



## PROPOSTA DE TEMA DE TESE

### *ESTUDO E MODELAGEM DE SISTEMAS DE GERENCIAMENTO E BALANCEAMENTO DE BATERIAS*

André Abido Figueiró

Proposta de tema de tese a ser desenvolvido  
no LEAD/COPPE/UFRJ para o Mestrado  
do Programa de Engenharia Elétrica da  
COPPE/UFRJ

Professor: Alessandro Jacoud Peixoto

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2014

# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                       | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Motivação</b>  | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>Objetivos</b>  | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>Metodologia e Resultados Esperados</b>               | <b>6</b>  |
| <b>5</b> | <b>Tópicos Propostos para Pesquisa</b>                  | <b>8</b>  |
| 5.1      | Definição do Tipo de Bateria . . . . .                  | 9         |
| 5.2      | Modelagem Matemática das Células . . . . .              | 9         |
| 5.3      | Definição da Topologia de Conexão das Células . . . . . | 10        |
| 5.4      | Estudo de Carregamento . . . . .                        | 10        |
| 5.5      | Estudo de Descarregamento . . . . .                     | 10        |
| 5.6      | Estudo de Caso . . . . .                                | 11        |
| <b>6</b> | <b>Bibliografia Proposta</b>                            | <b>12</b> |
| <b>7</b> | <b>Cronograma Proposto</b>                              | <b>15</b> |
| <b>8</b> | <b>Conclusão</b>  | <b>16</b> |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                       | <b>17</b> |

# Agradecimentos

Gostaria de registrar os devidos agradecimentos ao programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL junto à Energia Sustentável do Brasil S.A. pela bolsa de mestrado que torna possível essa pesquisa.

# Capítulo 1

## Introdução

Tanto no meio acadêmico quanto em aplicações industriais, a presença de sistemas acionados por baterias apresenta importância significativa, mesmo com a alternativa de sistemas elétricos alimentados por outros meios, como geradores. O uso de sistemas operados por baterias permite reduzir ou eliminar a necessidade do uso de cabos para alimentação, sobretudo nos casos nos quais é possível estabelecer comunicações sem fio.

Sistemas de Gerenciamento de Baterias consistem nos dispositivos e lógica necessários para otimizar o uso de baterias segundo critérios de eficiência, segurança e vida útil, gerenciando, portanto, o carregamento e descarregamento destas. Tais sistemas devem possibilitar também a comunicação a outros sistemas dos parâmetros de operação das baterias, como potência máxima e carga útil, de forma a permitir o uso inteligente da energia disponível no sistema de baterias.

As pesquisas a serem desenvolvidas visam a possível utilização no Robô para Operações de *Stoplogs* Alagados (*ROSA*). O ROSA consiste em um sistema de monitoramento de operações de inserção e remoção de *stoplogs* em hidroelétricas, apresentando, portanto, boa parte dos desafios de engenharia que são comuns a projetos de robótica submarina, como a necessidade de sistemas de alimentação, comunicação e sensoriamento. No contexto da alimentação e gerenciamento de energia se verifica a importância de sistemas de gerenciamento de baterias para tal projeto..

Embora um considerável progresso tenha sido feito nessa área, uma completa classificação e determinação dos sistemas de carga e descarga de baterias não é uma tarefa simples, já que embora resultados acadêmicos sejam facilmente encontrados na literatura, os aspectos tecnológicos relacionados ao projeto e implementação não são facilmente documentados. As principais dificuldades no gerenciamento de baterias estão relacionadas à correta estimação do estado das baterias, assim como o correto balanceamento das células da bateria.

# Capítulo 2

## Motivação

Tendo em vista o projeto desenvolvido, é de suma importância que se avalie a possibilidade de alimentar o sistema por meio de baterias. O uso de baterias evitaria o uso de cabos para alimentação do sistema, de modo a reduzir os custos de material e desenvolvimento para o correto gerenciamento destes. Vale frisar que o uso de cabos traz uma série de dificuldades técnicas, sendo marcante a necessidade de recolhimento destes por meio de um carretel ou *Tether Management System*, de forma que a grande vantagem do uso de baterias é possibilitar a eliminação da necessidade de tais sistemas.

Uma vez utilizada alimentação por baterias, o estabelecimento de um sistema de gerenciamento de baterias é de suma importância para a segurança, desempenho e vida útil destas. Esta proposta busca estabelecer uma visão geral da literatura relacionada a sistemas de gerenciamento de bateria, o que engloba questões de projeto, como a escolha do tipo de bateria a ser utilizado e a definição da topologia de conexão das células e dos elementos de eletrônica de potência. Acrescidos às questões de projeto, há de se considerar questões de teoria de controle, como a modelagem do comportamento eletroquímico das células, a estimação do estado de carga (*SoC - State of Charge*) e a lógica de carregamento e proteção do sistema de baterias [1],[2].

