

AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CARGA DE BATERIAS UTILIZANDO UM MODELO HÍBRIDO DAS EQUAÇÕES DE PEUKERT E SHEPHERD

Autores:

Luiz Artur Pecorelli Peres, D. Sc. (lapp@uerj.br)

Thayse Cristina Trajano da Silva (thaysecristina@ig.com.br)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Endereço: Rua S. Francisco Xavier, 524 FEN / ELE, sala 5029 – A

Tel: (21)2587-7401

Resumo: As baterias constituem uma fonte essencial de energia. Elas estão presentes em situações nas quais se deseja armazenar energia e aparecem associadas a diversos sistemas de produção. A eficiência energética nestas aplicações é imprescindível e desta forma é desejável o conhecimento do seu estado de carga após períodos de descarga visando prever a capacidade ainda disponível. Este trabalho apresenta uma modelagem matemática deste problema a partir de um tratamento híbrido das equações de Peukert e Shepherd levando em conta o comportamento não linear do período de descarga. Os resultados obtidos estão em coerência com testes disponíveis na literatura técnica e o modelo mostra-se satisfatório para acoplá-lo em rotinas de simulação, nos quais os bancos de bateria estejam sujeitos a correntes de descarga variáveis, como, por exemplo, no caso de trajetos realizados com veículos elétricos.

1 Introdução

As baterias são dispositivos eletroquímicos com a capacidade de acumular e manter a energia elétrica sob a forma de energia química e, em seguida transformá-la em energia elétrica.

As primeiras pilhas elétricas foram idealizadas e construídas pelo físico italiano Alessandro Volta em meados de 1800. Avanços posteriores conduziram ao que se denomina de baterias, sendo estas recarregáveis.

Elas possuem uma ampla importância no que se referem à estocagem e posterior utilização da energia. Fontes intermitentes de energia, como por exemplo, a eólica e a solar, empregam muitas vezes bancos de baterias quando o vento ou luminosidade é insuficiente.

Existem vários tipos de bateria utilizando diversos elementos em sua composição. Estas variações determinam distintas densidades de energia e de potência. Neste trabalho foi enfocada a do tipo chumbo-ácido. Estas são comumente utilizadas nas mais diversas aplicações, inclusive, em veículos elétricos nos quais é essencial o conhecimento do estado de carga tendo em vista a previsão da sua autonomia [PECORELLI PERES, L. A., 2003]. As do tipo chumbo-ácido possuem uma tecnologia sedimentada e grandes avanços. Constitui ainda o tipo mais acessível, devido às facilidades em sua manufatura e reciclagem.

2 Descrição das Equações de Peukert e Shepherd

Equação de Peukert

Esta equação [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989] tem por objetivo relacionar o tempo de descarga de uma bateria a um valor constante de corrente de descarga, e é dada por:

$$T = \frac{k}{I^n} \quad (01)$$

Onde: T - Tempo de utilização da bateria em h

I - Corrente elétrica de descarga em A

k e n - Constantes de Peukert

O valor de n , em geral, fica compreendido entre 1,2 e 1,4. Estes valores estão sujeitos às características da bateria chumbo-ácido.

O estado de carga da bateria levando-se em consideração qualquer valor constante de corrente, os valores nominais de corrente de descarga e de capacidade, e o tempo de sua utilização, pode ser traduzido pela equação:

$$S = 1 - \frac{I.T}{C_N} \cdot \left(\frac{I}{I_N} \right)^{n-1} \quad (02)$$

Onde: S - Estado de carga da bateria

C_N - Capacidade nominal da bateria em A.h.

I_N - Corrente nominal de descarga em A

Equação de Shepherd

Esta equação [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989] descreve a queda de tensão de uma bateria, levando-se em consideração o tempo e a corrente de descarga, dada como:

$$E = E_S - N.I - K.I \cdot \left(\frac{Q}{Q - I.t} \right) \quad (03)$$

Onde: E - Tensão terminal da bateria em V

E_S - Tensão de referência em V

t - Tempo de utilização da bateria em s

Q - Constante referente à carga máxima da bateria em A.s.

N - Constante relativa à resistência interna da bateria em Ω

K - Constante relativa à resistência interna da bateria em Ω

I - Corrente elétrica de descarga em A

Os valores de E_S , N, K e Q são as constantes de Shepherd e podem ser determinados experimentalmente.

