

Analysis of the Use of Electric Vehicles by Electric Utility Companies Fleet in Brazil

L. A. P. Peres, *Member, IEEE*, J. F. M. Pessanha, J. V. Serra, F. M. F. Particelli and A. C. I. Caldas

Abstract— The urgent need to reduce greenhouse gas emissions along with growing energy security concerns has driven the search for alternatives to the internal combustion engine vehicle. One of the most promising solutions being considered is the electric vehicle. The commercialization of electric vehicles is expected to instigate an array of new business opportunities for electrical utilities, particularly with the advent of the smart grid. This article presents the findings from a study on the potential for electric vehicle deployment into a commercial fleet; focusing particularly on fleet range requirements, economic feasibility and environmental impacts.

Keywords— Electrical vehicle, greenhouse emissions, commercial fleet, distribution utilities.

I. INTRODUÇÃO

O PAINEL Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e a Agência Internacional de Energia (IEA) estimam em 34% e 13% as emissões de gases do efeito estufa geradas no setor de transporte global e norte-americano respectivamente [1]. A necessidade premente de mitigar estas emissões tem incentivado a busca de alternativas aos veículos de combustão interna (VCI). Uma das alternativas mais promissoras é a substituição dos VCI por veículos elétricos (VE). Os primeiros veículos elétricos foram construídos no final do século XIX, porém somente a partir do final dos anos 1980 observa-se uma retomada vigorosa pelo interesse no VE, favorecida pelo progresso tecnológico e pela combinação simultânea das questões políticas, econômicas e ambientais, cujas respostas são incompatíveis com o VCI, mas passam pelo desenvolvimento e disseminação do VE [2], [3]. Acrescente-se que no Brasil enquanto a matriz de energia elétrica é considerada uma das mais limpas do mundo devido à produção majoritária das usinas hidráulicas, a matriz de transporte, ao contrário, apresenta um desempenho de baixa eficiência tendo em vista a predominância quase exclusiva do modal rodoviário baseado nos ciclos Diesel e Otto, que é responsável por 83% das emissões de CO₂ do setor de acordo com o Boletim da Confederação Nacional de Transporte de Janeiro de 2010. Ao lado das questões de caráter global não podem ser excluídas as emissões de caráter local determinadas

pelo monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e outros numerosos poluentes que apesar das limitações regulamentares impostas representam um impacto social desairoso. De acordo com pesquisas realizadas pelo Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Universidade de São Paulo (USP) a má qualidade do ar custa pelo menos US\$ 1 bilhão – cerca de R\$ 2,3 bilhões – aos cofres públicos brasileiros a cada ano, principalmente com as mortes ou tratamento de doenças associadas direta ou indiretamente às doenças, tais como dias de trabalho perdidos, redução de ganhos, entre outros. O estudo conduzido na USP refere-se a seis regiões metropolitanas do país, sendo que o *ranking* dos prejuízos causados pela poluição atmosférica mostra São Paulo (US\$ 300 milhões) na ponta, seguido por Rio de Janeiro (US\$ 250 milhões), Porto Alegre (US\$ 180 milhões), Belo Horizonte (US\$ 150 milhões), Curitiba (US\$ 140 milhões) e Recife (US\$ 10 milhões). Em resumo, os poluentes se tornaram um problema de saúde pública.

A introdução dos VE abre uma série de oportunidades para as distribuidoras de energia elétrica, principalmente com o advento das redes inteligentes [4], [5]. Por exemplo, o consumo mensal de um VE equivale ao consumo de um domicílio, logo é fácil perceber que a massificação do VE amplia o negócio das distribuidoras. O aumento da demanda será bem vindo se ocorrer durante a madrugada, um período de carga leve e, portanto, com capacidade disponível para atender as recargas sem implicar em investimentos adicionais de porte na rede elétrica. Porém, o nível de apropriação destas oportunidades pelas distribuidoras dependerá do mercado potencial do VE e de como será a regulação da infra-estrutura elétrica para recarga das baterias.

Cientes das oportunidades e dos riscos, na Europa, algumas empresas do setor elétrico e fabricantes de automóveis estabeleceram parcerias, muitas vezes com incentivos governamentais, com a finalidade de viabilizar o VE [6]. Atividades desta natureza são registradas de forma semelhante nos Estados Unidos e países asiáticos. A partir de 2006, no Brasil, a Itaipu Binacional estabeleceu uma parceria com a Fiat, a Kraftwerke Oberhasli AG e a empresa MES-DEA para a produção, até 2010, de 50 unidades do Palio Weekend Elétrico, um VE a bateria, equipado com um motor de indução trifásico de 15 kW (20CV), e bateria do tipo *Sodium Nickel Chloride*, comercialmente conhecida como ZEBRA (*Zero Emission Battery Research Activity*). A CPFL desenvolveu um caminhão elétrico para as atividades de manutenção conforme exposto no evento VE-2009, em Campinas, ao lado de outras interessantes iniciativas. Estas considerações são indicativas do potencial desta tecnologia atuar de forma mais significativa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, cujas atividades

L. A. P. Peres, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil, lapp_uerj@yahoo.com.br

J. F. M. Pessanha, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil, professorjfm@hotmail.com

J. V. Serra, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Brasil, joaovitor@jurea.com

F. M. F. Particelli, Light Serviços de Eletricidade S.A., Rio de Janeiro, Brasil, fernanda.particelli@light.com.br

A. C. I. Caldas, Light Serviços de Eletricidade S.A., Rio de Janeiro, Brasil, carolcaldas@light.com.br

de turismo são um enorme campo de aplicação uma vez que nela se situa a segunda maior frota de veículos automotores do Brasil e ocorrerá a Copa do Mundo de 2014 seguida pela Olimpíada de 2016.