Motiva este projeto, portanto, a possibilidade do uso de baterias nos projetos em andamento no laboratório, a se destacar o Robô para Operações de *Stoplogs* Alagados (*ROSA*). Se frisa, portanto, a necessidade de alimentar e comunicar com a eletrônica embarcada do projeto. Tal necessidade poderia ser atendida por meio de um cabo umbilical, o que implica no uso de um sistema de recolhimento de cabos, a ser instalado no guindaste. Devido às dificuldades mecânicas apresentadas por tal sistema, bem como a demanda de mínima interferência na estrutura mecânica do guindaste, deve ser analisada uma alternativa a essa solução. A comunicação poderá ser feita por meio de um sistema por ultra-som, enquanto a alimentação do sistema seria fornecida por meio de um sistema de baterias. Tal arranjo pode eliminar ou simplificar o uso de sistemas de gerenciamento de cabos, reduzindo os

desafios mecânicos do projeto.

# Capítulo 3

## Objetivos

Tendo em vista as questões citadas, o projeto proposto tem como objetivo estabelecer os conceitos necessários para um sistema de gerenciamento de baterias, desenvolver o conceito estabelecido e testá-lo em bancada e experimentalmente no ROSA.. Para o correto gerenciamento da energia em um sistema alimentado por baterias, tendo em vista um robô submarino, devemos desenvolver os modelos teóricos das baterias, bem como as corretas abordagens para seu correto gerenciamento. Tal desenvolvimento deve considerar as informações disponíveis na literatura, de modo a analisá-la e desenvolvê-la.

O objetivo geral é desenvolver pesquisa básica e aplicada na área de sistemas robóticos submarinos e formar recursos humanos especializados em controle e robótica. A pesquisa básica, trata-se da análise de métodos de gerenciamento para sistemas robóticos alimentados por bateria. Do ponto de vista das aplicações, visa-se de uma forma geral a automação e, em particular, robótica submarina. As técnicas e os algoritmos deverão ser testados em bancadas experimentais. Objetiva-se desenvolver experimentos para validar os resultados teóricos desenvolvidos e considerar problemas práticos de implementação, tais como: modelagem dinâmica das células, desenvolvimento de sistemas inteligentes de carregamento e balanceamento, gerenciamento de carga e sistemas de gerenciamento de potência e proteção.

## Capítulo 4

# Metodologia e Resultados Esperados

A metodologia de trabalho adotada consiste em atualizar a revisão bibliográfica, generalizar os resultados já obtidos, incorporar técnicas e conceitos da literatura recente, corroborar os resultados teóricos via simulação numérica realista (considerando aspectos práticos) e por experimentos.

Será apresentada neste trabalho inicialmente uma visão geral da literatura acerca sistemas de controle e monitoramento de baterias. Devem ser considerados sistemas passíveis de implementação prática tendo em vista os recursos do laboratório, levando em consideração o prévio desenvolvimento de simulações e implementações práticas por parte do autor.

Os sistemas propostos na literatura devem ser avaliados segundo sua adequação à sistemas embarcados de pequeno porte, o que traz exigências quanto à eficiência, robustez e espaço físico. Deve ser levada em consideração também a precisão na previsão de carga disponível, bem como a possibilidade de gerenciamento de falhas internas e externas à bateria.

Posteriormente deve ser desenvolvida uma análise teórica dos sistemas por meio de simulação numérica, levando em conta o modelo teórico das baterias. O sistema simulado deve ser testado em bancada, de forma a validar os resultados das simulações e estabelecer os componentes necessários para o posterior desenvolvimento do equipamento.

Finalmente, devem ser realizados teste de um protótipo no robô ROSA, sendo avaliada a performance do sistema e sua adequação ao uso em robótica submarina.

Serão utilizados os recursos humanos e computacionais dos seguintes laboratórios: Laboratório de Controle e Automação, Engenharia de Aplicação e Desenvolvimento (LEAD/PEE/COPPE) e Laboratório de Controle do Programa de Engenharia Elétrica (LABCON/PEE/COPPE). Além disso, o estudo se amparará nos recursos e conhecimentos desenvolvidos para diferentes projetos de robótica previamente desenvolvidos no LEAD, como o DORIS, robô de monitoramento em plataformas *offshore* e o LUMA, robô submarino, ambos operados por baterias. Resultados ex-



perimentais poderão ser obtidos utilizando as baterias adquiridas para estes projetos para o desenvolvimento da integração dos sistemas de controle e gerenciamento dos pacotes (*packs*) de baterias.

