

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

**IMPACTO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS NO MODELO HÍBRIDO DE KIM
PARA A PREDIÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE BATERIAS LI-PO¹
IMPACT OF THE ELECTRIC PARAMETERS IN THE HYBRID MODEL OF
KIM FOR THE PREDICTION OF THE TIME OF LIFE OF LI-PO BATTERIES**

**Carolina Bruski Gonçalves², Airam Teresa Zago Romcy Sausen³, Paulo
Sérgio Sausen⁴**

¹ Pesquisa Institucional desenvolvida no Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, pertencente ao Grupo de Automação Industrial e Controle.

² Aluna do curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí.

³ Professora do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Unijuí.

⁴ Professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Unijuí.

Resumo: A predição do tempo de vida de baterias é algo de significativa importância, tendo em vista que é crescente a utilização de dispositivos móveis, os quais são alimentados por baterias portadoras de uma energia finita. Uma forma de realizar essa predição é através da modelagem matemática, por meio de modelos de baterias. Os modelos híbridos se destacam, pois são constituídos pela combinação de dois ou mais modelos distintos, e assim, agregam as vantagens de cada modelo que os compõem. Nesta pesquisa, é abordado o modelo híbrido de Kim, o qual é formado pela união de um modelo analítico com um modelo elétrico. Durante o processo de modelagem do tempo de vida de baterias, é necessária a estimação dos parâmetros pertencentes aos modelos que constituem o modelo híbrido. Estudos tem utilizado dados reais obtidos de uma plataforma de testes, para baterias de Lítio Íon Polímero (Li-Po) para a estimação dos parâmetros da parte analítica, enquanto que para os parâmetros da parte elétrica frequentemente tem sido utilizados dados da literatura técnica. Nesse contexto, nessa pesquisa é realizada a estimação dos parâmetros, tanto da parte analítica, quanto da parte elétrica do modelo híbrido; os resultados das simulações são comparados com os resultados do modelo híbrido que usa os parâmetros da parte elétrica da literatura. Visando garantir a confiabilidade da análise desta pesquisa, são empregados conceitos estatísticos para definir se a diferença entre os resultados é significativa. As simulações computacionais são realizadas na ferramenta computacional *MatLab/Simulink*. As análises realizadas mostram que há diferença na acurácia do modelo híbrido quando comparados os resultados, contudo, essa diferença não é significativa a nível de 5%.

Abstract: The prediction of battery life is of significant importance, given the increasing use of mobile devices, which are powered by batteries with a finite energy. One way to accomplish this prediction is through mathematical modeling, using battery models. Hybrid models stand out because they consist of the combination of two or more distinct models, and thus, add the advantages of each model that compose them. In this research, Kim's hybrid model is approached, which is formed by the union of an analytical model with an electric model. During the process of modeling the battery life, it is necessary to estimate the parameters belonging to the models that

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

constitute the hybrid model. Studies have used real data obtained from a test platform for Lithium Polymer (Li-Po) batteries for the estimation of analytical part parameters, while data from the electrical part frequently have used data from the technical literature. In this context, in this research the estimation of the parameters, both of the analytical part, and of the electric part of the hybrid model is performed; the results of the simulations are compared with the results of the hybrid model that uses the parameters of the electrical part of the literature. In order to guarantee the reliability of the analysis of this research, statistical concepts are used to define if the difference between the results is significant. The computational simulations are performed in the computational tool MatLab / Simulink. The analysis showed that there is a difference in the accuracy of the hybrid model when compared to the results, however, this difference is not significant at 5% level.

Palavras-chave: Modelagem Matemática. Modelos Matemáticos de Baterias. Modelo Híbrido.

Keywords: Mathematical Modeling. Mathematical Models of Batteries. Hybrid Model.

1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos móveis do tipo *smartphone*, emergem no cotidiano à medida que facilitam as tarefas do dia-a-dia. Esses dispositivos são alimentados por uma bateria que dispõe de energia finita, portanto é descarregada após um determinado tempo de uso. Nesse caso, o aparelho permanece inoperante até que seja conectado a uma fonte fixa de energia. Frente a isso, tornam-se relevantes as pesquisas acerca do tempo em que as baterias mantêm o dispositivo móvel operacional. Um recurso para a predição do tempo de vida útil de baterias é a modelagem matemática, pois descreve o processo de descarga das baterias sem demandar altos custos e, considera os efeitos e as características importantes deste processo. Os modelos matemáticos para a predição do tempo de vida útil de baterias podem ser classificados de acordo com suas características, sendo eles, os eletroquímicos, os elétricos, os analíticos, os estocásticos, os via identificação de sistemas, e os híbridos (JONGERDEN & HAVERKORT, 2008).

