

PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ELETRIFICAÇÃO DOS TRANSPORTES

Gregório Costa Luz de Souza Lima

Centro de Estudos em Regulação e Infraestrutura - Fundação Getúlio Vargas
Programa de Engenharia de Transportes – PET/COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Licínio da Silva Portugal

Programa de Engenharia de Transportes – PET/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Sendo o setor de transportes responsável por grande parcela das emissões de CO₂ no Brasil, a eletrificação dos transportes aparece como uma alternativa para cumprimento dos acordos climáticos. Nesse contexto, deve-se avaliar os aspectos ambientais e econômicos envolvidos no desenvolvimento dos veículos elétricos, bem como entender o papel que estes ocupam nas transformações em curso nos setores de transporte urbano e energia. Constata-se o enorme potencial dos veículos elétricos (VEs) de reduzirem as emissões de CO₂ em países com a matriz energética composta majoritariamente por fontes limpas (ex: Brasil). Apesar de apresentarem um custo operacional inferior, os VEs ainda apresentam um custo total superior aos dos veículos de combustão interna. Portanto, os VEs se mostram mais competitivos em sistemas de compartilhamento de viagens e do tipo *mobility-as-a-service*. Por fim, identifica-se os VEs como peça fundamental da transformação em curso no setor elétrico com potencial de otimizar a utilização de fontes de energia renováveis intermitentes.

ABSTRACT

Since the transport sector is responsible for the large share of CO₂ emissions in Brazil, transport electrification appears as an alternative to comply with climate agreements. In this context, consideration must be given to environmental and economic issues related to electric vehicles development, as well as their role in the ongoing transformations in the energy and urban transportation sectors. It is possible to observe the enormous potential of the electric vehicles (EVs) to reduce CO₂ emissions in countries with an energy matrix composed mainly by clean sources (ex: Brazil). Despite lower operating costs, EVs still have a higher total cost than internal combustion vehicles. Therefore, VEs are more competitive in ride splitting and mobility-as-a-service systems. Finally, it finds the VEs as fundamental to the ongoing transformation in the electricity sector the potential to optimize the use of intermittent renewable energy sources.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, cerca de 85% da população vive em centros urbanos, sendo que existem 36 cidades com mais de 500 mil habitantes, além de 40 regiões metropolitanas estabelecidas, nas quais vivem mais de 80 milhões de brasileiros (cerca de 45% da população) (IPEA, 2016). Neste contexto de rápida urbanização, a pressão sobre as infraestruturas urbanas nas cidades brasileiras é cada vez maior. Estas, portanto, enfrentarão consideráveis transformações para criar condições de vida sustentáveis para seus habitantes. Os setores de transporte urbano e energia, pilares dessas transformações, precisarão se adaptar ao crescimento demográfico e econômico de modo a não aumentar os níveis de poluição e congestionamento.

De forma a conter o aumento dos níveis de poluição, no último acordo climático das Nações Unidas o país se comprometeu a reduzir 43% das emissões de gases do efeito estufa até 2030. Sendo o setor de transportes, responsável por grande parcela das emissões de CO₂, a eletrificação dos transportes aparece como uma alternativa para o atingimento de tal meta. Entretanto, para que os benefícios da eletrificação extensiva dos transportes sejam reais, a energia elétrica que os alimenta deve ser proveniente de fontes de energia limpas e renováveis. Neste sentido, a eletrificação se mostra ainda mais pertinente, uma vez que grande parte da matriz energética brasileira é limpa e o país apresenta grande potencial para desenvolvimento de energias limpas e renováveis (eólica e solar).

Nesse contexto, deve-se avaliar os aspectos ambientais e econômicos envolvidos no desenvolvimento dos veículos elétricos, bem como entender o papel que estes ocupam nas

transformações em curso nos setores de transporte urbano e energia. Para o desenvolvimento do artigo utilizou-se de revisão bibliográfica sobre o tema, além de compilação e análise de dados.

O trabalho é organizado em sete seções. A seção dois faz uma caracterização dos tipos de veículos elétricos existentes atualmente. A seção três apresenta os aspectos ambientais (poluição do ar e sonora) e a amplitude dos efeitos da eletrificação dos transportes. A seção de número quatro trata dos aspectos econômicos dos veículos elétricos. A quinta e a sexta seção do trabalho abordam o potencial papel que os veículos elétricos podem desempenhar na transformação dos setores de transporte urbano e energia, respectivamente. Por fim, a seção de número sete é destinada às considerações finais do trabalho.

2. CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos podem ser divididos em quatro grupos: HEVs (*Hybrid Electric Vehicles*), PHEVs (*Plug-In Electric Vehicles*), REXs (*Range Extenders*) e os BEVs (*Battery Electric Vehicles*), com diferentes níveis de eletrificação e possibilidades para contribuir com a redução de emissões (AJANOVIC E HAAS, 2016).