O cenário descrito motivou a Light a patrocinar uma pesquisa no âmbito da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, com a finalidade de estabelecer uma metodologia de planejamento e análise para a implantação de veículos elétricos em atividades de transporte na sua área de concessão. De forma mais específica estão sendo estabelecidos procedimentos para inserir a tecnologia veicular elétrica no âmbito da sua frota e dos seus clientes, desenvolvidas concepções e padrões para eletropostos, bem como modelada a avaliação deste mercado. No âmbito do projeto, está em andamento a construção de um eletroposto para recarga das baterias nas instalações da empresa que servirá de protótipo para futuras instalações deste tipo. Para testá-lo será submetido a uma programação envolvendo processos de recarga e comunicação veículo-empresa e usuário-empresa e para isto foi incluso no trabalho a aquisição de um Palio Weekend Elétrico que será introduzido na frota da empresa na execução das atividades tipicamente realizadas pelos demais veículos congêneres da frota.

Neste artigo são apresentados os resultados de uma avaliação da viabilidade técnica da introdução do VE no que diz respeito à autonomia disponível, nas atividades de transporte efetuadas por veículos leves na Light. Adicionalmente, as economias esperadas são estimadas. Para a realização deste estudo foi selecionado um conjunto de 1.227 veículos à combustão interna utilizados nas tarefas atuais de supervisão. A seção 2, a seguir, descreve um breve panorama da tecnologia veicular elétrica e suas tendências. Estatísticas da frota de veículos utilizados pela Light são apresentadas na seção 3 sendo identificados os seguimentos que poderiam ser substituídos por VE. Na seção 4 são estimadas as economias nas despesas com combustíveis e na seção 5 são avaliadas as emissões evitadas com a introdução do VE na frota analisada, tomando como referência o desempenho esperado do Palio Weekend Elétrico. Por fim, na seção 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

II. O VEÍCULO ELÉTRICO

Em um VE típico a propulsão é fornecida por um motor elétrico alimentado por bateria (*battery electric vehicle* – BEV). Também há veículos em que o motor elétrico e a bateria são alimentados por um gerador elétrico acionado por um motor de combustão interna. Estes são denominados por veículos elétricos híbridos (*hybrid electric vehicles* – HEV), sendo que alguns destes ainda permitem recarregar a bateria em uma tomada (*plug-in electric vehicle* – PHEV) como nos BEV. Nos veículos elétricos a bateria (BEV) o acionamento das rodas é feito por um motor elétrico (ME), em geral, sem a necessidade de uma caixa de câmbio. Os tipos de motores mais usados em VE são os motores de indução e os motores de ímã permanente sem escovas, sendo que os primeiros são os de menor custo e mais confiáveis, enquanto os segundos são os mais eficientes [7]. A energia que alimenta o motor é

proveniente da energia armazenada em um conjunto de baterias. Os VE são silenciosos, têm partida suave, poucas vibrações e no caso dos BEV por não terem tanques de combustível não apresentam emissões pelo cano de escape. Apesar destas vantagens, a autonomia do VE é limitada pela bateria e pela sua recarga lenta. No veículo elétrico híbrido (HEV) a bateria e o motor elétrico executam as funções principais, porém são combinados com um motor de combustão interna. Há duas configurações básicas para um HEV: a configuração em série e a configuração em paralelo. No HEV com configuração em série a potência mecânica fornecida por um motor de combustão interna (MCI) move um gerador de energia elétrica e esta, combinada com a energia armazenada em um banco de baterias, alimenta um motor elétrico que aciona as rodas (não existe nenhuma conexão mecânica entre o MCI e as rodas). Durante uma frenagem, o motor elétrico atua como gerador que fornece eletricidade para as baterias (freio regenerativo). A potência requerida pelo ME é fornecida pela bateria, e quando o estado de carga da bateria está dentro do mínimo pré-determinado, o MCI aciona o gerador para recarregar a bateria. Em geral, o sistema de controle desliga o MCI quando o estado de carga da bateria encontra-se em um nível desejável. O MCI pode ficar desligado enquanto o veículo estiver parado e funcionar apenas para carregar a bateria, de modo que sua operação se faz nas condições em que apresenta o melhor rendimento [8]. Assim, as emissões, decorrentes da queima incompleta do combustível são consideravelmente reduzidas. Na configuração em série não há necessidade da caixa de transmissão, constituindo-se numa vantagem de custo. Porém, uma desvantagem desta configuração diz respeito ao tamanho da bateria e do motor elétrico.

No HEV, com configuração em paralelo, o ME e o MCI são aplicados simultaneamente, de forma combinada ou independente, no acionamento das rodas. Em uma configuração bastante comum, o motor de combustão interna fornece a tração como em um VCI, mas dispõe de potência suplementar suprida por um banco de baterias e um gerador elétrico além da frenagem regenerativa. Na configuração paralela, o veículo não precisa de um gerador dedicado, pois o próprio motor elétrico é usado como gerador para recarregar as baterias. A desvantagem comparada à configuração série é que o sistema requer uma estratégia de controle mais sofisticada para o uso das duas fontes de energia. Também há uma configuração série-paralela usualmente encontrada nos atuais carros elétricos *plug-in híbridos* (PHEV), cujas baterias podem ser carregadas em qualquer tomada elétrica.