3 Modelagem Computacional Proposta

Neste trabalho foi desenvolvida uma rotina computacional que utiliza as equações de Peukert e Shepherd, de forma híbrida, para informar o estado de carga de uma bateria submetida a valores de corrente de descarga sucessivos e variáveis.

O emprego das equações (01) e (03) exigem o conhecimento prévio das suas constantes. Para isto, foram desenvolvidas rotinas adicionais visando o cálculo destas.

Cálculo das Constantes de Peukert

A partir da equação de Peukert (01) foi desenvolvida a rotina “Peukert” em ambiente computacional específico [HANSELMAN, D.; LIULEFIELD, B., 1999] para se determinar as suas constantes n e k .

O conhecimento do valor da constante n é importante, pois está relacionado com a resistência interna da bateria. Quanto maior a constante n de Peukert menor será o tempo de descarga para uma mesma corrente.

Para desenvolver esta rotina fez-se necessário o uso de métodos matemáticos a fim de que a equação (01) pudesse ser expressa por um comportamento linear. Segue o processo:

$$T = \frac{k}{I^n} \quad \therefore \quad \log T = \log \frac{k}{I^n} \quad \therefore \quad \log T = \log k - n \log I$$

Assim, a equação em seguida pode ser utilizada:

$$\log T = -n \log I + \log k \quad (04)$$

Foi suposto o conhecimento prévio, através de ensaio, dos tempos correspondentes às correntes de descarga completa a que foi submetida a bateria. A título de ilustração foram transcritos os valores do ensaio realizado por [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989] com uma bateria de capacidade nominal igual 36 A.h. e tensão 12 V, indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de Ensaio para Obtenção das Constantes de Peukert

Corrente de Descarga (A)	1,80	4,00	6,00	8,00	10,00	15,00
Tempo de Descarga (h)	16,42	5,90	3,70	2,70	2,10	1,16

Colocando-se estes valores em escala logarítmica são obtidos então os pontos que melhor se ajustam a equação de uma reta representativa da equação (04). Com isto é possível determinar o polinômio que melhor se ajusta e determinar, portanto, as constantes n e k , neste caso iguais a 1,23 e 33,48, respectivamente.

A Figura 3.1 apresenta o gráfico da equação (04) utilizando-se a rotina “Peukert” aqui desenvolvida. Os valores encontrados para n e k estão de acordo com [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989].

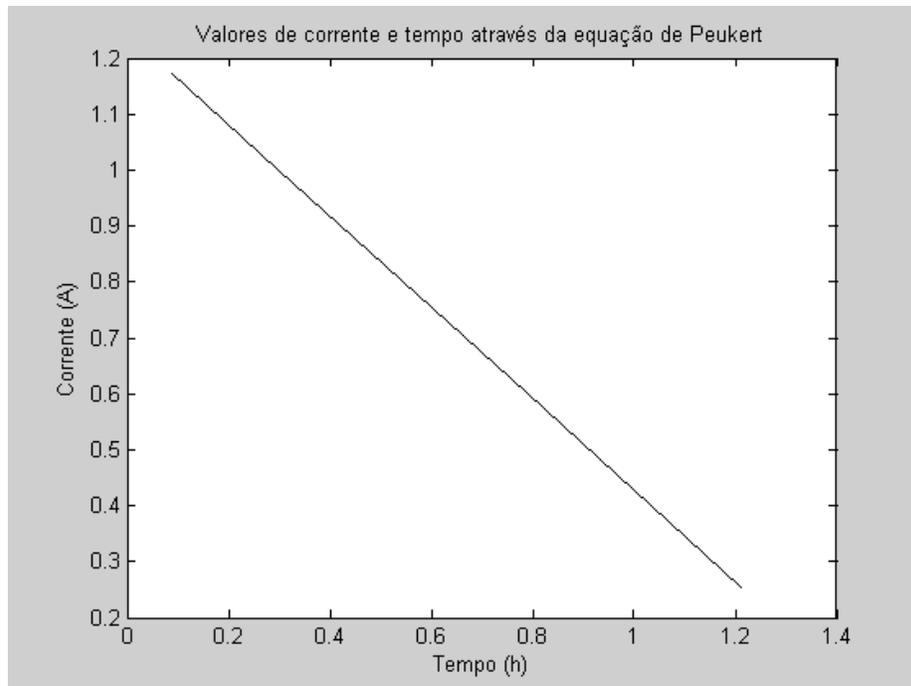


Figura 3.1 - Gráfico de Corrente versus Tempo Utilizando a Rotina “Peukert”