De acordo com Adnan *et. al* (2016), os HEVs, possuem um motor de combustão interna que funciona com combustível convencional e um motor elétrico que se utiliza de energia armazenada em uma bateria. No entanto, esta bateria é carregada via frenagem regenerativa, não havendo a necessidade de conectá-lo a uma tomada. Os PHEVs possuem um motor de combustão interna alimentado por combustível convencional ou alternativo, e um motor elétrico que se utiliza da energia armazenada na bateria. Este tipo de veículo pode ser conectado a uma tomada para o carregamento da sua bateria. Já os REXs possuem motor elétrico com bateria do tipo *plug-in* e um motor de combustão interna. A sua diferença em relação aos PHEVs é que o motor elétrico sempre aciona as rodas do veículo, enquanto que o motor de combustão interna atua como um gerador para recarregar a bateria quando esta estiver esgotada. Os BEVs operam exclusivamente com eletricidade via baterias *on-board* que são carregadas conectando-as a uma tomada ou estação de carregamento. Esses veículos não têm motor a gasolina, possuem maior autonomia elétrica quando comparado com os PHEVs e não emitem gases poluentes durante a operação.

Apesar de apenas os BEVs serem considerados veículos de emissão zero, conforme apresentado na Figura 1, esta afirmação não necessariamente é válida quando se considera toda a cadeia de fornecimento de energia elétrica, uma vez que, a energia que abastece o veículo pode não vir de uma fonte limpa (AJANOVIC E HAAS, 2016).

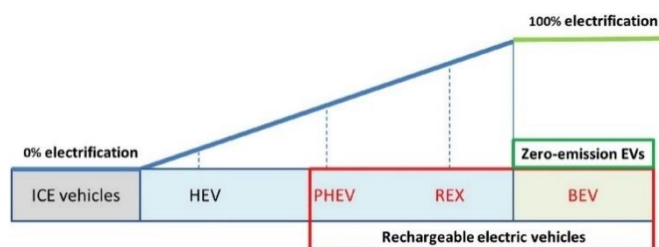


Figura 1: Nível de eletrificação dos veículos elétricos

Fonte: Ajanovic e Haas (2016)

Os HEVs, segundo Ajanovic e Haas (2016), apresentam características muito similares aos veículos convencionais de combustão interna. Estes, por serem alimentados por combustíveis

fósseis e possuem um nível baixo de eletrificação, apresentam um potencial muito limitado para redução de emissões de poluentes. Neste sentido, a expectativa na redução de gases poluentes é muito maior sobre veículos com maior nível de eletrificação.

Em contrapartida, os veículos elétricos (EVs) recarregáveis apresentam alto custo, baixa autonomia operacional e necessidade de infraestrutura de carregamentos, sendo sua disseminação ainda pequena atualmente. Quando se analisa o Custo Total de Posse (*total cost of ownership*), calculado através da equação 1, os VEs ainda são mais caros quando comparados com os veículos de combustão interna, principalmente em razão dos custos de investimento (HAGMAN *et al.*, 2016);

$$TCO = \frac{(IC + \tau_{REG}) \times \alpha}{skm} + P_f FI + \frac{C_{O\&M}}{skm} \quad (\text{REAIS/100 km}) \quad (1)$$

em que TCO = custo total de posse

IC = custos de investimento

τ_{REG} = taxa de registro

α = fator de recuperação do capital

skm = quantidade de quilômetros rodados por ano

P_f = preço da energia incluindo taxas

FI = consumo de energia dos veículos

$C_{O\&M}$ = custos de operação e manutenção

Ainda, de acordo com a equação, os custos da posse de um veículo elétrico dependem também do padrão de viagem do usuário, indicando que, veículos com um alto grau de utilização, como táxis, veículos do tipo *mobility-as-service* e frete, podem ser mais indicados do ponto de vista econômico para eletrificação (AJANOVIC E HAAS, 2016). A quilometragem rodada que torna o veículo elétrico mais barato que o convencional depende dos custos de compra do veículo, taxas de registro e preço do combustível principalmente.

Apesar dos veículos elétricos emitirem pouco ou nenhum gás poluente, os benefícios ambientais da eletrificação estão diretamente relacionados com a fonte energética utilizada para a geração de eletricidade; ou seja, os benefícios ambientais dos veículos elétricos apenas poderão ser alcançados caso a energia utilizada para alimentá-los seja proveniente de fontes limpas e renováveis.

3. ASPECTOS AMBIENTAIS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Atualmente, o transporte motorizado à combustão assumiu o papel predominante nos deslocamentos cotidianos da população, respondendo por grande parte das emissões de poluentes dos grandes centros urbanos, principalmente daqueles originários da queima dos combustíveis fósseis (IPEA, 2011).

Segundo o IPEA (2011), pode-se classificar a poluição veicular em duas categorias, de acordo com a abrangência dos seus impactos. A poluição local, que causa danos no entorno onde o serviço de transporte é realizado, e os poluentes globais, que impactam o planeta como um todo. Dentre os poluentes locais nocivos à saúde e que degradam o ambiente urbano estão: os materiais particulados (MP), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2), que podem se apresentar na forma de fuligem, que saem dos escapamentos dos veículos, freios, pneus e superfície viária. Por outro lado, os poluentes globais são gases expelidos na atmosfera e que contribuem para o aquecimento global. É o caso do dióxido de carbono (CO_2), um importante gás causador do efeito estufa (GEE).