Os veículos elétricos podem funcionar como uma fonte de energia suplementar em horários adequados e até mesmo em caso de falhas no fornecimento regular de energia elétrica pela rede de distribuição. Esta característica vem demandando um grande esforço de novos desenvolvimentos, pois agrega valor substancial às atuais concepções das redes inteligentes [4], [5].

A principal barreira técnica para a disseminação em larga escala do VE está associada com a tecnologia das baterias. A capacidade da bateria limita a autonomia do veículo, porém com a tecnologia atual este limite não representa um problema

nas áreas urbanas, onde os trajetos diários são curtos, em geral inferiores a 100 km, sendo a média algo da ordem de 54 km. Atualmente, vários tipos de baterias vêm sendo comercializados concomitantemente às pesquisas de fontes eletroquímicas mais avançadas. O emprego de supercapacitores, associados às baterias atuais, apresenta um potencial para vencer as dificuldades apontadas. Além disso, continuam intensas as investigações com respeito ao emprego das células a combustível. Cumpre, entretanto afirmar, que do ponto de vista da eficiência energética os estudos referentes ao processo completo, isto é, desde a produção da energia, passando pelo reabastecimento, incluindo a propulsão e o deslocamento do veículo (*well to wheel analysis*), o BEV é o tipo que se mostra com melhor desempenho apesar da sua menor autonomia [9].

Todavia, uma inovação na forma de comercializar o VE torna possível diminuir os efeitos da atual limitação e ainda reduzir o preço do VE aos compradores. A empresa Better Place propõe um novo modelo de negócio para comercializar o VE. Para isto, é pressuposta a instalação de uma rede de postos para a recarga ou troca rápida das baterias. Neste modelo, a venda de um VE vem acompanhada pela contratação de um plano que dá ao proprietário o direito de utilizar os serviços da rede autorizada, mediante o pagamento de um valor mensal de acordo com o número de trocas realizadas ao longo do mês. Nesta estratégia a bateria seria comercializada como um telefone celular em um plano de telefonia móvel. A diferença é que os consumidores comprarão uma quantidade mensal de quilômetros, em vez de minutos de ligação telefônica.

Em janeiro de 2008, a Better Place anunciou uma parceria com o consórcio Renault-Nissan para a formação do primeiro operador de rede de recarga elétrica em Israel. A partir desta iniciativa, os governos de alguns países europeus já demonstraram interesse ou já estão engajados na implantação de uma infra-estrutura semelhante com a finalidade de disseminar o VE em larga escala.

III. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA FROTA DA LIGHT

Na Light, as atividades de supervisão contam com o apoio de uma frota formada por 1.227 veículos: 5 motocicletas, 823 veículos de 2, 4 e 5 portas e 389 furgões e pick-ups. Para cada veículo foi informado o modelo, o ano de fabricação, o tipo de combustível (álcool, gasolina ou ambos), o consumo de combustível (em litros) e a distância percorrida (em km) em alguns meses do triênio 2006-2008.

A partir das informações mensais foi possível calcular o rendimento médio (km/litro) e a distância média percorrida diariamente (km/dia) por cada modelo, considerando-se um total de 20 dias úteis por mês. As médias estimadas são apresentadas na Tabela I. As estimativas indicam que em média os trajetos percorridos diariamente pelos veículos da frota analisada não ultrapassam os 100 km e, portanto, os trajetos estão dentro da autonomia do BEV.

A análise estatística realizada com o histograma acumulado das distâncias percorridas diariamente pelos veículos (Fig. 1) revela que as necessidades de transporte das atividades de

supervisão envolvem majoritariamente (95% dos casos) trajetos diários de até cerca de 100 km, portanto, dentro do limite de autonomia de um VE atualmente comercializado. Conforme indicado pelo gráfico, no lado esquerdo da Fig. 2, entre os veículos de 2, 4 e 5 portas a maior parte percorre trajetos diários menores que 100 km. A média das extensões dos trajetos diários percorridos por estes veículos é da ordem de 66,44 km. Porém, são observados alguns *outliers* (indicados com +) nos quais as distâncias percorridas são superiores a autonomia de um VE típico.

TABELA I
MÉDIAS DOS RENDIMENTOS E DISTÂNCIAS PERCORRIDAS.

Tipo	Modelo	Número de veículos	Rendimento (km/litro)	Distância percorrida diariamente (km)
MOTOCICLETAS	CG 125 CARGO ²	4	19,06	8,60
	XLR 125 ES ²	1	8,50	2,33
AUTOMÓVEIS	Celta 1.0 8V ²	122	10,45	55,91
	Celta Life 1.0 ³	50	8,52	51,76
	Fiesta GL Class ²	49	10,23	60,92
	Fiesta Street ²	1	9,08	42,99
	GOL 16V ²	166	9,45	43,59
	Gol City ³	42	10,30	50,63
	Gol City ²	211	10,38	75,10
	Palio Fire 1.0 ³	146	11,16	75,71
	Palio Weekend ²	2	8,97	55,98
	Parati 16V ²	1	9,29	24,33
	Parati plus 1.6 ³	27	10,68	92,18
	Peugeot 306 ²	6	10,08	60,11
	FURGÕES & PICK-UPS	A-20/6 ¹	1	5,84
C-10 ²		1	6,11	21,88
Kombi ²		1	8,41	15,98
Peugeot ²		21	7,79	45,26
Fiorino 1.3 ³		230	8,64	61,03
Kombi ²		5	7,05	25,58
Montana 1.8 ³		29	7,99	73,77
Montana ³		1	5,84	47,50
Parati 16V ²		4	9,39	34,85
Peugeot Partner ²	106	7,38	41,23	

Nota: 1 = álcool, 2 = gasolina e 3 = flex fuel

No lado direito da Fig. 2 é apresentado um gráfico semelhante para furgões e pick-ups, onde mais uma vez se pode observar que a maior parte destes veículos percorre trajetos diários menores que 100 km.

