



AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E CONVENCIONAIS INCORPORANDO VARIABILIDADE: EMISSÕES DE GEE E CUSTOS DE CICLO DE VIDA

P. Marques¹ & F. Freire¹

¹ ADAI/LAETA, Centro para a Ecologia Industrial - Universidade de Coimbra

Os veículos eléctricos assumem crescente relevância nos cenários futuros de mobilidade. Este artigo apresenta uma avaliação comparativa de ciclo de vida de veículos eléctricos a bateria (BEV) e convencionais (ICE, gasolina ou diesel), incorporando variabilidade nos consumos energéticos durante a utilização. O principal objectivo é avaliar comparativamente a intensidade de Gases com Efeito de Estufa (GEE) e os custos económicos por quilómetro percorrido. Desenvolveu-se um modelo global para 2 gamas de veículos ligeiros de passageiros (subcompactos e compactos), seus componentes (e.g. bateria) e o sistema de geração de eletricidade, com base num inventário físico e económico de ciclo de vida. Assumiu-se uma utilização de 20 000 km por ano, para 10 anos de vida útil. Apresenta-se uma análise comparativa das emissões de GEE dos veículos ($\text{gCO}_2\text{eq/km}$) eléctricos e convencionais em função da intensidade de GEE da geração de eletricidade ($\text{gCO}_2\text{eq/kWh}$), incorporando $\pm 10\%$ de variabilidade nos consumos de energia. Efectou-se uma análise económica (método do custo anual equivalente), considerando 2 tarifários de eletricidade (contexto Português), 2 taxas de actualização (5% e 10%) e incorporando $\pm 50\%$ de variabilidade no consumo e custo de energia.

1. Introdução

Os veículos eléctricos assumem crescente relevância nos cenários futuros de mobilidade. É, no entanto, fundamental avaliar estes veículos em termos económicos e de emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) considerando uma perspectiva global de ciclo de vida dos veículos e seus componentes (e.g. bateria), assim como da geração de eletricidade. Este tipo de avaliação integrada permite comparar veículos eléctricos (VE) e veículos convencionais (ICE), assim como identificar oportunidades de desenvolvimento tecnológico e de melhoria nos aspetos e fases do ciclo de vida mais críticos. O presente artigo tem por objetivo apresentar um modelo de ciclo de vida desenvolvido para veículos, com base num inventário físico e económico para Portugal. Foram caracterizadas as seguintes tecnologias: BEV (veículo eléctrico 100%), Diesel (ICE) e Gasolina (ICE), para 2 gamas de veículos: subcompacto (citadinos) e compacto (médio a longo-curso). No que respeita às emissões de GEE, foram analisados comparativamente os BEV e ICE em função da intensidade de GEE da geração de eletricidade ($\text{gCO}_2\text{eq/kWh}$), de modo a avaliar, em termos gerais, a influência da intensidade de GEE da geração de eletricidade, incorporando variabilidade nos consumos. Por final apresenta-se uma análise de custo por km, realizada com base no método do Custo Anual Equivalente (CAE), incorporando variabilidade no consumo e no custo de energia. Foram considerados 2 tarifários de eletricidade para o carregamento do BEV e realizada uma análise de sensibilidade ao valor da taxa de actualização (5% e 10%).



2. Modelo de Ciclo de Vida

Os modelos desenvolvidos para cada tecnologia (BEV e ICE) são apresentados na figura 1. O modelo considera uma perspectiva global de ciclo de vida dos veículos e seus componentes (e.g. bateria), assim como do sistema de geração de eletricidade. Na figura 1 as fases de produção dos veículos e de fim de vida são comuns às várias tecnologias consideradas.

