



## Estudo da inserção de veículos elétricos na malha rodoviária através de simulação com PAMVEC

### Área Temática: Energia e Sociedade

Felipe L. A. Vieira<sup>1</sup>, Silvio C. A. de Almeida<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Cidade Universitária, Rio de Janeiro – felipeangelim@poli.ufrj.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ – Rio de Janeiro-RJ – silvioa@gmail.com

### Resumo

Veículos elétricos são aqueles que utilizam pelo menos um motor elétrico para acionamento das rodas, caracterizando-se pelo baixo nível de ruído e de emissões. Desde a década de 1960, quando as questões ambientais vieram à tona, diversas montadoras voltaram-se para o desenvolvimento desses veículos. No Brasil, destacam-se os esforços da Itaipu Binacional, que comercializa o Palio Weekend Elétrico desde 2006. Esse estudo visa simular o desempenho hipotético de um veículo modelo Fiat Palio Weekend Elétrico e de outro novo veículo, o Tesla Modelo S, alimentados por diferentes tipos de baterias: Panasonic 18650, original do Modelo S, lítio-íon e a bateria Zebra, original do Palio Elétrico. Foi utilizada a ferramenta PAMVEC para simular o desempenho de veículos elétricos. Essa ferramenta é baseada na plataforma Excel e nos permite alterar as especificações das baterias e das plataformas veiculares de modo a analisar a influência desses parâmetros no consumo energético, nas emissões e autonomia de um veículo. Assim, são analisadas as vantagens de cada banco de bateria em cada configuração veicular e a viabilidade da inserção desses veículos na malha rodoviária.

**Palavras-chave:** Veículos; Elétricos; Pamvec; Simulação

### 1 Introdução

O tempo de recarga e a autonomia dos carros elétricos (BEVs) sempre foram dois dos obstáculos para sua adoção no mercado. Logo após o surgimento das primeiras rodovias intermunicipais no início do século XX, a demanda por grandes deslocamentos prejudicou a procura por esses veículos e provocou o seu desaparecimento das estradas. O custo de produção, a autonomia e praticidade dos carros movidos à gasolina após a introdução do motor de partida privaram os veículos elétricos de uma participação ativa no mercado.

Somente após a publicação de “Primavera Silenciosa” em 1962 por Rachel Carson e a sua repercussão sobre os problemas ambientais houve o interesse por parte das grandes montadoras no desenvolvimento de novos carros elétricos. Dentre os automóveis desenvolvidos, a primeira geração do híbrido Toyota Prius lançada em 1997 obteve destaque pelo seu sucesso, acumulando 37 mil vendas até o fim de sua produção em 2000 [1].

No Brasil, destaca-se o Fiat Palio Weekend Elétrico, o Itaipu, elaborado em 2006 numa parceria entre a montadora, a Itaipu Binacional e a suíça KWO Grimselstrom



na busca de um veículo com emissão zero de poluentes e nenhum ruído. Alimentado por uma bateria de sódio (Zebra), possui uma autonomia de 120 km com carga completa e tempo de recarga de 8 horas, se conectado a uma tomada de 220 volts [2]. Um de seus protótipos pode ser encontrado no CEPTEL/ELETROBRAS na cidade universitária da UFRJ.

No entanto, a autonomia e o tempo de recarga ainda eram dois grandes obstáculos para os veículos completamente elétricos. Nessa perspectiva, a Tesla Motors introduziu em 2012 seu Modelo S ao mercado, sendo alimentado por baterias lítio-íon Panasonic 18650 e apontando uma autonomia de 426 km na sua versão de 85 kWh [3]. Fora a autonomia, o veículo atende a rápidas recargas, sendo capaz de abastecer metade da capacidade de sua bateria em *20 minutos* nas estações providas de “Superchargers”. Em uma tomada de 240 V convencional, os 426 km são abastecidos em cerca de 9 horas [4].