De acordo com a EPE (2016), o setor de transportes foi responsável por 42% das emissões de

CO_2 associadas à matriz energética no ano de 2015 no Brasil. Segundo a ANTP (2016), nas cidades brasileiras, mais de 93% das viagens motorizadas são feitas por modalidades baseadas em energia derivada do petróleo, o que pode contribuir para este quadro. Uma vez que o setor de transportes é o maior responsável por emissões de CO_2 no Brasil e a proporção de viagens por modalidades que se utilizam da queima de combustíveis fósseis é bastante elevada no país, a eletrificação dos veículos rodoviários surge como uma opção relevante para o cumprimento dos acordos climáticos dos quais o país é signatário.

Wu e Zhang (2017) avaliam a capacidade de os veículos elétricos reduzirem as emissões de gases poluentes em países em desenvolvimento. Estes comparam os impactos causados nas emissões de gases poluentes pela substituição dos veículos de combustão interna (*ICEVs – internal combustion engine vehicles*) por veículos do tipo BEVs, PHEVs e HEVs (Tabela 1) em oito países (Tabela 2). Tal comparação considera o método *well-to-wheel* para identificar a quantidade de CO_2 e outros poluentes emitidos por cada kWh gerado, considerando as estruturas dos sistemas energéticos de cada país e as respectivas perdas energéticas de transmissão (Tabela 3). O método *well-to-wheel* considera as emissões de gases poluentes das diferentes fontes energéticas do país para cada kWh gerado e se subdivide em duas etapas: *well-to-produce* (fonte para produção) e *produce-to-wheel* (produção para o tanque). Os dados utilizados por Wu e Zhang (2017) são referentes a 2012. No entanto, a representatividade das energias limpas renováveis no Brasil continua elevada (74%), segundo apontam dados da ANEEL (2018).

Tabela 1: Características dos veículos considerados em cada categoria*

	ICEV	HEV	PHEV**	BEV
Veículos representativos	Toyota Corolla Chevrolet Cruze Volkswagen Golf	Toyota Prius Chevrolet Malibu Volkswagen Jetta	BMW i3 REX Chevrolet Volt Hyundai Sonata	BMW i3 BEV Chevrolet Spark EV Volkswagen E-Golf
Ano do modelo	2016	2016	2016	2016
Capacidade do tanque (L)	50/52/50	43/50/45	7/34/55	-
Capacidade da Bateria (kW)	-	-	125/87/50	105/85/125
Consumo de combustível (L/100 km)***	7,3/6,8/8,0	4,5/5,2/5,4	6,1/5,6/5,9	-
Consumo médio de combustível (L/100 km)	7,4	5	5,9	-
Consumo de energia (kWh/100 km)***	-	-	18/19/21	17/18/17
Consumo médio de energia (kWh/100 km)	-	-	19,5	17,5
Autonomia (km)	680/750/615	945/960/840	240/675/965	130/135/130

* Dados retirados do *U.S. Department of Energy*, disponível em: <http://www.fueleconomy.gov/>

** Para os veículos do tipo HEV e PHEV o considerou-se apenas gasolina no consumo de combustível

*** Baseado em dados da *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*; 45% rodovia e 55% área urbana

Tabela adaptada de Wu e Zhang (2017).

Tabela 2: Emissões de poluentes e redução das emissões de um VE nos diferentes países durante um ano (considerando 15.000 km rodados).

	China	Rússia	Índia	Brasil	Alemanha	França	EUA	Japão
<i>Emissões anuais de um PHEV*</i>								
CO_2 (kg)	2442	1600	2789	799	1826	790	1862	1938
MP (g)***	2711	1633	2866	1802	2036	1354	1957	1829
NO_x (g)	6556	3199	7546	1218	4412	1007	4300	4457

SO_2 (g)	18,317	5373	20,59	1437	11,282	1642	10,051	8811
<i>Emissões anuais provocados pela substituição de um ICEV a gasolina por um PHEV**</i>								
CO_2 (kg)	-713	-1555	-366	-2356	-1329	-2365	-1293	-1217
MP (g)	1153	75	1308	243	477	-204	399	270
NO_x (g)	3990	634	4980	-1347	1847	-1559	1735	1892
SO_2 (g)	17,473	4529	19,747	593	10,439	798	9207	7967
<i>Emissões anuais de um BEV</i>								
CO_2 (kg)	2175	1230	2565	332	1484	322	1524	1610
MP (g)	2820	1611	2993	1800	2062	1297	1974	1830
NO_x (g)	6895	3130	8006	908	4491	671	4365	4541
SO_2 (g)	20,397	5876	22,947	1461	12,506	1691	11,124	9734
<i>Emissões anuais provocadas pela substituição de um ICEV por um BEV**</i>								
CO_2 (kg)	-980	-1925	-590	-2823	-1671	-2834	-1631	-1545
MP (g)	1261	52	1435	241	503	-261	415	271
NO_x (g)	4329	564	5440	-1658	1925	-1895	1799	1976
SO_2 (g)	19,553	5032	22,103	617	11,662	847	10,28	8890

* Assumindo o uso do PHEV, com 80% de km rodados utilizando eletricidade e 20% consumindo gasolina.