Os resultados teóricos serão verificados com o auxílio de simulações e ensaios experimentais dispondo, para tal, dos recursos humanos e computacionais do LEAD. Espera-se, ao fim deste projeto, obter-se um modelo coerente de gerenciamento de baterias para aplicações em robótica submarina.

# Capítulo 5

## Tópicos Propostos para Pesquisa

Este capítulo descreve os tópicos para estudos a serem desenvolvidos em maior detalhe nesta proposta. Os principais itens deste projeto podem ser descritos como segue:

- Definição do tipo adequado de bateria, de acordo com requisitos de segurança, complexidade e restrições de volume e espaço. Podem ser considerado, posteriormente, avaliações a respeito dos custos de cada solução.
- Avaliação das topologias de conexão das células, tendo em vista as necessidades de confiabilidade e a complexidade do sistema de eletrônica de potência para gerenciamento da carga e descarga das células para operação balanceada tanto das células individuais como dos conjuntos de células.
- Modelagem matemática das células, tendo em vista a estimação dos parâmetros físicos de cada célula, assim como o acompanhamento em tempo real do estado de carga.
- Estudo do sistema de carregamento, tendo em vista o desenvolvimento teórico acerca do comportamento das células durante a carga, visando, sobretudo, o correto balanceamento a nível de células.
- Estudo do descarregamento, gerenciamento de potência no robô, sistemas de proteção e balanceamento a nível dos conjuntos de células, fazendo uso de simulações para análise da estabilidade do balanceamento.
- Estudo da possibilidade de integração de sistemas existentes de *packs* de bateria.
- Estudo dos elementos de eletrônica de potência a serem utilizados para o projeto, de acordo com as especificações de corrente, tensão, eficiência, entre outros.

## 5.1 Definição do Tipo de Bateria

Para a definição do tipo de bateria adequado para a aplicação, serão utilizados os seguintes critérios:

- **Densidade Energética e Custo**

Será feita a comparação da densidade de energia por volume e energia por massa para sistemas de baterias Chumbo-Ácida, de Níquel Cádmio (*NiCd*), Níquel Hidreto Metálico (*Ni-MH*) e de diferentes composições de Íon de Lítio. Serão também avaliados os impactos do volume e massa das baterias em projetos de robótica submarina, assim como das estimativas de custos diretos e indiretos em função do tipo de bateria utilizado.

- **Questões de Segurança**

Considerando a estabilidade eletroquímica dos diferentes tipos de bateria, serão avaliados os riscos de sobreaquecimento, danos a sistemas próximos e risco de explosão em caso de curto-circuito, impacto mecânico ou operação fora das especificações de temperatura e corrente. Serão consideradas também as estratégias de mitigação dos efeitos de tais eventos. Apurar questões específicas para operação em ambientes de risco.

- **Complexidade do Sistema de Carregamento**

Tendo em vista as especificações de curva de carregamento da bateria, bem como sua tolerância para sobrecarregamento, sobrecorrente e sobretensão de carga, serão avaliados os sistemas necessários para o correto carregamento das baterias, sem que haja comprometimento da vida útil e da capacidade da bateria.

- **Propriedades de Descarga e Sistemas de Proteção**

Serão estudados os sistemas de proteção necessários à operação de cada tipo de bateria, tendo em vista sua tolerância a sobrecorrente e picos de corrente, bem como a complexidade destes.

## 5.2 Modelagem Matemática das Células

Para a correta utilização das células da bateria, é necessário definir um modelo teórico para estas, realizar a estimação dos parâmetros quantitativos para adequação de cada célula ao modelo e do estado de carga das células.

Para o estabelecimento do modelo teórico a ser utilizado, serão estudados os modelos possíveis para representação de uma célula, tendo em vista a complexidade

de implementação, o custo computacional e a precisão da representação para o fim visado [3],[4].

Já para a estimação dos parâmetros a serem utilizados para cada célula, será verificado um método eficiente para obtenção dos dados quantitativos visando a adequação do modelo estabelecido para cada célula. Tal estimação visa representar as células conforme a variabilidade de capacidades, tensões de operação e resistência em série equivalente. Pode ser avaliada também a variação de tais parâmetros segundo circunstâncias externas.

Finalmente, deve-se acompanhar em tempo real o estado de carga das células, tendo em vista o modelo definido e os parâmetros dinâmicos estimados.