Os modelos híbridos são considerados uma classe promissora, visto que são formados pela união de dois ou mais modelos, e agregam as suas vantagens individuais. Em sua maioria são compostos por um modelo analítico e um elétrico, com isso são capazes de representar os principais efeitos não lineares do processo de descarga, como o efeito da taxa de capacidade e de recuperação, assim como as características elétricas da bateria (ZHANG *et al.* 2010; KIM & QIAO, 2011; GOMES *et al.*, 2016). O modelo híbrido proposto por Kim e Qiao (2011) é constituído pela união do modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I de Chen e Rincón-Mora (2006), e o modelo analítico *Kinetic Battery Model* (KiBaM) de Manwell e McGowan (1993). O modelo elétrico fornece as características de tensão e corrente, que são importantes no processo de descarga da

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

bateria, e o modelo analítico fornece o estado da carga (SOC), o tempo de vida da bateria, e também considera os efeitos não lineares (RAO *et al.*, 2003).

No Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), já foram desenvolvidos trabalhos realizando a aplicação do modelo híbrido de Kim e Qiao (2011) na predição do tempo de vida das baterias. Nos trabalhos iniciais com esse modelo foram utilizados (DUARTE, 2014; FRANZOZI, 2015; GOMES, 2017) valores para os parâmetros da parte elétrica obtidos da literatura técnica (KIM & QIAO, 2011; CHEN & RINCÓN-MORA, 2006), sendo estimados somente os parâmetros da parte analítica. Observa-se que as características da bateria de Li-Po da literatura são capacidade nominal de 860 miliampère (mA), tensão de *cutoff* de 3 volts (V), e tensão nominal de 3,7 V. Enquanto que as características das baterias de Li-Po utilizadas pelo GAIC são capacidade nominal de 800 mA, tensão de *cutoff* de 2,7 V, e tensão nominal de 3,7 V.

Na sequência desses estudos, Wottrich (2017) realizou a modelagem matemática do tempo de vida de baterias das baterias Li-Po utilizando o modelo elétrico para Predizer Runtime e Características V-I, que é o modelo utilizado na parte elétrica do modelo híbrido, estimando seus parâmetros empíricos por análise visual de curvas de descarga. Posteriormente, Alessi (2018), utilizou esses parâmetros e realizou a modelagem matemática do tempo de vida de baterias por meio de modelos híbridos com resultados satisfatórios, assim como utilizou a mesma bateria para realizar a estimação de parâmetros da parte analítica e da parte elétrica. Frente a isso, o principal objetivo deste artigo é verificar se houveram prejuízos na acurácia do modelo híbrido de Kim e Qiao (2011) quando foram utilizados parâmetros obtidos da literatura, e firmar por meio de teste estatístico se essa diferença é significativa a nível de 5% de confiabilidade.

O restante do artigo está organizado como segue. Na Seção 2 são apresentados os modelos utilizados na concepção do modelo híbrido, assim como o modelo híbrido e suas equações. Na Seção 3 são descritos os dados experimentais e os parâmetros utilizados neste trabalho. Na Seção 4, faz-se a análise e discussão dos resultados obtidos e, por fim, na Seção 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2.MODELAGEM MATEMÁTICA

Nesta seção é apresentado o modelo híbrido de Kim, o qual é composto por um modelo analítico e um modelo elétrico. Inicialmente são descritos os modelos originais que constituem o modelo híbrido, e em seguida, é apresentada a união entre os modelos originais, juntamente com as equações do modelo híbrido.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

2.1 MODELO ANALÍTICO

O modelo analítico *Kinetic Battery Model* (KiBaM), desenvolvido por Manwell e McGowan (1993), é um modelo cinético que modela os processos químicos da bateria. Nesse modelo, a carga da bateria é organizada em duas fontes, sendo denominadas carga limitada e carga disponível, conforme a Figura 1.