Constantes de Shepherd

A equação de Shepherd (03) possui quatro constantes e a rotina computacional “Constshepherd” foi desenvolvida para calculá-las a partir de ensaios inicialmente conduzidos. Para isto, supõe-se conhecidas previamente duas curvas de tensão terminal da bateria em relação à sua capacidade em A.h, que são submetidas a duas correntes de descarga distintas até que a tensão atinja um valor indesejável. Este valor para baterias chumbo-ácido de 6 células e tensão nominal igual a 12 V é considerado igual a 10,5 V. Visando ilustrar o entendimento do cálculo descrito são mostrados os pontos das curvas apresentados por [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989] na Tabela 3.2, a seguir:

Tabela 3.2 -Valores de Ensaio Obtidos das Curvas 1 e 2

Curva 1 ($I_a=6$ A)		Curva 2 ($I_b = 10$ A)	
$E_2 = 12,0$ V	$T_2 = 1,25$ h	$E_1 = 12,0$ V	$T_1 = 0,50$ h
$E_4 = 11,5$ V	$T_4 = 3,00$ h	$E_3 = 11,5$ V	$T_3 = 1,42$ h

Para o desenvolvimento desta rotina foram necessários alguns desenvolvimentos algébricos com a equação de Shepherd (03). Foram obtidos dois sistemas e cada um com duas equações, conforme segue.

O primeiro sistema de equações é dado por:

$$\begin{cases} E_2 = E_s - NI_a - KI_a \left(\frac{Q}{Q - I_a t_2} \right) \\ E_4 = E_s - NI_a - KI_a \left(\frac{Q}{Q - I_a t_4} \right) \end{cases} \quad (05)$$

O segundo sistema de equações é dado por:

$$\begin{cases} E_1 = E_s - NI_b - KI_b \left(\frac{Q}{Q - I_b t_1} \right) \\ E_3 = E_s - NI_b - KI_b \left(\frac{Q}{Q - I_b t_3} \right) \end{cases} \quad (06)$$

Subtraindo-se as equações indicadas em (05) tem-se:

$$E_2 - E_4 = KI_a \left(\frac{Q}{Q - I_a t_4} - \frac{Q}{Q - I_a t_2} \right) \quad (07)$$

$$E_2 - E_4 = KI_a Q \left[\frac{I_a t_4 - I_a t_2}{(Q - I_a t_4)(Q - I_a t_2)} \right] \quad (08)$$

Fazendo-se o mesmo para o sistema (06) obtém-se:

$$E_1 - E_3 = KI_b \left(\frac{Q}{Q - I_b t_3} - \frac{Q}{Q - I_b t_1} \right) \quad (09)$$

$$E_1 - E_3 = KI_b Q \left[\frac{I_b t_3 - I_b t_1}{(Q - I_b t_3)(Q - I_b t_1)} \right] \quad (10)$$

Dividindo-se as equações (08) e (10), resulta uma equação que depende apenas da constante Q de Shepherd, pois os demais valores foram obtidos pelo teste conforme Tabela 3.2:

$$\frac{E_2 - E_4}{E_1 - E_3} = \frac{I_a [I_a t_4 - I_a t_2] [(Q - I_b t_3)(Q - I_b t_1)]}{I_b (Q - I_a t_4)(Q - I_a t_2)(I_b t_3 - I_b t_1)} \quad (11)$$

Utilizando uma rotina específica em ambiente computacional de matemática MATLAB [HANSELMAN, D.; LIULEFIELD, B., 1999], a constante Q pode ser determinada e a partir desta obteve-se K, substituindo-se Q em (08) ou (10), e por último N e E_S.

Modelo Híbrido das Equações de Peukert e Shepherd

A equação (02) derivada da equação de Peukert que calcula o estado de carga da bateria não leva em conta a tensão obtida correspondente à corrente de descarga considerada. Esta tensão é bem significativa para o conhecimento do estado de carga da bateria, tendo em vista que o seu decréscimo não deve exceder cerca de 12,5% em relação ao seu valor nominal quando estiver funcionando no modo de descarga. De modo análogo, a utilização isolada da equação de Shepherd responde apenas pela tensão da bateria após um período de descarga. Este trabalho apresenta de maneira inovadora a combinação dos dois métodos visando o cálculo do estado de carga da bateria após submetê-la a valores variáveis de correntes.

