

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

THAYNA OENING

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE
BATERIAS DE LÍTIO**

JOINVILLE

2017

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

THAYNA OENING

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE
BATERIAS DE LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer

JOINVILLE

2017

THAYNA OENING

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE
BATERIAS DE LÍTIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Orientador:

Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
UDESC

Membros:

Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd
UDESC

Prof. Dr. Marcello Mezaroba
UDESC

Joinville, 5 de Dezembro 2017.

Dedico esse trabalho aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Pedrinho Oening e Roseli Figueiredo, por serem para mim, o maior exemplo de honestidade e resiliência.

Agradeço também aos amigos Fabiana Seidel e Ruan Pêsoa por dividirem comigo os desafios da vida universitária. À amiga Daiane Cristine do Santos, que sempre esteve presente em minha vida. Ofereço também meus agradecimentos ao amigo Tiago Jackson May Dezuo por sempre desviar meu olhar para o lado positivo da ciência e da pesquisa.

Sinto-me completamente agradecida aos companheiros do NPEE (Núcleo de Pesquisa em Engenharia Elétrica) por dividirem suas experiências e assim tornar meu processo de aprendizagem ainda mais enriquecedor.

Agradeço aos professores que durante toda a jornada acadêmica foram excelentes mestres e amigos, oferecendo-me suas experiências profissionais e pessoais. Sinto-me mais preparada para os desafios da vida profissional.

Expresso meu sentimento de gratidão ao professor Alessandro Luiz Batschauer pelo tempo e conhecimento dispendidos na orientação deste trabalho.

Tudo, antes de ser fácil, é difícil. (Thomas Fuller)

RESUMO

Em um cenário onde a demanda por dispositivos eletrônicos portáteis e por geração de energia limpa está crescendo rapidamente, a necessidade de armazenar energia de forma eficiente acompanha este crescimento. Entre os dispositivos de armazenamento de energia, a bateria se destaca por possuir maior densidade de energia quando comparada as outras tecnologias. Novas tecnologias de baterias vêm sendo desenvolvidas com o propósito de otimizar o processo de armazenamento de energia. Atualmente, as baterias de íons de lítio se sobressaem em relação as características elétricas e físicas e por isso são abordadas neste trabalho. Em consequência a grande utilização das baterias, faz-se necessário o estudo e desenvolvimento de sistemas que realizem a medição e o controle de parâmetros importantes das baterias a fim de proteger as mesmas de situações adversas. Estes sistemas são conhecidos como sistemas de gerenciamento de baterias (BMS - *Battery Management System*) e têm como principal objetivo fornecer à bateria uma condição ótima de funcionamento. Este trabalho propõe realizar a implementação de um BMS comercial, o bq7693002DBT da empresa *Texas Instruments*, em um banco de baterias de íons de lítio.

Palavras-chave: Baterias, *Battery Management System*, BMS, bq7693002DBT, Íons de lítio, Sistema de Gerenciamento de Baterias.

ABSTRACT

In a scenario where the demand for portable electronic devices and clean energy generation is growing rapidly, the need to store energy efficiently follows this growth. Among the energy storage devices, the battery stands out because it has a higher energy density when compared to other technologies. New battery technologies have been developed with the purpose of optimizing the energy storage process. Currently, lithium ion batteries are noteworthy due to their electrical and physical characteristics and are therefore addressed in this work. As a result of the great use of batteries, it is necessary to study and develop systems that measure and control important battery parameters in order to protect them from adverse situations. These systems are known as battery management systems (BMS's) and have as their main objective to provide the battery with an optimum operating condition. This work proposes to carry out the implementation of a commercial BMS, the bq7693002DBT from Texas Instruments Company, for a pack of lithium ion batteries

Keywords: Batteries, Battery Management System, BMS, bq7693002DBT, Lithium Ion.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Modelo ilustrativo da célula eletroquímica.	19
2.2	Circuito do modelo elétrico simples com resistência série equivalente	25
2.3	Circuito do modelo elétrico simples com resistência e capacitância série equivalente	25
2.4	Circuito do modelo elétrico baseado no equivalente de Thévenin	26
2.5	Circuito do modelo elétrico baseado na impedância eletroquímica	26
2.6	Circuito do modelo elétrico baseado no tempo de duração de carga	27
2.7	Circuito do modelo capaz de prever o tempo de duração de carga e característica I-V.	27
3.1	Características de um BMS.	29
3.2	Circuito amplificador diferencial para medição de corrente por resistência <i>shunt</i> . . .	30
3.3	Circuito de um amplificador diferencial para medição de tensão em células.	31
3.4	Desequilíbrio na tensão das células.	32
3.5	Carregamento de bateria com tensão constante	34
3.6	Carregamento de bateria com tensão constante e limitação de corrente	34
3.7	Carregamento de bateria com corrente constante	35
3.8	Carregamento de bateria com Corrente Constante seguido de Tensão Constante . .	35
3.9	Curvas SoC por OCV para diferentes taxas C em bateria de lítio à 25°C.	39
3.10	Relação típica entre SoC e OCV para banco de baterias de lítio	39
4.1	Diagrama de pinos do bq76930	46
4.2	Diagrama de blocos funcional do bq769x0	46
4.3	Circuito simplificado utilizando bq76930	48
4.4	Diagrama de blocos funcional do bq769x0	49
4.5	Circuito de carga e descarga	53
4.6	Processo de escrita I2C	56
4.7	Processo de leitura I2C	57
4.8	Circuito de balanceamento do bq7693002DBT	69
4.9	Circuito de proteção do bq7693002DBT	70
4.10	Circuito de comunicação do bq7693002DBT	70
4.11	Imagem 3D do protótipo	71
4.12	Protótipo desenvolvido para realização de testes	72
5.1	Teste 1 - Circuito para balanceamento	73
5.2	Bancada de testes utilizando fonte DC	74
5.3	Leitura do registrador SYS_STAT (Escala: 1V/div e 50 μ s)	75
5.4	Teste de leitura - Tensões e Registradores	76

5.5	Escrita do registrador SYS_STAT (Escala: 1V/div e 50 μ s)	77
5.6	Teste de escrita em SYS_STAT	78
5.7	Bancada de testes utilizando banco de baterias	79

LISTA DE TABELAS

2.1	Principais características de alguns tipos de baterias.	22
3.1	Comparação entre os principais BMS's comercializados.	44
4.1	Descrição dos pinos do bq76930	47
4.2	Estados de CHG e DSG em resposta a eventos de proteções.	54
4.3	Configuração dos registradores do bq7693002DBT.	58
4.4	Registrador SYS_STAT (0x00)	58
4.5	Registrador CELLBAL1 (0x01)	60
4.6	Registrador CELLBAL2 (0x02)	60
4.7	Registrador SYS_CTRL1 (0x04)	61
4.8	Registrador SYS_CTRL2 (0x05)	62
4.9	Registrador PROTECT1 (0x06)	63
4.10	Registrador PROTECT2 (0x07)	63
4.11	Registrador PROTECT3 (0x08)	64
4.12	Registrador OV_TRIP (0x09)	64
4.13	Registrador UV_TRIP (0x09)	65
4.14	Registrador CC_CFG (0x0B)	65
4.15	Registradores de Leitura do bq7693002DBT.	66
4.16	Registrador ADCOFFSET (0x51).	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledge</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AFE	<i>Analog Front-End</i>
BEH	<i>Battery Electric Vehicles</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BTMS	<i>Battery Thermal Management Systems</i>
CC	<i>Constant Current</i>
CC-CC	<i>Constant Current to Constant Current</i>
CC/CV	<i>Constant Current/Constant Voltage</i>
CI	Circuito integrado
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CuHCF	Hexacianoferrato de cobre
CV	<i>Constant Voltage</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>
EVM	<i>Evaluation Module</i>
HLIM	<i>High Limit</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LDO	<i>Low Drop-Out</i>
LiCoO ₂	Lítio-cobalto
LiFePO ₄	Fosfato de Ferro-lítio
Li-ion	Íons de lítio