### 5.3 Definição da Topologia de Conexão das Células

Para definição da topologia de conexão das células, serão propostas diferentes maneiras de conectar eletricamente as células, sendo elas: as topologias híbridas (série-paralelo e paralelo-série) e as topologias simples (série e paralelo). As diferentes topologias serão analisadas segundo critérios de complexidade de implementação e robustez. A análise quanto à complexidade de implementação terá em vista os sistemas de eletrônica de potência envolvidos no carregamento e descarregamento das células da bateria. Já a análise quanto à robustez avaliará o efeito de problemas nas células, como curto-circuito e desbalanceamento.

### 5.4 Estudo de Carregamento

Para o estudo do carregamento da bateria, serão analisadas as possibilidades de balanceamento de células através de conversores CC-CC, o que caracteriza balanceamento ativo ou por *bypass*, o que caracteriza balanceamento passivo. Cada abordagem terá seus efeitos comparados quanto à eficiência, complexidade de implementação e robustez do sistema de carregamento [5], [6].

Serão levados em conta também os efeitos de sistemas de desacoplamento de conjuntos de células e sua necessidade para as topologias consideradas, tendo em vista o carregamento dos conjuntos de células.

### 5.5 Estudo de Descarregamento

Será avaliado mediante simulação a estabilidade do balanceamento durante a descarga. Especial atenção será dada ao caso da topologia série-paralelo com a utilização de diodos para impedir a reversão de corrente nos conjuntos em série. A

distribuição de corrente pelos grupos de células tendo em vista a variabilidade de tensão e capacidade das células é um importante critério para tal avaliação.

Será avaliada a possibilidade de desenvolver conceitualmente um sistema de controle de balanceamento de grupos de células para a descarga, tendo em vista os resultados das simulações de estabilidade do balanceamento [7].

## 5.6 Estudo de Caso

Considerando baterias comercialmente disponíveis, sobretudo as utilizadas nos projetos em andamento no LEAD, será avaliada a possibilidade de integração das baterias inteligentes ao sistema de gerenciamento abordado nesta proposta, tendo em vista os sistemas de comunicação, de carregamento e de proteção destas.

Poderá ser avaliada também a adequação de elementos de eletrônica de potência e de dispositivos eletromecânicos para cada finalidade do sistema, tendo em vista suas especificações mecânicas e elétricas.

Finalmente, para um determinado robô, será estudado um método de monitoração de potência dos subsistemas do robô, possibilitando a implementação de sistemas de gerenciamento de energia e de tempo de operação, bem como de sistemas de proteção contra falhas e sobrecorrente [8],[9].

# Capítulo 6

## Bibliografia Proposta

### Decisão sobre o tipo de bateria

#### Livros:

- [1] D. Linden and T. Reddy, *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, Third ed., 2002.
- [2] Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, and Kai Strunz, *Electric Vehicle Battery Technologies*. Springer.

#### Artigos:

- [3] A. Taniguchi, N. Fujioka, M. Ikoma, and A. Ohta, *Development of Nickel/Metal-Hydrate Batteries for EVs and HEVs*, Journal of Power Sources, vol. 100, no. 1-2, pp. 117-124, 2001.
- [4] Greg Albright , Jake Edie and Said Al-Hallaj. *A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications*. AllCell Technologies LLC, 03/2012.

## Modelagem

#### Teses:

- [5] H.J. Bergveld, *Battery Management Systems Design by Modelling*. University Press Facilities, Eindhoven
- [6] Mahmoud Alahmad and Mohamed Amer Chaaban. *Optimization of Energy Storage Systems in HEV's*, University of Nebraska, Lincoln, 2011.

## Artigos:

- [7] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint and Abdel-Ilah, *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicle*. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE.
- [8] Min Chen and Gabriel A. Rincón-Mora, *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I/V Performance*. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 21, NO. 2, JUNE 2006.
- [9] Robert M. Spotnitz, *Battery Modeling*. The Electrochemical Society Interface. Winter 2005.
- [10] Ahmad RAHMOUN and Helmuth BIECHL, *Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams*. PRZEGL'D ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7b/2012.
- [11] Chao Shen and Lei Wan, *A Design methodology for Lithium-ion Battery Management System and its application to an Autonomous Underwater Vehicle*. Advanced materials research Vols. 383-390.

## Topologia de Conexão

### Artigos:

- [12] Jon Crowell, *Battery Arrays, Rechargeable Li-ion Battery Power Sources for Marine Applications*. OceanServer Technology, Inc.
- [13] Antoine DURIEUX. *Smart management of multi-cell batteries*, MATSCI303: Principles, Materials and Devices of Batteries, 2010.