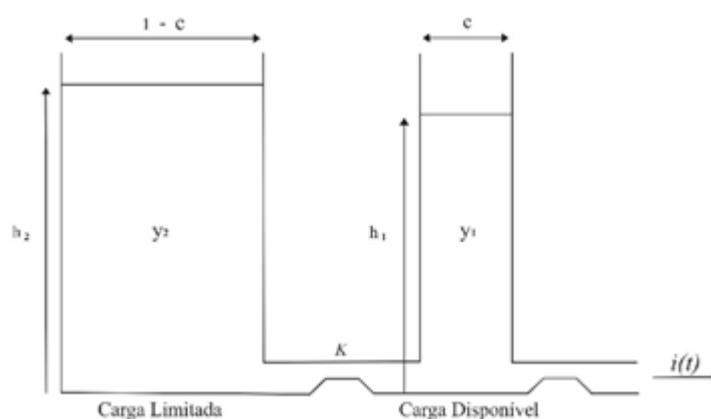


Figura 1: Modelo analítico KiBaM - divisão de cargas.

A fonte de carga limitada disponibiliza elétrons para a fonte de carga disponível, que por sua vez fornece elétrons à corrente $i(t)$, esse fluxo de elétrons entre as fontes de carga é descrito pelo parâmetro k . O parâmetro c é a capacidade com a qual a carga é distribuída na fonte de carga disponível, e uma fração $1 - c$ da capacidade total C é distribuída na fonte de carga limitada, onde $0 < c < 1$.

A mudança da carga nas duas fontes é descrita conforme o sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs),

$$\begin{cases} \frac{dy_1(t)}{dt} = -i(t) + k'cy_2(t) - k'(1-c)y_1(t), \\ \frac{dy_2(t)}{dt} = -k'cy_2(t) + k'(1-c)y_1(t). \end{cases} \quad (1)$$

As condições iniciais são as cargas no tempo $t = 0$, dadas por $y_1(0) = cC$ e $y_2(0) = (1 - c)C$, onde y_1 é a carga disponível e y_2 é a carga limitada. Considerando essas informações, a partir da resolução do sistema de EDOs por meio da Transformada de Laplace, obtém-se,

$$\begin{cases} y_1(t) = y_1(0)e^{-k't} + \frac{(y_0k'c-I)(1-e^{-k't})}{k'} - Ic\frac{k't-1+e^{-k't}}{k'}, \\ y_2(t) = y_2(0)e^{-k't} + y_0(1-c)(1-e^{-k't}) - \frac{I(1-c)(k't-1+e^{-k't})}{k'}, \end{cases} \quad (2)$$

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

onde: $k'=k/[1-cc]$ é definida a fim de facilitar a resolução do modelo, y_0 é a soma entre $y_1(0)$ e $y_2(0)$. Ainda é possível definir $\delta(t)$ que é a diferença entre as alturas, dada pela equação:

$$\delta(t) = h_2 - h_1 = \frac{y_2(t)}{1-c} - \frac{y_1(t)}{c}. \quad (3)$$

A bateria será considerada descarregada quando $y_1(t)$ for igual a zero. Assim, a carga indisponível $u(t)$ será expressa por:

$$u(t) = (1-c)\delta(t). \quad (4)$$

Esse modelo analítico é capaz de capturar os principais efeitos não lineares presentes no processo de descarga da bateria, sendo eles o efeito da taxa de capacidade e o efeito de recuperação. O efeito da taxa de capacidade está diretamente ligado a corrente de descarga aplicada na bateria, para correntes mais altas a capacidade efetiva é reduzida. O efeito de recuperação ocorre em momentos de relaxação, ou seja, quando a corrente de descarga é nula ou significativamente reduzida, nesses momentos, as espécies eletroativas possuem tempo suficiente para se reorganizarem no eletrólito, aumentando a capacidade efetiva da bateria (JONGERDEN & HAVERKORT, 2009).

2.2 MODELO ELÉTRICO

O modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I, de Chen e Rincón-Mora foi proposto para simular o tempo de vida das baterias e as respostas transientes de curta e longa duração. Na Figura 2, pode ser visualizado o circuito que representa o modelo, onde o lado esquerdo é baseado no modelo *Runtime* e representa o tempo de vida da bateria, enquanto o lado direito é baseado no modelo de Thévenin, possui uma rede resistiva capacitiva e representa o comportamento transiente da bateria (CHEN & RINCÓN-MORA, 2006).

