte americano).

## 6. CONCLUSÃO

Como toda e qualquer nova tecnologia, apesar dos veículos movidos a célula de combustível possuírem boa eficiência – como a sua larga autonomia – e serem de baixo impacto ambiental – considerando sua emissão de água através do escapamento, ainda há grandes entraves, como por exemplo a falta da infraestrutura de reabastecimento necessária à essa modalidade de veículos bem como o custo final de venda do combustível.

No entanto, já é possível verificar alguns investimentos e parcerias sendo realizadas em prol da oferta de novos produtos. Entre os principais interessados estão as montadoras e fornecedores de gases industriais, como por exemplo a associação entre a japonesa Toyota e a francesa Air Liquide que visa a criação de uma grande rede de abastecimento preparada para uma esperada alta demanda nos próximos anos. Atualmente, o Japão já conta com cerca de 17 postos, enquanto a Alemanha possui 15, entre outros países como a Coreia, Dinamarca e Reino Unido que juntos possuem planos para mais de mil novas unidades de abastecimento até 2020 [13].

Cientes da necessidade de criar atrativos financeiros aos seus novos produtos, algumas montadoras se utilizam de condições especiais, como por exemplo três anos de custo gratuito de abastecimento (limitado a US\$15 mil) e dois anos de manutenção gratuita (primeiras 25 mil milhas percorridas), oferecidos pela Toyota aos consumidores da Califórnia [4]. Enquanto isso, a também japonesa, Honda, já finaliza o projeto *FCEV Concept*, com autonomia declarada como sendo superior aos 700km.

Conclui-se que, apesar do alto custo atual (dos veículos e do combustível), os modelos de célula a hidrogênio já representam um grande avanço na tecnologia automotiva, e a medida

em que os projetos e a infraestrutura das cidades sejam amadurecidos, estes poderão se tornar muito mais vantajosos em todos os aspectos quando comparados aos modelos movidos à gasolina, híbridos e aos elétricos.

## 6. REFERÊNCIAS

<sup>1</sup>Toyota – Venda de híbridos no mundo. Disponível em: < <http://g1.globo.com/sao-paulo/sorocaba-jundiai/especial-publicitario/empresas-maggi/noticia/2015/01/toyota-vende-7-milhoes-de-veiculos-hibridos-no-mundo.html> >. Acesso em: 21 junho 2015.

<sup>2</sup>Tesla Roadster – Resultado ciclo EPA. Disponível em: < [http://electricvehiclesnews.com/Cars/BEV/Tesla\\_Roadster.htm](http://electricvehiclesnews.com/Cars/BEV/Tesla_Roadster.htm)>. Acesso em: 21 junho 2015.

<sup>3</sup>Toyota Mirai – Resultado ciclo EPA. Disponível em: <<http://www.greencarcongress.com/2015/06/20150630-mirai.html> >. Acesso em: 21 junho 2015.

<sup>4</sup>Mirai – Economia de combustível. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/matthewdepaula/2015/06/30/toyota-mirai-fuel-economy-numbers-are-in-it-gets-67-miles-per-gallon/> >. Acesso em: 21 junho 2015.

<sup>5</sup>Toyota – Sistemas de célula de combustível. Disponível em: <[http://www.toyota-global.com/innovation/environmental\\_technology/fuelcell\\_vehicle/](http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/)>. Acesso em: 5 julho 2015.

<sup>6</sup>Ashley, Steven. *Can Toyota's Mirai be the next Prius?*. SAE. Automotive Engineering International Online. Vol.1. N° 6. 2014.

<sup>7</sup>Comparativo de consumo de combustível. Disponível em: < <http://www.fueleconomy.gov/>>. Acesso em: 09 julho 2015.

<sup>8</sup>Um guia para entender o impacto dos veículos de célula de combustível. Disponível em: < [http://cafcp.org/sites/files/W2W-2014\\_Final.pdf](http://cafcp.org/sites/files/W2W-2014_Final.pdf)>. Acesso em: 07 agosto 2015.

<sup>9</sup>Preços de combustíveis nos Estados Unidos. Disponível em: < <http://www.californiagasprices.com>>. Acesso em: 07 agosto 2015.

<sup>10</sup>Preços de combustíveis alternativos nos Estados Unidos. Disponível em: < [www.altfuelprices.com](http://www.altfuelprices.com)>. Acesso em: 07 agosto 2015.

<sup>11</sup>A transição para o Hidrogênio. Disponível em: < <http://steps.ucdavis.edu/files/08-13-2014-08-13-2014-NextSTEPS-White-Paper-Hydrogen-Transition-7.29.2014.pdf>>. Acesso em: 07 agosto 2015.

V WORKSHOP DE PESQUISA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (PTI)

I SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA (SIINTEC)

10 e 11 de setembro de 2015 / Salvador, Bahia, Brasil

<sup>12</sup>Mitchell, William J., Borroni-Bird, Christopher E., Burns, Lawrence D. *Reinventing the Automobile: personal urban mobility for the 21st century*. The MIT Press. Inglaterra, 2010.

<sup>13</sup>Ashley, Steven. *Can Toyota's Mirai be the next Prius?*. SAE. Automotive Engineering International Online. Vol.1. N° 6. 2014.