Ressalta-se que o Palio Weekend Elétrico adquirido pela Light no âmbito desta pesquisa tem uma autonomia estimada em 120 km, portanto suficiente para executar a maioria das tarefas de supervisão já realizadas pelos VCI.

A introdução do Palio Weekend Elétrico na frota da Light permitirá a realização de testes com o veículo visando a aferição da sua autonomia quando submetido ao mesmo nível de carga transportada nos trajetos tipicamente percorridos pelos demais veículos da frota, bem como testar as instalações de recarga.

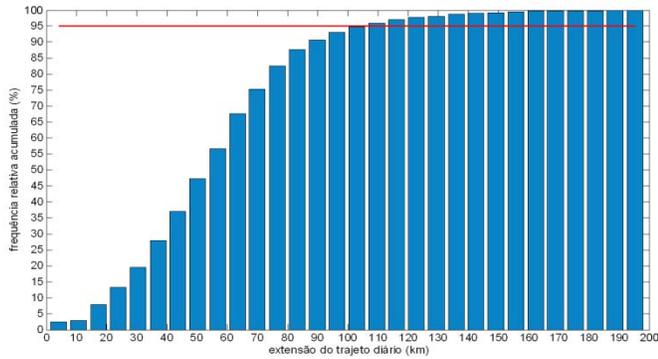


Figura 1. Histograma das distâncias percorridas diariamente por cada veículo.

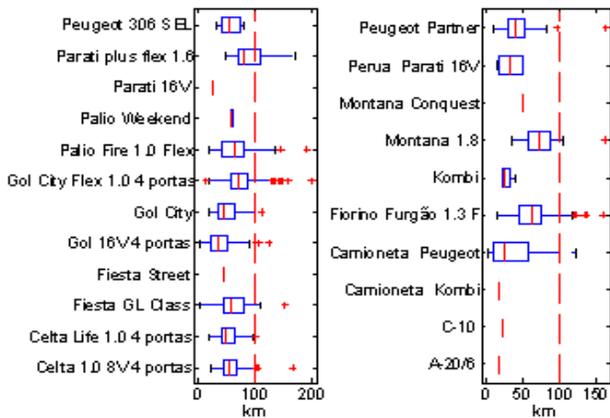


Figura 2. Box-plots das distâncias percorridas diariamente por cada modelo.

IV. ECONOMIA NA DESPESA COM COMBUSTÍVEL

O motor do Palio elétrico é alimentado por uma bateria Zebra com capacidade de 19,2 kWh. Dada a autonomia de 120 km até a descarga total da bateria, pode-se estimar um rendimento de aproximadamente 6 km/kWh ($\cong 120/19,2$). A versão com motor à combustão interna tem um rendimento de cerca de 9 km/l em trajetos urbanos. O preço da gasolina comum na cidade do Rio de Janeiro varia entre R\$ 2,479 e R\$ 2,999. Já a tarifa de energia elétrica da classe residencial BT da Light é apresentada na Tabela II, onde é possível observar o efeito da incidência dos impostos.

Com base nestes números pode-se estabelecer uma comparação dos custos de abastecimento do modelo Palio Weekend na versão elétrica com o mesmo modelo à combustão interna, para um trajeto diário de 100 km. Conforme indicado na Tabela III, as despesas com combustível no modelo elétrico são bem menores que as estimadas para o modelo convencional, indicando uma significativa margem de economia. Porém ressalta-se que a economia estimada depende da estrutura de impostos que incidem sobre a energia elétrica e a gasolina e que as estimativas obtidas refletem apenas a situação atual no Rio de Janeiro. No caso da Light esta economia seria ainda maior, pois a recarga das baterias seria incluída no consumo próprio da concessionária.

TABELA II
TARIFAS DA CLASSE RESIDENCIAL BAIXA TENSÃO R\$/KWH.

Tarifa homologada pela Resolução ANEEL N° 1085/10 de 3/11/2010 sem incidência de ICMS/PIS/COFINS		0,31769
Tarifa com PIS/COFINS isenta de ICMS		0,33700
Tarifa com a incidência de ICMS	Consumo até 300 kWh (ICMS de 18%)	0,41653
	Consumo acima de 300 kWh (ICMS de 30%)	0,49431

TABELA III
DESPESAS COM COMBUSTÍVEIS.

Modelo	Rendimento	Consumo para percorrer 100 km	Preço & Tarifa	Despesa (R\$)
Palio Weekend Elétrico	6 km/kWh	16,7 kWh	0,49431 R\$/kWh ¹	R\$ 8,25
			0,41653 R\$/kWh ²	R\$ 6,96
			0,33700 R\$/kWh ³	R\$ 5,63
			0,31769 R\$/kWh ¹	R\$ 5,31
Palio Weekend à Combustão interna	9 km/l	11,1 litros	2,999 R\$/litro	R\$ 33,29
			2,479 R\$/litro	R\$ 27,52

Nota: (1) sem incidência de ICMS/PIS/COFINS, (2) com PIS/COFINS, (3) com PIS/COFINS e ICMS de 18%, (4) com PIS/COFINS e ICMS de 30%.