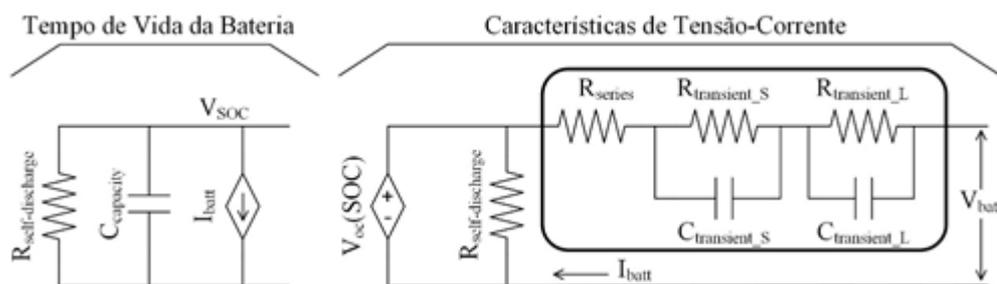


Figura 2: Modelo elétrico para Predizer Runtime e Características V-I.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Uma característica modelada por este circuito, é a capacidade utilizável, que representa a energia extraída quando a bateria é descarregada, partindo do estado de carga (SOC) completo. Essa capacidade diminui com o aumento dos ciclos da bateria e com o tempo de armazenamento da carga. Esse fenômeno é modelado por um capacitor carregado, um resistor de auto descarga e um resistor equivalente.

$$Z_{eq} = R_{transient_L} + R_{transient_S} + R_{series}, \quad (5)$$

onde: Z_{eq} é o resistor equivalente, os resistores $R_{transient_L}$ e $R_{transient_S}$ são responsáveis pela resistência transiente de longa e curta duração, e R_{series} caracteriza a resposta imediata frente a correntes de carga e/ou descarga. As equações que modelam a tensão transiente são funções do SOC e são dadas pelas equações abaixo:

$$V_{oc}[SOC(t)] = a_0^{a_1[SOC(t)]} + a_2 + a_3[SOC(t)] - a_4[SOC(t)]^2 + a_5[SOC(t)]^3, \quad (6)$$

$$R_{series} = b_0^{-b_1[SOC(t)]} + b_2 + b_3[SOC(t)] - b_4[SOC(t)]^2 + b_5[SOC(t)]^3, \quad (7)$$

$$R_{transient_S}[SOC(t)] = c_0^{-c_1[SOC(t)]} + c_2, \quad (8)$$

$$C_{transient_S}[SOC(t)] = d_0^{-d_1[SOC(t)]} + d_2, \quad (9)$$

$$R_{transient_L}[SOC(t)] = e_0^{-e_1[SOC(t)]} + e_2, \quad (10)$$

$$C_{transient_L}[SOC(t)] = f_0^{-f_1[SOC(t)]} + f_2, \quad (11)$$

onde: os capacitores $C_{capacity_L}$ e $C_{capacity_S}$ configuram as capacitâncias transientes longa e curta duração, sendo que o potencial $V_{oc}(SOC)$ é a fonte e tensão dependente. A tensão V_{soc} é caracterizada por uma variação de 0 V, resultando em um SOC de 0% a 1 V, resultando em um SOC de 100%.

Já o potencial V_{batt} , é dado por,

$$V_{batt} = V_{oc} - I_{batt} * Z_{eq}, \quad (12)$$

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

onde: potencial V_{oc} representa a tensão em circuito aberto, e I_{batt} é a fonte de corrente controlada.

Esse modelo, apesar de apresentar uma boa acurácia, não comporta os efeitos não lineares, como efeito de recuperação e efeito da taxa de capacidade (CHEN & RINCÓN-MORA, 2006).

2.3 MODELO HÍBRIDO

O modelo híbrido de Kim, proposto por Kim e Qiao (2011), é constituído pela união do modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I, com o modelo analítico KiBaM. A união destes modelos, agrega ao modelo híbrido as vantagens de capturar os efeitos não lineares da taxa de capacidade e de recuperação, assim como as características elétricas da bateria, como tensão e corrente. O desenvolvimento do modelo híbrido ocorre com a substituição dos componentes responsáveis pelo estado da carga e o tempo de vida da bateria, no modelo elétrico, pelas equações baseadas no modelo analítico KiBaM. A representação esquemática do modelo híbrido é mostrada na Figura 3.