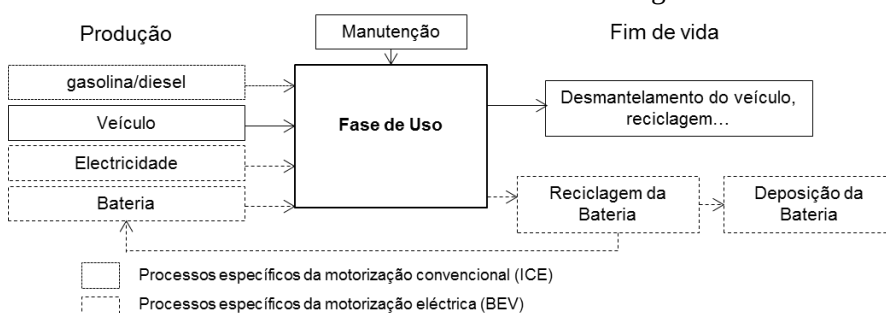


Figura 1: Modelos e fronteiras de sistema: BEV e ICE.

As principais características das tecnologias analisadas têm por base FREIRE & MARQUES, 2012, e são apresentadas na tabela 1. São caracterizadas 2 gamas de veículos: subcompacto e compacto. Considerou-se que a motorização BEV tem uma eficiência global de 80%, tendo em conta as perdas na bateria, no motor, nos consumos auxiliares do veículo e os ganhos da travagem regenerativa (NOTTER *et al.*, 2010). Na tabela 2 apresentam-se as principais propriedades das baterias de lítio (BEV). A produção e fim de vida das tecnologias BEV e ICE tiveram por base (AEA ENERGY & ENVIRONMENT, 2007) e (SPIELMANN *et al.*, 2007). O processo da produção e combustão de combustíveis fósseis foi baseado em (SPIELMANN *et al.*, 2007). Na tabela 3 apresentam-se os cenários considerados para a geração de eletricidade: mix do sistema electroprodutor Português para os anos 2004, 2009 e 2011 (REN, [S.d.]). Pode observar-se uma redução da intensidade nas emissões de GEE, devido ao aumento da geração com base em energias renováveis (eólica e hídrica) e centrais de ciclo combinado a gás natural.

Tabela 1: Principais características das diferentes tecnologias (2 gamas).

Subcompacto “cidadinos” Compacto “médio longo curso”					
Tecnologia	BEV		Gasolina		Gasóleo
Peso do veículo [kg] (bateria incluída)	883	1202	800	1058	800 1058
Gasolina Gasóleo [l/100km]			4	5,2	3,6 4,5
Eletricidade [Wh/km]*	125	188			
Peso da bateria [kg]	220	329			
Capacidade [kWh]	25	38			
Nº de baterias (200 000 km)	2	2			
Descarga da bateria até 30% [km]	140	140			
Descarga Total [km]	200	200			

*(PERUJO, 2009)



Tabela 2: Principais características da bateria.

Bateria	Lítio (Óxido de Manganês)	Referências
Energia específica (Wh/kg)	114	(NOTTER <i>et al.</i> , 2010)
Número de ciclos	1000	(VANDENBOSSCHE <i>et al.</i> , 2006)

Tabela 3: Cenários de geração de eletricidade e emissões de GEE.

Cenário	Descrição	Emissões (kg CO ₂ eq/kWh)
2004	Mix de geração em 2004	666
2009	Mix de geração em 2009	560
2011	Mix de geração em 2011	400

3. Resultados: Emissões de GEE

Na figura 2 apresentam-se as emissões de GEE em função da intensidade de GEE do sistema electroprodutor para as tecnologias BEV e ICE (subcompacto e compacto), incorporando 10% de variabilidade nos consumos de energia na fase de operação (vida útil de 200 000 km).

