

IV Congresso Brasileiro de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL
Araxá, MG – Brasil, 19 a 21/11/ 2007

Avaliação de Desempenho de Veículos Elétricos em Frotas de Empresas
Distribuidoras: Uma Proposta para o Planejamento Experimental

J.F.M. Pessanha - UERJ; L.A. Pecorelli Peres - UERJ,
M.B.D.A Medeiros; A Barreto – Ampla;

Resumo - Em função da pouca experiência com veículos elétricos, há incertezas com relação ao impacto da introdução destes veículos em frotas comerciais. Para mitigar esta incerteza, alguns ensaios são necessários, de forma a possibilitar uma avaliação da performance dos veículos elétricos, segundo alguns indicadores selecionados, tais como: o rendimento (kWh/km), a autonomia (km), o tempo médio de recarga da bateria e os estados de carga da bateria. A performance de um veículo elétrico também depende de uma variedade de fatores externos, e das interações entre eles, tais como a distância percorrida, o tipo de percurso, e o peso transportado. Portanto, uma avaliação dos efeitos e da significância destes fatores também se faz necessária. Para alcançar este objetivo, o presente trabalho apresenta um plano experimental a ser adotado nos ensaios com o veículo elétrico, bem como uma descrição resumida das técnicas estatísticas subjacentes para a análise dos dados experimentais coletados.

Palavras-chave-planejamento de experimentos, planejamento fatorial, veículo elétrico.

Avaliação de Desempenho de Veículos Elétricos em Frotas de Empresas Distribuidoras: Uma Proposta para o Planejamento Experimental

J.F.M. Pessanha - UERJ ; L.A.Pecorelli Peres - UERJ, M.B.D.A Medeiros – AMPLA ; A Barreto – Ampla;

Resumo-Em função da pouca experiência com veículos elétricos, há incertezas com relação ao impacto da introdução destes veículos em frotas comerciais. Para mitigar esta incerteza, alguns ensaios são necessários, de forma a possibilitar uma avaliação da performance dos veículos elétricos, segundo alguns indicadores selecionados, tais como: o rendimento (kWh/km), a autonomia (km), o tempo médio de recarga da bateria e os estados de carga da bateria. A performance de um veículo elétrico também depende de uma variedade de fatores externos, e das interações entre eles, tais como a distância percorrida, o tipo de percurso, e o peso transportado. Portanto, uma avaliação dos efeitos e da significância destes fatores também se faz necessária. Para alcançar este objetivo, o presente trabalho apresenta um plano experimental a ser adotado nos ensaios com o veículo elétrico, bem como uma descrição resumida das técnicas estatísticas subjacentes para a análise dos dados experimentais coletados.

Palavras-chave-planejamento de experimentos, planejamento fatorial, veículo elétrico.

I. INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos, em suas diferentes versões, constituem uma tecnologia de vanguarda e, portanto, ainda não há uma experiência bem consolidada acerca da sua operação, em larga escala, nas frotas veiculares de órgãos governamentais e empresas dos mais variados ramos de atividade [1].

Em função da pouca experiência com veículos elétricos, há incertezas com relação ao impacto da introdução destes veículos em frotas comerciais, por exemplo, nas frotas das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Para mitigar esta incerteza, alguns testes ou ensaios devem ser conduzidos com o objetivo de avaliar a performance dos veículos elétricos, segundo alguns indicadores selecionados: o rendimento (kWh/km), a autonomia (km), o tempo médio de recarga da bateria e os estados de carga da bateria. Como em qualquer veículo, a performance de um veículo elétrico também depende de uma variedade de fatores externos, tais como a distância percorrida, o tipo de percurso, e o peso transportado [1,2].

Conforme ilustrado na Figura 1, um veículo elétrico pode ser considerado como uma função, desconhecida, que atua sobre as variáveis de entrada (fatores F_1, \dots, F_k) e produz como variáveis de saída os indicadores de desempenho (respostas observadas R_1, \dots, R_m).

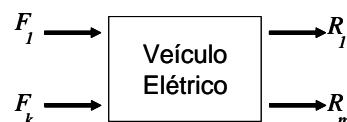


Figura 1. Veículo elétrico tratado como uma função



Como não se conhece a função que relaciona os fatores e as respostas, deve-se realizar um experimento com o veículo elétrico visando obter dados que permitam avaliar precisamente os efeitos dos fatores, e de suas interações, sobre a resposta de interesse.

Para não desperdiçar tempo e recursos, o experimento deve ser previamente planejado. Entre os vários planos experimentais [3,4,5], o planejamento fatorial completo apresenta-se como um candidato apropriado para o experimento com o veículo elétrico, pois o desempenho do veículo (resposta) é afetado por mais de um fator experimental.