LiMnO ₄	Lítio-manganês
Li-S	Lítio-enxofre
LLIM	<i>Low Limit</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NiCd	Níquel-cádmio
NiMH	Níquel hidreto metálico
NTC	<i>Negative Temperature Coefficiente</i>
OCD	<i>Overcurrent in Discharge</i>
OCV	<i>Open Circuit Voltage</i>
OV	<i>Overvoltage</i>
Pb-Acid	Chumbo-ácido
PTC	<i>Positive Temperature Coefficiente</i>
R/W	<i>Read/Write</i>
SCD	<i>Short Circuit in Discharge</i>
SLI	<i>Start, Lighting and Ignition</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SoH	<i>State of Health</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
UV	<i>Undervoltage</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Estrutura do Trabalho	16
2	BATERIAS	18
2.1	Baterias e seus tipos	18
2.1.1	Estrutura	18
2.1.2	Características	19
2.1.3	Tipos de baterias	20
2.1.3.1	Chumbo-Ácido	20
2.1.3.2	Níquel-Cádmio	21
2.1.3.3	Níquel Hidreto Metálico	21
2.1.3.4	Íons de Lítio	22
2.2	Novas Tecnologias de Baterias	23
2.3	Modelamento das Baterias	23
2.3.1	Modelos Eletroquímicos	24
2.3.2	Modelos Matemáticos	24
2.3.3	Modelos Elétricos	24
2.3.3.1	Modelo Elétrico Simples	24
2.3.3.2	Modelo Baseado no Equivalente de Thévenin	25
2.3.3.3	Modelo Baseado na Impedância Eletroquímica da Bateria	26
2.3.3.4	Modelo Baseado no Tempo de Duração de Carga	26
2.3.3.5	Modelo Capaz de Prever o Tempo de Duração e Característica I-V	27
3	SISTEMA DE GESTÃO DE BATERIAS	28
3.1	Estrutura do Sistema	29
3.1.1	Bloco de Medição	29
3.1.1.1	Técnicas de medição de corrente	30
3.1.1.2	Técnicas de medição de tensão nas células	31
3.1.1.3	Técnicas de medição de temperatura	31
3.1.2	Equalização das Baterias	32
3.1.3	Algoritmos de carregamento	33
3.1.3.1	Carregamento utilizando tensão constante	33
3.1.3.2	Carregamento utilizando corrente constante	34

3.1.3.3	Carregamento utilizando corrente constante seguida de tensão constante	35
3.1.4	Gerenciamento de temperatura	36
3.1.5	Sistemas de proteção	36
3.2	Estimação do Estado de Carga	38
3.2.1	Medição Direta	38
3.2.1.1	Medição de Tensão de Circuito Aberto	38
3.2.1.2	Medição de Tensão Terminal	40
3.2.1.3	Medição de Impedância	40
3.2.2	Métodos <i>Book-Keeping</i>	40
3.2.2.1	<i>Coulomb Counting</i>	40
3.2.2.2	<i>Coulomb Counting</i> Modificado	41
3.2.3	Sistemas Adaptativos	42
3.2.4	Métodos Híbridos	42
3.3	Estimação do Estado de Vida Útil	42
3.4	BMS's comerciais	43
4	DESENVOLVIMENTO	45
4.1	O bq7693002DBT	45
4.1.1	Medição	50
4.1.1.1	ADC 14 bits	50
4.1.1.2	ADC 16 bits	51
4.1.2	Proteções	51
4.1.3	Controle	52
4.1.3.1	Acionamento dos MOSFET's	52
4.1.3.2	Detecção de Carga	54
4.1.3.3	Balanceamento de Células	54
4.1.3.4	Alerta	55
4.1.3.5	Saída de Tensão Regulada	55
4.2	Comunicação I2C	55
4.3	Registradores	57
4.3.1	Configuração dos Registradores	58
4.3.2	Leitura dos Registradores	65
4.4	Circuito Implementado	68
4.5	Protótipo	70
5	RESULTADOS E ANÁLISES	73
5.1	Procedimento de Testes	73

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
6.1	Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE COMUNICAÇÃO DO ARDUINO	84

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e industrial fez com que houvesse a necessidade de maior geração de energia. Atualmente busca-se gerar energia através de fontes renováveis, tais como a geração a partir de painéis fotovoltaicos e geradores eólicos. Porém, outro desafio é armazenar a energia gerada de forma eficiente, uma vez que estas fontes não geram energia de forma constante. Diversas tecnologias de armazenamento de energia são encontradas na literatura e na indústria, tais como supercapacitores, volantes de inércia (*flywheels*), ultracondensadores e baterias. Dentre estas, as baterias tem lugar de destaque por possuírem grande densidade de energia por massa e por volume, possuindo assim uma fácil mobilidade (PAUL, 2015).

As baterias são amplamente utilizadas em dispositivos portáteis que necessitam de uma fonte de energia constante e estável, exemplos destes são os telefones celulares e *laptops*. Esta tecnologia também está presente nos Veículos Elétricos a Bateria (BEH - *Battery Electric Vehicles*), que utilizam energia elétrica ao invés de combustíveis fósseis (YOUNG et al., 2013).

Pensando na grande utilização das baterias e no seu importante papel para o desenvolvimento de novas tecnologias, se faz necessário o estudo das mesmas, visando melhorar seu desempenho. Uma das maiores dificuldades encontradas na utilização das baterias está relacionada ao fato de que seus principais parâmetros não podem ser medidos diretamente. Parâmetros como temperatura e taxa de descarga, abordados neste trabalho, influenciam diretamente o desempenho e a eficiência das baterias e por isso requerem um monitoramento e controle.

O estado de carga (SoC - *State of Charge*) e a vida útil (SoH - *State of Health*) são parâmetros que determinam a quantidade de carga disponível e a capacidade de oferecer energia de uma bateria, respectivamente, também necessitam de monitoramento.

Desta forma, este trabalho propõe o estudo e a implementação de um sistema de gerenciamento de baterias (BMS - *Battery Management System*). Estes sistemas são utilizados em diversas aplicações e para diferentes tipos de baterias e tem como principal objetivo realizar a medição e monitoramento das variáveis relevantes do sistema, bem como realizar o controle de operação do mesmo.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho busca estabelecer uma apresentação lógica e didática dos assuntos estudados durante a realização do mesmo. Este trabalho é dividido em duas partes princi-

país: o estudo do estado da arte envolvendo baterias e BMS's e a implementação de um BMS's comercial utilizando baterias de íons de lítio.

Desta forma, o Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais relacionados à bateria, apontando as diferentes tecnologias utilizadas e abordando a estrutura química e as características elétricas. Também são apresentadas técnicas de modelamento de baterias.

Os conceitos relacionados ao sistema de gerenciamento de baterias são apresentados no Capítulo 3. Neste capítulo também são exibidas as principais funções destes sistemas e os métodos utilizados para realizar cada função. São apresentados alguns BMS'S comerciais e definido qual será utilizado neste trabalho.

No Capítulo 4 é apresentada a implementação do circuito analógico utilizado para validar as funções do BMS comercial. Também é apresentado, de forma detalhada, o funcionamento deste circuito.

Os resultados são exibidos no Capítulo 5 e a conclusão e sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

2 BATERIAS

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais relacionados às baterias, os diferentes tipos de baterias utilizados atualmente, suas características químicas e elétricas e algumas das possíveis técnicas de modelamento.

