

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LIMA BUZZÁ

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO EM  
APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

CURITIBA

2018

ANDRÉ LIMA BUZZÁ

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO EM  
APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Coorientador: Dr. Juliano de Andrade

CURITIBA

2018

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

ANDRÉ LIMA BUZZÁ

### **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO EM APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista no Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Patricio Rodolfo Impinnizi

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. João Américo Vilela

Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 26 de junho de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, meus pais Maria Teresa e José Buzzá e a minha irmã Lisa pelo amor, incentivo e dedicação em sempre me apoiarem.

Agradeço ao Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki pela orientação, dedicação, conselhos e amizade.

Agradeço ao Dr. Juliano de Andrade pela coorientação, supervisão, pelos diversos conhecimentos passados nesses anos de experiência de laboratório, pela paciência e amizade.

Agradeço também ao Prof. Dr. Patrício Impinnisi por toda assitência, ensinamentos e dedicação sempre que foi lhe pedido e pela amizade.

Agradeço aos meus colegas do laboratório dos Institutos Lactec pela disposição, paciência, ajuda e dedicação.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos passados, contribuindo para a minha formação.

## RESUMO

Existem muitos sistemas de geração energia elétrica renovável tanto conectados a rede quanto isolados, inclusive com o uso de sistemas de armazenamento com baterias. Porém poucas vezes se usa uma previsão mais precisa do desgaste das baterias em aplicação na escolha de acumuladores ou na elaboração projetos pequenos. Dessa forma, o diferencial desse projeto consiste no desenvolvimento de um modelo de estimação de degradação para a otimização do uso desses sistemas de armazenamento de acordo com o modelo de desgaste das baterias, obtendo assim o modo ótimo de uso sob as diversas condições das aplicações. O modelo de envelhecimento calcula a estimativa de vida útil da bateria considerando não somente a quantidade de ciclos realizada quanto também a temperatura da bateria. Aplicando esse algoritmo a diferentes baterias é possível encontrar, através da vida-útil, o melhor modelo de acumulador a satisfazer as aplicações em questão, incluindo diferentes tecnologias de bateria com seu custo-benefício.

Palavras chave: Baterias, Armazenamento de Energia, Microgrids.

## **ABSTRACT**

There are already many renewable energy generation systems on-grid and off-grid using batteries to store eventual exceeded generated energy in operation. However, is not very often to find some lifespan by application prediction algorithm being used to choose or to design a small storage system with batteries for microgrids. This project consists in developing a model of battery degradation prediction to improve the understanding and use of battery storage systems. The model of battery ageing calculates the lifespan considering not only the number of cycles but also the operation temperature. The algorithm can be applied to different batteries and find the battery model that suits better for the application.

Key words: Batteries, Storage systems, Microgrids.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
1.1	Contexto .....	8
1.2	Objetivos.....	9
1.3	Justificativas .....	9
1.4	Estrutura da monografia .....	10
<b>2</b>	<b>TECNOLOGIAS DE BATERIAS E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO</b>	<b>11</b>
2.1	Introdução .....	11
2.2	Tecnologia de Baterias de Chumbo-Ácido .....	11
2.2.1	Aspectos eletroquímicos e físicos .....	11
2.2.2	Aplicações .....	13
2.2.3	Mecanismos de Degradação .....	13
2.2.4	Capacidade, Segurança e Meio ambiente .....	15
2.3	Tecnologias de bateria de Lítio .....	17
2.3.1	Aspectos eletroquímicos e físicos .....	18
2.3.2	Aplicações .....	21
2.3.3	Mecanismos de degradação .....	21
2.3.4	Capacidade, Segurança e Meio ambiente .....	22
2.4	Considerações finais do capítulo .....	23
<b>3.</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>24</b>
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTO.....</b>	<b>27</b>
4.1	Modelo de degradação instantâneo .....	27
4.2	Equacionamento do modelo .....	29
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>44</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

O armazenamento de energia em grandes bancos de baterias no moderno sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica vem sendo cada vez mais explorado por conta de diversos fatores. Dentre estes fatores se destacam a necessidade de desenvolver a geração distribuída (em substituição da centralizada), a introdução em larga escala de fontes de energia renováveis (intermitentes por natureza), o atendimento a comunidades isoladas (sem conexão à rede convencional de fornecimento de energia elétrica), a necessidade de melhorar a qualidade da energia fornecida e de otimizar a utilização da infraestrutura do sistema elétrico como um todo (adiando investimentos).

No caso do Brasil, se observa um crescimento significativo da contribuição das fontes renováveis, principalmente solar e eólica, à matriz energética. Junto com as vantagens e benefícios trazidos pela utilização em grande escala de energia proveniente de fontes renováveis, alguns problemas ficam evidentes. Um deles é a intermitência. A solução deste problema (que não permitiria ter uma matriz com mais de 10-15% de geração intermitente) é o armazenamento de energia. Este armazenamento tem como objetivo principal funcionar como amortecedor das variações imprevisíveis inerentes às fontes de energia renováveis como a solar ou a eólica

Em sistemas isolados, a relevância dos sistemas de armazenamento de energia ligados às fontes renováveis fica mais evidente ainda, pois sem um sistema estável e de fornecimento contínuo o fornecimento de energia oscilaria ao mesmo ritmo da própria geração.

Em virtude dos aspectos assinalados, o setor elétrico vem estudando a problemática envolvida com a introdução de sistemas de armazenamento de energia nas redes elétricas com o objetivo de otimizar o sistema (incluindo a acumulação de energia em bancos de baterias) e desenvolver as ferramentas de prevenção e controle. Neste sentido, e no contexto mencionado, o presente trabalho terá como foco principal

o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização da operação de bancos de baterias conectados à rede elétrica.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento e o desempenho de sistemas de armazenamento de energia com baterias em aplicações de potência, conectados à rede elétrica, com geração fotovoltaica.

Por sua vez, os objetivos específicos são:

1. Identificar as variáveis físicas que impactam a taxa de degradação de baterias (e portanto que afetam sua durabilidade) para o caso de baterias de chumbo-ácido e íons de lítio
2. Desenvolver uma relação entre a taxa de degradação das baterias e cada uma das variáveis físicas para o caso de baterias de chumbo-ácido e íons de lítio
3. Propor um modelo matemático (uma equação) para medir a taxa de degradação em função das condições de operação do sistema de armazenamento de energia para o caso de baterias de chumbo-ácido e íons de lítio .
4. Validar o modelo proposto para as baterias de chumbo-ácido utilizando dados de operação em campo (em sistemas isolados);
5. Avaliar a utilidade da previsão de vida útil das baterias no custo-benefício de projetos, como custos de operação e manutenção e análise de viabilidade técnico-econômica.

## **1.3 Justificativas**

Atualmente existem inúmeros sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, tanto conectados a rede quanto isolados, inclusive com o uso de diferentes sistemas de armazenamento. Porém poucas são as referências, como em (Jorn M. Reniers et al, 2018)(Samuel Pelletier et al, 2017)(Ruixin Yang et al, 2017), que mencionem algum tipo de algoritmo de controle do sistema em função de premissas preestabelecidas como, por exemplo, operar o sistema para maximizar a durabilidade

das baterias, ou definir a operação para minimizar os custos de manutenção, ou para maximizar os lucros, ou a satisfação dos clientes, ou qualquer outra diretriz. Dessa forma, a presente proposta pretende desenvolver um modelo de controle da operação do SAE para otimizar seu uso em função das condições de operação. Se espera que o desenvolvimento deste trabalho permita simular esses sistemas e compreender os principais impactos da operação na degradação dos sistemas de armazenamento de energia a base de baterias.

#### **1.4 Estrutura da monografia**

Este trabalho está dividido em seis capítulos; Introdução, onde é feita uma contextualização e apresenta a motivação do trabalho. O capítulo Tecnologias de baterias e mecanismos de degradação, apresenta um levantamento teórico sobre o funcionamento e a degradação em baterias. O Estado da arte apresenta algumas principais publicações na área. Procedimento apresenta o passo a passo da elaboração do método de estimativa de degradação. Na parte dos Resultados, apresenta-se a aplicação do algoritmo num sistema de geração fotovoltaico isolado com armazenamento com bateria chumbo-ácido. Na Conclusão, aponta-se as principais observações e sugere-se trabalhos futuros.

## 2 TECNOLOGIAS DE BATERIAS E MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

### 2.1 Introdução

Os conteúdos das seções 2.1 até 2.3 são baseados nos capítulos da referência *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing* - Moseley and Garche, conforme especificado em cada seção.

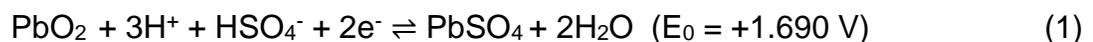
Atualmente, dentre todos os tipos de baterias existentes, as tecnologias mais utilizadas para as diversas aplicações de potência são as baterias chumbo-ácido, íons de lítio e de níquel metal-hidreto, porém as tecnologias escolhidas para serem abordadas neste trabalho foram as chumbo-ácido e íons de lítio por serem as mais utilizadas no Brasil.

### 2.2 Tecnologia de Baterias de Chumbo-Ácido

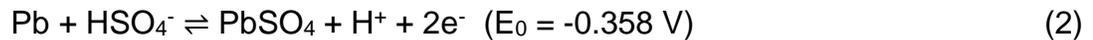
As baterias de chumbo-ácido tiveram o seu início há mais de 150 anos quando Gaston Plantè introduziu a possibilidade de se obter uma corrente elétrica a partir de duas placas de chumbo submersas em ácido sulfúrico. Após isso, Camille Fauré propôs o uso de pasta nas placas. Desde então, houveram muitas variações de formato, mas sem grandes mudanças nos aspectos fundamentais da sua operação e dos seus principais mecanismos de degradação.

#### 2.2.1 Aspectos eletroquímicos e físicos

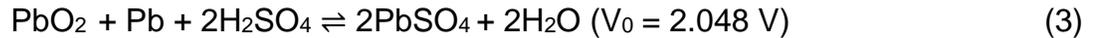
A reação química da bateria chumbo-ácido, para uma carga/descarga, é, na placa positiva:



e na negativa:



resultando na reação global:



No processo de descarga os íons de  $\text{HSO}_4^-$  migram para a placa negativa e reagem com o chumbo, produzindo sulfato de chumbo ( $\text{PbSO}_4$ ) e íons  $\text{H}^+$ . O sulfato é isolante. A reação libera dois elétrons no eletrodo negativo, que circulam pelo circuito externo (realizando trabalho) até o eletrodo positivo,. Como o eletrólito ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) faz parte da reação de carga e descarga (ver equações xxx e yyy), a variação na concentração do mesmo acaba sendo uma forma simples de se medir seu estado de carga (SoC). Esta possibilidade é uma característica exclusiva das baterias de chumbo-ácido.

Na carga, o processo é o inverso. Conforme a célula se aproxima de estar totalmente carregada, a maioria do  $\text{PbSO}_4$  (tanto na placa positiva como na placa negativa) já foi convertido novamente a  $\text{PbO}_2$ ,  $\text{Pb}$  liberando íons sulfato que aumentam a concentração do ácido sulfúrico. Se for mantida uma corrente de carga mesmo após a célula estar totalmente carregada (ou seja, quando não há mais sulfato para ser transformado em  $\text{PbO}_2$  ou  $\text{Pb}$ ), a reação que acontecerá será a de decomposição da água, liberando gases, hidrogênio na placa negativa e oxigênio na placa positiva, o que resulta na perda de água do eletrólito (a bateria seca) A perda de água e a sulfatação são dois dos principais mecanismos de degradação das baterias de chumbo-ácido.