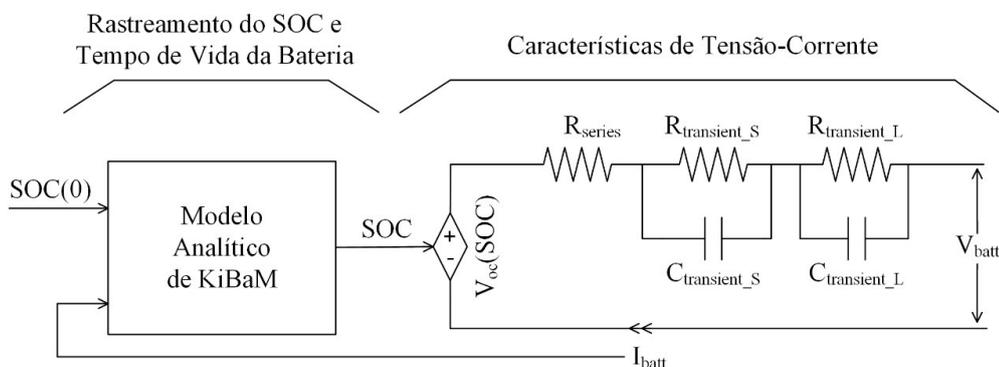


Figura 3: Modelo híbrido de Kim.

Para realizar a modelagem do processo de descarga da bateria, considera-se um período de tempo em que $t_0 < t < t_r$; no período de $t_0 < t < t_d$, com $t_d < t_r$, a bateria é descarregada por uma corrente constante ($i_{cell} = I > 0$), e passa por um momento de relaxação no período de $t_d < t < t_r$, com $i_{cell} = 0$. Assim o SOC pode ser determinado pela seguinte equação,

$$SOC(t) = \frac{C_{available}(t)}{C_{max}}, \quad (13)$$

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

onde: $C_{available}(t)$ e C_{max} são a capacidade disponível e a capacidade nominal da bateria respectivamente. Por sua vez, a capacidade disponível da bateria $C_{available}(t)$, é determinada por:

$$C_{available}(t) = C_{initial} - l(t) - C_{unavailable}(t), \quad (14)$$

onde: $C_{initial}$ é a capacidade inicial da bateria, $l(t)$ é a carga total consumida pelo sistema, que é dada por:

$$l(t) = \int i_{cell}(t) dt. \quad (15)$$

Para determinar $C_{unavailable}(t)$ utiliza-se as equações do modelo KiBaM. Desta forma,

$$C_{unavailable}(t) = u(t), \quad (16)$$

onde: $u(t)$ é dada por:

$$u(t) = \begin{cases} (1 - c)[\delta(t_0)e^{-k'(t-t_0) + \frac{1}{c} \cdot \frac{1-e^{-k'(t-t_0)}}{k'}}], & t_0 < t < t_d, \\ (1 - c)\delta(t_d)e^{-k'(t-t_d)}, & t_d < t < t_r. \end{cases} \quad (17)$$

Sendo que c é a capacidade total da bateria, $\delta(t_0)$ é a diferença entre as alturas das fontes do modelo KiBaM no início do processo de descarga, k' é a constante relacionada com a taxa de difusão de energia entre as fontes de carga, $\delta(t_d)$ é a diferença entre as alturas das fontes do modelo KiBaM no tempo final do processo de descarga, I é a corrente de descarga, t_0 é o tempo inicial, t_d é o tempo final de descarga, ou seja é o tempo que resta para terminar o período.

Durante o processo de descarga, que acontece no período de $t_0 < t < t_d$, os valores da função $u(t)$ aumentam, caracterizando o aumento da carga indisponível, representando o efeito não linear da taxa de capacidade. Já no intervalo $t_d < t < t_r$, os valores para $u(t)$ diminuem, ou seja, a carga indisponível diminui, pois a carga da fonte indisponível flui para a fonte de carga disponível, representando assim, o efeito não linear de recuperação. Assim, $C_{unavailable}(t)$ também pode ser expressa por:



Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

$$C_{unavailable}(t) = \begin{cases} C_{unavailable}(t_0)e^{-k'(t-t_0)} + (1-c)\frac{I}{c} \cdot \frac{1-e^{-k't-t_0}}{k'}, & t_0 < t < t_d, \\ C_{unavailable}(t_d)e^{-k'(t-t_d)}, & t_d < t < t_r. \end{cases} \quad (18)$$