TABELA IV
DESPESAS MENSAIS COM COMBUSTÍVEIS.

Modelo	Rendimento	Consumo para percorrer 100 km/dia	Preço & Tarifa	Despesa (R\$)
Palio Weekend Elétrico	6 km/kWh	16,67 kWh x 20 dias = 333,33 kWh	0,49431 R\$/kWh	164,77
Palio Weekend à Combustão interna	9 km/l	11,1 litros x 20 dias = 222,22 litros	2,999 R\$/litro	666,44
			2,479 R\$/litro	550,88

Na Tabela IV são apresentados o consumo e a despesa mensal com combustíveis, considerando 20 dias úteis. O consumo mensal apresentado na Tabela IV é bem superior ao consumo médio por unidade consumidora da classe residencial da Light, estimado em 190,77 kWh/mês no ano de 2008. Para trajetos diários acima de 60 km, o consumo de energia elétrica é superior ao consumo médio de energia elétrica por unidade consumidora da classe residencial, sugerindo que a disseminação do VE implica em um significativo mercado potencial para a distribuidora.

V. EMISSÕES EVITADAS

Tendo em vista que o montante de emissões veiculares pelo tubo de escapamento dos veículos à combustão interna (VCI) é proporcional à distância percorrida e ao número de veículos, esta análise será procedida de forma comparativa considerando-se como referência uma frota de 100 veículos leves, de quatro rodas, com capacidade para cinco passageiros, admitindo-se todos de 1000 cilindradas ou 1.0, que realize percursos de 100 km/dia. Os cálculos são procedidos observando-se os limites estabelecidos pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

(PROCONVE) e os fatores médios de emissão adotados pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Estas premissas refletem as observações disponíveis dos levantamentos realizados ao longo da pesquisa a que se refere este trabalho permitindo que os resultados possam ser facilmente extrapolados para frotas mais numerosas. A fim de penalizar os VE e com isto tornar a comparação apresentada mais robusta, por hipótese, serão admitidos VCI novos a partir de 2008. Além disto, não são consideradas as emissões evaporativas dos VCI assim como as emissões do tipo *well to wheel*, isto é, do ciclo de produção, transporte e reabastecimento, amplamente favoráveis aos VE, tendo em vista que no Brasil as fontes geradoras são de forma majoritária de origem hidroeétrica. Uma descrição mais detalhada destas emissões pode ser consultada em [10]. Vale notar que as emissões do tubo de escapamento se referem àquelas com as quais as empresas concessionárias podem exercer um controle direto mediante a gestão das frotas utilizadas, incluindo, a mudança de tecnologia veicular empregada. Quanto à frota correspondente de VE foi considerada composta por carros de porte similar aos VCI, correspondente a um modelo do tipo Palio com sistema de propulsão tendo como fonte de energia exclusivamente baterias eletroquímicas.

De uma maneira geral, devido aos progressos tecnológicos introduzidos nos VCI passa a ter relevância o decréscimo considerável que os fatores de emissão dos poluentes legislados vêm sofrendo enquanto que o dióxido de carbono, um dos Gases de Efeito Estufa – GEE apresenta, ao contrário, um aumento do seu fator de emissão. Esta situação é uma consequência natural da reação de combustão que em última análise resultaria apenas em CO₂ caso a queima do combustível fosse perfeita. A melhoria da eficiência dos motores e os catalisadores transformam as emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos em dióxido de carbono e água, aumentando, portanto, as emissões de CO₂ dos veículos mais novos. Segundo o relatório do IPCC, o CO₂ é responsável por mais de 97% das emissões totais de GEE de fontes móveis. Isto conduz a ênfase que este trabalho dedicou às emissões de CO₂ visto a sua estreita ligação com as Mudanças Climáticas e as possibilidades de utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, preconizado pelo Protocolo de Kyoto. Com respeito às emissões de poluentes produzidas pelos VCI foram consideradas aquelas de maior influência, ou seja, o CO (monóxido de carbono), o HC (hidrocarbonetos não queimados) e o NO_x (óxidos de nitrogênio) e o CHO (aldeídos), visto que as demais substâncias os veículos novos apresentam os fatores legislados relativamente baixos e em declínio de forma a reduzir os seus impactos.

Tendo em vista a grande penetração dos carros *flex fuel* assumiu-se que em 78% dos trajetos percorridos os VCI funcionaram com Álcool Etilico Hidratado Combustível (AEHC). Com isto procurou-se levar em conta os efeitos sazonais da oferta deste combustível que em determinadas épocas faz com que seu preço não seja atrativo. Portanto, apenas 22% dos trajetos percorridos utilizaram Gasolina C,

admitindo-se um conteúdo de 20% de Álcool Etilico Anidro Carburante (AEAC). Esta hipótese penaliza os VE no que tange às emissões evitadas de CO₂ caso se utilize o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, preconizado pelo Protocolo de Kyoto. Para a porcentagem restante adotou-se o funcionamento exclusivamente com gasolina. A frota assim constituída é composta de veículos novos (ano modelo 2008) com os quais é evoluído o seu desempenho energético e ambiental ao longo de períodos anuais, conforme estas premissas estipuladas.

TABELA V
DESEMPENHO MÉDIO DOS COMBUSTÍVEIS.

Combustível	Consumo de combustível (km/litro)
Gasolina C	11,30(*)
AEHC (100%)	7,81

Nota (*) Desempenho correspondente à gasolina C com teor de álcool a 20%.