Os principais componentes de uma célula unitária de chumbo-ácido são o dióxido de chumbo na placa positiva e o chumbo metálico (poroso) na placa negativa. Cada um destes eletrodos (placas) está em contato com um coletor de corrente (a denominada grade, que é de chumbo)e com uma solução de ácido sulfúrico concentrada (que é o eletrólito). Entre as placas há ainda o separador, feito de material poroso e isolante (para impedir o curto-circuito entre as placas de diferentes polaridades). Todos estes componentes ficam dentro de um vaso ou recipiente,

geralmente feito de polipropileno. A maioria das baterias de chumbo-ácido tem suas placas (internamente) ligadas em diferentes configurações série/paralelo.

### **2.2.2 Aplicações**

As baterias chumbo-ácido são aplicadas em inúmeras áreas (permanece ainda como a bateria mais utilizada no mundo), com demandas por diferentes regimes de operação. Como exemplos de aplicações comuns, elas são utilizadas em veículos à combustão (baterias de arranque), veículos híbridos (HEVs) e elétricos (EVs) (baterias de tração), no-breaks (baterias estacionárias) e atualmente nas redes elétricas no controle de parâmetros de qualidade (como afundamentos de tensão, controle de frequência, entre outros). Em todos os casos a bateria deve suprir a energia necessária para a aplicação.

Junto com as questões técnicas, outro fator importante a ser considerado é o custo (de compra, instalação, operação e manutenção). As baterias chumbo-ácido são geralmente usadas em larga escala devido a sua robustez e baixo custo de aquisição se comparada com outras tecnologias. Outra vantagem das baterias de chumbo-ácido é o conhecimento adquirido em 150 anos de utilização da tecnologia. Neste período de tempo muitos aspectos da sua operação foram estudados e entendidos. Entre eles os mecanismos de degradação, que são o foco do trabalho proposto.

### **2.2.3 Mecanismos de Degradação**

As baterias de chumbo-ácido apresentam uma eficiência coulômbica em Ah (relação entre a carga fornecida no processo de carregamento e a carga devolvida durante ao processo de descarga) de aproximadamente 85%. Quanto menor a taxa de carga e descarga (ou seja, menor a corrente), mais eficientes são (pois diminuem as reações paralelas de decomposição de água).

As células de chumbo-ácido, como todas as baterias em geral, apresentam uma perda de desempenho com o passar do tempo devido a sua degradação. As formas mais frequentemente observadas de degradação dessas baterias, são:

- Expansão da placa positiva

A reação de carga, que transforma o  $\text{PbO}_2$  (volume molar de  $25 \text{ cm}^3/\text{mol}$  de Pb) em  $\text{PbSO}_4$  (volume molar de  $50 \text{ cm}^3/\text{mol}$  de Pb) aumentando o volume na placa positiva e conseqüentemente causa estresse mecânico que causa queda de material (esfarelamento da placa).

- Perda de água

A produção de hidrogênio e oxigênio durante uma sobrecarga, causa uma redução no volume do eletrólito podendo chegar ao ponto em que parte do material ativo das placas fica em contato com o ar. O contato das placas com o ar inutiliza as mesmas, perdendo capacidade (proporcional à área da placa em contato com o ar). Este processo pode se autoacelerar, uma vez que a perda de água aumenta a resistência interna, que por sua vez gera um maior aquecimento durante carga e assim mais decomposição de água (decomposição por eletrólises e não evaporação).

- Sulfatação irreversível

A sulfatação irreversível (diferentemente da sulfatação produto da descarga, que é normal e reversível), tem várias fontes. Uma delas é a estratificação do ácido. Na recarga, ácido sulfúrico é produzido e entre as placas há uma tendência de se ter uma maior concentração de ácido nessa região, com maior densidade relativa, o ácido mais concentrado se "deposita" no fundo da célula. Essa variação vertical de concentração do eletrólito pode causar sulfatação irreversível na parte inferior das placas (além de corrosão acelerada). Outra fonte de sulfatação é o carregamento incompleto. Se os eletrodos forem mantidos descarregados, pode haver uma redução na capacidade da bateria devida à formação de grandes cristais de sulfato de chumbo que não são reduzidos durante a carga (sulfatação irreversível por falta de carga)..

- Corrosão

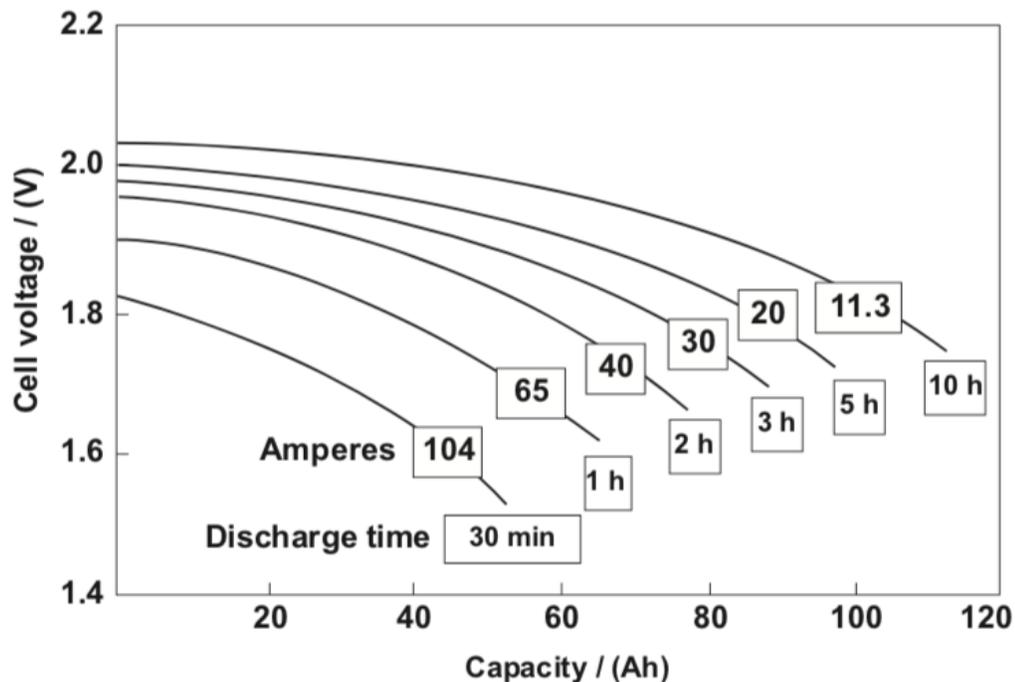
A grade positiva está sujeita a corrosão, devido a sua composição (chumbo metálico), à presença do eletrólito (ácido sulfúrico), ao potencial da placa (potenciais muito positivos) e à temperatura (que acelera os processos). O produto dessa corrosão

é geralmente mais resistivo do que a grade de chumbo original, resultando numa queda de tensão maior entre os terminais da bateria. Em casos extremos, resulta na rupturada grade e assim, perda da placa. No caso especial da sulfatação da placa negativa ela é principalmente ocasionada pelo tempo em estado de baixa carga, com a formação de sulfato de chumbo irreversível.. Este problema é frequente em aplicações que exijam que a bateria se mantenha em um estado parcial de carga na maior parte do tempo, como por exemplo, aplicações com energias renováveis.

#### 2.2.4 Capacidade, Segurança e Meio ambiente

A capacidade de uma bateria, mesmo quando descarregada a uma corrente constante, depende de uma série de fatores, incluindo a construção da célula, o histórico de regime de ciclos, idade, manutenção e temperatura. Por exemplo, a capacidade real obtida com uma descarga em 30 minutos corresponde a uma fração da capacidade obtida em uma descarga em 10 horas.

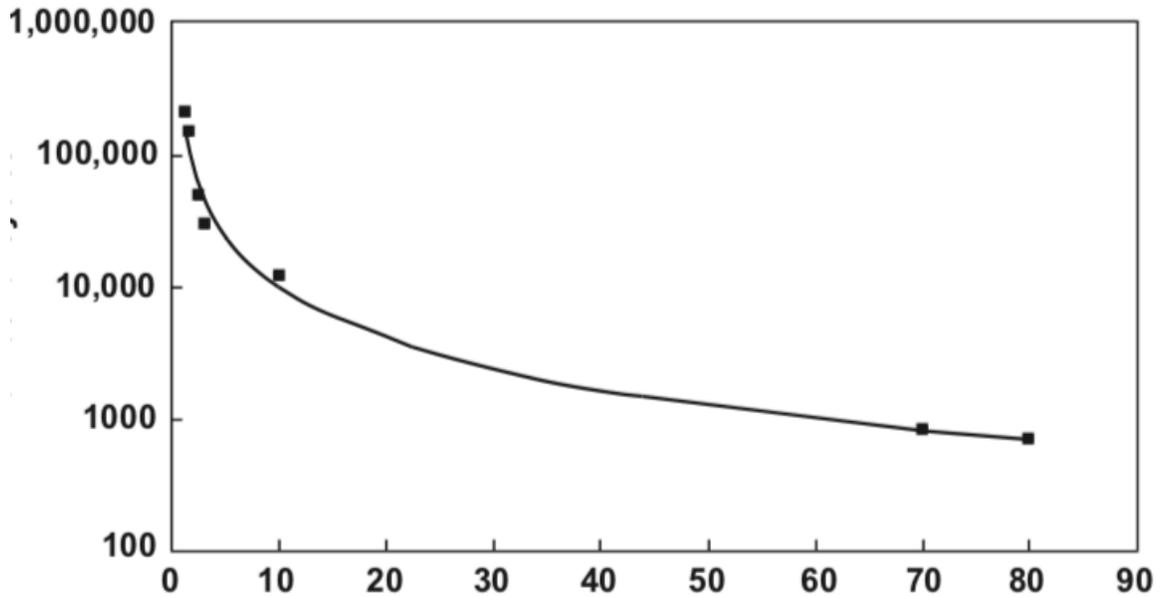
Figura 1 - Curva típica para baterias chumbo-ácido



Fonte: D. A. J. Rand e P. T. Moseley EECPS vol. 4, pag. 554

Operações com uma profundidade de descarga reduzida (DoD) geralmente leva a uma maior vida útil da bateria, como pode ser observado na figura a seguir:

Figura 2 - Variação da vida cíclica com a profundidade de descarga de uma bateria VRLA



Fonte: D. A. J. Rand and P. T. Moseley EECPS vol. 4, pag. 565.

Baterias de chumbo devem ser monitoradas até chegarem a carga máxima, pois o sobrecarregamento não só é um desperdício de energia quanto também danifica as placas positivas. Em sistemas de baterias, a principal função do monitoramento é identificar eventuais problemas como células desbalanceadas. Este desbalanceamento pode ser resolvido com cargas de equalização.

O gás hidrogênio evoluído durante o processo de carga, principalmente sobrecarga de baterias de chumbo, é altamente explosivo. Este perigo pode ser evitado com um bom gerenciamento de carga e uma ventilação adequada.