**Igual à quantidade de emissões do PHEV (ou BEV) menos a quantidade de emissões de um ICEV a gasolina.

*** Emissões de MP não incluem apenas as emissões provenientes da gasolina, mas também incluem a emissão de fontes como desgaste dos pneus, freios e vias, e suspensão de poeiras das vias. Fator de emissões do VE considerada é 65,7 mg/km (TIMMERS E ACHTEN, 2016).

Fonte: Tabela adaptada de Wu e Zhang (2017).

Tabela 3: Estrutura dos sistemas energéticos e perdas de transmissão em 2012

	Energia termoelétrica				Hidroelétrica	Energia Nuclear	Outras*	Taxa de perda na transmissão**
	Total	Carvão	Óleo	Gás Natural				
<i>Países em desenvolvimento (BRICS)</i>								
China	77,8%	75,9%	0,1%	1,7%	17,3%	2,0%	3,0%	6,7%
Rússia	67,5%	15,8%	2,6%	49,1%	15,5%	16,6%	0,4%	10,2%
Índia	81,4%	71,1%	2,0%	8,3%	11,2%	2,9%	4,5%	21,0%
Brasil	14,6%	2,6%	3,6%	8,5%	75,2%	2,9%	7,4%	15,9%
<i>Países desenvolvidos</i>								
Alemanha	59,7%	46,1%	1,2%	12,5%	3,4%	16,0%	20,9%	4,4%
França	8,6%	3,9%	0,8%	3,9%	10,5%	76,1%	4,9%	5,9%
EUA	68,9%	38,5%	0,8%	29,6%	6,5%	18,8%	5,9%	6,6%
Japão	80,5%	29,6%	12,2%	38,7%	7,4%	1,6%	10,6%	4,6%

Tabela adaptada de Wu e Zhang (2017). Fonte: *World Bank (2016) e **Ofweek (2015) *apud* Wu e Zhang (2017).

De acordo com Wu e Zhang (2017), como os HEVs se utilizam de um sistema que recupera a energia da frenagem para carregamento da bateria e não necessitam ser alimentados por uma fonte externa, seus efeitos nas emissões são idênticos em todos os países. Estima-se que os HEVs podem aumentar a eficiência em termos de combustível em 40%; isto é, ao substituir um ICEV por um HEV a gasolina, as emissões de CO_2 , MP, NO_x e SO_2 podem ser reduzidas em 1023 kg, 189g, 832g e 274g respectivamente.

Em todos os países, a utilização de PHEVs, BEVs ou HEVs em substituição ao ICEV a gasolina contribui para a redução das emissões de CO_2 . Na maioria dos países (exceção da China), a substituição por PHEV ou BEV é mais efetiva na redução de CO_2 quando comparada à substituição por HEV (WU E ZHANG, 2017). Destaca-se que a segunda maior redução de CO_2 e NO_x devido à utilização de PHEV e BEV foram encontradas no Brasil, ficando atrás apenas da França. Isto é explicado pelas matrizes energéticas brasileira e francesa serem compostas majoritariamente por energias limpas - hidrelétrica e nuclear, respectivamente.

Apesar do menor incremento comparativamente a outros países, a variação das emissões de

MP e SO_2 no caso brasileiro é positiva. Isto acontece devido à produção de MP e SO_2 no processo de produção da energia elétrica, de modo que, a utilização de PHEVs e BEVs em substituição ao ICEV a gasolina contribui para aumentar a emissão desses poluentes. Entretanto, deve-se ressaltar que tais poluentes (MP e SO_2), classificados como poluentes locais, serão emitidos nas proximidades das usinas geradoras de energia e distante das regiões mais densamente povoadas (centros urbanos). Ademais, Wu e Zhang (2017) pontuam que a tecnologia para redução de poluentes atmosféricos locais (MP e SO_2) é madura atualmente e existem vantagens devido à economia de escala.

Além dos benefícios referentes à redução de poluentes atmosféricos, existe a redução da poluição sonora; todavia, seus efeitos são limitados. Bernhard *et al.* (2004) avaliam o impacto dos diferentes componentes do veículo nos ruídos do tráfego urbano, dentre eles: ruído do pneu, ruído aerodinâmico e do motor de propulsão. Observa-se na Figura 2 a tendência de incremento dos ruídos destes três elementos com o aumento da velocidade, sendo os pneus o elemento que exerce maior influência na composição do ruído total em todas as faixas de velocidade. Entretanto, quando se analisa os ruídos aerodinâmicos e do motor de propulsão, percebe-se que o segundo, a velocidades reduzidas, exerce maior influência. Neste sentido, a redução dos ruídos provenientes de tráfego em vias de alta velocidade provavelmente não será perceptível pelos habitantes, por outro lado, o ruído de tráfego urbano a velocidades inferiores a 40km/h será, uma vez que, os ruídos do motor são dominantes a velocidades mais baixas.