Tendo em vista os avanços tecnológicos nesse setor, é importante o estudo das dificuldades atuais dos veículos elétricos e também o conhecimento das dificuldades já ultrapassadas. O uso desses veículos é essencial para a redução do nível de ruído no trânsito brasileiro e para a redução da poluição, além de outros aspectos sociais negativos.

Nessa perspectiva, este trabalho tem o intuito de avaliar o emprego da tecnologia elétrica na malha rodoviária, realizando uma análise do uso de diferentes bancos de baterias em dois veículos elétricos. Será feita uma simulação através do software PAMVEC (*Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption*)[5] e apresentados resultados sobre consumo energético e custo dos veículos.

## 2 O Pamvec

Para comparar o desempenho dos veículos com os diferentes bancos de baterias, foi utilizada a ferramenta PAMVEC, desenvolvida na universidade de Queensland e atualizada pelo grupo de pesquisa de veículos alternativos da UFRJ.

O PAMVEC, elaborado na plataforma Excel, é uma planilha capaz de descrever análises paramétricas de emissões e do consumo energético dos veículos de acordo com o ciclo de direção, estrutura veicular e especificações de cada bateria. Para obter as previsões do software (*outputs*, ou dados de saída), é necessário fornecer dados de entrada (*inputs*).

Entre as vantagens do programa está a sua implementação transparente no Excel, ou seja, é possível ver o modo como são interpretados os dados e calculados os resultados. Além disso, os cálculos são realizados de forma quase imediata. Assim que alteramos os dados de entrada (*inputs*), podemos obter os novos dados de saída (*outputs*).

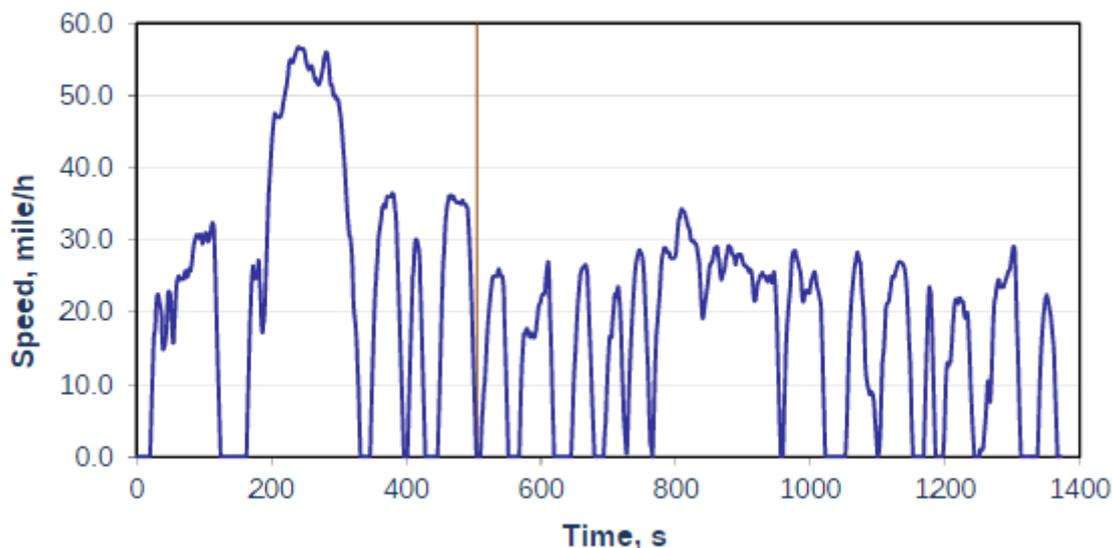
Para simulação, foi escolhido o ciclo de condução urbano UDSS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*) já disponibilizado no PAMVEC, com as seguintes propriedades: velocidade média de 31,35 km/h, velocidade média cúbica de 44,52 km/h e aceleração característica de 0,171 m/s<sup>2</sup>. A escolha vem de sua semelhança com o ciclo padronizado nacional NBR-6601 e por sua aprovação pela literatura especializada.