Os componentes das baterias de chumbo são listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela de componentes de baterias chumbo-ácido

Componente	Peso (%)
<b>Coletores de corrente, chumbo dos pólos</b>	30
<b>Material ativo positivo (PbSO<sub>4</sub>)</b>	20
<b>Material ativo negativo (Pb)</b>	20
<b>Eletrólito</b>	20
<b>Separadores e recipiente</b>	10

Fonte: Adaptado de Electrochemical E. S. S., Moseley and Garche, pag. 203.

É estimado que 95% dos materiais utilizados na bateria chumbo-ácido são reciclados. Uma bateria nova contém cerca de 60% a 80% de chumbo e plásticos reciclados.

Uma análise completa do ciclo de vida de baterias de chumbo, níquel-cádmio, níquel-metalhidreto, íons-de-lítio e sódio-sufuroso, foi realizada em 2010 pelo Argonne National Laboratory nos Estados Unidos. Foi verificado que as baterias de chumbo-ácido são as que requerem menos energia para a produção e geram menos poluentes durante a sua fabricação. Na Europa, há uma proposta de descontinuar o uso de chumbo, com excessão para o uso de produção de baterias.

### 2.3 Tecnologias de bateria de Lítio

A primeira bateria de lítio recarregável comercial foi um sistema de LiMoO<sub>2</sub> produzido pela companhia canadense Moli, no final da década de 1980. Porém, foi tirada do mercado devido a problemas de segurança causados pela instabilidade do eletrodo de lítio metálico, curto circuitos do separador, entre outros. As baterias de lítio pode ser classificadas como recarregáveis ou não-recarregáveis. O lítio é o metal mais leve da tabela periódica (densidade de 0.534 g cm<sup>-3</sup> à 20°C) e possui um alto potencial eletroquímico ( $E^\circ = -3.045$  V), pode fornecer uma alta densidade de energia em baterias.

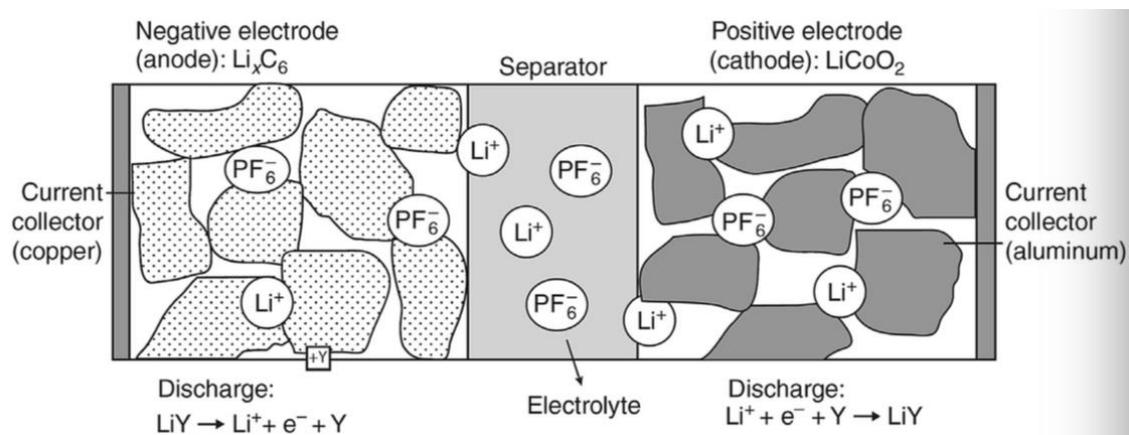
### 2.3.1 Aspectos eletroquímicos e físicos

As baterias com anodo de lítio metálico apresentaram problemas de estabilidade e segurança, pois o lítio reage violentamente com água e pode causar uma ignição. Desta forma, baterias mais modernas de íons de lítio usam carbono no eletrodo negativo e de óxido de lítio no eletrodo positivo. De forma inversa, o lítio reage lentamente com solventes orgânicos e forma uma "película protetora", interface sólido-eletrólito (SEI), na superfície do metal, que permite o transporte de íons. O eletrólito geralmente é composto de um sal de lítio em uma solução orgânica.

Durante a descarga o lítio metálico é retirado do eletrodo negativo e durante a carga é redepositado. Este depósito não é homogêneo, o que leva a irregularidades no formato do eletrodo negativo. O crescimento de dendritos pode levar a curto-circuitos entre os eletrodos, o que pode causar aquecimento local e reações entre o lítio e o eletrólito.

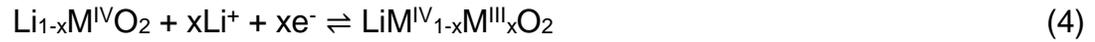
Após o desenvolvimento de eletrólitos de polímeros e eletrodos de intercalação de lítio para evitar a reação do lítio e o solvente, foi trazida ao mercado, em 1991, a primeira bateria de íons-de-lítio, baseada em óxido de lítio-cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ , LCO). Baterias de íons-de-lítio não sofrem com problemas do reativo lítio metálico, pois não há lítio metálico presente em nenhum estágio de ciclo. A maioria das células comerciais utilizam compostos de intercalação de carbono-lítio.

Figura 3 - Design básico de uma célula de íon-de-lítio



Fonte: Elsevier, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, P. Kurzweil, Lithium Rechargeable Systems, vol. 5.

O eletrólito dessas baterias consiste em um sal de lítio em um solvente orgânico, onde os íons  $\text{Li}^+$  atuam como transportadores de corrente entre os eletrodos. As reações de intercalação que ocorrem nas baterias de íons-de-lítio são, na descarga:



E na carga:



Uma visão geral sobre as diferentes características de diferentes materiais de eletrodos pode ser vista na Tabela 1.

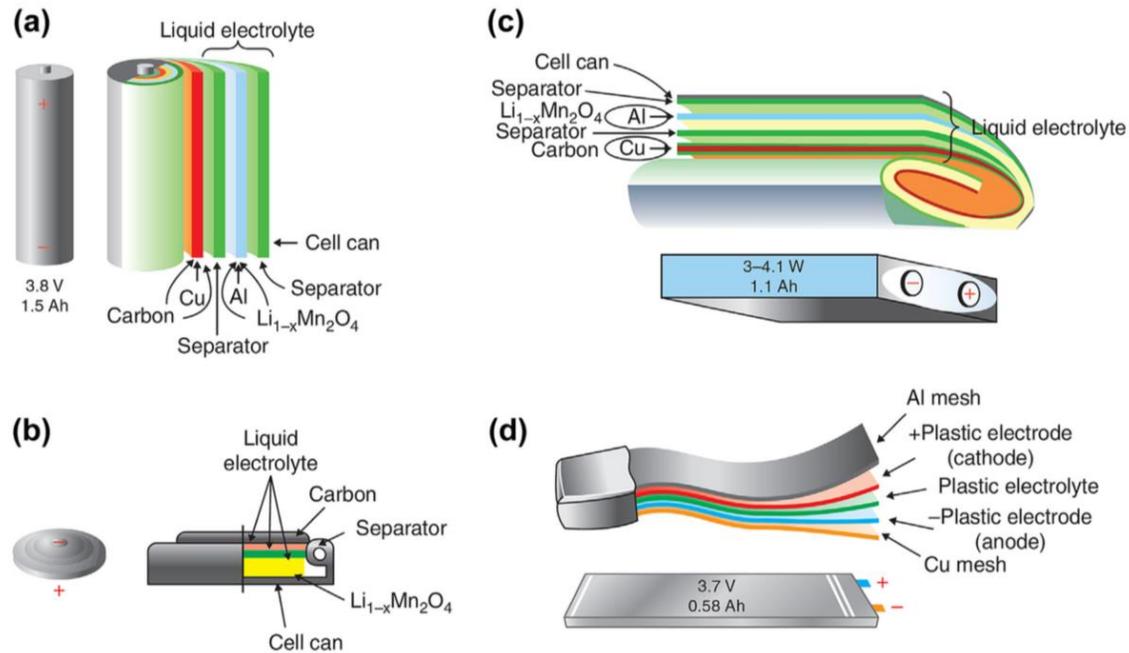
Tabela 2 - Visão geral de alguns materiais de eletrodos de baterias de íons-de-lítio

		LiCoO <sub>2</sub>	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiNi <sub>0.8</sub>	LiNi <sub>0.33</sub>	LiNiO <sub>2</sub>	LiFePO <sub>4</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Li <sub>2</sub> S <sub>8</sub>
<b>Tensão</b>	V	3.7	3.8	3.7	3.7	3.2-4.2	~3.5	~3(LiAl)	2.1
<b>Potencial vs Li/Li<sup>+</sup></b>	V	3.0-4.4	3.0-4.5	-	-	-	-	1.9-3.4	2.23
<b>Capacidade específica</b>	Ah kg <sup>-1</sup>	274	296	-	-	192	168	442	-
<b>C. teórica</b>	Ah L <sup>-1</sup>	706	634	-	-	919	-	495	-
<b>prática</b>	Ah kg <sup>-1</sup>	~140	~120	~190	~160	-	-	-	~1300
<b>Energia Específica</b>	Wh kg <sup>-1</sup>	90-180	160	140	<180	-	80-120	<125	~150
<b>Densidade de energia</b>	Wh L <sup>-1</sup>	220-350	270	-	-	-	-	-	<400
<b>Potencia específica</b>	W kg <sup>-1</sup>	760	1800	-	-	-	-	-	-
<b>Estabilidade (vida-ciclo)</b>		~1000	>1000	-	-	-	>2000	>100	-
<b>Segurança</b>		razoável	boa	razoável	razoável	razoável	segura	-	-
<b>Preço</b>		alto	baixo	alto	alto	razoável	razoável	-	-

Fonte: Electrochemical E. S. S., Moseley and Garche, pag. 273.

Os designs básicos de células de lítio recarregáveis estão ilustrados na figura 4.

Figura 4 - (a) Cilíndrica, (b) Formato "moeda", (c) Prismática, (d) Formato plano ("flat")



Fonte: Elsevier, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, P. Kurzweil, Lithium, Rechargeable, Systems, vol. 5.

### 2.3.2 Aplicações

As baterias recarregáveis de lítio conquistaram o mercado dos eletrônicos portáteis e mais recentemente o mercado de veículos elétricos e híbridos. Ao menos até 2015, não foram usadas em grandes extensões nas aplicações de armazenamento de energia e balanceamento de rede elétrica, provavelmente devido ao alto custo. Mas em 2017, foi construída e entregue, pela empresa americana Tesla, na Austrália o maior sistema de armazenamento de energia de íons-de-lítio do mundo. São 100 MW de capacidade de energia que podem alimentar mais de 30 mil casas por 1 hora.

### 2.3.3 Mecanismos de degradação

A vida das baterias de íons-de-lítio dependem dos processos de envelhecimento ocorrentes. Elas degradam mais à altas temperaturas e perdem

capacidade quando são sobrecarregadas. Apesar de existirem poucos dados sobre teste de longa duração em altas potências, experimentos de aceleração de desgaste indicam que o ciclo de vida de baterias de íons-de-lítio supera a maioria das outras baterias comerciais. Há processos de degradação que ocorre com a carga e a descarga nessas baterias. A impedância da bateria aumenta e a capacidade de descarga diminui em função do número de ciclos realizados. Dentre todos os processos de envelhecimento, existem quatro que são principais, que são:

- A interface sólido-eletrólito cresce excessivamente ou é danificada, consumindo íons de lítio.
- Moléculas do solvente podem intercalar junto com os íons de lítio, danificando a estrutura cristalina dentro do eletrodo, impossibilitando futuras intercalações de íons de lítio.
- Decomposição do eletrodo a uma taxa dependente da temperatura e da tensão dos terminais.
- Durante ciclagem, mudanças na estrutura pode acontecer no material dos eletrodos e sua integridade ser comprometida, pela expansão e contração de material ativo.