Aplicando a Análise da Variância (ANOVA) aos registros experimentais obtidos em um experimento fatorial, pode-se testar a significância estatística dos efeitos dos fatores, e suas interações, sobre as respostas. Uma vez identificados os fatores significativos, os dados experimentais podem ser utilizados na construção de uma superfície de resposta [3,4], i.e., na estimação da função que relaciona a resposta de interesse com os fatores. Nas duas situações acima, a aplicação de técnicas estatísticas aos dados experimentais confere objetividade científica às conclusões do experimento.

A seguir, na seção II, apresenta-se uma breve descrição do planejamento fatorial completo. Na seção III, é descrita uma proposta para o planejamento dos ensaios a serem conduzidos com o veículo elétrico. Por fim, na seção IV são resumidas as principais conclusões do trabalho.

*Os autores agradecem o apoio financeiro da Ampla Energia e Serviços S.A. ao projeto de pesquisa de desempenho de veículos elétricos. J.F.M.Pessanha e L.A.Pecorelli Peres são professores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

II. PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO

Esta classe de planejamento é útil para mensurar os efeitos (ou influências) de um ou mais fatores e suas interações na resposta de um sistema.

Sem perda de generalidade considere a situação na qual têm-se dois fatores A e B , cada um podendo assumir três níveis ($A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$). Neste caso tem-se um planejamento fatorial 3×3 (ou 3^2) e que por ser completo implica em ensaiar as nove combinações possíveis entre os níveis dos dois fatores: $A_1B_1, A_2B_1, A_3B_1, A_1B_2, A_2B_2, A_3B_2, A_1B_3, A_2B_3, A_3B_3$.

Para obter uma estimativa do erro, o ensaio de cada combinação deve ser replicado R vezes, perfazendo ao final um total de $3 \times 3 \times R$ ensaios experimentais. Portanto, os experimentos fatoriais completos podem resultar em um grande número de ensaios mesmo que o número de fatores e/ou níveis sejam moderados. Por esta razão, os experimentos fatoriais completos são restritos aos experimentos com poucos fatores e, em geral, abertos em dois ou três níveis.

Em um experimento fatorial com dois fatores A e B , com a e b níveis respectivamente, e R réplicas, a relação entre a variável resposta (y_{ijl}) e os fatores e suas interações é expressa pelo seguinte modelo linear:

$$y_{ijl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijl} \quad (1)$$

onde $i=1, a, j=1, b, l=1, R$

Em (1), μ é a média global, τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento (nível) do fator A , β_j é o efeito do j -ésimo tratamento do fator B , $(\tau\beta)_{ij}$ denota o efeito da interação entre os fatores A e B , todos estimados pelo Algoritmo de Yates [3,6]. Por fim, ε_{ijl} é um erro aleatório suposto com média nula, homocedástico, independente e normalmente distribuído.

Os efeitos dos tratamentos dos fatores são considerados desvios em relação a média global, assim, $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ e $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$. Os efeitos das interações são

definidos de tal forma que $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$

[3,4].

Para avaliar a significância do efeito de cada fator e interação sobre a variável resposta, recorre-se à análise da variância (ANOVA), conforme indicado na Tabela I para um experimento com dois fatores experimentais.

Na Tabela I, y_{ijl} denota a resposta obtida pela combinação do i -ésimo nível do fator A , com o j -ésimo nível do fator B na l -ésima replicação do ensaio.

TABELA I

ANOVA DO PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO COM DOIS FATORES

Fonte de variação	Soma dos quadrados	g.l.*	Estatística F
Fator A	$SQ_A = \frac{1}{bR} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{(y_{...})^2}{abR}$	$a-1$	$\frac{SQ_A/(a-1)}{SQ_E/ab(R-1)}$

Fator B	$SQ_B = \frac{1}{aR} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{(y_{...})^2}{abR}$	$b-1$	$\frac{SQ_B/(b-1)}{SQ_E/ab(R-1)}$
Interação AB	$SQ_{AB} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{(y_{...})^2}{abR} - SQ_A - SQ_B$	$(a-1)(b-1)$	$\frac{SQ_{AB}/((a-1)(b-1))}{SQ_E/ab(R-1)}$
Erro	$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_{AB}$	$abR-ab$	Variância do erro $\sigma_\varepsilon^2 = \frac{SQ_E}{ab(R-1)}$
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^R y_{ijl}^2 - \frac{(y_{...})^2}{abR}$	$abR-1$	

*graus de liberdade

Continuando com a notação da Tabela I, tem-se que:

$y_{...}$ = Total dos registros experimentais

$y_{i..}$ = Total dos registros associados ao i -ésimo nível do fator A

$y_{.j.}$ = Total dos registros associados ao j -ésimo nível do fator B

$y_{ij.}$ = Total dos registros associados ao i -ésimo nível do fator A e j -ésimo nível do fator B

Para cada fonte de variação (fatores e interação) calcula-se a estatística F, a qual permite avaliar a significância do efeito de uma fonte de variação sobre a variável resposta.