Figura 1 – Ciclo de condução UDDS (velocidade por tempo). Fonte: DieselNet [6]

### 2.1 Dados de entrada

Para realizar simulações de veículos elétricos através do PAMVEC, é necessário



fornecer, além do ciclo de condução, dados sobre a arquitetura veicular (massa da carroceria, coeficiente de arrasto aerodinâmico, aceleração, velocidade máxima, entre outros) e especificações dos bancos de baterias (potência específica, energia específica, densidade energética). As tabelas 1 e 2 apresentam algumas características das baterias e dos veículos simulados.

**Tabela 1 – Dados de entrada na aba “inputs”**

Plataforma	Fiat Palio Weekend	Tesla Modelo S
▪ a massa da carroceria	899 kg	1505 kg
▪ coeficiente de arrasto aerodinâmico ( $C_dA$ )	0,79	0,75
▪ coeficiente de atrito dinâmico	0,007	0,007
▪ massa total da carga transportada	310 kg	310 kg
▪ potência média dissipada pelos acessórios	200 W	200 W
Desempenho	Fiat Palio Weekend	Tesla Modelo S
▪ aceleração	0 a 60 km/h em 9 s	0 a 100 km/h em 5,6 s
▪ velocidade máxima	100 km/h	225 km/h

**Tabela 2 – Especificações das baterias**

Bateria	Potência Específica (W/kg)	Energia Específica (Wh/kg)	Eficiência	Densidade energética(Wh/L)



BEV – Na-NiCl <sub>2</sub> (Zebra) [7]	181	120	95%	177
BEV – Li-íon [8]	1800	155	99%	309
BEV – Panasonic 18650 [9]	1800	233	99%	630

### 3 Análise do desempenho dos veículos

Serão feitas as seguintes análises: o desempenho de um Fiat Palio Weekend Elétrico com diferentes bancos de baterias, mas com massas constantes, e o desempenho de um veículo Tesla Modelo S com diferentes bancos de baterias, por sua vez com autonomia constante de 426 quilômetros.

Os bancos de baterias para simulação correspondem à Zebra, bateria de sal fundido (Na-NiCl<sub>2</sub>) original do primeiro veículo; à bateria de lítio-íon Panasonic 18650, original do Tesla Modelo S; e a uma de lítio-íon convencional.

#### 3.1 Autonomia

Pretende-se, nesse item, comparar o desempenho do Palio Elétrico com os três diferentes bancos de baterias de mesma massa, tendo como referência o valor de sua bateria Zebra original. A figura 2 apresenta os resultados da simulação para esse veículo no ciclo urbano UDDS.