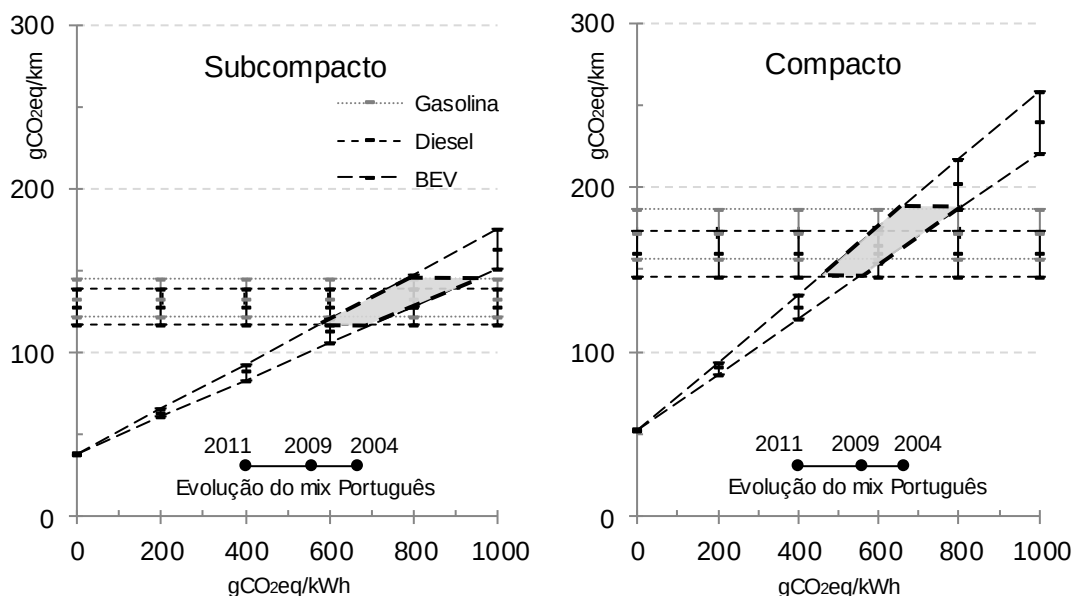


Figura 2: Emissões dos BEV e ICE em função da intensidade de GEE da geração de eletricidade.

Na figura 2 observa-se uma banda crítica de incerteza (devido à incorporação da variabilidade nos consumos) na identificação da tecnologia com menores emissões. Para veículos do tipo subcompacto, a banda localiza-se dos 550 a 950 gCO₂eq/kWh e, para veículos compacto, entre



450 e 800 gCO₂eq/kWh. O BEV apresenta menores emissões de GEE face aos ICE para intensidades inferiores a 550 gCO₂eq/kWh (subcompacto) e 450 gCO₂eq/kWh (compacto). Comparando os resultados para os vários cenários de geração de eletricidade, verifica-se a importância do sistema electroprodutor na identificação da tecnologia com menores emissões de GEE. Em 2004, não era possível identificar a tecnologia com menores emissões. Para 2009, e no caso dos subcompacto, o BEV apresenta emissões inferiores ao ICE. No entanto, para o compacto não é possível concluir o mesmo, pois os valores para as duas tecnologias estão na referida banda crítica. Para o cenário 2011, verifica-se que a tecnologia BEV apresenta uma redução de 23% das emissões face aos ICE, para veículos subcompactos (9% de redução, veículos compactos).

4. Análise de custos de ciclo de vida

Nesta secção apresenta-se uma análise de custos económicos de ciclo de vida, para as tecnologias BEV e ICE (veículos subcompacto e compacto), realizada com base no método do custo anual equivalente (CAE), discriminando custos de aquisição e operação. Foram considerados 2 tarifários de eletricidade (contexto Português), 2 taxas de actualização (5% e 10%) e incorporando variabilidade no consumo e no custo de energia ($\pm 50\%$). O método do CAE permite calcular os custos uniformes equivalentes anuais do investimento e os custos de funcionamento, (ABECASSIS E CABRAL, 1991). A tabela 4 apresenta o preço de aquisição dos veículos e o valor residual dos veículos no final de vida (10º ano). Na tabela 5 apresentam-se os preços de energia para Portugal em 2012 (gasolina, gasóleo e eletricidade), considerando uma tarifa bi-horária para a eletricidade (cheia e vazio).