2.1 BATERIAS E SEUS TIPOS

Baterias são dispositivos formados por células eletroquímicas, uma ou mais, que podem ser acopladas em série e/ou em paralelo. Estas células eletroquímicas armazenam energia elétrica sob a forma de energia química.

As baterias podem ser classificadas como primárias, neste caso só permitem um ciclo e depois de descarregadas precisam ser descartadas, e secundárias, quando permitem vários ciclos, podendo receber recarga (BERGVELD, 2001). No processo de recarga a energia elétrica é transformada em energia química. Neste trabalho aborda apenas arranjos de baterias secundárias e por isso esse termo será omitido.

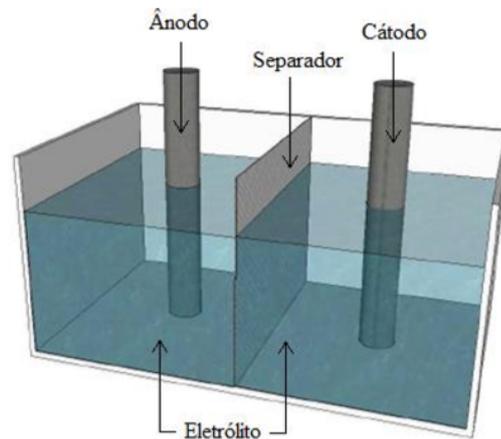
2.1.1 Estrutura

A célula eletroquímica é normalmente composta por quatro elementos: ânodo, cátodo, eletrólito e separador. Estes elementos possuem as seguintes funções:

- **Ânodo:** comumente conhecido como eletrodo negativo, fornece elétrons ao sistema durante a descarga e sofre oxidação durante a reação eletroquímica;
- **Cátodo:** conhecido como eletrodo positivo, recebe elétrons do sistema durante o processo de descarga e é reduzido durante a reação eletroquímica;
- **Eletrólito:** meio que fornece a condutividade iônica essencial entre o ânodo e o cátodo. O eletrólito deve ter alta condutividade para os íons e baixa condutividade para os elétrons, para evitar ou minimizar o efeito de auto-descarga das baterias;
- **Separador:** isolamento físico que separa os eletrodos, formado por material não condutor de elétrons mas que permite a passagem de íons do eletrodo positivo para o negativo prevenindo curtos-circuitos.

A Figura 2.1 exibe o arranjo dos componentes. Os elementos químicos utilizados no ânodo e no cátodo determinam as características da bateria, como tensão e capacidade.

Figura 2.1 – Modelo ilustrativo da célula eletroquímica.



Fonte: (DUARTE, 2013)

2.1.2 Características

Para a compreensão das características e diferenciação de cada tipo de bateria se faz necessário a apresentação dos seguintes conceitos (BERGVELD, 2001):

- Densidade de Energia [Wh/l]: relação entre a quantidade de energia máxima e o volume da bateria;
- Densidade de Potência [W/l]: relação entre a quantidade de potência máxima que a bateria pode fornecer e o seu volume;
- Capacidade [Ah]: define a quantidade de corrente elétrica que a bateria é capaz de oferecer no período de tempo de uma hora;
- Energia Específica [Wh/kg]: relação entre a quantidade máxima de energia armazenada e massa da bateria;
- Potência Específica [W/kg]: relação entre a quantidade de máxima de potência que a bateria pode fornecer e a sua massa;
- Taxa-C: relação entre a corrente de carga ou descarga e a capacidade da bateria. Diz-se que se uma bateria com capacidade de 2 Ah fornece uma corrente de 2A durante 1 hora, a mesma está fornecendo a corrente a uma taxa de 1 C (BERGVELD, 2001);

- Ciclos de Vida: define a quantidade de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada, sob condições específicas, sem que a capacidade atinja o valor mínimo, normalmente de 80% da capacidade inicial;
- Tensão de Corte: tensão mínima que a bateria pode atingir quando está sendo descarregada, sem que haja redução da vida útil;
- Taxa de Auto-descarga: perda da energia acumulada na bateria, normalmente expressa por mês em porcentagem a uma determinada temperatura;
- Efeito Memória: declínio na capacidade efetiva com ciclos de carga/descarga parcialmente repetidos. Acontece quando a bateria é carregada ou descarregada parcialmente, fazendo com que a próxima carga não ultrapasse a carga parcial anterior. Isso faz com que a tensão da bateria seja significativamente reduzida e prejudique o funcionamento dos dispositivos conectados. Porém, depois de alguns ciclos completos de carga/descarga a bateria pode restaurar sua capacidade total (BERGVELD, 2001).
- Segurança: Baterias apresentam riscos de choque elétrico, centelhamento e explosão (PAUL, 2015). Tipos diferentes de baterias possuem graus diferentes de segurança, assim como a correta utilização impede que situações de perigo ocorram.

2.1.3 Tipos de baterias

As baterias podem ser classificadas em função do tipo de metal e eletrólito empregados na sua fabricação. Dentre os vários tipos de baterias, destacam-se as de chumbo-ácido (Pb-Acid), níquel-cádmio (NiCd), níquel hidreto metálico (NiMH) e as baterias de íons de lítio (Li-ion) (RAHIMI-EICHI et al., 2013). Em seguida, são apresentadas as principais características químicas e elétricas de cada tipo de tecnologia.

2.1.3.1 Chumbo-Ácido

Uma das mais populares dentre as tecnologias de armazenamento de energia, a bateria de chumbo-ácido foi desenvolvida em 1859 por Robert Louis Gaston Planté e passou a ter grande aplicação nos primeiros veículos elétricos, em 1895 (ROOT, 2010).

Chumbo (Pb), dióxido de chumbo (PbO₂) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) constituem o eletrodo positivo, o eletrodo negativo e o eletrólito, respectivamente.

Em relação as características elétricas, cada célula tem comumente 2,0V de tensão nominal e uma densidade de potência elevada, no entanto possuem baixa energia específica e baixa

potência específica em consequência dos materiais utilizados. Como são relativamente fáceis de produzir e o custo de produção é baixo, esse tipo de bateria possui diversas aplicações. Os três principais usos são em automóveis, em um sistema denominado SLI (*Start, Lighting, Ignition* - Arranque, Iluminação e Ignição), em sistemas de tração e em armazenamento estacionário de energia (ROOT, 2010).

2.1.3.2 Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio são comumente conhecidas pelo baixo custo e robustez (BERGVELD, 2001).

O eletrodo negativo é composto por hidróxido de cádmio ($\text{Cd}(\text{OH})_2$), podendo ter até 25% de ferro e pequenas quantidades de níquel e grafite. No eletrodo positivo, composto principalmente por oxi-hidróxido de níquel ($\text{Ni}(\text{O})\text{OH}$), pode ser adicionado óxido de cobalto (CoO). O eletrólito da bateria é uma solução aquosa de 20% a 32% de hidróxido de potássio (KOH) com até 2% de hidróxido de lítio (LiOH) (ROOT, 2010).

As baterias de níquel-cádmio apresentam em torno de 1,2V de tensão nominal por célula, baixa densidade de energia e baixa energia específica. Sua principal desvantagem está atrelada ao fato de possuir efeito de memória (BERGVELD, 2001).

Atualmente o mercado de baterias de níquel-cádmio está diminuindo, estas estão sendo substituídas por baterias de níquel hidreto metálico e de lítio, ambas descritas adiante. Uma das razões para que este tipo de bateria seja substituída é o fato do cádmio ser um metal tóxico e sua eliminação de forma imprudente pode contaminar o meio ambiente. Políticas de descarte de baterias de níquel-cádmio são aplicadas em diversos países (ROOT, 2010).