III. PLANEJANDO OS EXPERIMENTOS A SEREM REALIZADOS COM O VEÍCULO ELÉTRICO

Na referência [1] são analisados alguns resultados obtidos nos testes com veículos elétricos realizados pelo *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory* (INEEL). No decorrer das análises, os autores fazem descrições resumidas acerca dos ensaios realizados, porém suficientes para auxiliar na identificação das respostas de interesse e principais fatores, com os respectivos níveis, considerados nos ensaios com o veículo elétrico (Tabela II).

TABELA II

PROPOSTA DE FATORES EXPERIMENTAIS E VARIÁVEIS DE RESPOSTA

Fatores	Respostas
Peso transportado níveis: médio, leve e pesado	Rendimento (kWh/km)
Distância percorrida níveis: 50 km, 70 km e 90km	Estado da carga da bateria
	Tempo de recarga

Todos os ensaios serão realizados em trajetos urbanos com vias expressas.

Cada variável resposta depende de dois fatores experimentais e, portanto, o experimento fatorial completo é apropriado para medir e testar a significância do efeito dos fatores, e suas interações. Propõe-se um planejamento fatorial completo 3×3 , inicialmente com duas réplicas, cuja matriz de planejamento é apresentada na TABELA III.

TABELA III
MATRIZ DE PLANEJAMENTO PROPOSTA

Percurso urbano em vias expressas		Distância (km)					
		50		70		90	
Peso transportado	Leve						
	Médio						
	Pesado						

No início de cada percurso (ensaio) a bateria do veículo elétrico deverá estar completamente carregada, i.e., o estado de carga dos bancos de bateria deverá ser 100%. Ao final de cada percurso devem ser registrados o consumo de eletricidade (kWh), o estado da carga (%) e também o tempo necessário para carregar completamente a bateria.

Com relação aos níveis do fator peso transportado (leve, médio e pesado), ressalta-se que todos os ensaios com o veículo em movimento serão realizados com no mínimo duas pessoas: um motorista e um acompanhante. Também será considerada uma carga de peso equivalente aos apetrechos utilizados por veículos de empresas distribuidoras de energia elétrica, por exemplo, escadas, caixa de ferramentas, conectores, instrumentos, etc. O peso desta carga deverá ser modulado de acordo com o nível do fator peso transportado, sendo que para o nível pesado pretende-se, caso seja possível, adotar uma carga equivalente ao peso máximo suportável pelo veículo.

Para comparar o desempenho do veículo elétrico com o veículo a combustão interna, propõe-se a mesma matriz de planejamento apresentada na Tabela III. No entanto, neste caso, as respostas de interesse são o consumo de combustível (em litros) e o rendimento (litros/km). Ressalta-se que para este experimento deve ser selecionado um veículo similar ao elétrico em bom estado, e que durante os ensaios o ar refrigerado deverá estar desligado, dado que o veículo elétrico não conta com este acessório.

A definição do número de réplicas depende da variância da variável resposta, um valor desconhecido e para o qual não se dispõe de uma estimativa proveniente de outros estudos com veículos elétricos. Por esta razão, nos dois experimentos propostos, foram consideradas duas réplicas para cada combinação dos níveis dos fatores. Após a conclusão de todos os ensaios iniciais será estimada a variância da variável resposta e avaliada a necessidade de considerar réplicas adicionais.

Por fim, lembra-se que nos dois tipos de experimento, os ensaios devem ser realizados em ordem totalmente aleatória para evitar a ocorrência de distorção estatística nos resultados, i.e., impedir que os erros atípicos sejam obrigatoriamente associados a determinadas combinações de níveis. Uma maneira de fazer isso consiste em sortear a ordem de realização dos ensaios.

IV. CONCLUSÕES

Há pouca informação da utilização das técnicas de planejamento estatístico para a avaliação do desempenho

de veículos elétricos. Desta forma, pretende-se aplicar estes métodos na quantificação dos benefícios energéticos dos veículos elétricos, uma vez que esta tecnologia se mostra promissora para a ampliação do mercado de energia elétrica e redução de impactos ambientais.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. J. Francfort and L.A. Slezak, *Electric and Hybrid Vehicle Testing*, SAE, 2002.
- [2]. L.A. Pecorelli Peres, L.A.N. Horta e G.T. Lambert, "A inserção do veículo elétrico no planejamento estratégico nas empresas de energia", VIII ERLAC, Cigré, Ciudad del Leste, Paraguai, 1999.
- [3]. A. Fz. Trocóniz, *Modelos Lineales: regresión, análisis de la varianza, diseños experimentales*, Bilbao: Servicio Editorial Universidad del Pais Vasco, 1987.
- [4]. V. Calado e D. Montgomery, *Planejamento de experimentos usando o Statistics*, Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.
- [5]. BB. Neto, I.S. Scarminio e R.E. Bruns, *Planejamento e otimização de experimentos*, 2ª edição, Campinas: Editora da Unicamp, 1996.
- [6]. F.D. Van Voorhess and A.T. Bahill, "Sensitivity analysis by design of experiments", in *Proc. Workshop on Systems Engineering of Computer based Systems*, 1995.