Tabela 4: Preço (€.) de aquisição dos veículos (incl. bateria) e valor residual.

	Subcompactos			Compactos		
	BEV	Gasolina	Diesel	BEV	Gasolina	Diesel
Veículos (c/ bateria) [€]	35250	15300	19300	35850	22800	25400
Valor residual (10 anos) [€]	7070	2905	3080	7170	4560	5080

Tabela 5: Preços da energia final

	Preço da eletricidade (2012)		Gasolina	Gasóleo
	Horas cheio	Horas vazio		
	0,19 €/kWh	0,10 €/kWh	1,65 €/Litro	1,5 €/Litro
Referências	ERSE (2012)		Valor médio (Janeiro-Maio, 2012)	

Na figura 3 apresentam-se os resultados da análise económica (vida útil de 200000 km), para 2 taxas de actualização (5% e 10%) e duas gamas de veículos (subcompactos e compactos). Os resultados mostram que a tecnologia BEV não é ainda competitiva em termos económicos, existindo, no entanto, alguma incerteza nos resultados, devido à incorporação da variabilidade no consumo e custo de energia, e quanto à necessidade de substituir a bateria (custo



III Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços

“Novos desafios para um planeta sustentável”

03 a 06 de setembro de 2012

Maringá – PR - Brasil



representado a tracejado na Figura 3). Por exemplo, para os veículos subcompacto, embora a gama de custos marginais de utilização do BEV ($0,013 < \text{€/km} < 0,037$) seja inferior à do ICE (gasóleo: $0,027 < \text{€/km} < 0,080$; gasolina $0,033 < \text{€/km} < 0,100$), o custo de aquisição do BEV por quilómetro (0,180 €/km) é muito superior aos ICE (gasóleo 0,100 €/km, gasolina 0,085 €/km). Os valores referidos foram calculados para uma taxa de atualização de 5%, sendo que, para taxas superiores (e.g. 10%), o custo anual de investimento do BEV ainda será mais elevado (o custo de operação é o mesmo). Por outro lado, considerando taxas inferiores a 5%, a diferença de custo diminui, mas o BEV continua a apresentar um custo total uniforme por km mais elevado.

Relativamente à utilização do BEV, o horário de carregamento tem uma influência muito significativa no custo da eletricidade (redução de 45% para as horas de vazio); no entanto, esta diferença não influencia significativamente o custo total por km. Por outro lado, a necessidade de um segundo conjunto de baterias representa um acréscimo muito significativo no custo por km (0,103€/km; um aumento de 30%). No entanto, caso não seja necessário um 2º conjunto de baterias, o BEV compacto apresenta ($i=5\%$) uma gama de custo total por km (Cheio: 0,219-0,254 €/km; vazio: 0,210-0,230 €/km) no intervalo de incerteza dos ICE (gasolina 0,186-0,272€/km; diesel 0,190-0,258 €/km). Verificando-se resultados semelhantes para $i=10\%$.