2.1.3.3 Níquel Hidreto Metálico

Desenvolvida por volta de 1967, a bateria de níquel hidreto metálico surgiu como uma melhoria à bateria de níquel-cádmio, passando a substituí-la nas mais diversas aplicações e também se destacando nas tecnologias de veículos elétricos e híbridos.

Tal como a bateria de níquel-cádmio, esta bateria tem como base o mesmo composto no eletrodo positivo, o oxi-hidróxido de níquel ($\text{Ni}(\text{O})\text{OH}$). A grande diferença está no eletrodo negativo que é composto por uma liga metálica. Um grande número de metais pode ser utilizado para formar a liga, os mais comuns são o alumínio (Al), o manganês (Mn) e o cobalto (Co) (ROOT, 2010).

As células de níquel hidreto metálico apresentam tensão nominal de aproximadamente 1,2 V e possuem um perfil de descarga plano, isso implica em uma maior dificuldade em determinar

o seu estado de carga, também possuem menor densidade de potência e menor tolerância a sobrecargas, quando comparadas às baterias de níquel-cádmio. No entanto, possuem maior densidade de energia, não possuem compostos tóxicos e sofrem um fraco efeito de memória, citado anteriormente (BERGVELD, 2001).

2.1.3.4 Íons de Lítio

As baterias de íons de lítio foram introduzidas ao mercado por volta de 1970 e passaram a ter grande repercussão quando a empresa japonesa *Sony* passou a utilizá-las nos seus produtos, no ano de 1991 (ROOT, 2010). Atualmente, as baterias de íons de lítio têm inúmeras aplicações, como equipamentos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário de energia. Sua demanda atual é maior que a demanda comum dos outros tipos de baterias citados nesse capítulo e suas aplicações tendem a crescer, pois esse tipo de bateria é constantemente estudado e aprimorado.

Em relação as suas características químicas, as baterias de íons de lítio utilizam materiais de carbono, principalmente o grafite, no eletrodo negativo. No eletrodo positivo são usados óxidos de metal ou compostos de fosfato. Os três materiais mais utilizados são o óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2), o óxido de lítio-manganês (LiMnO_4) e o fosfato de lítio ferro (LiFePO_4). A escolha do material que compõe o eletrodo positivo implica em diferentes características na bateria, resultando em variações na capacidade, densidade de energia, densidade de potência e até mesmo segurança e estabilidade (ROOT, 2010).

A preferência à bateria de íons de lítio em relação as outras apresentadas se dá principalmente por esta oferecer maior tensão nominal, cerca de 3,6 V por célula, possui também maior energia específica, maior densidade de energia e suporta mais ciclos de carga/descarga, além de não possuir efeito memória (BERGVELD, 2001).

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação das características dos diferentes tipos de baterias citados nessa seção.

Tabela 2.1 – Principais características de alguns tipos de baterias.

Índice	Pb-Acid	NiCd	NiHM	Li-ion
Tensão nominal [V]	2	1,2	1,2	3,6
Energia Específica [Wh/kg]	30-35	30-35	35-65	50-500
Densidade de Energia [Wh/l]	130	150	200	250-1000
Ciclos de Vida	200	500	500-1000	500-3000
Efeito Memória	Não	Sim	Sim (fraco)	Não

Fonte: Adaptado de (ZHOU; LI, 2015).

2.2 NOVAS TECNOLOGIAS DE BATERIAS

Ainda que as baterias sejam a melhor opção em armazenamento de energia atualmente, existem muitas melhorias a serem feitas. Diversas pesquisas são realizadas com a intenção de descobrir novos elementos que forneçam às baterias melhores características elétricas. Dentre as características principais, faz-se necessário o aprimoramento da densidade de energia, tempo de vida útil, capacidade e tempo de recarga. Uma vez que nas aplicações recentes, como os veículos elétricos e os sistemas de energia estacionários (que servem principalmente para armazenar energia renovável), essas características são extremamente importantes, podendo interferir no avanço das mesmas.

Exemplo dessas tecnologias são as baterias de lítio-ar, que substituem o componente do eletrodo positivo por um material poroso, comumente o carbono, que utiliza oxigênio durante o processo de carga e descarga. Isso acarreta um aumento considerável da densidade de energia, entre 4 e 10 vezes mais quando comparados as tradicionais baterias de íons de lítio.

Outra tecnologia bastante promissora é a bateria de hexacianoferrato de cobre (CuHCF), que utiliza uma liga de cobre e ferro carregada com íons de potássio. Como o potássio é capaz de se carregar positiva e negativamente sem se degradar, é possível construir uma bateria de alta potência. Teoricamente essa bateria pode suportar até 40 mil ciclos, cerca de 30 anos de vida útil, sendo nesse ponto, muito superior às tecnologias existentes (WESSELLS et al., 2011).

Pode-se citar também as baterias de lítio-enxofre (Li-S), que possuem elevada densidade de energia e baixo custo como principais vantagens.

Atualmente é realizado um projeto de pesquisa e desenvolvimento em baterias de sódio. Este projeto é uma parceria entre a Itaipu Binacional e a Fundação Parque Tecnológico Itaipu e visa o domínio da tecnologia de produção da bateria de sódio-níquel. Esta tecnologia faz parte de uma classe de baterias conhecidas como baterias de sal fundido e tem como vantagens a alta densidade de energia, baixo custo de matéria prima e elevados ciclo de vida e nível de segurança.

2.3 MODELAMENTO DAS BATERIAS

A modelagem das baterias se faz necessária para a compreensão e análise de seu funcionamento. Na literatura, existem três principais formas de modelar uma bateria, com diferentes tipos de complexidade (SUN; SHU, 2011). São estes:

2.3.1 Modelos Eletroquímicos

Esses modelos são baseados em equações físico-químicas que caracterizam as reações que ocorrem na bateria, são modelos normalmente usados para caracterizar os mecanismos fundamentais da geração de energia, parâmetros macroscópicos (tensão e corrente) e microscópicos (concentração e distribuição). Esses modelos são os mais representativos, porém possuem alta complexidade e é necessário um vasto conhecimento nas áreas de química e eletroquímica, por isso tem sua utilidade limitada.

2.3.2 Modelos Matemáticos

Conhecidos também como modelos estatísticos, são modelos que adotam equações empíricas e aproximações estocásticas para prever alguns comportamentos da bateria, como eficiência e capacidade (SUN; SHU, 2011). Embora seja uma modelagem relativamente simples, a mesma não oferece informações sobre tensão e corrente ou resultam em aproximações não muito exatas, chegando a possuir um erro de 20%. Outra desvantagem desse modelo é que sua validade é aplicada apenas para a bateria a qual foram extraídos os valores de forma experimental, não podendo ser utilizado como um modelo genérico (RINCON-MORA; CHEN, 2006).

2.3.3 Modelos Elétricos

Por fim, esses modelos são equivalentes elétricos que usam componentes como fontes de tensão e corrente, capacitores e resistores para modelar as características da bateria. São modelos mais intuitivos, úteis e fáceis de lidar, principalmente para projetos de engenharia elétrica, do que os outros modelos apresentados. Além disso, mesmo sendo um modelo bastante simples, os mesmos oferecem ótimos resultados, com taxa de erro de 2% a 5% (SUN; SHU, 2011).

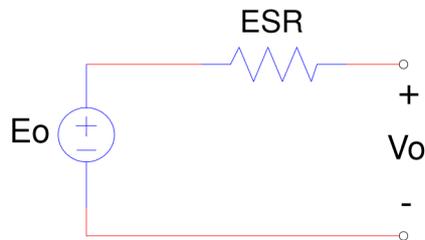
Em seguida, são apresentados alguns modelos elétricos que possibilitam a interpretação do funcionamento de uma bateria.