O conceito de estado de descarga da bateria pode ser inserido na equação de Shepherd, uma vez que é apresentado como:

$$f = \frac{It}{Q} \quad (12)$$

Onde: f - Estado de descarga da bateria

Então com a substituição de (12) na equação de Shepherd (03), assim como proposto por [BOTTURA, C. BARRETO, G., 1989], resulta:

$$E = E_s - NI - KI \left(\frac{1}{1-f} \right) \quad (13)$$

Desta forma há uma relação entre a tensão terminal, corrente de descarga e estado de carga, uma vez que os estados de carga e descarga estão interligados do seguinte modo:

$$S = 1 - f \quad (14)$$

Observa-se que a equação (13) é independente do tempo de descarga, o qual está explícito no estado de descarga (12). Na simulação realizada por [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989] foram considerados vários estados de descarga fixos e obteve-se uma família de curvas com o comportamento da tensão em função da variação da corrente.

Neste trabalho, contudo, procurou-se desenvolver uma rotina mais geral, a “Estcargareal”, cuja corrente de descarga a qual a bateria é submetida pode sofrer variações na sua intensidade. Esta consideração é importante, pois nas aplicações usuais as baterias não são solicitadas com correntes constantes. Foi necessário, portanto, um tratamento discretizado para a corrente fornecida pela bateria de tal forma a representá-la por um vetor. Sendo assim, como os elementos do vetor de corrente são desiguais, e como os intervalos de tempo também podem variar, nota-se pela equação (02) que o estado de carga também poder variar a cada intervalo de tempo. Pela relação (14) o estado de descarga também será variante, e pela equação (03) a tensão

terminal da bateria do mesmo modo estará mudando. Logo, foi possível criar a rotina “Estcargareal” que reúne estas variações e fornece algo significativo para a análise da simulação do desempenho das baterias, pois a cada instante é possível saber o seu estado de carga e se foi atingida uma tensão indesejável.

No trabalho aqui desenvolvido assumiu-se um vetor de correntes tomando-se, entretanto, cuidados especiais quanto aos valores que foram escolhidos. Segundo [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989] é preciso estar alerta quanto aos limites da faixa de aplicabilidade das constantes de Shepherd os quais não devem ser desrespeitados.

4 Descrição e Resultados das Simulações

Para a realização deste trabalho foram realizadas simulações com as rotinas “Peukert”, “Constshepherd” e “Estcargareal”. Para isto, foi considerada uma bateria de 12V, 36 A.h. de acordo com [BOTTURA, C.; BARRETO, G., 1989]. O primeiro passo consistiu na obtenção da constante de Peukert n . Conforme pode ser observado na equação (02), esta independe da constante k . A Tabela 4.1 apresenta os dados utilizados para este cálculo que coincidem com os valores de corrente e intervalos de tempo da Tabela 3.2.

Tabela 4.1 - Dados para o Cálculo da Constante n de Peukert

Corrente (A)	Tempo (h)
6	3
10	1.42

O emprego da rotina computacional “Peukert” forneceu como resultado $n = 1.4642$ que está dentro da faixa de valores considerados aceitáveis.

As constantes de Shepherd foram calculadas através dos dados da Tabela 3.2 e apresentaram os valores indicados na Tabela 4.2, e que estão em acordo com os valores encontrados por [BOTTURA, C. BARRETO, G., 1989]:

Tabela 4.2 – Constantes de Shepherd

Q (A.s.)	E_s (V)	N (Ω)	K (Ω)
108267,435	12,143	-0,0719	0,0719

Uma vez calculadas todas as constantes foi utilizada a rotina “Estcargareal”, tomando-se o vetor de correntes solicitadas da bateria conforme a Tabela 4.3 a seguir:

Tabela 4.3 - Vetor de Correntes Imposto à Bateria

Correntes (A)	Intervalos de Tempo (s)
4	2700
5	2700
6	2700
7	2700

Com base nos valores da Tabela 4.3 e empregando-se a rotina “Estcargareal” a tensão da bateria chegou ao valor de 10,5 V ao final de 8895 segundos ou 2,47 horas, apresentando um estado de carga igual a 0,235, portanto, 23,5%.