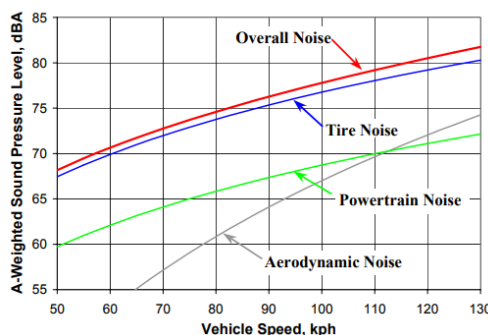


Figura 2: Contribuição das diversas subfontes de ruído do tráfego rodoviário

Fonte: Bernhard *et al.* (2004)

4. ASPECTOS ECONÔMICOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Embora os custos de energia correspondam a uma pequena parcela do custo total de transportes, altos preços da gasolina e baixos preços da eletricidade podem vir a motivar a troca para VE. Espera-se que os preços do petróleo cresçam nas próximas décadas, devido ao incremento nos custos de exploração do petróleo em regiões não convencionais (xistos e areias petrolíferas). Ademais, a crescente demanda por petróleo na China e na Índia poderá provocar aumentos regulares nos preços devido à escassez de oferta. O preço da eletricidade também é suscetível a aumento; porém, espera-se um aumento inferior ao preço do petróleo. As políticas de carbono provocarão um custo adicional aos combustíveis fósseis e o efeito global das alterações nos preços estimulará a eletrificação e o uso de veículos mais eficientes em termos de consumo de combustível (DIJK *et al.*, 2013).

A Tabela 4 compara os preços da energia e da gasolina em diferentes países, e a diferença dos custos com combustíveis de um usuário de um VE e um usuário de um ICEV. Nesta análise, considerou-se a eficiência do veículo elétrico – 18,5 km/100 kWh (média de consumo entre um típico PHEV e um BEV conforme a Tabela 2) – e a eficiência média dos veículos do tipo ICEV (aproximadamente 16km/l) mais econômicos do mercado brasileiro.

Tabela 4: Comparativo entre os custos/km de um VE e um ICEV.

País	Preço da eletricidade USD/kwh*	Custo VE (USD/100 km)	Preço da gasolina (USD/L) **	Custo ICEV USD/100 km	Economia
Noruega	0,10	1,93	2,03	12,69	85%
México	0,06	1,18	1,03	6,44	82%
Coréia do Sul	0,12	2,20	1,46	9,13	76%
Canadá	0,11	1,97	1,19	7,44	74%
Holanda	0,18	3,26	1,96	12,25	73%
Finlândia	0,17	3,14	1,80	11,25	72%
França	0,18	3,38	1,81	11,31	70%
República Checa	0,16	2,89	1,48	9,25	69%
Brasil	0,14***	2,50	1,18	7,38	66%
Reino Unido	0,21	3,84	1,69	10,56	64%
Suíça	0,20	3,76	1,60	10,00	62%
Chile	0,17	3,13	1,30	8,13	61%
Portugal	0,26	4,84	1,84	11,50	58%
Itália	0,28	5,12	1,89	11,81	57%
Estados Unidos	0,13	2,32	0,82	5,13	55%
Japão	0,22	4,10	1,31	8,19	50%
Espanha	0,27	4,98	1,53	9,56	48%
Austrália	0,20	3,74	1,10	6,88	46%
Alemanha	0,33	6,10	1,71	10,69	43%

*Dados extraídos da *International Energy Agency* (2017). Disponível em:<

<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>

** Dados extraídos da *Global Petrol Prices* (2018). Disponível em:

<https://www.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/>

***Dados da ANEEL (2018). Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>

Fonte: Elaboração própria

Além dos custos inferiores com combustível que os veículos elétricos apresentam em relação aos de combustão interna, Palmer *et al.* (2018) ponderam que os custos de manutenção também são inferiores (em média 18%) graças ao menor desgaste dos freios e a menor quantidade de partes móveis dos VEs.

Uma vez que o custo fixo de compra do veículo elétrico (CAPEX) é o elemento predominante no custo total de posse e, a quantidade de quilômetros rodados por mês é inversamente proporcional a este custo (Equação 1), a eletrificação de veículos de alta utilização, como ônibus de transporte público e entregas, apresenta, até o momento, melhor custo benefício quando comparada à frota de veículos de combustão interna. Entretanto, espera-se que no futuro os veículos elétricos se tornem mais baratos que os veículos de combustão interna (ICEV) com a queda dos custos de bateria (elemento predominante no custo de investimento). Segundo Martin *et al.* (2017), os custos de bateria caíram de \$ 1000 por kWh em 2010 para menos de \$ 300 em 2015, reduzindo consideravelmente os custos dos VEs.