#### **2.3.4 Capacidade, Segurança e Meio ambiente**

A capacidade específica das baterias de lítio são teóricamente  $26.8 \text{ Ah mol}^{-1}$ , porque 1 mol de eletrons são liberados com 1 mol de lítio. Pela alta tensão e a pequena massa do lítio, obtem-se uma ótima energia específica.

As baterias de lítio, idealmente, devem ser armazenadas abaixo da temperatura ambiente, mas não devem ser congeladas ( $\sim 40^\circ\text{C}$ ) e não devem ser armazenadas completamente carregadas. Uma bateria armazenada carregada perderá cerca de 20% de capacidade por ano. Quando armazenada com 50% de carga, perderá em torno de 4% por ano.

Os sistemas de gerenciamento dessas baterias precisam distinguir os limites das correntes de carga e descarga, controlar dinamicamente a tensão e temperatura de cada célula durante operações, permitir independentes níveis de "cutoff" e permitir

equalização de células. Grandes baterias devem ter também um gerenciamento de temperatura e ter a habilidade de diagnosticar o estado de saúde pelo barramento.

A reatividade química do lítio exige precauções. Reações descontroladas ou acidentais podem levar até a explosões. A bateria não deve ser operada acima de 70°C, ou com correntes acima dos limites ou ser sobrecarregada. Acima de 120°C, reações exotérmicas ocorrem no eletrodo negativo da bateria, juntamente com a decomposição da massa ativa e do eletrólito, levando a uma fuga térmica em torno de 190°C.

É estimado que o recurso global de lítio seja de no mínimo 46 milhões de toneladas, sendo os depósitos principais: os aquíferos da Argentina, Bolívia, Chile, China e Tibet; rochas cristalinas da Austrália, Canadá, Estados Unidos e Zimbábue. A água do mar contém cerca de 0.14-0.25 mg L<sup>-1</sup> de lítio, o que corresponde hipoteticamente a uma reserva de 230 x 10<sup>9</sup> toneladas.

A produção de 1Wh de baterias de lítio LiPO<sub>4</sub> emite em torno de 0.25kg de CO<sub>2</sub>-eq, ou 0.20kg para as de NMC (LiNi<sub>0,33</sub>Mn<sub>0,33</sub>Co<sub>0,33</sub>O<sub>2</sub>). Processos de reciclagem como de fundições e hidrometalúrgicos são usados para a recuperação de matérias de muitas baterias e utilizados em outras aplicações, como até aditivos para concreto. O solvente do eletrólito e sais podem ser tratados e reutilizados, os separadores não. Partes metálicas são recuperadas pela reciclagem.

## **2.4 Considerações finais do capítulo**

Compreender o funcionamento dos mecanismos de degradação de baterias é essencial para que seja possível modelar e estimar a vida-útil sob diferentes regimes de operação. É importante entender quais as principais dependências de cada mecanismo de degradação para que a modelagem possa abranger e considerar estes fatores e simular o mais próximo da realidade.

### 3. ESTADO DA ARTE

Para a seleção de artigos, foi pesquisado no sítio de periódicos da capes, utilizando para a primeira pesquisa as palavras chave: "ageing mechanism" e "lead-acid batteries" e para a segunda "ageing mechanism" e "lithium batteries". Na primeira pesquisa foram encontrados 23 artigos revisados por pares, dos quais, após terem os títulos lidos, foram selecionados 4 artigos para a leitura. Na segunda pesquisa foram encontrados 46 artigos, onde foram selecionados para leitura 5 artigos.

Palavras chave: "Ageing Mechanism" e "Lead-acid batteries".

- "Empirical sulfation model for valve-regulated lead-acid batteries under cycling operation", Franke, Marcel, Kowal, Julia.

Neste artigo, os autores apresentam um modelo empírico para a sulfatação. A sulfatação é dada através dos valores de resistência interna, obtidos pela equação dependente da corrente ( $I$ ) de descarga usada no microciclo e o tempo ( $t_{cv}$ ) da fase de tensão constante após microciclos.

- "Ageing mechanism and service life of lead-acid batteries", Ruetschi, Paul.

Este trabalho de Paul Ruetschi, traz uma revisão sobre o que se tem de conhecimento sobre os mecanismos de degradação das baterias chumbo-ácido. Os mecanismos degradativos são muitas vezes interdependentes, pois um pode levar ao outro como consequência. As taxas de cada tipo de degradação dependem muito do tipo de uso da bateria em questão. Temperatura tem forte influência no envelhecimento assim como concentração do ácido, o qual em baixas concentrações, como no estado descarregado, pode danificar as grades e em altas concentrações reduz a vida útil da bateria devido a outros agentes degradantes.

- "A lead-acid battery's remaining useful life prediction by using electrochemical model in the Particle Filtering framework", Lai, Qinzhi et al.

Este artigo traz um trabalho sobre previsão de vida-útil para baterias chumbo-ácido. Um novo filtro de partícula incorporado a um modelo eletroquímico que simula carga e descarga, com parametrização feita experimentalmente. A validação desse modelo foi realizada tanto de maneira sintética quanto com dados experimentais. As previsões de vida útil remanescente foram feitas com dois pontos de início diferentes e

os resultados com o novo modelo eletroquímico de filtro de partícula foram melhores que o tradicional filtro de partículas baseado em dados.

- "Modeling of the cranking and charging processes of conventional valve regulated lead acid (VRLA) batteries in micro-hybrid applications", Gou, Jun et al.

Neste trabalho, o autor mostra um estudo das baterias VRLA chumbo-ácidas em condições de *cranking* (altas descargas) e cargas, como em aplicações stop-start, microhíbridas. A modelagem apresentada foi usada para analisar a sulfatação dos eletrodos negativos - uma falha comum nas baterias de chumbo-ácido. O impacto das altas correntes pulsantes na densidade de corrente e a camada correspondente de sulfato foram estimados, assim como parâmetros críticos de design.

Palavras chave: "Ageing Mechanism" e "Lithium Batteries"

- "Performance comparison of four lithium-ion battery technologies under calendar aging", Akram Eddahech et al.

Este trabalho apresenta o calendário de envelhecimento para quatro tecnologias de baterias de lítio. A diferença das químicas das baterias foram estudadas e foram reveladas diferentes características de cada tipo. Baterias com cátodo contendo magnésio apresentaram maior sensibilidade ao estado de carga e ao aumento de temperatura do que as de lítio-ferro-fosfato ou lítio-níquel. O estudo comparou as diferentes tecnologias através de uma análise da evolução de eficiência energética com relação ao envelhecimento.

- "Investigation of path dependence in commercial lithium-ion cells for pure electric bus applications: Aging mechanism identification", Ma Zeyu et al.

Este trabalho traz um estudo na estimação do estado de saúde de baterias de lítio através do estudo dos mecanismos de envelhecimento, com análises quantitativas e procedimentos laboratoriais repetíveis. Análise de capacidade incremental e tensão diferencial foram utilizadas para testar os mecanismos de degradação e quantificar as atribuições à capacidade. Foi notado um aumento no envelhecimento sob descargas de até 80% da capacidade e também sob operações à 40°C, o que nos testes resultou em perdas de material ativo em ambos eletrodos.

- "A new method of accelerated life testing based on the Grey System Theory for a model-based lithium-ion battery life evaluation system", Gu Weijun et al.

Este artigo traz um estudo da vida útil de baterias de lítio baseado no sistema Grey. Este modelo não necessita de mecanismos de envelhecimento, pois utiliza exclusivamente dados obtidos de através de um método de estimação, a partir de poucos dados experimentais. Para maior precisão, foi introduzido um método de aprimoramento, o qual também é utilizado para modelar o erro entre o valor real e o esperado.

- "A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electrical vehicle: Aging mechanism identification", Han Xuebing et al.

Neste trabalho os autores compararam os diferentes tipos de envelhecimento que cada tipo de bateria de lítio apresenta. Ele utiliza as curvas de corrente e tensão durante cargas para estimar capacidade (SoC) e envelhecimento - estado de saúde (SoH). Este método pode ser usado em BMS para diagnósticos em tempo real da bateria. Este algoritmo genético pode ser usado para analisar o envelhecimento da bateria mesmo offline.

## 4. PROCEDIMENTO

### 4.1 Modelo de degradação instantâneo

A metodologia a ser desenvolvida terá uma componente que permitirá obter a taxa de degradação instantânea a partir dos dados operacionais das baterias, a saber, dados de corrente de carga e descarga, tensão, estado de carga, temperatura e tempo. Estes dados deverão permitir calcular, a partir de informações características da tecnologia de bateria que está sendo utilizada, fornecidas pelo fabricante (que podem ser conferidas em laboratório) ou a partir de dados obtidos em laboratório (o problema aqui é que esta coleta de dados é demorada), a taxa de degradação. Como as condições de operação das baterias mudam permanentemente a metodologia a ser desenvolvida deverá incluir também um procedimento que permita acumular (integrar) o desgaste devido à taxa instantânea de degradação, de forma similar à relação entre um medidor de velocidade (taxa instantânea da variação da distância com o tempo) num veículo e o seu medidor de km rodados (acumulado da distância percorrida).

Todos os fatores que degradam as baterias (que são muitos) podem ser agrupados em duas grandes categorias. Uma depende da operação, a outra depende de quando a bateria foi produzida. Assim a degradação da bateria terá duas componentes, uma devido à ciclagem (depende da operação da bateria) e outra devida ao tempo transcorrido desde a sua construção (independe da operação da bateria).

A componente que independe da operação (denominada “*calendar life*”) é influenciada pelo tempo transcorrido desde a sua fabricação, pela temperatura na qual permaneceu durante esse tempo e pelo estado de carga no qual esteve durante esse tempo - SoC (são os principais parâmetros a serem considerados na componente “*calendar life*”). O parâmetro “tempo” influencia na degradação (na componente “*calendar life*”) segundo uma dependência fornecida pelo fabricante, em geral é uma relação linear. A temperatura segue a lei de Arrhenius (aumento de 100% da velocidade de degradação a cada 10 °C de aumento de T). Finalmente o estado de carga apresenta uma relação exponencial com a taxa de degradação. Conhecendo as

funções que determinam estas dependências pode ser proposta uma equação que calcule o impacto do estado operacional da bateria na componente “*calendar life*”.