2.3.3.1 Modelo Elétrico Simples

Esse é o modelo mais simples que representa uma bateria. Composto por uma resistência série equivalente *ESR* (*Equivalent Series Resistance*) e uma fonte de tensão E_0 . A tensão medida nos seus terminais é dada por V_0 , conforme Figura 2.2. Porém o mesmo possui uma

série de desvantagens, como não levar em conta a variância da resistência interna por causa da variância do estado de carga, não possuir resposta a transitórios e não modelar a variação de carga da bateria (SUN; SHU, 2011).

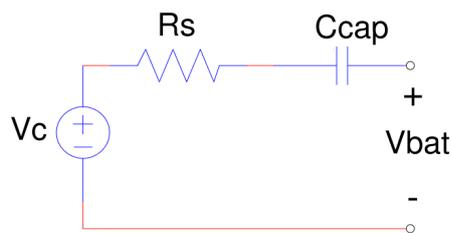
Figura 2.2 – Circuito do modelo elétrico simples com resistência série equivalente



Fonte: Adaptado de (SUN; SHU, 2011).

Uma das melhorias possíveis à esse modelo é a adição de um capacitor em série com os outros componentes. Desta maneira, o capacitor modela a variação do estado de carga da bateria, a fonte de tensão modela a tensão de corte e a resistência modela a resistência interna (Figura 2.3). Esse modelo mantém algumas das limitações do anterior, tal como não representar corretamente os efeitos transitórios. Contudo, a adição do capacitor torna possível modelar, mesmo que com baixa exatidão, a variação da tensão na bateria.

Figura 2.3 – Circuito do modelo elétrico simples com resistência e capacitância série equivalente

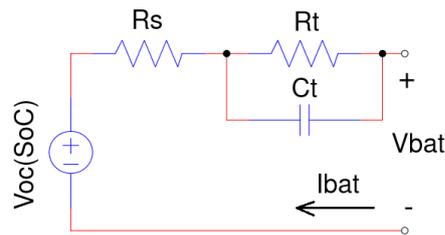


Fonte: Adaptado de (SUN; SHU, 2011).

2.3.3.2 Modelo Baseado no Equivalente de Thévenin

Composto por uma resistência em série R_s , que modela a resistência interna da bateria e uma malha RC (R_t e C_t) que modela a resposta ao transitório da carga, assumindo uma tensão de circuito aberto $V_{oc}(SoC)$ constante. Esse modelo se apresenta mais completo que o primeiro e pode ser observado na Figura 2.4. Ainda assim, o mesmo não estima o tempo de duração de carga da bateria.

Figura 2.4 – Circuito do modelo elétrico baseado no equivalente de Thévenin

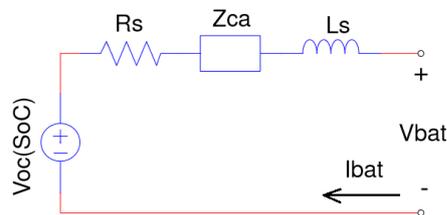


Fonte: Adaptado de (SUN; SHU, 2011).

2.3.3.3 Modelo Baseado na Impedância Eletroquímica da Bateria

Nesse modelo, apresentado na Figura 2.5, a combinação de R_s e L_s modela a resistência interna e Z_{ca} modela a impedância eletroquímica da bateria, obtida através da técnica de eletroscopia de impedância eletroquímica (EIS- *Electrochemical Impedance Spectroscopy*). A fonte de tensão $V_{oc}(SoC)$ modela a tensão de circuito aberto em determinado estado de carga (SUN; SHU, 2011).

Figura 2.5 – Circuito do modelo elétrico baseado na impedância eletroquímica

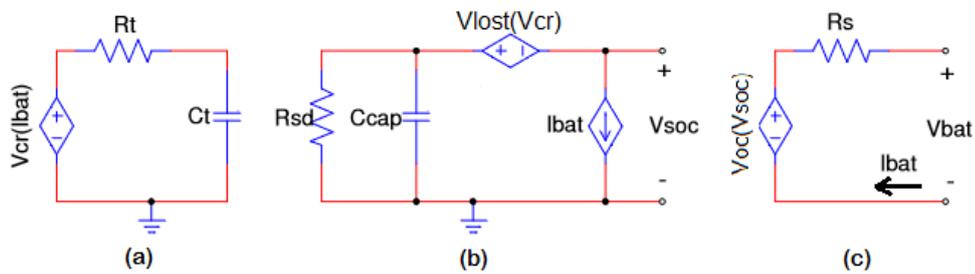


Fonte: Adaptado de (SUN; SHU, 2011).

2.3.3.4 Modelo Baseado no Tempo de Duração de Carga

Esse modelo é composto por três circuitos diferentes. O primeiro deles consiste em uma resistência R_t e um capacitor C_t que modelam o comportamento transiente da bateria (Figura 2.6(a)). O segundo circuito possui uma resistência R_{sd} , um capacitor C_{cap} e uma fonte V_{lost} , que representam a resistência de auto-descarga, a capacitância total da bateria e tensão perdida devido a perdas internas (Figura 2.6(b)). O último circuito é composto por uma resistência R_s , que modela a resistência interna e por uma fonte de tensão $V_{oc}(SoC)$ que representa o estado de carga da bateria, esse circuito fornece informações sobre a tensão da bateria V_{bat} nos terminais de saída e o estado de carga da bateria (Figura 2.6(c)) (SUN; SHU, 2011).

Figura 2.6 – Circuito do modelo elétrico baseado no tempo de duração de carga

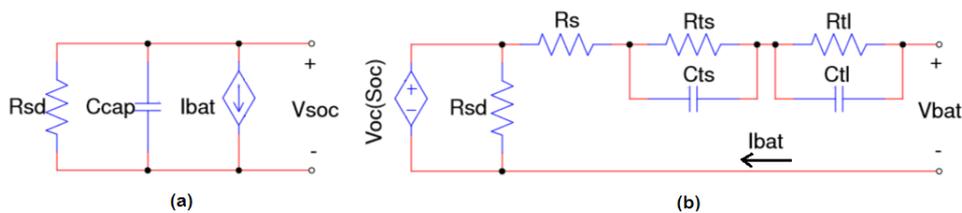


Fonte: Adaptado de (SUN; SHU, 2011).

2.3.3.5 Modelo Capaz de Prever o Tempo de Duração e Característica I-V

A composição de dois circuitos, que combinam características de modelos anteriores, dá ao modelo atual algumas vantagens. O primeiro é formado por uma resistência R_{sd} , um capacitor C_{cap} e uma fonte de corrente controlada I_{bat} (Figura 2.7(a)). Esse circuito modela o tempo de duração de carga da bateria, a capacidade e o fenômeno de auto-descarga. O segundo circuito é composto por uma fonte de tensão controlada $V_{oc}(SoC)$, uma resistência em série R_s , e duas malhas RC (R_{ts} e C_{ts} , R_{tl} e C_{tl}) (Figura 2.7(b)), que modelam a tensão em circuito aberto para um determinado estado de carga, a resistência interna e a resposta transitória curta e longa da bateria, respectivamente. Essas informações combinadas, modelam a característica $I-V$, tão importante para a estimação de carga e vida útil das baterias (SUN; SHU, 2011). Essa é a modelagem mais completa de baterias, seus parâmetros dependem de diversos fatores, como estado de carga, corrente, temperatura e ciclos de vida da bateria.

Figura 2.7 – Circuito do modelo capaz de prever o tempo de duração de carga e característica I-V.



Fonte: Adaptado de (SUN; SHU, 2011).