Enquanto os custos de bateria ainda não são suficientemente baixos para tornarem os VEs competitivos, novos modelos de negócios estão sendo adotados para endereçar tal questão. Esse é o exemplo da empresa Better Place, que oferece um serviço de *leasing* (empréstimo) de baterias. Mitiga-se assim o problema dos seus elevados custos, a incerteza associada à sua vida útil e o valor residual da bateria ao seu fim. Significa dizer que a Better Place lida tanto com os custos iniciais da bateria, como com o risco do seu valor residual. Assim, os custos mais representativos de um BEV se tornam os custos da carcaça de um veículo vazio (sem bateria). (DIJK *et al.*, 2013). Segundo Martin *et al.* (2018), existe ainda o potencial de novas

fontes de renda para operadores de frotas (ex: transporte público e frete), que poderão prestar serviços auxiliares ao mercado de energia. A interação entre veículos elétricos e o setor de energia serão discutidos na seção 6.

5. TRANSFORMAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO

De acordo com Lima (2018), chegou-se em um ponto em que alguns elementos convergem para uma mudança de paradigma no transporte urbano. São eles: avanços tecnológicos, mudança comportamental das gerações mais jovens e a tendência global para redução das emissões de gases poluentes.

Segundo Finger *et al.* (2017), cidadãos e entidades do setor público estão cada vez mais conscientes dos impactos ambientais negativos das sociedades industrializadas. Tal afirmação pode ser comprovada pelos acordos globais de redução das emissões de GEE e pelo desenvolvimento de tecnologias de energia renovável e veículos de zero emissão. As gerações mais jovens (*Millenials*) estão mais propensas a consumir mais serviços e menos bens e apresentam maior interesse em compartilhar do que as gerações anteriores, além de possuírem maior afinidade com as tecnologias digitais, sendo considerados nativos digitais.

A crise econômica, por sua vez, gera uma nova demanda por serviços de baixo custo (*low-cost*) (LIMA, 2018). Finger *et al.* (2017) pontuam que as tecnologias da informação e comunicação (TIC) permitiram a comunicação conveniente e barata através da *internet*, a comunicação universal e a geolocalização através dos *smartphones* e a automatização de processos por meio dos computadores. Todos estes elementos possibilitaram o surgimento de plataformas digitais e reduziram drasticamente os custos de transação, estimulando assim o desenvolvimento da mobilidade compartilhada.

Dentro da mobilidade compartilhada, dois elementos apoiarão o desenvolvimento dos VEs: o surgimento de operadores de serviços de transporte (ex: empresas de *car sharing* e compartilhamento de viagens) e sistemas de intermodalidade (plataformas do tipo *mobility as a service*). Empresas de *carsharing* e compartilhamento de viagens eliminam os custos de compra, posse e manutenção dos veículos para os usuários. Ademais, proporcionam estímulo econômico para adoção de VEs devido ao alto grau de utilização dos veículos (custos operacionais mais baixos que os ICEV). Os sistemas intermodalidade combinam diferentes modos de transporte de forma ótima, limitando o uso do carro e ônibus à primeira e última milha e, portanto, endereçando o problema da autonomia reduzida dos VEs em relação aos ICEV.

Cabe, contudo, ter em mente o objetivo último de política. Significa dizer que mais do que incentivar uma adoção extensiva de veículos elétricos, o resultado almejado é a redução de emissões de GEE. Portanto, as políticas urbanas e de transporte devem se ater a reduzir o número de veículos particulares das vias, principalmente aqueles que se utilizam de combustíveis fósseis, estimulando transportes de massa integrados com modalidades limpas de menor capacidade.

6. TRANSFORMAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO

Martin *et al.* (2017) sugerem que o setor de energia elétrica está no meio de uma transformação. A transição energética tem como pilares:

- a eletrificação de novos usos, englobando grandes setores da economia, como os transportes;

- a descentralização, impulsionada pela queda acentuada nos custos dos *distributed energy resources (DERs)*, como armazenamento distribuído, geração distribuída, resposta da demanda e eficiência energética e;
- a digitalização tanto da rede, com medição inteligente (*smart metering*), sensores inteligentes, automação e outras tecnologias de rede digital, quanto além do medidor, com o advento da Internet das Coisas (*IoT*) e uma disseminação de dispositivos conectados consumidores de energia.

Ainda segundo Martin *et al.* (2017), estas três tendências atuam como um círculo virtuoso (Figura 3), permitindo, amplificando e reforçando o desenvolvimento uma das outras. A eletrificação dos transportes se mostra crítica para atingimento das metas de longo prazo de redução de emissões de carbono e representará uma grande parcela do consumo das energias renováveis. A descentralização do setor de energia tornará os usuários elementos ativos do sistema, o que exigirá uma forte coordenação. A digitalização apoiará as duas tendências permitindo maior controle, incluindo uma otimização do consumo e da produção de energia, além da interação com os consumidores de forma automática e em tempo real.