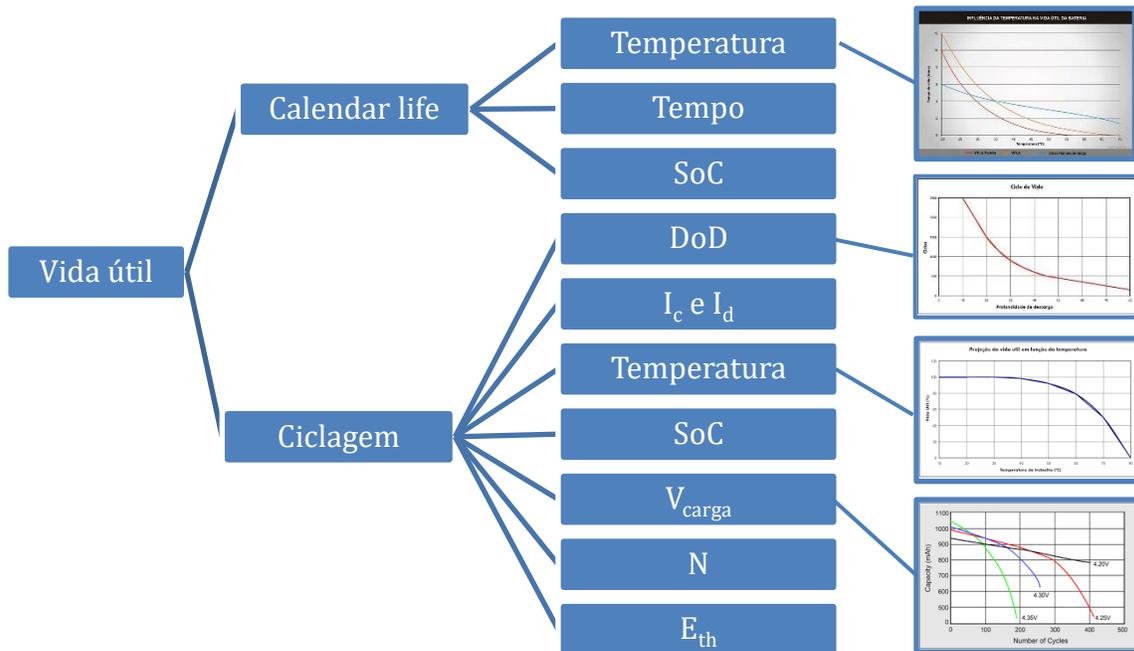
A componente que depende da ciclagem (denominada “*cycle life*”) causa uma degradação maior que a componente “*calendar life*”. Os principais parâmetros que influenciam esta componente são a profundidade de descarga - DoD (do ciclo executado), a corrente de carga –  $I_c$  e descarga  $I_d$  (utilizadas na ciclagem) e a temperatura. Há outros parâmetros que impactam em menor grau, mas que poderiam ser considerados. Eles são: o estado de carga (médio durante a ciclagem), a tensão de carga –  $V_{carga}$ , o número de ciclos -  $N$  e o denominado “*energy throughput*”-  $E_{th}$  que é a quantidade de carga que passou pela bateria somando todos os ciclos executados. Em muitos casos estes parâmetros não são independentes e combinam de forma a modificarem as taxas de degradação (taxas que dependem da combinação de parâmetros), dificultando a obtenção de modelos abrangentes.

Considerando os principais parâmetros, o impacto do parâmetro “profundidade de descarga” na vida cíclica da bateria é geralmente fornecido pelo fabricante e portanto é conhecido de forma que numa operação real o impacto deste parâmetro pode ser facilmente quantificado. No caso da temperatura, se assume que a degradação segue a mesma lei de Arrhenius já descrita (esta degradação também é geralmente fornecida pelo fabricante para uma ampla faixa de temperaturas). Finalmente (para determinar a influência dos principais parâmetros), faltaria propor uma relação para o impacto da corrente de carga e descarga. No caso dos parâmetros secundários e das possíveis combinações de parâmetros (interdependência), deverão ser feitos estudos para verificar o impacto deles e como podem ser considerados.

A modelagem detalhada dos mecanismos de degradação requer conhecimentos químicos e eletroquímicos alheios aos engenheiros eletricitas que lidam com questões de smart grids, preços de energia, fontes renováveis e algoritmos de otimização. Para os pesquisadores conhecedores dos sistemas eletroquímicos o maior desafio é identificar a dependência da vida útil em função dos parâmetros acima assinalados e das suas combinações.

Na Figura 5 é apresentado um esquema simplificado dos parâmetros que afetam a degradação de baterias.

Figura 5. Diagrama esquemático dos parâmetros que influenciam a taxa de degradação de baterias.



Fonte: O autor (2018).

Alguns dos parâmetros apresentados na Figura 1 tem sua influência na vida útil da bateria determinada pelo fabricante e esta dependência é informada geralmente na forma de gráficos. O impacto dos outros parâmetros (a lei que determina sua influência) precisa ser determinado.

#### 4.2 Equacionamento do modelo

Na prática uma bateria é considerada totalmente degradada quando sua capacidade de armazenar carga (medida em Ah) atinge 80% do valor inicial (quando era nova). A equação que permitirá calcular a taxa de degradação da bateria e seu estado de saúde (que seria a degradação acumulada) deverá incluir a degradação devido ao tempo transcorrido desde a sua fabricação ( $D_{cal}$ ) e a degradação devida ao regime de ciclagem ( $D_{ciclo}$ ):

$$D_{Total} = D_{cal} + D_{ciclo} \quad (1)$$

em que estas degradações são funções dos parâmetros apresentados na Figura 1, ou seja:

$$D_{\text{cal}} = \text{fc} (\text{parâmetros}) \quad (2)$$

$$D_{\text{ciclo}} = \text{fc} (\text{parâmetros}) \quad (3)$$

A função  $D_{\text{cal}}$  que determina o tempo de vida da bateria independentemente do seu regime de operação (ou seja, este tempo começa a contar desde o momento da fabricação da bateria e não é influenciado pela ciclagem) como foi dito, depende principalmente do parâmetro tempo transcorrido (desde a fabricação da bateria), depende também da temperatura e depende do estado de carga em que a bateria permaneceu armazenada (sem ciclar).

A dependência do estado de saúde da bateria (sua degradação) em função do tempo transcorrido desde a sua fabricação pode ser quantificada da seguinte forma: a partir da fabricação se calcula a fração da vida-útil perdida por dia, como a relação entre esse tempo transcorrido e o tempo total de vida útil informado pelo fabricante, como no exemplo a seguir, onde se supõe que o fabricante informa uma “*calendar life*” de 10 anos (3650 dias):

$$3650 \text{ dias} = 100 \% \quad 1 \text{ dia} = \frac{1}{3650} \% \quad (4)$$

Assim, seria possível calcular a vida-útil “consumida” em função do tempo transcorrido:

$$D_t = t_t/t_F \quad (5)$$

Em que:

$D_t$  – degradação devida ao tempo transcorrido desde a fabricação da bateria

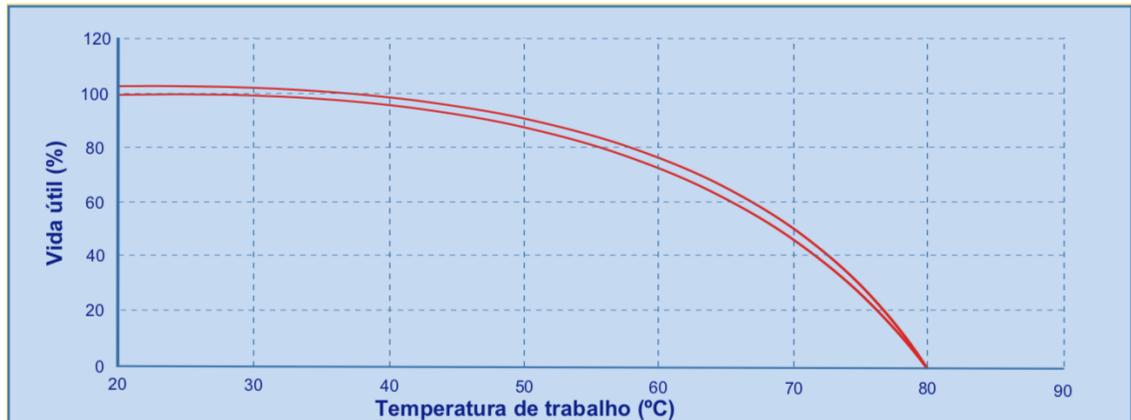
$t_t$  – tempo transcorrido desde a fabricação da bateria

$t_F$  – tempo de vida total (“*calendar life*”) informado pelo fabricante

Reações parasíticas podem acontecer mesmo quando a bateria se encontra em circuito aberto. Para esses casos, estima-se o tempo de vida-útil através da vida de

prateleira da bateria. Estas reações, químicas, tem sua taxa influenciada pela temperatura ambiente da bateria.

**Figura 6. Exemplo da influência da temperatura na vida-útil de uma específica bateria chumbo-ácido de 200Ah (C10), fornecida pelo fabricante.**



Caso o fabricante de bateria não forneça esta informação, aproxima-se esta influência através da relação de Arrhenius. Assim, cada aumento da temperatura ambiente da bateria de 10 Kelvin resulta aproximadamente em uma taxa de reação química (degradação) duas vezes mais rápida. (Moseley and Garche, 2015).

Neste caso, consideramos que as baterias são monitoradas e armazenadas sempre com 100% de seu estado de carga, ou seja, não adicionaremos a influência de outras reações parasitas que são resultado de longos períodos de tempo em outros estados de carga.

A equação, baseada na lei de Arrhenius de primeira ordem, para corrigir o valor da taxa de degradação com a temperatura quando não há informação do fabricante:

$$D_{t(T^{\circ}C)} = D_{t(25^{\circ}C)} * 2^{\frac{T}{25^{\circ}C}} \quad (6)$$

Em que:

$D_{cicT^{\circ}C}$  – Degradação de ciclagem na temperatura  $T^{\circ}C$

$D_{cic25^{\circ}C}$  – Degradação de ciclagem na temperatura  $25^{\circ}C$

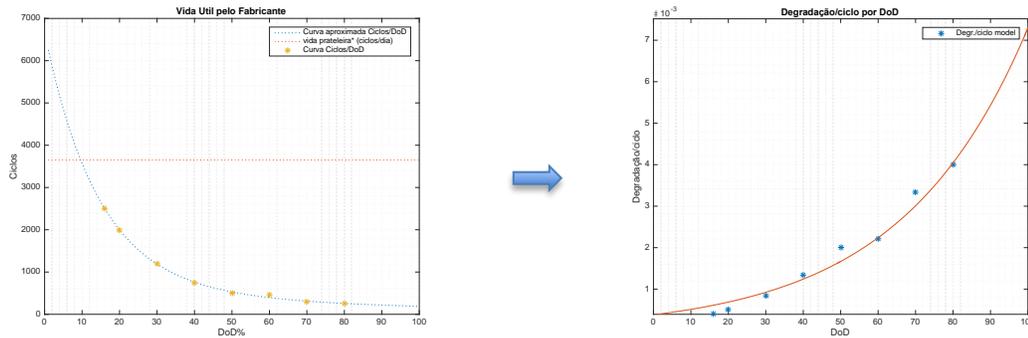
$T^{\circ}C$  - Temperaturada da bateria

Resultando em:

$$D_{cal} = (t_t / t_f) * 2^{\frac{T}{25^\circ C}} \quad (7)$$

A função para o parâmetro da ciclagem ( $D_{cic}$ ) toma como base a curva de profundidade de descarga (DoD - Depth of Discharge) pelo número de ciclos, informada pelo fabricante. A partir desta curva é possível se obter o desgaste correspondente de cada ciclo de cada profundidade de descarga, normalizando o eixo para um ciclo, ou seja, invertendo cada valor de ciclo para obter profundidade de descarga pelo desgaste/ciclo, como no exemplo abaixo:

Figura 7. (a) Curva de DoD x Ciclos (à 25°C) e (b) Curva DoD x Desgaste/Ciclo (à 25°C).