Desta forma, o SOC é descrito por:

$$SOC(t) = SOC_{initial} - \frac{1}{C_{max}} [i_{cell}(t)dt + C_{unavailable}(t)], \quad (19)$$

onde: $SOC_{initial}$ é o SOC estimado antes de t_0 , $i_{cell}(t)$ é a corrente de descarga, e $C_{unavailable}(t)$ é a capacidade indisponível da bateria que é proveniente do modelo KiBaM. A tensão $V_{cell}(t)$ do modelo é expressa por:

$$V_{cell}(t) = V_{oc}[SOC(t)] - i_{cell}(t) \cdot R_{series} - V_{transient}(t), \quad (20)$$

onde: $V_{oc}[SOC(t)]$ é a tensão em circuito aberto, R_{series} são as resistências em série e $V_{transient}(t)$ é a tensão transiente. Esses termos são descritos pelas equações originárias do modelo elétrico, as quais modelam a tensão transiente são funções do SOC e são dadas pelas equações (6), (7), (8), (9), (10) e (11).

3. METODOLOGIA

Os dados experimentais necessários para a estimação dos parâmetros do modelo híbrido, assim como para a validação do mesmo, são provenientes do trabalho desenvolvido por Wottrich (2017). Estes dados experimentais foram obtidos através de uma plataforma de testes desenvolvida no GAIC, sendo que foram utilizadas oito baterias novas do tipo Li-Po, série 383562-2C com tensão nominal de 3,7 volts e capacidade nominal de 800 mAh adotando-se carga lenta.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Tabela 1: Dados experimentais.

Perfil	TV_{e1}	TV_{e2}	TV_{e3}	TV_{e4}	TV_{e5}	TV_{e6}	TV_{e7}	TV_{e8}	TV_{ex}
50	964,07	980,42	860,43	922,15	920,43	993,96	931,38	950,08	940,37
75	593,06	607,28	626,98	599,75	586,9	652,15	582,58	606,78	606,94
100	464,71	474,42	460,45	466,3	470,75	459,03	445,53	486,62	465,98
125	388,48	392,93	375,03	367,4	380,9	393,65	381,55	398,17	384,76
150	283,02	311,72	302,97	307,58	345,03	297,62	279,48	305,38	304,1
175	280,85	274,5	271,33	285,07	297,07	253,5	246,43	269,1	272,23
200	232,2	219,18	213,95	236,18	218,83	235,7	239,72	228,12	227,99
225	206,45	191,38	188,35	207,45	199,83	211,8	214,07	208,58	203,49
250	191,23	173,47	167,72	188,93	182,78	190,15	193,12	184,65	184,01
275	170,48	159,63	145,22	168,08	165,87	171,35	175,63	165,1	165,17
300	156,15	148,23	142,28	156,65	157,58	140,68	138,83	155,37	149,47
325	141,57	145,68	149,53	143,47	148,45	129,85	126,4	145,33	141,29
350	126,53	137,71	139,57	131,23	133,43	123,65	118,67	132,97	130,47
375	118,63	128,93	130,68	123,57	127,72	111,52	118,87	124,96	123,11
400	115,55	117,75	121,52	115,78	118,8	107,9	101,9	117,5	114,59
425	111	113,72	94,47	110,13	105,3	109,03	114,4	109,01	108,38
450	102,45	105,05	109,6	103,15	106,82	89,8	87,28	103,15	100,91
475	97,28	98,67	91,68	97,54	101,72	86,11	82,9	98,18	94,26
500	91,98	93,93	97,11	92,68	96,7	83,13	78,65	90,45	90,58
525	88,57	91,3	93,15	85,28	92,63	78,67	74,11	85,85	86,2
550	83,77	85,06	88,77	82,48	87,46	72,67	68,9	84,42	81,69
575	80,42	83,11	82,88	80	83,13	68,13	65,85	79,23	77,84
600	77,1	77,98	81,31	76,15	80,57	65,5	62,68	76,25	74,69
625	73,6	74,38	77,58	72,4	77,3	62,42	59,83	73,12	71,33
650	71,05	71,67	74,67	70,03	74,13	59,42	55,9	70,38	68,41
675	68,35	69	71,68	67,78	71,63	57,18	53,42	68,73	65,97
700	65,9	66,37	69,48	64,73	69,76	54,73	51,85	65,28	63,51
725	63,53	63,77	66,68	62,27	66,42	51,62	48,27	62,98	60,69
750	64,12	50,2	47,06	60,87	61,32	61,72	64,42	59,72	58,68
775	62,35	47,96	44,04	58,87	59,73	59,8	62,08	58,23	56,63
800	60,1	46,32	42,5	56,92	57,3	57,78	60,07	56,13	54,64

Fonte: Wottrich (2017).