É interessante verificar que a bateria não seria capaz de atender às solicitações propostas, ou seja, funcionar adequadamente durante o tempo total de 10800 segundos. Verifica-se assim, que antes, isto é, ao final de 2,47 horas, a tensão já teria atingido um valor indesejável. Neste caso uma das providências seria, por exemplo, utilizar uma bateria diferente, de maior capacidade, ainda que na bateria testada sobrasse alguma carga.

O gráfico com a variação da tensão terminal da bateria está apresentada na Figura 4.1. Quanto ao estado de carga encontra-se no gráfico da Figura 4.2, conforme seguem.

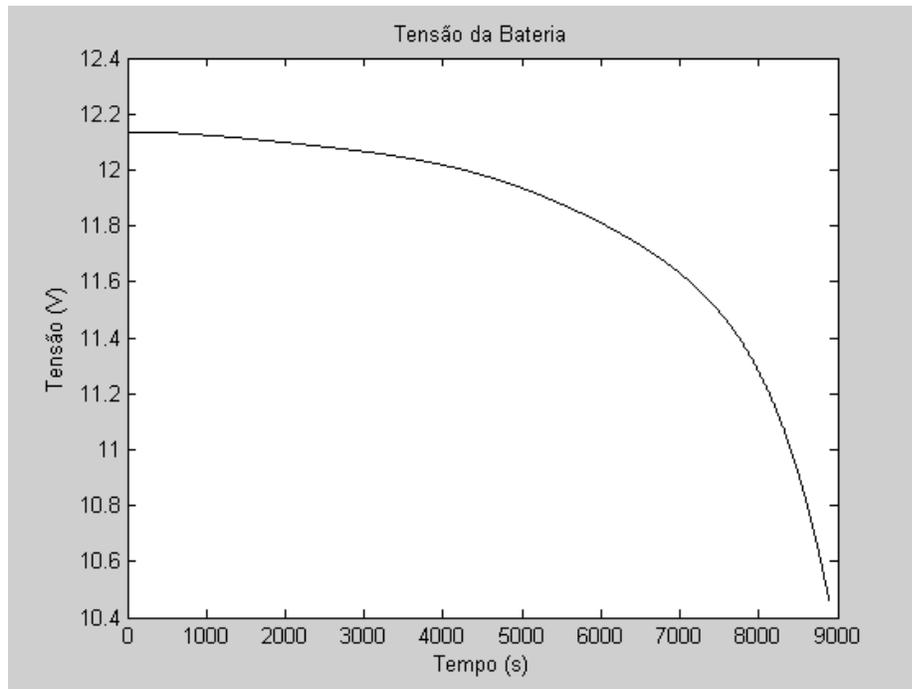


Figura 4.2 - Variação da Tensão Terminal da Bateria até 10,5 V, no Instante 8895 s