Através desta nova curva (3.b), a cada ciclo realizado na bateria, pode-se obter o desgaste equivalente. Quando a somatória desse desgaste/ciclo ( $D_{cic}$ ) chegar a 100%, assume-se que a bateria chegou ao final de sua vida-útil.

Em ambas as parcelas ( $D_{cal}$  e  $D_{cic}$ ), é feita uma correção da % de SoH perdida por conta da temperatura de operação. Para isso se usa a informação do fabricante de baterias sobre a vida útil da bateria em diferentes temperaturas. Quando não há esta informação disponível, com base na lei de Arrhenius aproxima-se que a quantidade de SoH perdida é proporcional à temperatura, em que para cada 10°C a velocidade de reações químicas (de degradação) duplica, como na equação 6.

O valor obtido no gráfico a cada ciclo é em [%SoH/ciclo] que não é a mesma unidade da parcela  $D_{cal}$  ([%SoH/tempo]). Por conta disso, se faz necessário ter uma relação entre tempo e ciclos, ou seja, saber quantos ciclos por dia serão realizados.

Assim, sabendo o número médio de ciclos por dia, possível somar as parcelas  $D_{cal}$  e  $D_{cic}$  para obter  $D_{total}$ .

Na sequência é explicitada a função global de  $D_{cic}$  acima descrita.

$$D_{cic}(T^{\circ}C) = \sum_{i=1}^{n \text{ ciclos}} D_{cic}(25^{\circ}C)(DoD_i) * 2^{\frac{T}{25^{\circ}C}} \quad (9)$$

Em que:

$D_{cic}T^{\circ}C$  – Degradação de ciclagem na temperatura  $T^{\circ}C$

$D_{cic}25^{\circ}C$  – Degradação de ciclagem na temperatura  $25^{\circ}C$

$T^{\circ}C$  – Temperaturada da bateria

$DoD_i$  – Valor correspondente de degradação, pela curva de ciclos por profundidade de descarga.

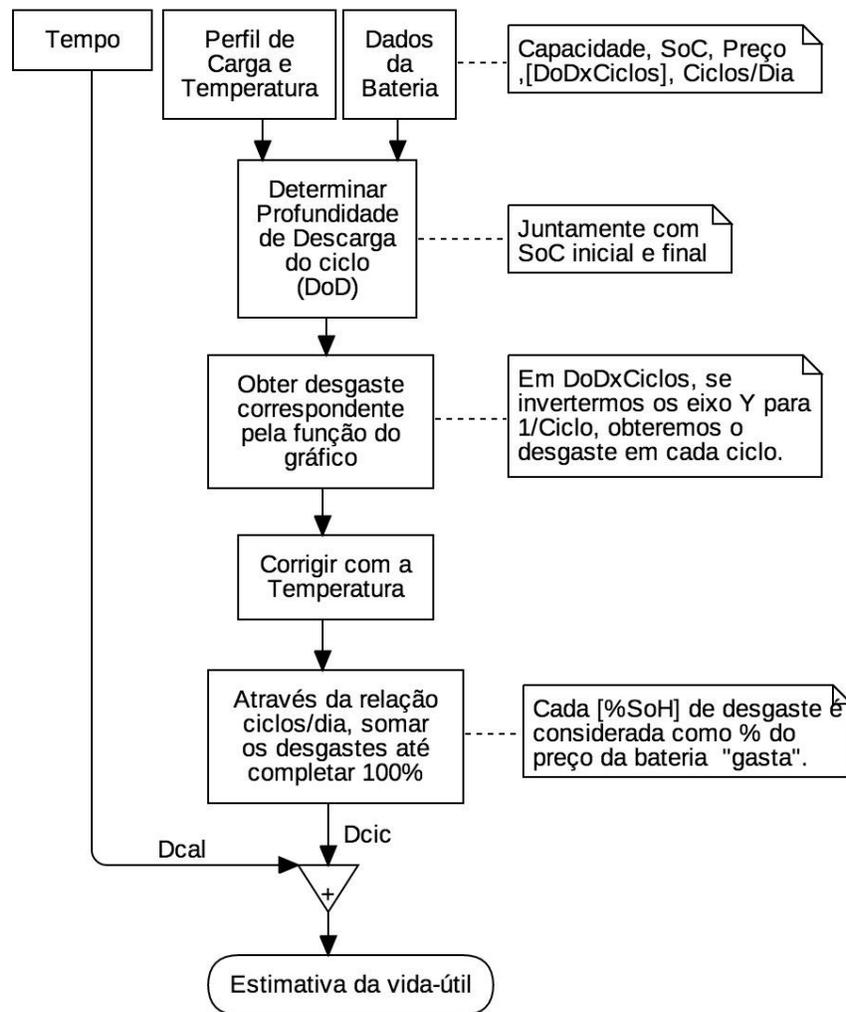
Somando  $D_{cic}$  com  $D_{cal}$ , temos que:

$$D_{total} = (t_t / t_f) * 2^{\frac{T}{25^{\circ}C}} + \sum_{i=1}^{n \text{ ciclos}} D_{cic}(25^{\circ}C)(DoD_i) * 2^{\frac{T}{25^{\circ}C}} \quad (10)$$

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

O algoritmo de estimação da durabilidade de baterias depende de algumas informações de entrada e segue a seguinte lógica:

Figura 8. Fluxograma de passos do algoritmo de estimativa de vida-útil



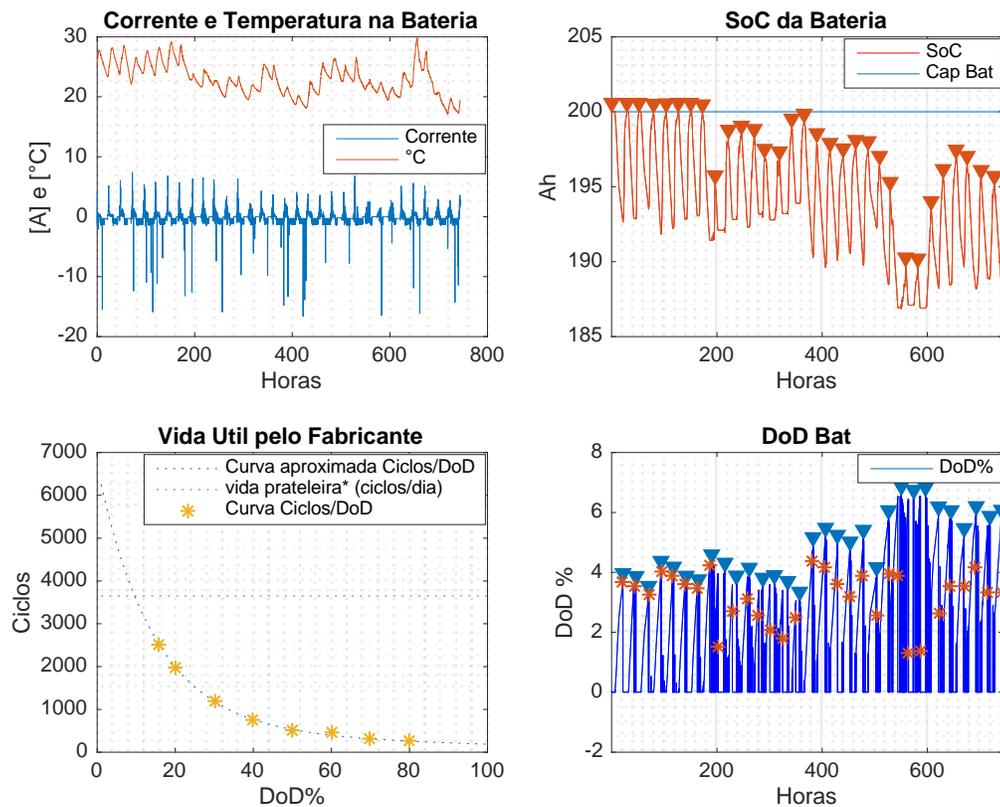
Fonte: O autor (2018).

A estimativa de vida que o algoritmo informa é baseada no perfil de carga fornecido, como se o mesmo perfil de carga se repita até o fim da vida da bateria.

Utilizando dados existentes de um sistema fotovoltaico isolado com baterias, fornecido pelo laboratório de pesquisa em baterias dos Insitutos Lactec, foi possível testar o algoritmo. Neste caso, foi simulado o armazenamento sendo feito por uma bateria chumbo-ácido de 200Ah(C10) em um sistema no qual o uso da bateria é baixo, como na figura 9. A corrente, temperatura da bateria são dados de entrada junto com a curva de Ciclos x DoD (profundidade de descarga) da bateria e a vida de prateleira, apresentadas no catálogo do fabricante.

Neste exemplo teste, nota-se que as descargas realizadas na bateria são pequenas, cerca de 5% de sua capacidade total. Por este motivo, a degradação causada por cada descarga é pequena e a vida-útil estimada é ligeiramente menor que a vida de prateleira.

Figura 9. Dados da simulação de durabilidade com uma bateria fotovoltaica chumbo-ácido.



No gráfico da curva de Vida-útil pelo Fabricante, na figura 9, há uma reta em 3650 ciclos. Esta reta informa o limite máximo de vida-útil sabendo a quantidade de ciclos por dia que a bateria realiza. No caso do exemplo, sabe-se que a bateria faz 1 ciclo por dia. Supondo descargas que tendem a 0% de profundidade, a bateria duraria no máximo o tempo de sua vida de prateleira, neste caso de 10 anos, que corresponde a 3650 ciclos.

Figura 10. Curva de Degradação/Ciclo por Profundidade de descarga(DoD).

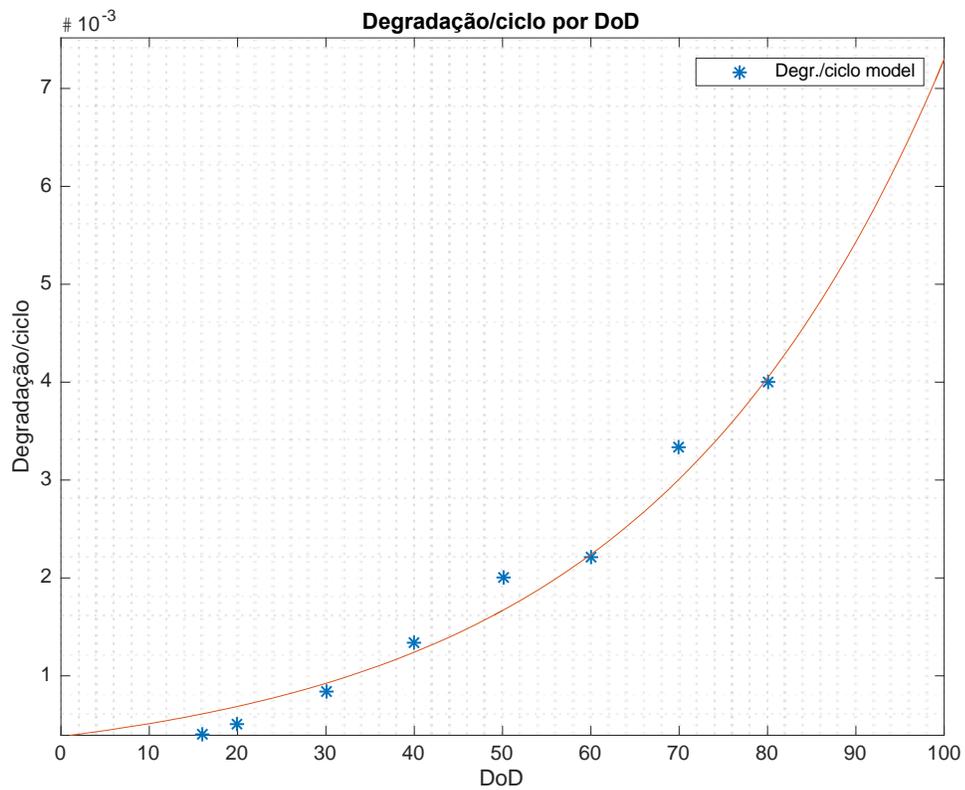


Figura 11. Resultados da simulação teste da vida-útil em sistema isolado com bateria chumbo-ácido.