Na Tabela 1 são apresentados os dados experimentais, sendo que TV_e são as repetições realizadas para cada perfil de corrente, e TV_{ex} é o tempo de vida experimental médio para cada perfil. Destaca-se que os resultados experimentais são divididos em dois conjuntos, o primeiro é utilizado para a estimação dos parâmetros do modelo híbrido, e o segundo para a simulação e validação do

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

modelo. Wottrich (2017) estimou os parâmetros da parte elétrica do modelo elétrico para Predizer *Runtime* e Características V-I, que são apresentados Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros elétricos estimados com a bateria utilizada no GAIC.

a0	-1,0931	b1	41,0174	d2	548,3854
a1	23,8482	b2	0,3169	e0	0,3325
a2	3,7037	c0	0,5927	e1	4,2892
a3	0,0808	c1	18,7453	e2	0,0146
a4	-0,2980	c2	0,0721	f0	-2342,0565
a5	0,1428	d0	-455,1850	f1	6,3571
b0	1,0632	d1	9,4617	f2	3036,0800

Fonte: Wottrich (2017).

Posteriormente, Alessi (2018), estimou os parâmetros da parte analítica, conforme apresentado na Tabela 3. Esses parâmetros foram utilizados juntamente com os parâmetros da parte elétrica acima apresentados, constituindo os parâmetros do modelo híbrido de Kim.

Tabela 3: Parâmetros analíticos.

y_0	2825
y_1	2599,30
y_2	225,7
c	0,9201
k'	0,000519

Fonte: Alessi (2018).

Nesta pesquisa, o modelo híbrido de Kim foi simulado com os dados da parte elétrica da literatura. Esses parâmetros podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros elétrico obtidos da literatura técnica.

a0	-0,852	b0	0,1463	c0	0,1063	e0	0,0712
a1	63,867	b1	30,27	c1	62,49	e1	61,4
a2	3,6297	b2	0,1037	c2	0,0437	e2	0,0288
a3	0,559	b3	0,0584	d0	-200	f0	-3083
a4	0,51	b4	0,17473	d1	-138	f1	180
a5	0,508	b5	0,1288	d2	300	f2	5088

Fonte: Kim e Qiao (2011).

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

As simulações da previsão do tempo devida de baterias, para o modelo híbrido de Kim, são realizadas no *software MatLab/Simulink*, utilizando os parâmetros analíticos da Tabela 3 e elétricos da Tabela 4. Posteriormente é realizada a validação do modelo, e o cálculo do erro médio. O erro obtido com estes parâmetros, é comparado com o erro obtido por Alessi (2018), o qual realizou as simulações com os parâmetros das Tabelas 2 e 3.

Objetivando apresentar um estudo completo e confiável, após o cálculo do erro é realizada uma análise da significância desta diferença. Para tal, é calculado o valor p , a partir de uma função já implementada no *MatLab*. O valor p , é também conhecido como nível descritivo ou probabilidade de significância. Inicialmente, definiram-se as hipóteses nula e alternativa, H_0 e H_1 , respectivamente. Assim como o nível de significância, ou seja, para qual valor de p define-se que a hipótese nula é equivocada e assume-se a hipótese alternativa, ou seja, a hipótese do pesquisador (VICTOR & PAES, 2010).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 5 são apresentados os perfis de descarga utilizados para a validação do modelo, onde TV_{ex} é o tempo de vida experimental, TV_{SA} é o tempo de vida simulado, e o erro A representa os resultados obtidos por Alessi (2018), enquanto que o tempo de vida simulado TV_{SB} e o erro B representam os resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 5: Simulações e erros (%) dos tempos de vida de baterias de Li-Po.

Perfil (mA)	TV_{ex} (min)	TV_{SA} (min)	$Erro_A$ (%)	TV_{SB} (min)	$Erro_B$ (%)
75	606,94	630,72	3,92	637,60	5,05
100	465,98	471,35	1,15	477,40	2,45
125	384,76	375,75	2,34	381,27	0,90
150	304,10	312,03	2,60	317,18	4,30
175	272,23	266,53	2,09	271,42	0,29
225	203,49	205,90	1,18	210,40	3,39
275	165,17	167,35	1,31	171,58	3,88
475	94,26	94,52	0,27	98,13	4,10
Erro médio			1,86		3,05

Fonte: Autora (2019).