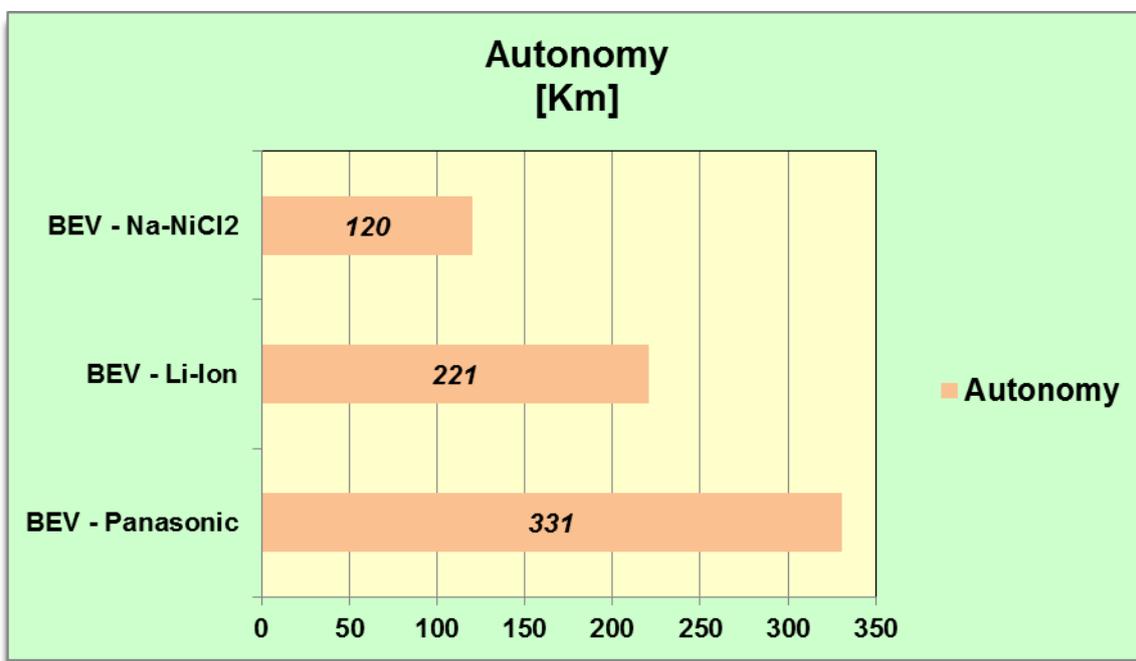


Figura 2 – Baterias e suas respectivas autonomias no Fiat Palio Weekend Elétrico.



Através da simulação, o banco de baterias correspondente à Panasonic 18650 apresenta a maior autonomia. O valor de 331 quilômetros é 176% maior que a autonomia original do veículo, de 120 quilômetros.

Os melhores resultados da Panasonic 18650 são consequência de sua elevada energia específica, como apresentado na tabela 2, que possibilita um maior armazenamento de energia para uma dada massa. Ao mesmo tempo, sua alta densidade energética proporciona um menor volume ocupado para uma quantidade de energia armazenada.

Vale ressaltar que a autonomia de veículos elétricos desempenha um importante papel, tendo em vista que o trânsito de grandes distâncias se trata de uma dificuldade histórica. Nesse sentido, o aumento da energia específica das baterias se mostra essencial para a introdução desses veículos em uma malha rodoviária extensa como a brasileira.

### 3.2 Vida útil

O PAMVEC calcula a vida útil de uma bateria a partir da expressão (1):

$$D = Aut \times N_{ciclos} \quad (1)$$

Onde:

*D* é a vida útil da bateria [km];

*Aut* é a autonomia referente à bateria [km];

*Nciclos* é o número de ciclos da bateria.

O número de ciclos equivale à quantidade de ciclos de carga-descarga até a bateria ter uma queda de 20% a 30% de sua capacidade inicial. Visto que a capacidade total da bateria não permanece constante, é válida a estimativa da vida útil de um banco de baterias a partir da expressão (2):

$$D = Aut \times 0,85 \times N_{ciclos} \quad (2)$$

O resultado obtido a partir da expressão (2) e através das especificações de cada bateria é apresentado na tabela 3.

**Tabela 3 – Estimativa de vida útil das baterias**

Baterias	Número de ciclos	Autonomia [km]	Vida útil da bateria [km]
BEV - Na-NiCl <sub>2</sub> (Zebra)	1000	120	102 000
BEV - Lítio-íon [8]	800	221	150 280
BEV - Panasonic 18650 [9]	800	331	225 080



### 3.3 Consumo energético

O consumo energético do automóvel segue o modelo da equação (3), tomando como base o consumo de energia por quilômetro no ciclo de direção e a eficiência do carregador.

$$CE = 1000 / (E_{avg} \times \gamma) \quad (3)$$

Onde:

$CE$  é a quantidade de quilômetros rodados por kWh consumido [km/kWh];

$E_{avg}$  é o consumo médio de energia por quilômetro no ciclo de condução [Wh/km];

$\gamma$  é a eficiência de recarga.

As estimativas dos custos energéticos de cada banco de bateria no Fiat Palio e no Tesla S estão representadas nas figuras 3 e 4, respectivamente.