TABELA VI
FATORES MÉDIOS DE EMISSÃO (FE) DE VEÍCULOS NOVOS.

Combustível	Consumo de combustível				
	CO	HC	NO _x	CHO	CO ₂
Gasolina C	3,73 g/litro	0,90 g/litro	0,90 g/litro	0,023 g/litro	2167 g/litro
	0,33 g/km	0,079 g/km	0,079 g/km	0,00204 g/km	191,77 g/km
AEHC (100%)	3,67 g/litro	0,86 g/litro	0,55 g/litro	0,109 g/litro	1382 g/litro
	0,47 g/km	0,11 g/km	0,07 g/km	0,014 g/km	179,65 g/km

TABELA VII
FATORES DE DETERIORAÇÃO (FD) E EMISSÃO (FE) CORRIGIDOS DE CO E HC.

Fatores de deterioração para distância média anual de 24.000 km, ou seja, 100 km/dia x 12 meses x 20 dias úteis						
Períodos Anuais	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
FD (CO)	1	1,07	1,13	1,20	1,27	1,28
FD (HC)	1	1,08	1,17	1,25	1,34	1,35
Fatores de emissão corrigidos para gasolina C						
FE(CO) x FD(CO)	0,330	0,352	0,375	0,397	0,419	0,424
FE(HC) x FD(HC)	0,080	0,086	0,093	0,100	0,106	0,108
Fatores de emissão corrigidos para AEHC						
FE(CO) x FD(CO)	0,470	0,508	0,550	0,588	0,630	0,635
FE(HC) x FD(HC)	0,110	0,119	0,129	0,138	0,147	0,149

De forma conservativa, o trabalho em pauta estabelece os elementos para a construção de uma “linha de base” caso se pretenda aplicar o MDL. Acrescente-se que devido à ausência de estatísticas mais detalhadas não se dispõe da relação entre os trechos de percurso urbano e aqueles de rodovia para empresas de energia elétrica assumindo-se desta forma para os fatores de emissão e consumos específicos dos veículos a combustão interna valores médios que correspondem às condições de trajeto urbano indicados na Tabela V. Para a estimação destes dados, foi utilizado como referência o trabalho [11] descrito em [12]. Na Tabela VI são apresentados os fatores de emissão (FE) para o CO, HC, NO_x, CHO e CO₂ dos veículos novos.

A partir da Tabela VI e admitindo-se as premissas consideradas com respeito às distâncias acumuladas foram calculados os fatores de deterioração relativos ao CO e HC que permitiram a obtenção dos fatores de emissão corrigidos aplicáveis ao final de cada ano de utilização dos veículos, conforme Tabela VII. Neste caso a partir do sexto ano os valores encontrados se estabilizam.

TABELA VIII
EMISSIONES ANUAIS DE CO E HC DA FROTA TÍPICA DE 100 VEÍCULOS.

Períodos Anuais	22% de VCI a Gasolina C na frota de 100 veículos		78% de VCI Flex AEHC na frota de 100 veículos		Emissões Totais da Frota	
	CO	HC	CO	HC	CO	HC
0-1	0,174	0,042	0,880	0,206	1,054	0,248
1-2	0,186	0,046	0,939	0,223	1,125	0,269
2-3	0,196	0,049	0,998	0,241	1,194	0,290
3-4	0,210	0,053	1,058	0,258	1,268	0,311
4-5	0,221	0,056	1,117	0,275	1,338	0,331
5-6	0,224	0,057	1,129	0,279	1,353	0,336

Com a reunião dos valores das Tabelas V, VI e VII foi possível determinar as estimativas das emissões anuais de CO e HC, cujos resultados encontram-se na Tabela VIII. Na seqüência, a Tabela IX refere-se às emissões anuais das demais substâncias estudadas, isto é, NOx, CHO e CO₂, que se mantêm constantes em todos os anos.

TABELA IX
EMISSIONES ANUAIS DE NOx, CHO E CO₂ DA FROTA TÍPICA DE 100 VEÍCULOS.

Combustível	NOx (t)	CHO (t)	CO ₂ (t)
Gasolina C	0,042	0,001	101,255
AEHC	0,132	0,026	331,250
Emissões Totais da Frota	0,174	0,027	432,250

Deve-se notar que as Tabelas VIII e IX apresentam as emissões provenientes da frota estudada de VCI. Tais valores correspondem às emissões evitadas dos tubos de escapamento caso a frota fosse composta de VE. Com respeito à avaliação da quantidade de CO₂ não renovável desconsidera-se a parcela de CO₂ proveniente do AEAC (Álcool Etílico Anidro Carburante) contida na gasolina quando os veículos *flex-fuel* operam exclusivamente com Gasolina C. Esta parcela não é objeto de utilização de MDL assim como no período de funcionamento apenas com AEHC. A seguir, na Tabela X destacam-se as emissões totais de CO, HC e NOx e CO₂ de cem VCI em um período de 10 anos.

TABELA X
EMISSIONES EVITADAS PELA SUBSTITUIÇÃO DA FROTA DE 100 VCI POR VE EM 10 ANOS (VALORES EM TONELADAS).