3 SISTEMA DE GESTÃO DE BATERIAS

O Sistema de Gestão de Baterias (BMS- *Battery Management System*) tem como principal objetivo garantir a utilização ótima da energia existente em células de bateria e reduzir os riscos de danos que possam ocorrer às mesmas. Para isso, são realizadas medições, monitoramento e controle do processo de carga e descarga das baterias (CHENG et al., 2011). Mais especificamente, suas funções são:

- Gestão de Baterias: implementação de funções que garantem a utilização ótima da bateria;
- Gestão de Potência: execução de funções que garantem a distribuição adequada de energia através do sistema e o consumo mínimo de energia em cada parte dele;
- Gestão de Energia: envolve a implementação de funções que garantem a eficiência no processo de conversão de energia no sistema, envolve também o armazenamento de energia do sistema.

Em algumas situações, mais de uma função podem ser utilizadas simultaneamente.

Interno as funções, o BMS realiza ações que garantem o bom funcionamento do conjunto de baterias. Estas ações dependem diretamente do tipo de aplicação do mesmo (CHENG et al., 2011). As principais são apresentados a seguir.

- Balanceamento das células de bateria, para que não haja desequilíbrio entre as mesmas;
- Controle e monitoramento do processo de carga e descarga da bateria para que não exista sobrecarga ou descarga excessiva;
- Controle de temperatura para que a bateria não atinja temperaturas nocivas;
- Medição de parâmetros importantes da bateria, como por exemplo, corrente e tensão em cada célula.
- Estimação do Estado de Carga (SoC - *State of Charge*) e Estimação de Estado de Vida (SoH - *State of Health*).

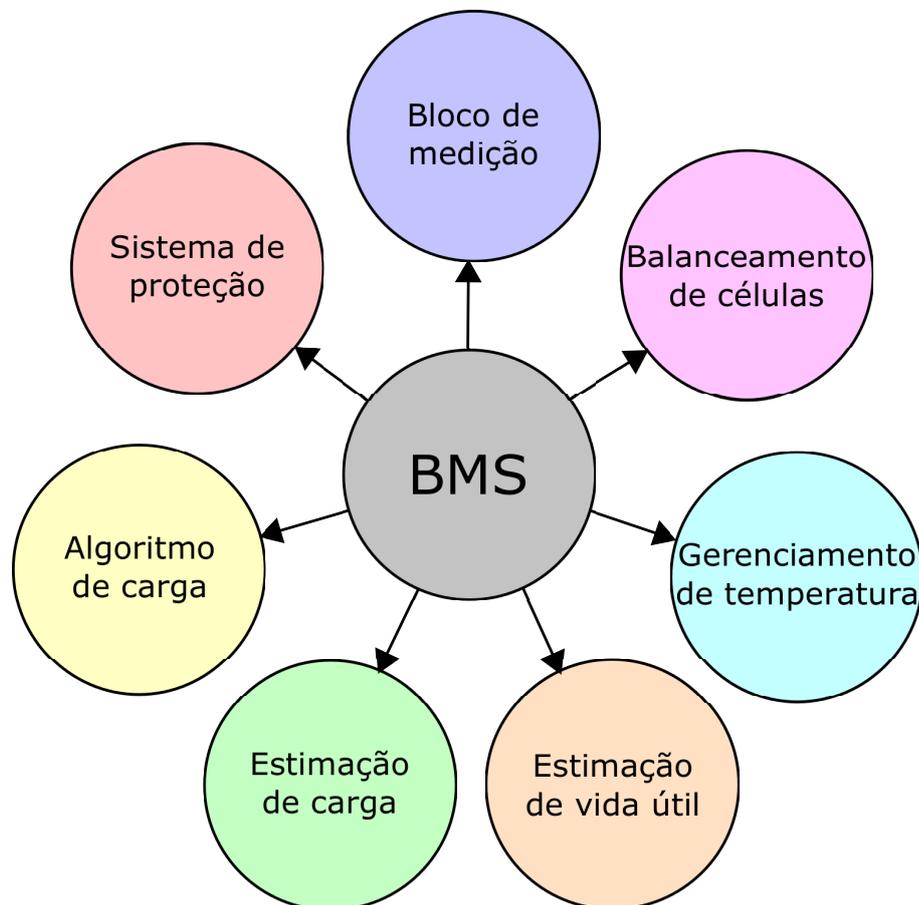
Diante dessas informações, o presente capítulo tem como objetivo detalhar as funções do BMS, sua estrutura e sua importância em sistemas de alto rendimento.

3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA

A complexidade e sofisticação do BMS dependem da abrangência, precisão e quantidade de funções e, em geral, quanto mais funções este possuir, melhor será o funcionamento da bateria ou banco de baterias e maior será a vida útil. Alguns tipos de baterias necessitam de mais cuidado e por isso mais funções devem ser empregadas, bem como algumas aplicações podem exigir alta precisão e eficiência por parte das baterias.

A estrutura de um BMS genérico é apresentada na Figura 3.1. São apresentadas características que podem ou não estarem presentes em sistemas comerciais ou desenvolvidos para aplicações específicas.

Figura 3.1 – Características de um BMS.



Fonte: Própria autora

3.1.1 Bloco de Medição

A principal função do bloco de medição é medir parâmetros importantes das baterias, como as tensão das células individuais, a corrente e a temperatura do banco de baterias em di-

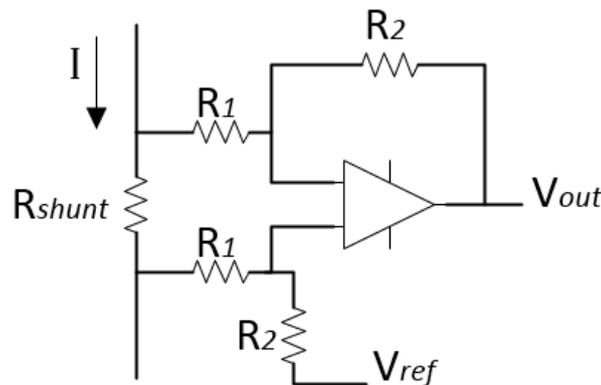
ferentes pontos. O bloco também é responsável por medir a temperatura ambiente e converter estes valores em valores digitais. Estes dados são utilizados para realizar o controle e proteção do sistema (CHENG et al., 2011). Existem diferentes formas de realizar cada medição, as principais serão apresentadas a seguir.

3.1.1.1 Técnicas de medição de corrente

Medições de corrente são comumente realizadas através de uma resistência *shunt* ou utilizando sensores de efeito *Hall* (INFINEON INC, 2009).

A medição realizada através da resistência *shunt* consiste em medir a queda de tensão em uma resistência adicionada ao circuito. Essa resistência é normalmente de baixo valor para que não haja perdas por condução. Conhecidos os valores da tensão e da resistência é possível determinar o valor da corrente. Usualmente, o fato do valor da resistência *shunt* ser baixo, a tensão medida também é baixa e para que não haja erros de medição ou medição de ruído é comum usar um circuito amplificador para obter níveis de tensão adequados (Figura 3.2), que são posteriormente amostrados através de um conversor analógico-digital (ADC - *Analog to Digital Converter*) (INFINEON INC, 2009).

Figura 3.2 – Circuito amplificador diferencial para medição de corrente por resistência *shunt*.