De acordo com Dijk *et al.* (2013) e Martin *et al.* (2018), o desenvolvimento das tecnologias de energia renovável e o surgimento de tecnologias *smart-grid* e *grid edge* afetarão diretamente a eletrificação dos transportes. O desenvolvimento das energias renováveis intermitentes (solar e eólica) introduzem uma quantidade cada vez maior de fontes de geração de energia não despachável (fontes de energia que podem ser ativadas e desativadas ou ajustadas conforme a demanda) no sistema. A natureza intermitente destas energias exige maior flexibilidade da rede elétrica para manter a frequência constante, o que demanda (aumento da) capacidade de armazenamento dos veículos e da gestão digital da demanda, fornecimento e armazenamento.



Figura 3: Três tendências da transformação do *grid edge*

Fonte: Adaptado de Martin *et al.* (2017)

Dessa forma, destaca-se que a introdução do veículo elétrico não só promove a redução das emissões de CO₂ como apresenta o potencial de otimizar a utilização de fontes de energia renováveis, porém intermitentes, ao fornecer maior confiabilidade à rede. Para tanto, é necessário que a eletrificação extensiva ocorra concomitantemente à transformação do setor elétrico, com os seguintes elementos apoiadores:

- Carregamento inteligente (*smart charging*): Controle da carga de carregamento para se adequar à capacidade da rede (evitando pico de demanda), à utilização de energia renovável (maximizando seu uso) e às necessidades do cliente (tempo e custos). (MARTIN *et al.*, 2018).
- V2X (*vehicle to everything*): Os proprietários de VEs, especialmente os operadores de frota de EV com capacidade de energia previsível, poderiam desempenhar serviços auxiliares ao fornecer o excesso de eletricidade armazenada nas baterias de VEs aos edifícios ou à rede elétrica. (MARTIN *et al.*, 2018).
- Integração com armazenamento descentralizado: Os *hubs* de carregamento de VEs se beneficiariam da integração com a geração e o armazenamento descentralizados para reduzir o impacto na rede de energia local, otimizando o perfil de carga. O uso de baterias de “segunda mão” de VEs em sistemas de armazenamento descentralizados poderia reduzir o custo do armazenamento e contribuir para os objetivos da economia circular (MARTIN *et al.*, 2018).

Portanto, os veículos elétricos associados à transição do setor elétrico poderão, potencialmente, ser utilizados como *decentralized energy resources (DERs)*, tendo a sua demanda por energia controlável (através do *smart charging*), atuando como armazenador de energia descentralizado (baterias) e fonte de energia através do *vehicle to everything (V2X)*, importante para flexibilidade dos sistemas energéticos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eletrificação dos transportes é em grande parte motivada pela redução das emissões de gases do efeito estufa; contudo, é necessário avaliar qual a contribuição efetiva dos VEs para o atingimento deste objetivo, quais os aspectos econômicos envolvidos na eletrificação extensiva dos transportes e identificar qual o papel dos VEs na transformação que está em curso no setor de energia e transporte urbano.

Deve-se atentar ao fato de que não existem veículos 100% limpos, pois até mesmo os BEV's, tidos como de zero emissão, emitem GEE quando se considera toda a cadeia de fornecimento de energia. Neste sentido, com exceção dos veículos do tipo HEV, o benefício ambiental da substituição dos ICEV por VEs depende fundamentalmente da natureza das fontes geradoras de energia que os alimenta. Como demonstrado por Wu e Zhang (2017), a alta proporção de energias limpas e renováveis na matriz energética brasileira torna a substituição dos ICEVs por BEVs e PHEVs uma alternativa para redução das emissões de GEE e atingimento das metas estabelecidas pelos acordos climáticos. Ainda em relação ao aspecto ambiental, prevê-se uma redução limitada da poluição sonora na substituição do motor de combustão interna para o elétrico.

No que se refere aos aspectos econômicos, os veículos elétricos ainda são mais caros quando comparados com os ICEVs principalmente devido aos custos fixos de investimento. Espera-se que no futuro os VEs fiquem mais competitivos graças ao aumento dos preços do petróleo, aos menores custos operacionais, aos incrementos nos preços dos combustíveis fósseis provocados pelas políticas de carbono e à queda nos custos de bateria (tendência que já se observa).

Dada a transformação em curso que está ocorrendo no setor de transporte urbano, as possibilidades para eletrificação extensiva se mostram favoráveis. Com o desenvolvimento da mobilidade compartilhada, os veículos elétricos devem se mostrar mais competitivos economicamente em relação aos ICEV devido ao alto grau de utilização da frota nos serviços

de *car sharing* e compartilhamento de viagens. Os serviços do tipo *Mobility as a Service* favorecem a intermodalidade e limitam a utilização do carro e ônibus a primeira e última milha, endereçando assim o problema de autonomia dos VEs.