CO	HC	NOx	CHO	CO ₂
12,75	3,13	1,74	0,27	4.325,10

Tomando-se o grupo de 100 veículos 1.0 funcionando com gasolina C, em 22% dos trajetos considerados, do total de CO₂ emitido, é preciso identificar aquele de origem fóssil e objeto de aplicação de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo). Análises a este respeito são descritas em [12] e o valor encontrado de CO₂ não renovável foi calculado de

acordo com a expressão (1) derivada em [13], levando em conta as densidades iguais a 0,740 e 0,791 Kg/litro para a queima estequiométrica da gasolina automotiva (C₈H₁₈) e do AEAC (C₂H₅OH) respectivamente que resulta na Gasolina C adotada:

$$p(CO_2 | G) = \frac{3,0877m_G}{m(CO_2 | G) + m(CO_2 | A)} \cdot 100\% \tag{1}$$

onde:

- $p(CO_2 | G)$ é a porcentagem de CO₂ na Gasolina (C₈H₁₈)
- m_G é a quantidade de massa de gasolina no combustível misturado em Kg / litro
- m_A é a quantidade de massa de álcool no combustível misturado, em Kg / litro
- $m(CO_2 | G) = 3,0877m_G$
- $m(CO_2 | A) = 1,9130m_A$

Nestas condições, 85,79 % do total de CO₂ emitido quando os veículos operam com Gasolina C podem ser considerados não renováveis, totalizando 868,67 toneladas em um período de 10 anos para cada grupo de cem veículos *flex-fuel*. Desta forma, para a frota da Light constituída de 823 veículos, verifica-se que podem ser evitadas as emissões de sete milhões de toneladas no período estudado o que equivale a ganhos da ordem de 210 milhões de dólares, assumindo um preço do crédito de carbono igual a 30 US\$/tonelada, conforme vem sendo utilizado pela *British Parliamentary Committee on Climate Change*. Observe-se que como a frota é constituída de 22 veículos 1.0 funcionando com gasolina C e 78 com AEHC do total de CO₂ emitido, apenas 866,13 toneladas são de origem fóssil e objeto de aplicação de MDL considerando-se a gasolina C com a adição de 20% de AEAC.

TABELA XI
CONSUMOS ANUAIS DE COMBUSTÍVEIS DA FROTA DE 100 VEÍCULOS.

Tipo de combustível utilizado	Consumo (litros)
Gasolina C	46.725,66
AEHC	239.692,70

Quanto ao desempenho energético, os dados indicados na Tabela XI, referentes aos consumos específicos da frota estudada, permitiram calcular os consumos anuais de combustíveis e que se encontram indicados na Tabela XII.

Com intuito de evidenciar o desempenho energético da frota em estudo foram levados em consideração os dados do poder calorífico inferior e densidade dos combustíveis, publicada pelo Ministério de Minas e Energia e que possibilitaram construir a Tabela XIII.

A Tabela XIII expressa os valores encontrados, indicando de forma comparativa a energia despendida pelos 100 VE em relação aos períodos em que os VCI trafegam com Gasolina C e AEHC, exclusivamente.

Em um período de 10 anos são consumidos pelo grupo de cem VCI 467.257 litros de gasolina C e 2.396.927 litros de AEHC enquanto que a grupo de 100 VE utiliza 3.996 MWh. Com isto, podem ser obtidos os consumos de energia

equivalente em MWh. De fato, como os veículos à combustão interna funcionando com gasolina C consomem 4.181 MWh e funcionando com AEHC, consomem uma energia igual 14.204 MWh resulta um total de 18.485 MWh.

TABELA XII
DENSIDADE DE ENERGIA DE COMBUSTÍVEIS AUTOMOTIVOS (KWH/LITRO).

Combustível	PCI (*) (kcal/kg)	Densidade (kg/litro)	kWh/litro
Gasolina Automotiva	10400	0,740	9,241
Gasolina C (20% de AEAC)	9670	0,750	8,433
AEAC	6750	0,791	6,208
AEHC	6300	0,809	5,926

Nota(*): PCI – Poder calorífico inferior

TABELA XIII
DESEMPENHO DAS FROTAS DE VE E VCI NO PERÍODO DE 10 ANOS.

Energia	VE	VCI com Gasolina C	VE	VCI com AEHC
MWh	879	4.181	3.117	14.204

Estes resultados evidenciam um desempenho, em termos de consumo de energia equivalente cerca de quatro vezes maior do VCI em relação ao do VE similar para um mesmo trajeto, que é compatível com aquele encontrado em modelo de simulação já validado e desenvolvido em [14].

VI. CONCLUSÕES

Os veículos elétricos não são uma idéia nova e várias tentativas no passado não alcançaram êxito. Atualmente, observa-se um interesse renovado nos veículos elétricos em um contexto diferente das experiências anteriores em que distintos modelos de VE se mostram aptos para a conquista de fatias do mercado.

As estatísticas da frota da Light indicam que o veículo elétrico atende as necessidades de transporte da empresa, podendo desempenhar boa parte das atividades de supervisão atualmente realizadas por meio de veículos leves com motor de combustão interna. A substituição de veículos à combustão interna por veículos elétricos faz com que se reduza a um terço as despesas anuais com combustíveis na frota da empresa.

Quanto ao desempenho energético verificou-se que em termos de energia equivalente é quatro vezes maior o consumo do VCI em relação ao do VE similar para um mesmo trajeto. No tocante às emissões, computando-se apenas aquelas pelo tubo de escapamento, são evitadas para cada 100 veículos considerados, num período de 10 anos, 12,75 t de CO₂, 3,13 t de HC, 1,74 t de NO_x, 0,27 de CHO propiciando uma considerável melhoria da qualidade do ar. As emissões de CO₂ não renovável foram estimadas neste período iguais a 7 milhões de toneladas podendo-se admitir um montante em termos de créditos de carbono da ordem de 210 milhões de dólares.