Fonte: Própria autora)

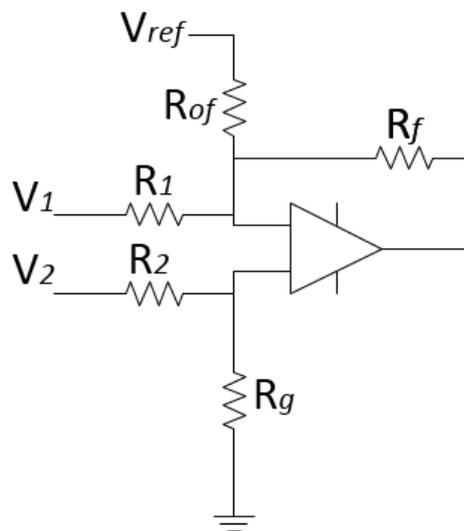
O sensor de efeito *Hall* permite a medição de correntes numa vasta gama de valores e apresenta perdas elétricas reduzidas, isto faz com que a medição seja mais precisa e consequentemente todo o sistema apresente um melhor desempenho, pois evita perdas desnecessárias (ERSHAG, 2008). O sensor *Hall* utiliza o fenômeno de efeito de mesmo nome para efetuar a medição de corrente, através de uma relação entre a corrente imposta na entrada e a grandeza que o sensor converte na saída. A saída pode ser apresentada em tensão ou em corrente, quando

em corrente, se faz necessário o uso de uma resistência para medir a queda de tensão provocada pela corrente de saída (INFINEON INC, 2009). Dentre as desvantagens deste sensor, pode-se citar o custo elevado e limitada resposta em alta frequência.

3.1.1.2 Técnicas de medição de tensão nas células

Em geral, os bancos de baterias as células são formados por baterias conectadas em série, desta forma há uma dificuldade na medição de tensão em cada célula. O principal método de medição de tensão das células utiliza amplificadores diferenciais (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Circuito de um amplificador diferencial para medição de tensão em células.



Fonte: Própria autora

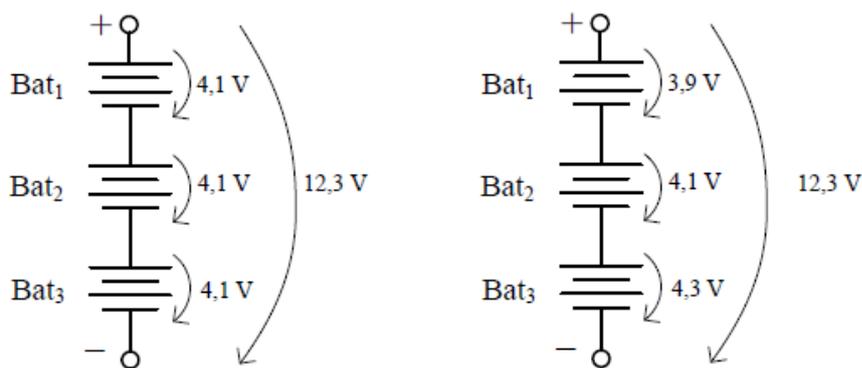
3.1.1.3 Técnicas de medição de temperatura

A temperatura influencia diretamente no comportamento da bateria. Seus parâmetros mais importantes, tais como tensão, resistência interna e SoC estão fortemente atrelados a temperatura, assim como o bom funcionamento, o tempo de vida útil e a segurança na operação. Portanto, faz-se necessário a medição e o monitoramento da temperatura (LI; ZHU, 2014). A solução usual é a utilização de termistores. Os termistores são semicondutores cuja resistência varia com a temperatura. A resistência pode aumentar com o aumento da temperatura, neste caso os termistores são denominados PTC (*Positive Temperature Coefficient* – Coeficiente de Temperatura Positivo) e caso diminua, são denominados NTC (*Negative Temperature Coefficient* – Coeficiente de Temperatura Negativo) (DUARTE, 2013).

3.1.2 Equalização das Baterias

Muitas aplicações que envolvem baterias utilizam bancos de baterias. Bancos de baterias são formados por associação de baterias em série, para aumentar a tensão nos terminais e/ou em paralelo, para aumentar a capacidade de corrente. Contudo, as baterias podem apresentar variações nas resistências internas e na capacidade, fazendo com que a tensão também apresente desequilíbrio. Este desequilíbrio pode ser nocivo ao funcionamento das baterias, bem como a vida útil (MOO et al., 2003). A variação de tensão pode muitas vezes não ser percebida no arranjo em série, fazendo com que a medição dos terminais do banco de baterias não apresente o desequilíbrio. Porém, quando verificada a tensão em cada bateria percebe-se que a tensão não está distribuída corretamente entre as mesmas, como na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Desequilíbrio na tensão das células.



Fonte: Própria autora

Durante o carregamento do banco de baterias pode haver a sobrecarga de uma ou mais células. A sobrecarga é uma situação que gera muitos danos a bateria, podendo até mesmo levar a uma explosão (CAO et al., 2008). Já no processo de descarga, uma ou mais células podem ficar abaixo da carga mínima recomendada, implicando em redução de vida útil. Algumas baterias são mais tolerantes a sobrecargas como é o caso da bateria de Chumbo-Ácido ou possuem mecanismos específicos de proteção. Já as tecnologias mais recentes são mais sensíveis, como as baterias de Íons de Lítio, utilizadas neste trabalho.

Para solucionar este problema, desenvolveu-se técnicas de equalização das cargas de baterias e vários métodos são propostos na literatura. Esses métodos podem ser divididos em duas categorias: dissipativas e não-dissipativas (BENTLEY, 1997).

Os métodos dissipativos tentam igualar as células extraíndo energia das cargas mais altas e dissipando-as através de elementos resistivos até se igualar a bateria de menor tensão. Em geral essa técnica é bastante rápida porém possui a desvantagem de consumir muita energia das ba-

terias carregadas (BENTLEY, 1997). Já nos métodos não-dissipativos, a energia sobressalente de uma bateria é transmitida para outra com menor energia, até que ambas fiquem com mesma tensão. Desta forma há menos desperdício de energia, fazendo com que esses métodos sejam mais eficientes energeticamente (BENTLEY, 1997). Há vários métodos não-dissipativos na literatura, como transformadores de múltiplas saídas, sistemas de equalização de carga, como o conversor distribuído e sistemas de equalização bidirecional, como capacitor comutado ou circuito indutor (SPELTINO et al., 2010).

3.1.3 Algoritmos de carregamento

A taxa de descarga da bateria é normalmente pré-determinada pela aplicação da mesma, já o carregamento deve levar em conta principalmente o tempo de operação e, quanto menor for esse tempo, maior será a eficiência do carregador. Por outro lado deve-se observar que diferentes tipos de baterias suportam diferentes taxas de carregamento, principalmente por conta da estrutura química. Essas limitações devem ser consideradas no aparelho de carregamento e o BMS precisa gerenciar, otimizar e proteger o regime de carregamento quando um carregador específico não estiver disponível (RAHIMI-EICHI et al., 2013). Os processos de carga devem ser precisos e cuidadosos pois o mau funcionamento do mesmo pode causar perda no desempenho da baterias, vazamentos ou, na pior das hipóteses, explosão e incêndio (ROOT, 2010).

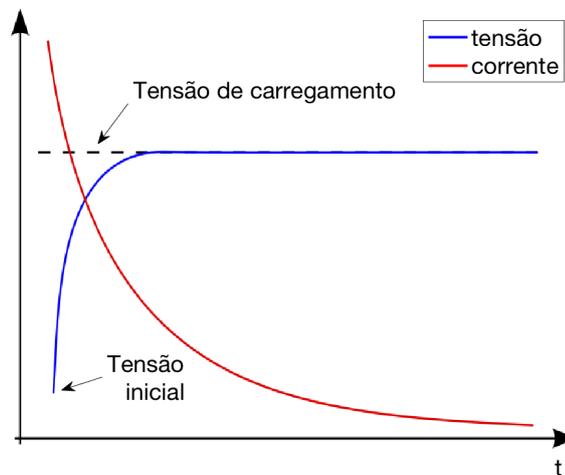
Existem diferentes algoritmos de carregamento para diferentes baterias. Dentre os existentes, os mais comuns são: Tensão Constante (CV – *Constant Voltage*), Corrente Constante (CC– *Constant Current*) e Corrente Constante seguido de Tensão Constante (CC/CV) (ROOT, 2010).