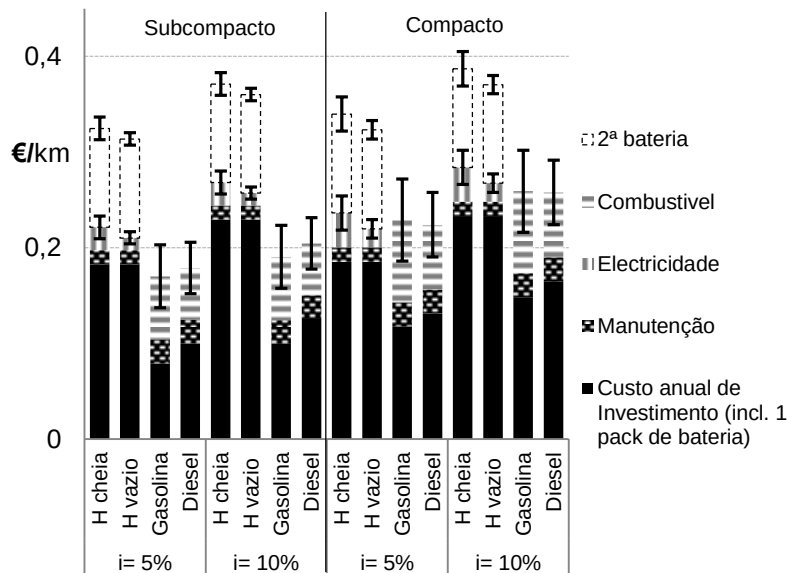


Figura 3: Custo por km (investimento e operação) para 2 taxas de atualização (Subcompactos e Compactos), incorporando variabilidade no consumo ($\pm 10\%$) e no custo de energia ($\pm 40\%$).

5. Conclusões

Apresentou-se uma avaliação comparativa de ciclo de vida de veículos elétricos a bateria (BEV) e convencionais (ICE, gasolina ou diesel), incorporando variabilidade nos consumos energéticos na utilização, para 2 gamas de veículos ligeiros de passageiros (subcompacto e compacto). Os



resultados obtidos para a intensidade de Gases com Efeito de Estufa (GEE) mostram que as emissões associadas ao sistema de geração de eletricidade são determinantes. Em particular, demonstrou-se que a utilização do BEV se traduz numa redução de emissões de GEE relativamente aos ICE para sistema electroprodutores com emissões inferiores a 450 gCO₂eq/kWh, no caso de veículos do tipo compacto, e 550 gCO₂eq/kWh, para os subcompacto. Em termos económicos, verifica-se que os BEV têm um custo marginal de utilização muito inferior aos ICE. No entanto, o custo de aquisição dos BEV é consideravelmente mais elevado. Por outro lado, a eventual necessidade de um 2º conjunto de baterias representa um acréscimo muito significativo no custo/km, o que condiciona a competitividade económica dos BEV. O modelo desenvolvido incorporou variabilidade nos consumos e custos de energia ($\pm 50\%$), o que permitiu identificar uma gama de incerteza nos resultados, indicando que no caso de ocorrer um aumento do preço dos combustíveis fósseis relativo à eletricidade, os BEV podem tornar-se competitivos economicamente.

Referências

ABECASSIS F. E CABRAL N. *Análise Económica e Financeira de Projectos*. 3ª Ed. **Fundação Calouste Gulbenkian**, Lisboa, 1991.

AEA ENERGY & ENVIRONMENT, (AEA G. Hybrid Electric and Battery Electric Vehicles. **Technical report**, 2007.

Freire, F.; Marques, P. Electric vehicles in Portugal: An integrated energy, greenhouse gas and cost life-cycle analysis. **2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)**, pp. 1-6, 2012. [doi: 10.1109/ISSST.2012.6227988](https://doi.org/10.1109/ISSST.2012.6227988)

NOTTER, D. A; GAUCH, M.; WIDMER, R. et al. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. **Environmental science & technology**, v. 44, n. 17, p. 6550-6, 1 set 2010.

PERUJO, A. & C. B. Potential Impact of Electric Vehicles on the Electric Supply System. **Commission Joint Research Centre, Institute for**, 2009.

REN. **Dados Técnicos da rede eléctrica nacional**.

<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/Paginas/DadosTecnicos.aspx>. Acedido a 1 de Maio de 2012.

SPIELMANN, M., BAUER, C., DONES, R., TUCHSCHMID, M. Transport Services. e- coinvent report No. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007

VANDEBOSSCHE, P.; VERGELS, F.; VANMIERLO, J.; MATHEYS, J.; VANAUTENBOER, W. SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. **Journal of Power Sources**, v. 162, n. 2, p. 913-919, nov 2006.