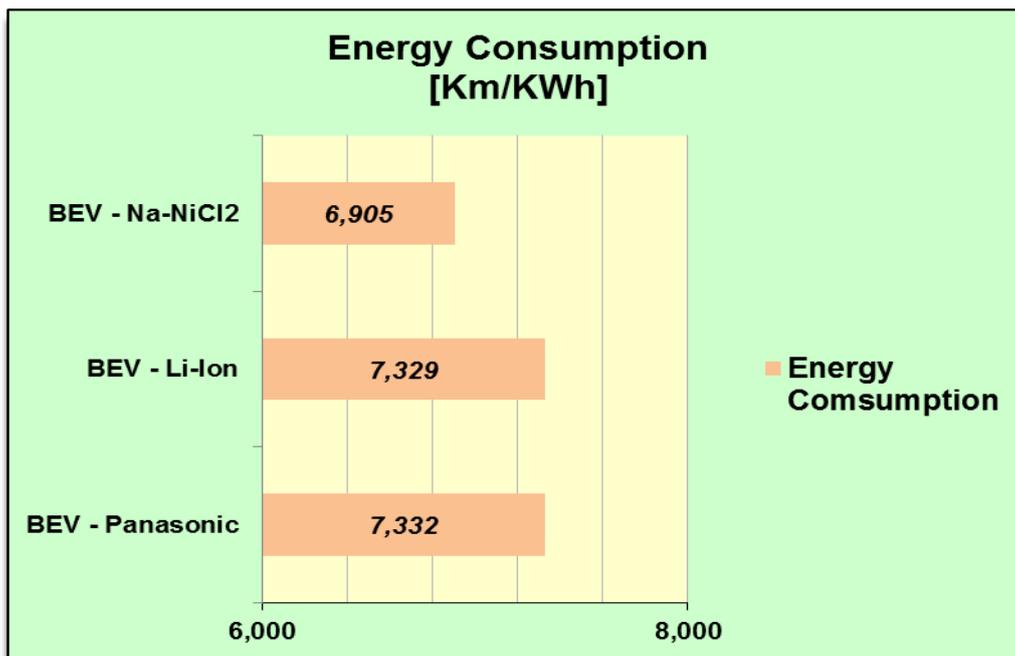


Figura 3 – Quilômetro rodado por kWh no Fiat Palio Weekend Elétrico.