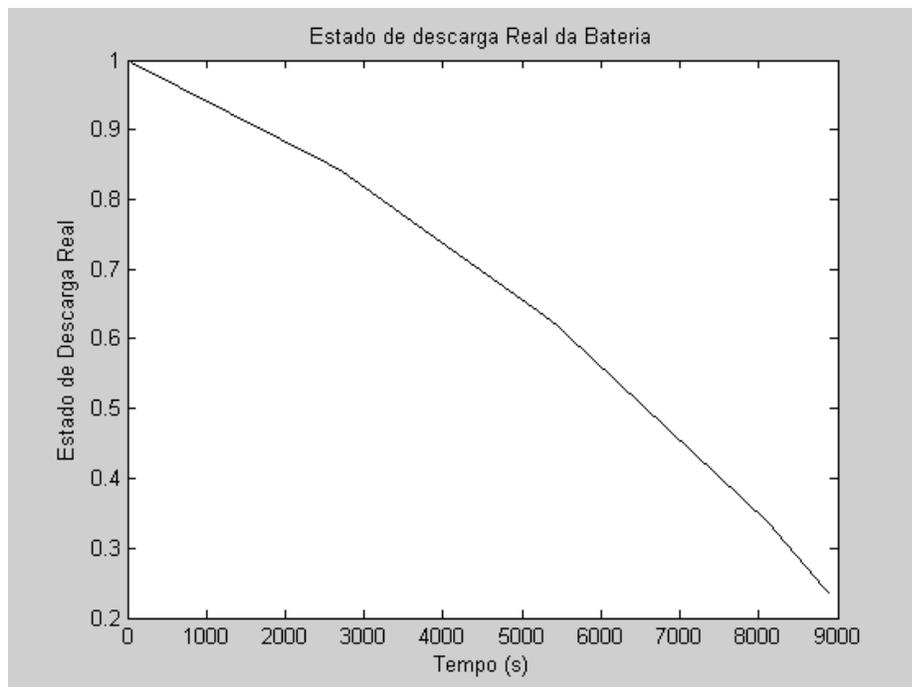


Figura 4.3 - Variação do Estado de Carga da Bateria até o Instante em que a Tensão Alcança 10,5 V (8895 s)

5 Conclusões

A partir dos resultados das rotinas “Peukert” e “Shepherd” desenvolvidas neste trabalho pode-se perceber que houve uma compatibilidade com os existentes na literatura técnica utilizada. De fato, houve uma reprodução fiel dos resultados consultados. No tocante a rotina computacional “Estcargareal”, na qual se considera a variação de corrente e sua duração para o cálculo do estado de carga da bateria, verificou-se a coerência dos valores de estado de carga encontrado, pois foi incluída também a variação da tensão neste processo.

O simples emprego da equação de Peukert pode levar a resultados otimistas. Isto foi verificado no cálculo que serviu de exemplo neste trabalho, no qual sem um exame mais detido acabar-se-ia por concluir que a capacidade era suficiente, caso não houvesse um cálculo simultâneo do comportamento da tensão.

O estado de carga é uma informação técnica muito importante, pois indica se a bateria ainda possui capacidade para suprir a uma certa demanda de potência ou não. Há fatores adicionais que caracterizam e influenciam no estado de carga, como, por exemplo, a temperatura. Desta forma, a rotina desenvolvida apesar de não levar em conta estes efeitos adicionais serve como estimativa do estado de carga. Pretende-se dar continuidade a este trabalho tendo em vista uma maior precisão de resultados bem como a realização de testes e ensaios complementares.

6 Referências

- 1) BOTTURA, Celso P. BARRETO, Gilmar. *Veículos Elétricos*. Campinas: Editora da UNICAMP, 1989.
- 2) MARTINO, G. *Eletricidade Industrial*. São Paulo: Hermus Editora, 1982.
- 3) BRANT, Bob. *Build Your Own Electric Vehicle*. [s.l.]: Mc Graw – Hill, s/d.

- 4) HANSELMAN, D. LIULEFIELD, B. *MATLAB 5 - Versão do Estudante – Guia do Usuário*. São Paulo: Makron Books, 1999.
- 5) PECORELLI PERES, Luiz A. NOGUEIRA, Luiz A.H. TORRES, Germano L. *Influências sobre os sistemas de energia com a introdução dos veículos elétricos na sociedade*. In: III CONGRESSO LATINO-AMERICANO GERAÇÃO-TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Campos do Jordão, SP: 1997.
- 6) PECORELLI PERES, Luiz A. NOGUEIRA, Luiz A. H. TORRES, Germano L. *Considerations about Electric Vehicles Impacts on Daily Load and Environment*, publicado no livro *Advances in Physics, Electronics and Signal Processing Applications*, editado por Dr. Nikos Mastorakis, World Scientific Engineering Society, 2000, ISBN: 960-8052-17-3
- 7) PECORELLI PERES, Luiz A. NOGUEIRA, Luiz A. H. TORRES, Germano L. *Analysis and Discussion on Energy Supply to Non-Road Electric Vehicles in Brazil*; IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY - T&D 2002 LATIN AMERICA CONFERENCE, São Paulo – Brazil, March 2002
- 8) PECORELLI PERES, Luiz A. *Veículos elétricos: Benefícios Ambientais e Energéticos*. Rio de Janeiro: Associação Cultural de Pesquisa Noel Rosa, 2003. 1 disco a laser para computador: son., color.; 4 3/4pol.
- 9) IMPINNISI, Patricio Rodolfo. *Baterias para VEHs*. Conferência proferida no Seminário sobre Veículo Elétrico Híbrido editada em CD, Blue Tree Convention, São Paulo, SP, Brasil, 27 de abril. 2004.