---

Vida útil "gasta" (em %) por dia foi:  
0.0319

A bateria, sob essas condições, durará cerca de (em dias):  
3131

Arredondado em meses:  
104

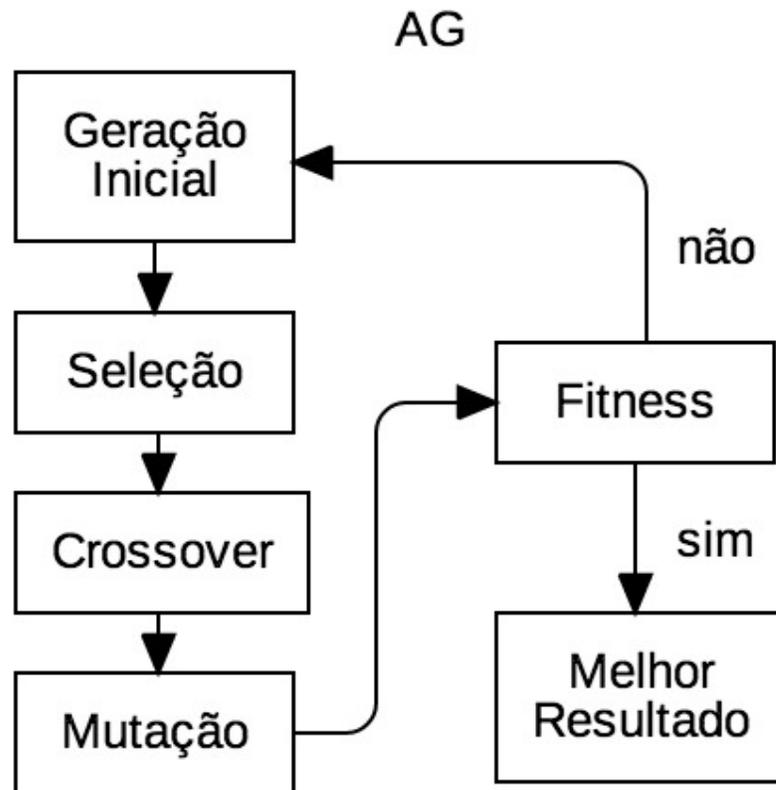
Arredondado em anos:  
9

A partir dos dados de entrada, o programa identifica os picos de descarga existentes nos dados informados. Cada pico é traduzido para um valor de degradação através da curva de Degradação/ciclo por Profundidade de descarga e em seguida armazenado a uma variável de somatória. O fim da vida-útil se dá quando a somatória desses valores de degradação totalizar 100%.

Na sequência, o algoritmo de estimação de degradação foi adicionado ao programa de otimização do uso de armazenamento de energia elétrica (figura 12) que está sendo desenvolvido também no grupo de pesquisa do Prof. Dr. Alexandre Aoki.

O programa de otimização de despacho utiliza a técnica de algoritmo genético para obter o conjunto de valores para melhor distribuir a energia armazenada.

Figura 12. Sequência de etapas do algoritmo genético



Com a adição da degradação do armazenamento, o valor da variável Fitness passa a estar também dependente do estado de saúde da bateria. Assim, o ganho com o uso do armazenamento,  $G$ , que antes estava sendo calculado como apenas a corrente extraída do armazenamento,  $I_a$ , multiplicada pela tarifa de energia elétrica da hora do dia,  $T_h$ , passa a ser calculada como sendo:

$$G = I_a \cdot T_h - P_{\text{VidaBat.}} \quad (11)$$

Em que:

$G$  – Ganho em [R\$]

$I_a$  – Energia extraída do armazenamento em [Wh]

$T_h$  – Tarifa de energia no momento de uso [R\$/Wh]

$P_{\text{VidaBat}}$  – Perda de vida útil da bateria em [R\$]

A perda de vida útil em [R\$] é obtida através da multiplicação entre a porcentagem de vida-útil (%SoH – State of Health) degradada no período analisado multiplicado pelo preço do armazenamento, como na equação abaixo:

$$P_{\text{VidaBat}} = \text{Preço} \cdot \%SoH \quad (12)$$

Em que:

$P_{\text{VidaBat}}$  – Perda de vida útil da bateria em [R\$]

Preço – Preço de compra do armazenamento

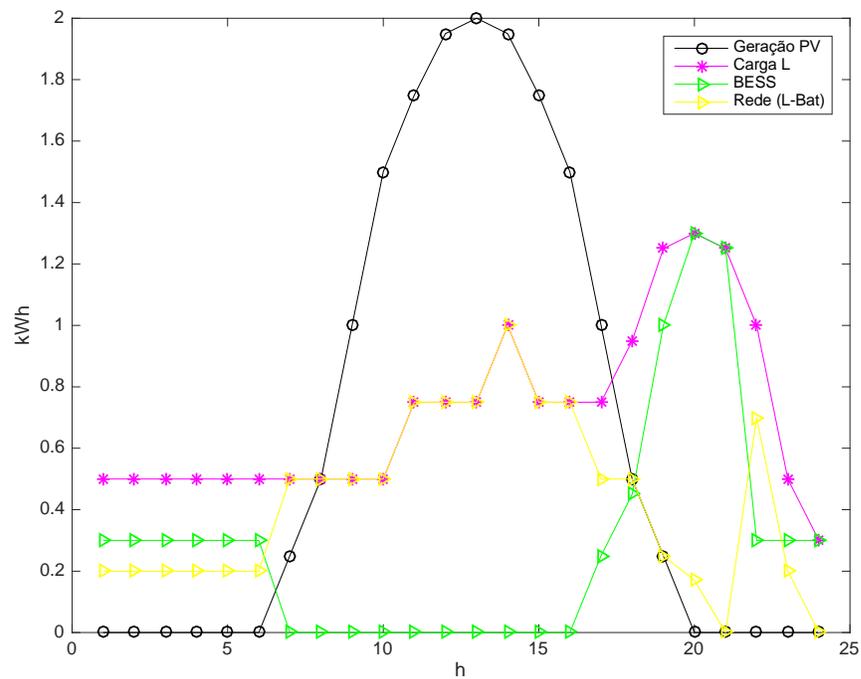
%SoH – Porcentagem de vida-útil degradada

Desta forma, executando a otimização em um cenário de um sistema fotovoltaico isolado alimentando uma carga, L, na qual a geração, PV, escolhida não é suficiente para suprir completamente a carga, juntamente com um sistema de armazenamento, B, de capacidade 10 kWh. Considerando os valores de tarifa, T, os resultados obtidos sem considerar a degradação do armazenamento são apresentados na figura 13. Os dados utilizados para esta simulação são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Dados escolhidos para a simulação, em kWh.

Hora do dia	Geração PV	Carga	Tarifa
1	0	0.5	0.2
2	0	0.5	0.2
3	0	0.5	0.2
4	0	0.5	0.2
5	0	0.5	0.2
6	0	0.5	0.2
7	0.25	0.5	0.2
8	0.5	0.5	0.2
9	1	0.5	0.2
10	1.5	0.5	0.2
11	1.75	0.75	0.2
12	1.95	0.75	0.2
13	2	0.75	0.2
14	1.95	1	0.6
15	1.75	0.75	0.6
16	1.5	0.75	1
17	1	0.75	1
18	0.5	0.95	1
19	0.25	1.25	0.6
20	0	1.3	0.6
21	0	1.25	0.2
22	0	1	0.2
23	0	0.5	0.2
24	0	0.3	0.2

Figura 13. Resultados da simulação sem degradação do armazenamento.



Lembrando que o vetor de variáveis consiste de seis elementos, no qual cada elemento tem seu valor correspondente para determinada hora do dia, como mostra o exemplo:

Vetor das variáveis resposta = [X1 X2 X3 X4 X5 X6]

Despacho = [X1 X1 X1 X1 X1 X1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 X2 X3 X4 X5 X6 X1 X1 X1]

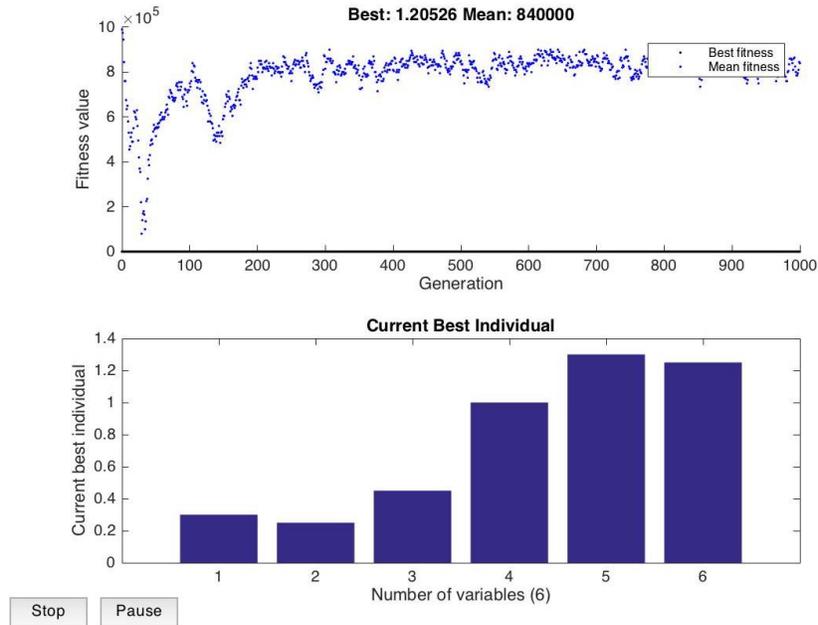
Os valores do despacho do armazenamento obtidos como resultado da otimização sem degradação da bateria, apresentados no gráfico pela cor verde, foram:

BESS (0h-24h) = [0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0.25 0.45 1 1.3 1.25 0.3 0.3 0.3] [kWh]

Ao incluir a perda de vida-útil devido a degradação do armazenamento, o algoritmo de otimização realiza as etapas anteriores e subtrai o valor perdido pela degradação. Naturalmente, o valor final do despacho se torna dependente das informações da bateria utilizada. A fim de comparação, foi simulado a mesma bateria chumbo-ácido, porém com preços diferentes para explicitar a influência no resultado.