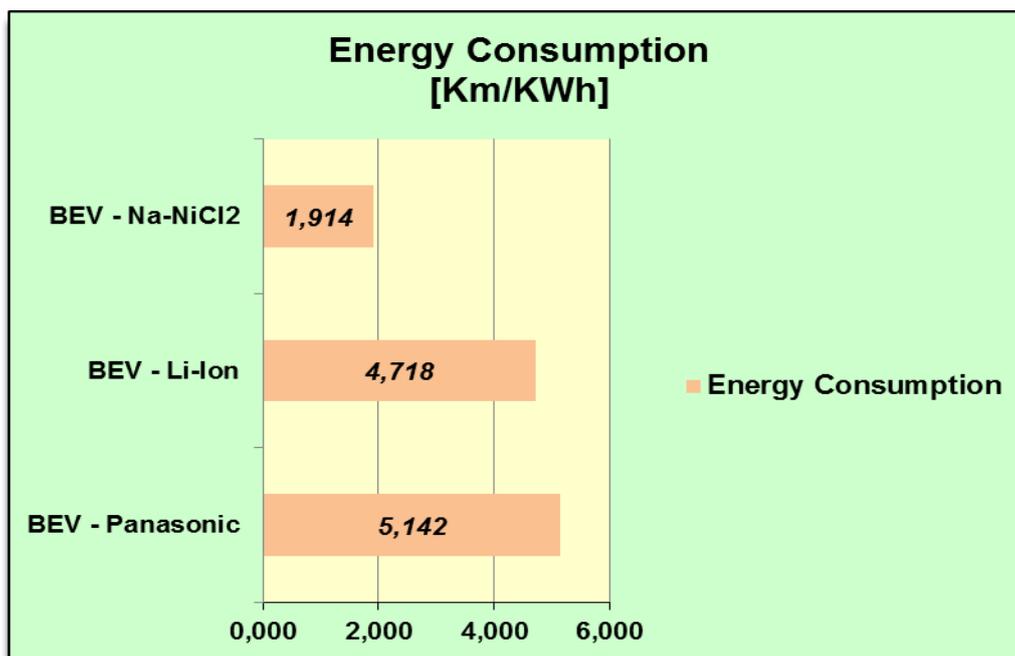


Figura 4 – Quilômetro rodado por kWh no Tesla Modelo S.

A figura 3 nos informa que para cada kWh fornecido na recarga, o Palio Weekend Elétrico, equipado com a bateria de Na-NiCl<sub>2</sub>, desloca-se por 6,905 quilômetros. A bateria de lítio-íon convencional, por sua vez, proporcionaria 7,329 quilômetros por quilowatts-hora, valor 6% acima da original do automóvel e similar à Panasonic, de 7,332 km/kWh.

Com relação ao Tesla Modelo S, o maior consumo energético em comparação ao Fiat Palio Weekend Elétrico vem de seu maior desempenho. Assim, em virtude da diferença de potência específica entre as baterias, como apresentado na tabela 2, a vantagem no consumo energético das baterias de lítio-íon com relação à Zebra se amplia.

### 3.4 Custo

Outro estudo importante é a relação do custo por quilômetro rodado. A partir dos dados de consumo energético (distância percorrida por kWh, vide figuras 3 e 4) e o preço do kWh médio do Brasil (0,44141 R\$/kWh, segundo a Aneel [10]), podemos calcular o custo por quilômetro do Fiat Palio e do Tesla S com cada banco de bateria, apresentado nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Custo por quilômetro rodado no Fiat Palio Weekend Elétrico

Banco de Baterias	Fiat Palio Weekend Elétrico	
	Consumo energético (km/kWh)	Preço por distância (R\$/km)
Na-NiCl <sub>2</sub> (Zebra)	6,905	0,0639
Lítio-íon	7,329	0,0602
Panasonic 18650	7,332	0,0602



**Tabela 5 – Custo por quilômetro rodado no Tesla Modelo S**

Banco de Baterias	Tesla Modelo S	
	Consumo energético (km/kWh)	Preço por distância (R\$/km)
Na-NiCl <sub>2</sub> (Zebra)	1,914	0,2306
Lítio-íon	4,718	0,0936
Panasonic 18650	5,142	0,0858

Vemos através das tabelas 4 e 5 o baixo preço por quilômetro dos dois veículos elétricos. O baixo consumo de sua tecnologia aliada ao baixo preço do fornecimento de energia faz do custo dos BEV's em longo prazo uma de suas vantagens.

Uma breve estimativa do preço por quilômetro de um veículo movido à gasolina (ICV) nos fornece uma importante comparação. Considerando o preço médio brasileiro do litro da gasolina, 3,302 R\$/l, segundo a ANP [11], e um consumo de combustível de 10 km/l, determinamos um custo por quilômetro de 0,3302 R\$/km para um veículo de combustão interna. Esse valor é cerca de quatro vezes maior que o valor correspondente ao Tesla Modelo S com seu banco de baterias original Panasonic. Se comparado com Palio Weekend Elétrico, o custo por quilômetro de um ICV chega a ser cinco vezes maior.

#### 4 Conclusões

As análises feitas pelo PAMVEC permitem chegar a conclusões importantes sobre os BEV's. Neste trabalho foram analisados o custo energético, a autonomia, o custo por quilômetro e o desempenho de diferentes configurações de veículos elétricos.