## Balanceamento (Carregamento e Descarregamento)

### Teses:

- [14] HEIDI FISK and JOHAN LEIJGÅRD, *A Battery Management Unit*. Chalmers University of Technology, 06/2010.
- [15] Sriram Yarlagadda, *A BATTERY MANAGEMENT SYSTEM USING AN ACTIVE CHARGE EQUALIZATION TECHNIQUE BASED ON DC-DC CONVERTER TOPOLOGY*. University of Akron 08/2010.

- [16] James D. Welsh, *A Comparison of Active and Passive Cell Balancing Techniques for Series/Parallel Battery Packs*. The Ohio State University, 2009.
- [17] Ming-Kuang and Simon Round And Richard Duke, *An Investigation of Battery Voltage Equalisation Topologies for na Electric Vehicle*. University of Canterbury, Christchurch.

### **Artigos:**

- [18] Thomas Stuart and Xiaopeng Wang and Cyrus Ashtiani and Ahmad Pesaran *A Modular Battery Management System for HEVs*.



# Capítulo 7

## Cronograma Proposto

|  | Fev<br>/Mar | Abr<br>/Mai | Jun<br>/Jul | Ago<br>/Set | Out<br>/Nov |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Pesquisa Bibliográfica                               | X           | —           |             |             |             |
| Formulação do Problema                               | X           |             |             |             |             |
| Avaliar os Modelos Matemáticos para Células          | X           | X           |             |             |             |
| Avaliar Estratégias de Gerenciamento de Baterias     | X           | X           |             |             |             |
| Avaliar Modelos via Simulação                        | X           | X           | —           |             |             |
| Avaliar e Comparar Estratégias de Carregamento       |             | X           |             |             |             |
| Avaliar e Comparar Estratégias de Descarregamento    |             | X           |             |             |             |
| Estudo de Caso                                       |             |             | X           |             |             |
| Realizar Simulações Numéricas                        |             | X           | X           |             |             |
| Avaliar Montagem de Bancada Experimental             |             |             | X           |             |             |
| Testes Preliminares                                  |             |             | X           |             |             |
| Propor Modificações nas Estratégias de Gerenciamento |             |             | X           | X           | —           |
| Realizar Modificações e Comparações                  |             |             |             | X           | X           |
| Simulações, Testes e Experimentos Finais             |             |             |             |             | X           |
| Elaborar Artigo e Texto Final                        |             |             | X           | X           | X           |

# Capítulo 8

## Conclusão

Nesta proposta de tema de tese de mestrado foram descritos os aspectos relevantes para o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de baterias. Os principais pontos a serem aprofundados neste trabalho são: a especificação de um critério para a definição do tipo de bateria e da topologia de conexão entre suas células, a modelagem matemática das células e um adequado gerenciamento do carregamento e descarregamento da bateria, considerando o balanceamento entre as células. Verifica-se que uma ampla gama de assuntos inter-relacionados fornece os subsídios para o desenvolvimento de tal sistema de gerenciamento.

Simulações numéricas serão conduzidas para avaliar o desempenho dos sistemas considerados em uma sequência de testes a serem elaborados. Finalmente, utilizando a infra-estrutura e os recursos humanos disponíveis no laboratório, torna-se viável a realização de experimentos para validação do esquema de gerenciamento proposto neste trabalho.

# Referências Bibliográficas

- [1] William Joel Schmidt III *Lithium-based Battery System Management and Balancing*, Purdue University. 2011
- [2] Heidi Fisk and Johan Leijgård *A Battery Management Unit*, Chalmers University of Technology. 2010
- [3] Min Chen and Gabriel A. Rincon-Mora *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I V Performance*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. 06/2006
- [4] A. Capel *Mathematical model for the representation of the electrical behaviour of a lithium cell*, Alcatel Space. 2001
- [5] Reinhardt Klein, Nalin A. Chaturvedi, Jake Christensen, Jasim Ahmed, Rolf Findeisen and Aleksandar Kojic *Optimal Charging Strategies in Lithium-Ion Battery*, American Control Conference. 2011
- [6] Yevgen Barsukov *Battery Cell Balancing: What to Balance and How*, Texas Instruments. 2003
- [7] Greg Earle and Will Kiewicz-Schlansker *LiFePO<sub>4</sub> Battery Pack Per-Cell*.
- [8] Thomas Stuart, Fang Fang, Xiaopeng Wang, Cyrus Ashtiani and Ahmad Pesaran *A Modular Battery Management System for HEVs*, University of Toledo. 01/2002
- [9] Yaniao Xing, Eden W. M. Ma, Kwok L. Tsui and Michael Pecht *Battery Management System in Electric and Hybrid Vehicles*, MDPI. 10/2011