Os veículos elétricos possuem um potencial ainda maior de redução de emissões de GEE e de geração de valor. Identifica-se os VEs como peças fundamentais na transformação em curso no setor elétrico com o potencial de otimizar a utilização de fontes de energia renováveis intermitentes fornecendo maior confiabilidade à rede.

Conclui-se, portanto, que existem oportunidades para o desenvolvimento futuro dos veículos elétricos. Para maximização dos benefícios econômicos e ambientais da eletrificação extensiva dos transportes, esta deve ser feita concomitante com o desenvolvimento das tecnologias de geração de energia renovável e digitais. Para tanto, será necessária uma abordagem voltada para as especificidades locais de cada região e desenvolvimento de estudos com intuito de entender as barreiras de desenvolvimento dos veículos elétricos sob a ótica dos usuários, empresas e poder público em cada local. Para que as estratégias de eletrificação sejam bem-sucedidas, deve-se considerar a transição do setor de transporte urbano e os novos padrões de mobilidade.

Recomenda-se pesquisas futuras para investigar possíveis mercados para o uso dos veículos elétricos, como por exemplo, linhas alimentadoras e articuladas às estações de sistemas de transportes de maior capacidade, BRT, e sistemas de ônibus urbano que apresentem uma quilometragem diária inferior à autonomia dos veículos.

No caso do Brasil, identifica-se que uma possível barreira para o desenvolvimento dos veículos elétricos é a forte presença da indústria de biocombustíveis. Neste sentido, recomenda-se a elaboração de estudos futuros que contraponham os benefícios ambientais e econômicos dos veículos movidos a eletricidade e a biocombustíveis e que avaliem a possibilidade de aplicação de veículos do tipo PHEV que fazem uso de biocombustíveis.

Agradecimentos

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adnan, Nadia & Nordin, Shahrina & Rahman, Imran & Vasant, Pandian & Amir Noor, Muhammad. (2017). An Integrative Approach to Study on Consumer Behavior towards Plug-In Hybrid Electric Vehicles Revolution: Consumer Behavior towards Plug-In Hybrid Electric Vehicles. 185-215. 10.4018/978-1-5225-1826-6.ch010
- Ajanovic A, Haas R. (2016) Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success. *Energy* 2016;115: 1451–1458'
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2018). BIG – Banco de Informações de Geração. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>
- ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos (2016). Sistema de Informações de Mobilidade Urbana – Relatório Geral 2014. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2016/9/3/sistemasinformacao-mobilidade-geral_2014.pdf>.
- Bernhard R. e Wayson R.L. (2005). An introduction of Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/914792>>
- Dijk, M., Orsato, R. J., & Kemp, R. (2013). The emergence of an electric mobility trajectory. *Energy Policy*, 52, 135–145.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2016). Balanço Energético Nacional 2016. Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>.
- Finger, Bert, Kupfer, Montero, Wolek, (2017). Research for TRAN Committee – Infrastructure funding challenges in the sharing economy, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels.

- Hagman J., Ritzén S., Stier J., Susilo Y. (2016). Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion Research in Transportation Business & Management.
- IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, (2016). Desafios da mobilidade urbana no Brasil. Brasília: IPEA. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6664/1/td_2198.pdf>
- IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, (2011). Emissões relativas de poluentes do transporte urbano. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5574/1/BRU_n05_emiss%C3%B5es.pdf>.
- Lima, Gregório C. Luz de S. (2018) Mobility as a Service na promoção da mobilidade sustentável: O caso do Rio de Janeiro (2018). Monografia – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024175.pdf>>
- Martin, C., Starace, F., and Tricoire, J.P. (2017). World Economic Forum Future of Electricity: New Technologies Transforming the Grid Edge. World Economic Forum Reports. Disponível em: <<https://www.weforum.org/reports/the-future-of-electricity-new-technologies-transforming-the-grid-edge>>.
- Martin, C., Starace, F., and Tricoire, J.P. (2018). World Economic Forum Electric Vehicles for Smarter Cities: The future of Energy and Mobility. World Economic Forum Reports. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_2018_%20Electric_For_Smarter_Cities.pdf>.
- Ofweek, (2015). The Transmission Loss Rate of Major Countries in the World Disponível em: <<http://power.ofweek.com/2015-01/ART-35002-8300-28926231.html>>
- Palmer K., Tate J. E., Wadud Z., Nellthorp J. (2018) Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. Applied. Energy, 209, pp. 108-119
- Timmers, V.R.J.H., Achten, P.A.J, (2016). Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. Atmospheric Environment. 134, 10-17.
- World Bank, (2016). World Bank Database Available at: <http://data.worldbank.org/>
- Wu, Y.; Zhang, L. (2017). Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? Transportation Research Part D, 51, 129–145.

Gregório Costa Luz de Souza Lima (gregorioluz@pet.coppe.ufrj.br)
Programa de Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
Centro de Tecnologia Bloco H - Sala 106
Cidade Universitária - RJ - Brasil