A análise da autonomia do Palio Weekend Elétrico em função do tipo de bateria mostra os melhores resultados da bateria Panasonic em relação às demais. No que diz respeito à vida útil, consumo energético e preço por quilômetro, essa bateria também apresentou uma vantagem sobre as outras simuladas nos dois veículos.

Além disso, enquanto o veículo Tesla Modelo S apresenta maior autonomia, observou-se que o Fiat Palio Elétrico tem menor custo por quilômetro e maior eficiência energética. O maior custo do Tesla em comparação ao Fiat Palio está associado, principalmente, ao seu maior peso e maior potência. Ainda assim, ambos apresentam gastos menores que um veículo movido à gasolina.

Apesar das vantagens no baixo preço por quilômetro, o custo da tecnologia desses veículos faz do preço inicial uma dificuldade para a concorrência com os ICV's. No Brasil, a necessidade de recorrer à importação de peças para a fabricação eleva ainda mais os gastos nas fábricas e, portanto, o preço no mercado. O Fiat Palio Weekend Elétrico é um exemplo: enquanto o preço de mercado do Fiat Palio Weekend 1.4 é estimado em R\$ 30,7 mil [12], sua versão elétrica custa cerca de R\$ 140 mil, cerca de 350% a mais. Com o veículo Tesla Modelo S os preços de mercado são ainda maiores, variando entre R\$ 220 mil e R\$ 330 mil dependendo das características desejadas.

Um dos fatores que impede o barateamento da fabricação dos BEVs e a acessibilidade aos consumidores é a não adoção de sua produção em larga escala



pela indústria automotiva. No Brasil, ao recorrer à importação de peças importantes, os veículos elétricos encontram dificuldade para sua fabricação em grandes quantidades. O próprio Fiat Palio Weekend Elétrico, analisado neste trabalho, precisa recorrer à importação de sua bateria para a produção.

Países como o Reino Unido e os Estados Unidos já tomam medidas para incentivar o uso e aquisição dos veículos elétricos. No Reino Unido, o governo oferece um desconto de até R\$ 24 mil na compra de um BEV [13], fora a isenção do pagamento de pedágios urbanos ou de estacionamento em certos lugares. Os Estados Unidos, por sua vez, estão incentivando o desenvolvimento de baterias e de veículos elétricos de próxima geração através do fornecimento de verbas [14]. A montadora Tesla Motors também vem encorajando os seus clientes para o trânsito de longas distâncias ao oferecer nas estações providas de *Superchargers*, locais onde é possível reabastecer 50% da autonomia do Modelo S em apenas 20 minutos, a recarga gratuita.

Para o Brasil, são necessários incentivos fiscais para a compra dos veículos elétricos e mais investimentos nessa área tecnológica, como feito nos Estados Unidos. São poucos os investimentos atuais, visto que em apenas alguns estados há a isenção do IPVA (Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores) e não há isenção de IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) para os BEV's. Por outro lado, a introdução desses veículos em território nacional, do ponto de vista ecológico, é favorecida. O Brasil possui 41% de sua matriz energética atribuída a fontes renováveis, não transferindo, dessa maneira, a poluição nos motores de combustão para a geração de energia, como ocorreria em países que baseiam sua geração em usinas termoeletricas [15].

Deve-se investir, também, em soluções para o *efeito memória*, efeito que em longo prazo diminui a capacidade total de recarga do banco de baterias, afetando a autonomia e a vida útil do veículo. Estudos apontam que, nas baterias de lítio-íon, como a Panasonic 18650, fatores como o aquecimento excessivo ou a descarga profunda das baterias acentuam esse efeito [16]. No que tange a autonomia, o presente trabalho mostra que as tecnologias atuais superam essa dificuldade ao viabilizar grandes deslocamentos.

Por fim, diversas são as vantagens ambientais e sociais dos carros elétricos. O uso desses veículos, classificados como emissão zero, propicia melhor qualidade de vida em meio urbano não apenas por reduzir a emissão de poluentes, mas, também, por evitar a poluição sonora. A alta eficiência da tecnologia elétrica, demonstrada neste estudo, promove, ademais, a utilização eficiente dos combustíveis. É necessário o debate e a busca por políticas públicas de incentivo capazes de moderar o preço inicial dos BEVs, na busca da construção de cidades mais limpas.