O cálculo do erro retrata qual a confiabilidade desse estudo, visto que quando obtido um erro menor que 5% o modelo é considerado acurado (TRIOLA, 1999). Além disso, ao realizar a comparação entre os erros médios apresentados na pesquisa anterior (ALESSI, 2018) e os resultados da pesquisa atual, percebe-se que há diferença entre os valores.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Na sequência, foi calculado o valor p , para isso, considerou-se que H_0 significa que não há diferença entre utilizar baterias iguais ou distintas para a estimação dos parâmetros elétricos e analíticos do modelo, enquanto H_1 , significa que há diferença. Para o nível de significância foi utilizado 0,05, assim, obtendo-se o valor p menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula, e aceita-se a hipótese alternativa. E, obtendo-se o valor p maior que o nível de significância, rejeita-se a hipótese alternativa e aceita-se a hipótese nula. Com o valor p calculado via função já implementada no *MatLab*, obteve-se para o modelo híbrido de Kim, valor p igual a 0,2028. Assim, sendo p maior que o nível de significância, assumiu-se a hipótese nula.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises realizadas, considerando os resultados obtidos, verificou-se que há diferença entre os valores de erros médios, quando utilizada a mesma bateria ou baterias distintas para a parametrização das partes analítica e elétrica do modelo híbrido de Kim. Contudo, a partir do cálculo do valor p , conclui-se que não há diferença estatística a nível de significância de 5% entre utilizar a mesma bateria ou baterias distintas para a parametrização.

REFERÊNCIAS

ALESSI, O. "Análise comparativa do nível de acurácia de modelos híbridos utilizados para prever o tempo de vida de baterias", **Dissertação de Mestrado**, UNIJUI, 2018.

CHEN, M; RINCÓN-MORA, G. A. "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, jun. 2006. p. 504-511.

DUARTE, K. P. "Aplicação de um modelo híbrido para predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis," **Dissertação de Mestrado**, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, abr. 2014.

FRANSOZI, L., "Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio íon polímero através de modelos híbridos," **Dissertação de Mestrado**, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, fev. 2015.

GOMES, L. B.; SAUSEN, A. T. Z. R.; SAUSEN, P. S.; FREITAS, D. J. B., "Proposição de um Modelo Híbrido para a Predição do Tempo de Vida de Baterias usando a Lei de Peukert Estendida", In: **Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**, Gramado, 2016.

GOMES, L. B., "Proposição de um modelo híbrido considerando a lei de peukert estendida para a

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

predição do tempo de vida de baterias,” **Dissertação de Mestrado**, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, mar. 2017.

JONGERDEN, M. R.; HAVERKORT, B. “Battery modeling”, **Faculty Electrical Engineering**, Tech. Rep., jan. 2008.

JONGERDEN, M. R.; HAVERKORT, B. R. “Which battery model to use?”, **IET software**, vol. 3, no. 6, pp. 445-457, 2009.

KIM, T.; QIAO W. “A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects”, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, dez. 2011. p. 1172-1180.

MANWELL, J.; MCGOWAN, J., “Lead acid battery storage model for hybrid energy systems”, **Solar Energy**, vol. 50, 1993. p. 399-405.

RAO, R.; VRUDHULA, S.; RAKHMATOV, D. N. “Battery modeling for energy-aware system design”, **IEEE Computer Society**, p. 77-87, dez. 2003.

TRIOLA, M. F., “**Introdução à Estatística**”, Rio de Janeiro-RJ: LTC, 1999.

VICTOR, E. da S.; PAES, A. T., “Reflexões sobre a importância do valor p: parte 1”, **Eisten: Educação Continuada em Saúde**, pp. 109-110, (2010).

WOTTRICH, S. C., “Modelagem matemática do tempo de vida de baterias de lítio íon polímero a partir do modelo elétrico para prever *runtime* e características v-i”, **Dissertação de Mestrado**, UNIJUI, 2017.

ZHANG, J.; CI S.; HAMID S.; ALAHMAD M. “An enhanced circuit-based model for single-cell battery”. In: **2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**, IEEE, 2010. p. 672-675.