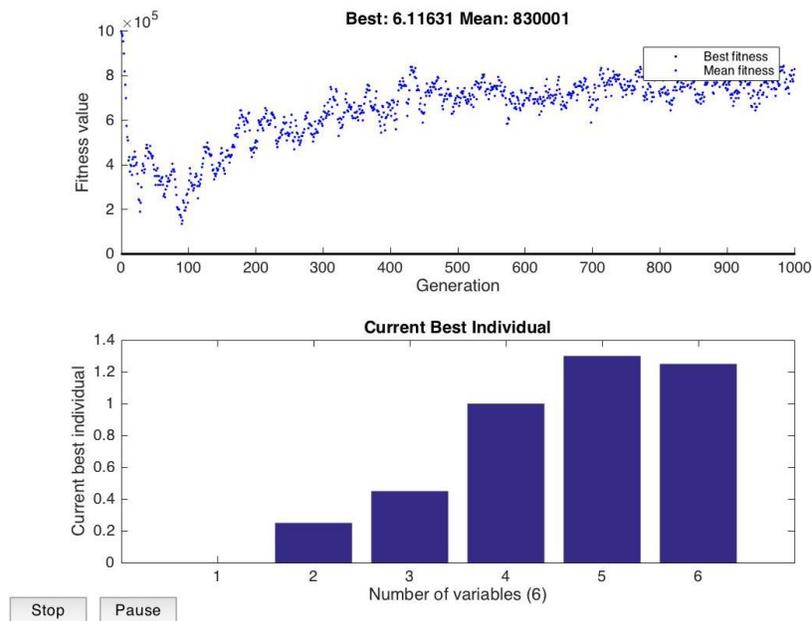
Com o preço do armazenamento fixo a um valor menor ou igual a R\$15.000,00, a distribuição de energia do armazenamento não foi alterada, como apresentado na figura 14.

**Figura 14. Resultado da simulação com degradação das baterias com preço até 15 mil reais.**



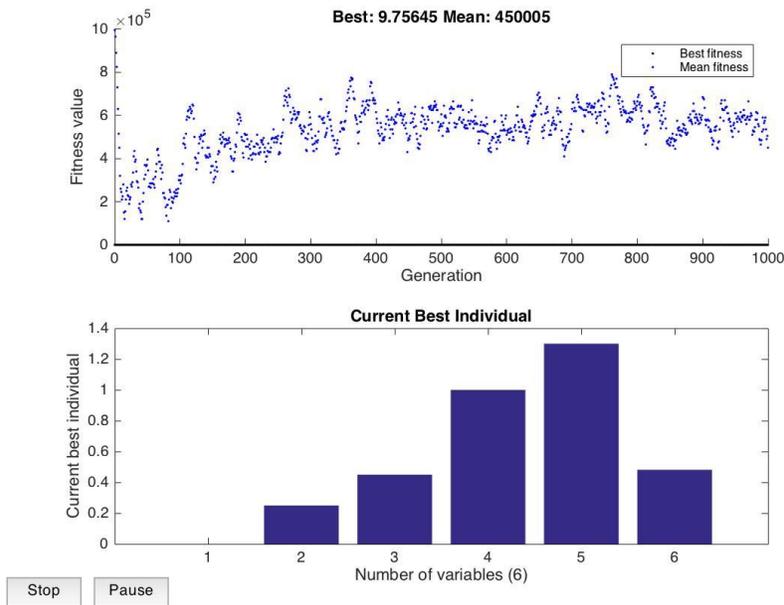
A partir de valores de armazenamento maiores que R\$15.000,00 até 30.000,00, o algoritmo genético retira o despacho do horário de menor tarifa, e apresenta o seguinte resultado:

**Figura 15. Resultado da simulação com degradação das baterias com preço até 30 mil reais.**

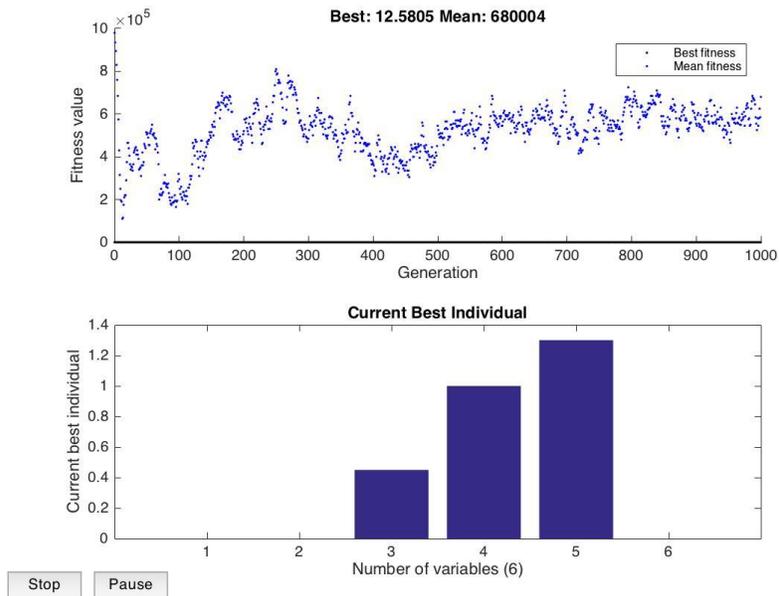


Quando simulado com preços superiores a 30 mil reais, como por exemplo 40 mil e 50 mil, nota-se que o algoritmo de otimização do despacho passa a reduzir ainda mais a quantidade de energia utilizada do armazenamento, conforme o custo da degradação dessa bateria se torna cada vez maior, com o aumento do preço.

**Figura 16. Resultado da simulação com degradação das baterias com preço de 40 mil reais.**



**Figura 17. Resultado da simulação com degradação das baterias com preço até 50 mil reais.**



## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de analisar o desempenho de sistemas de armazenamento com baterias, foi necessário desenvolver um modelo de degradação de baterias com base em informações fornecidas pelo fabricante de baterias, sem que haja necessidade de realizar testes laboratoriais. Dessa forma, foi observado o quanto que cada aplicação degradaria o armazenamento e por quanto tempo duraria.

Para desenvolver o modelo foi utilizado a ferramenta MatLab juntamente com dados existentes de bancos de baterias em sistemas fotovoltaicos isolados, que foram fornecidos pelo laboratório de baterias e corrosão dos Institutos Lactec.

Com o modelo testado e validado, foi possível então adicionar ele ao programa de otimização por algoritmo genético, que está em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. Aoki. Dentre os cenários simulados, foi observado que a influência da degradação das baterias para a otimização de um sistema, por exemplo fotovoltaico, existe. Porém esta influência passa a ser mais visível quando o preço da bateria é mais alto que o simulado (tarifa branca), pois se não os valores de despacho da energia do armazenamento continuam sendo os mesmos que os simulados sem o efeito da degradação de baterias, pelo fato que a perda pelo desgaste é inferior em relação ao custo de compra de energia da rede. Mas ao aumentar o preço do armazenamento, nota-se que nos horários que a energia é mais barata, o algoritmo passa a optar por comprar energia ao invés de utilizar das baterias, pois o desgaste custaria mais caro que a compra de energia da rede.

Por meio do modelo desenvolvido e das simulações realizadas foi possível compreender os principais efeitos e causas da degradação de sistemas de armazenamento de energia elétrica com baterias, junto com a complexidade e as dificuldades existentes para se estimar a vida-útil desses armazenamentos.

Como sugestão de trabalhos futuros, destaca-se a inclusão de mais fatores que influenciam na vida-útil de baterias ao algoritmo de estimação de degradação e o aprimoramento a cada tecnologia de bateria. Dessa forma seria possível obter resultados mais próximos da realidade, melhores otimizações e talvez até indicadores em tempo real de degradação de armazenamentos de energia com baterias.

## 7. REFERÊNCIAS

Ahmadian, Ali., Sedghi, Mahdi., Elkamel, Ali., Fowler, Michael., Golkar, Masoud Aliakbar., **Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework**, 2017.

Cebulla, F., Naegler, T., Pohl, M. <sup>[1]</sup><sub>SEP</sub>, **Electrical energy storage in highly renewable European energy systems: Capacity requirements, spatial distribution, and storage dispatch**, 2017.

Diao, Weiping., Jiang, Jiuchun., Zhang, Caiping., Liang, Hui., Pecht, Michael., **Energy state of health estimation for battery packs based on the degradation and inconsistency**, 2017.

Gao, Yang., Jiang, Jiuchun., Zhang, Caiping., Zhang, Weige., Ma, Zeyu., Jiang, Yan., **Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses**, 2017.

Garche, Jürgen., Karden, Eckard., Moseley, Patrick T., Rand, David A. J., **Lead-acid batteries for future automobiles**, 2017.

Gu, Weijun., Sun, Zechang., Wei, Xuezhe., Dai, Haifeng., **A new method of accelerated life testing based on the Grey System Theory for a model-based lithium-ion battery life evaluation system**, 2014.

Khodayaria, Maryam., Aslani, Alireza., **Analysis of the energy storage technology using Hype Cycle approach**, 2017.

Leng, Feng., Wei, Zhongbao., Tan, Cher Ming., Yazami, Rachid., **Hierarchical degradation processes in lithium-ion batteries during ageing**, 2017.

Lyu, Chao., Lai, Qingzhi., Ge, Tengfei., Yu, Honghai., Wang, Lixin., Ma, Na., **A lead-acid battery's remaining useful life prediction by using electrochemical model in the Particle Filtering framework**, 2016.

Merla, Yu., Wu, Billy., Yufit, Vladimir., Martinez-Botas, Ricardo F., Offer, Gregory J., **An easy-to-parameterise physics-informed battery model and its application towards lithium-ion battery cell design, diagnosis, and degradation**, 2018.

Moseley, Patrick T., Garche, Jürgen., **Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing**, 2015.

Olabi, A.G., **Renewable energy and energy storage systems**, 2017.

Pelletier, Samuel., Jabali, Ola., Laporte, Gilbert., Veneroni, Marco., **Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models**, 2017.

Ruetschi, Paul., **Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries**, 2004.

Sbordone, Danilo Antonio., Di Pietra, Biagio., Bocci, Enrico., **Energy analysis of a real grid connected lithium battery energy storage system**, 2015.

Vignarooban, K., Chu, X., Chimatapu, K., Ganeshram, P., Pollat, S., Johnson, N.G., Razdan, A., Pelley, D.S., Kannan, A.M., **State of health determination of sealed lead acid batteries under various operating conditions**, 2016.

Wankmüller, Florian., Thimmapuram, Prakash R., Gallagher, Kevin G., Botterud, Audun., **Impact of battery degradation on energy arbitrage revenue of grid-level energy storage**, 2017.

White, Corey D., Zhang, K. M., **Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction**, 2010.

Yang, Ruixin., Rui Xiong, Hongwen He, Hao Mu, Chun Wang<sup>[1]</sup>, **A novel method on estimating the degradation and state of charge of lithium-ion batteries used for electrical vehicles**, 2017.

Zhang, Zhong., Wang, Jianxue., Wang, Xiuli., **An improved charging/discharging strategy of lithium batteries considering depreciation cost in day-ahead microgrid scheduling**, 2015.