## 5 Referências Bibliográficas

[1] **Toyota Motor Corporation Global Website**, General Status of Plants in Japan. Disponível em : <[http://www.toyota-global.com/company/history\\_of\\_toyota/75years/data/automotive\\_business/production/production/japan/general\\_status/takaoka.html](http://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/data/automotive_business/production/production/japan/general_status/takaoka.html)>. Acessado em: 28 de abril de 2015.



- [2] **Fiat Automóveis do Brasil**. Disponível em:  
<<http://www.fiat.com.br/sustentabilidade/produto/palio-weekend-eletrico.html>>.  
Acessado em 28 de abril de 2015.
- [3] **The Car Guide**, 2015 Tesla Motors S 85. Disponível em:  
<<http://www.guideautoweb.com/en/specifications/tesla/model-s/>>. Acessado em: 28 de abril de 2015.
- [4] **Tesla Motors**, Premium Electric Vehicles. Disponível em :  
<<http://www.teslamotors.com/>>. Acessado em: 28 de abril de 2015.
- [5] SIMPSON, A. G. **Parametric modelling of energy consumption in road vehicles**. Dissertação (PhD) – School of Information Technol and Elec Engineering, The University of Queensland, 2005.
- [6] **DiselNet**. Emission Test Cycles : FTP-72 (UDDS). Disponível em :  
<<https://www.dieselnets.com/standards/cycles/ftp72.php>>. Acessado em: 18 de Junho de 2015.
- [7] **Itaipu Binacional**, Veículo Elétrico. Disponível em :  
<<https://www.itaipu.gov.br/ve/>>. Acessado em: 28 de abril de 2015.
- [8] **Energy Storage Instruments**, Lithium Ion Battery Analyzer Cycle Life Test. Disponível em: <<http://www.esi-technology.com/>>. Acessado em : 14 de maio de 2015
- [9] ANDERMAN, M. The Tesla Battery Report. **Advanced Automotive Batteries**. Disponível em <<https://www.advancedautobat.com/industry-reports/2014-Tesla-report/index.html>>. Acessado em: 6 de março de 2015
- [10] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em:  
<<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acessado em: 13 de junho de 2015.
- [11] **ANP**, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/>>. Acessado em: 20 de junho de 2015.
- [12] **iCarros**, Tabela Fipe. Disponível em: <<http://www.icarros.com.br/tabela-fipe/fiat-palio-weekend-attractive-1.4-8v-flex/14,215,2012,12477.html>>. Acessado em: 19 de junho de 2015.
- [13] **GOV.UK**, Plug-in car and van grants. Disponível em : <<https://www.gov.uk/plug-in-car-van-grants/overview>> Acessado em: 20 de junho de 2015.
- [14] CARTY, S. S. Obama pushes electric cars power this week. **Usa Today**. Disponível em:  
<[http://content.usatoday.com/communities/driveon/post/2010/07/obama-pushes-electric-cars-battery-power-this-week-1#.VYbkO\\_IViko](http://content.usatoday.com/communities/driveon/post/2010/07/obama-pushes-electric-cars-battery-power-this-week-1#.VYbkO_IViko)> Acessado em: 20 de junho de 2015.
- [15] **Balanco Energético Nacional**, Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2014. Disponível em:  
<<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2014.aspx>>. Acessado em: 20 de junho de 2015.



[16] DAHN, J. Why do Li-ion batteries die and can they be immortal?. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=9qi03QawZEk>>. Acessado em: 21 de maio de 2015.

[17] BUENO, M. da F.; ALMEIDA, S. C. A. de. **Simulação de veículo elétrico utilizando a ferramenta PAMVEC**. Dissertação (Graduação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.