Apesar da introdução de veículos elétricos na frota das concessionárias de distribuição reduzir as despesas com combustíveis é desejável que o preço da energia elétrica, em especial as alíquotas de ICMS sejam mais atrativas nos eletropostos comerciais tendo em vista a diminuição das

emissões atmosféricas e melhor uso da energia. A comunicação empresa-veículo aliada às técnicas de redes inteligentes permite o oferecimento de descontos tarifários nos horários fora de ponta. Todavia, um dos maiores desafios para a introdução do VE se deve ao seu preço ser altamente aviltado pela carga tributária incidente no Brasil, pois supera a do veículo à combustão interna ao se considerar o total dos impostos federais (IPI) e estaduais (ICMS e IPVA). Ao contrário, a legislação de vários países foi modificada em prol da eficiência e dos benefícios ambientais dispondo até mesmo de diversos incentivos fiscais para acelerar a penetração dos veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Hankey, J.D. Marshall “Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions”, Energy Policy, 2009.
- [2] S. D’Agostino “The electric car: a historical survey on the motives driving its existence”, IEEE Potentials, 1993.
- [3] K. G. Höyer “The history of alternative fuels in transportation: the case of electric and hybrid cars”, Utilities Policy, v. 16, pp. 63-71, 2008.
- [4] C. V. Boccuzzi, J. C. O. Mello “A Energia do futuro: mercados de atacado e varejo se fundindo”, XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, Brasil, Novembro, 2009.
- [5] C. V. Boccuzzi “Sistemas de Distribuição Inteligentes (Smart Grid) e Veículos Elétricos”, I Seminário Brasileiro Veículos Elétricos & Rede Elétrica – VER 2009, Rio de Janeiro, Brasil, Junho, 2009
- [6] M. Brown, P. Atherton, J. Lawson “All Hail the Electric Car but where Will plug them in ?, Citigroup”, september 2009, disponível em <http://www.apve.pt/upload/docs/citi.pdf>
- [7] G. Nanda, N. A. Kar “Survey and comparison of characteristics of motor drives used in electric vehicles”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering - CCECE/CCGEI, Ottawa, May, 2006.
- [8] W. Johanna “Modeling of Components for Conventional Car and Hybrid Electric Vehicle in Modelica”, Master’s thesis LiTH-ISY-EX-3489-2004. Dep. of Electrical Engineering, Linköpings universitet. Sweden, P.77, Maio, 2004.
- [9] P. Erber, “Veículos Elétricos & Redes Elétricas”, 1º Seminário Brasileiro Veículos Elétricos & Rede Elétrica – VER 2009, Rio de Janeiro, Brasil, Junho, 2009.
- [10] L. A. Pecorelli Peres, T. C. A. Rosso, P. M. Pinto, “Subsídios Metodológicos para a Avaliação das Emissões Anuais de Veículos Leves em Regiões Metropolitanas”, 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – CBES, Joinville, Setembro, 2003.
- [11] F. Damasceno “SFS – Software Flexfuel Sensor”, Magnetti Marelli, Julho, 2004.
- [12] R. R. Linke “A PROCONVE & PROMOT Resultados e Desafios Futuros”, Seminário Proconve: Necessidades e Impasses Iminentes, São Paulo, março, 2007.
- [13] L. A. Pecorelli Peres Metodologia de Análise de Desempenho Ambiental de Veículos Elétricos; Relatório Especial para a Empresa Ampla Energia E Serviços S.A.; Janeiro de 2008.
- [14] A. G. Simpson “Parametric Modelling of Energy Consumption in Road Vehicles”, PHD Thesis, The University of Queensland, Austrália, February, 2005.



L. A. P. Peres é engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1970 com M.Sc. e D.Sc em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 1977 e 2000 respectivamente. É professor de engenharia elétrica e da pós-graduação em engenharia mecânica na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) onde coordena o Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas. Dr. Pecorelli Peres trabalhou no planejamento e operação do sistema elétrico brasileiro na Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras, na Eletrobrás e em Furnas por mais de 30 anos. É membro do IEEE, fundador da Associação Brasileira do Veículo Elétrico e autor de livros, pesquisas e de vários trabalhos técnicos.



J. F. M. Pessanha é bacharel em Estatística pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas (ENCE) em 1992 e engenheiro eletricitista pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 1994. Obteve o grau de M.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1999 e D.Sc pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2006, ambos em engenharia elétrica. Dr.

Pessanha é Professor do curso de graduação em estatística do Instituto de Matemática e Estatística da UERJ.



J. V. Serra é engenheiro mecânico formado pelo Imperial College London em 2006 com M.Eng em mecânica nesta instituição (2007) e MSc em pesquisa operacional pela London School of Economics (2008). Atualmente é consultor independente no ramo de tecnologias limpas, com foco em transportes elétricos. Autor do livro *Electric Vehicles: Technology, Policy and Commercial Development*, que será

publicado pela Earth Scan em 2011.



F. M. F. Particelli é engenheira química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (Escola de Química, 1994) com Mestrado em administração pela Coppead-UFRJ em 1998. Atualmente desenvolve projetos de inovação e de geração distribuída na Light Serviços de Eletricidade S.A.



A. C. I. Caldas é engenheira eletricitista com ênfase em controle de processos pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2006. Obteve o M.Sc. em metrologia pela PUC-Rio em 2008. Atualmente desenvolve projetos de eficiência energética na Light Serviços de Eletricidade S.A.