3.1.3.1 Carregamento utilizando tensão constante

Este método consiste em determinar uma tensão constante para carregar a bateria. O valor escolhido deve ser suficientemente alto para que a carga aconteça o mais rápido possível, porém obedecendo os níveis de tolerância para reduzir ou mesmo evitar reações indesejadas, como o aquecimento.

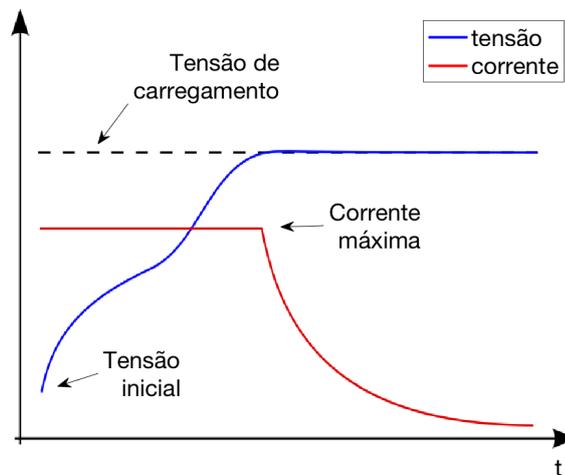
A corrente aplicada à bateria varia com o tempo. No início da carga a corrente possui valores altos, que precisam ser limitados, mas com o tempo os valores se aproximam de zero, indicando o fim do processo (Figura 3.5). A limitação da corrente é feita principalmente pela fonte de alimentação do carregador, o valor deve minimizar os efeitos nocivos mas deve permitir que a bateria seja carregada em um tempo razoável (Figura 3.6) (ROOT, 2010). Este método é aplicado principalmente em baterias de chumbo-ácido.

Figura 3.5 – Carregamento de bateria com tensão constante



Fonte: Própria Autora

Figura 3.6 – Carregamento de bateria com tensão constante e limitação de corrente

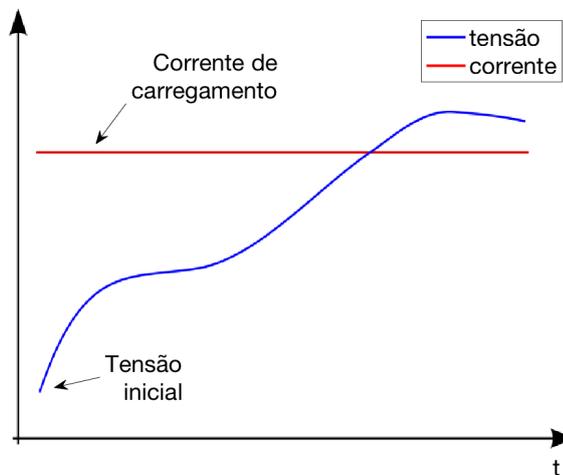


Fonte: Própria Autora

3.1.3.2 Carregamento utilizando corrente constante

Neste método é aplicado uma corrente constante à bateria. A Figura 3.7 apresenta o processo. Normalmente esta corrente tem um valor baixo para evitar reações parasitas e aquecimento excessivo, porém isto faz com que o carregamento seja bastante lento. Essa técnica de carregamento é pouco utilizada em baterias de íons de lítio, pois a mesma não suporta sobrecarga (ROOT, 2010).

Figura 3.7 – Carregamento de bateria com corrente constante

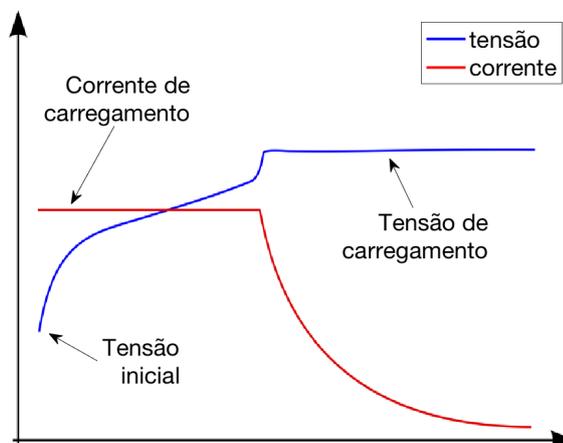


Fonte: Própria Autora

3.1.3.3 Carregamento utilizando corrente constante seguida de tensão constante

Este é um método de carga rápida de dois estágios, frequentemente usado para carregar baterias de íons de lítio (BERGVELD, 2001). O carregador CC/CV aplica uma determinada corrente de carga máxima (esse valor é de $0,5C$ para a maioria das baterias de Li-ion). Carregue-se a bateria até que esta atinja 80% da carga total. Na segunda etapa, quando a tensão atinge seu valor máximo o carregador passa a usar tensão constante, o valor máximo de tensão recomendado. Nesse estágio, a corrente diminui à medida que a bateria é carregada, até atingir um valor mínimo definido (ROOT, 2010). O método é apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Carregamento de bateria com Corrente Constante seguido de Tensão Constante



Fonte: Própria Autora

3.1.4 Gerenciamento de temperatura

O fluxo de corrente através de um condutor gera calor, isso é conhecido como o efeito Joule (RECHARGE INC, 2013). Porém, como já citado, as baterias de Li-ion sofrem alterações em seu comportamento devido a temperaturas que estejam fora da faixa limite, comumente entre 20°C e 40°C (LI; ZHU, 2014). Temperaturas mais altas degradam a bateria mais rapidamente, diminuindo a vida útil, enquanto as baixas temperaturas reduzem a capacidade de potência e energia. Desta forma, é de extrema importância um sistema que gerencie a temperatura das células e do banco de bateria (PESARAN et al., 2013).

Conhecido na literatura como Sistemas de Gerenciamento Térmico de Bateria (BTMS - *Battery Thermal Management Systems*), as principais funções destes sistemas são: manter as células operando na faixa de temperatura desejada, minimizar as variações de temperatura de uma célula em relação à outra, maximizar a energia útil das células e do banco de baterias e fazer com que menos energia seja usada para cada operação (PESARAN et al., 2013).

O BTMS deve possuir quatro funções essenciais para garantir as condições corretas de operação da bateria (PESARAN et al., 2013):

- Resfriamento: devido ao próprio funcionamento a célula de bateria gera calor, para que a temperatura não atinja níveis nocivos é necessário usar técnicas de resfriamento. Normalmente é acionado um aparelho de refrigeração, como um *cooler*.
- Aquecimento: mesmo a célula gerando calor, quando o banco de bateria está em um ambiente onde a temperatura é muito baixa é necessário que o mesmo seja aquecido;
- Isolamento: em climas de extremo frio ou calor é necessário que o banco de bateria tenha um isolamento para que a variação térmica não seja maior que a aceitável;
- Ventilação: é necessário eliminar gases nocivos de dentro do banco de bateria, essa função pode ser combinada com o resfriamento ou aquecimento em algumas técnicas.

3.1.5 Sistemas de proteção

Operações abusivas podem afetar a vida útil da bateria, porém em condições extremas podem interferir na segurança dos usuários. Nos últimos anos, um número expressivo de acidentes envolvendo baterias de Li-ion foram relatados. Milhões de baterias de *laptops* foram recolhidas devido a partículas de metal incorporadas às células durante o processo de fabricação, essas partículas podem penetrar no separador e causar curto-circuito. Também são conhecidos acidentes

envolvendo o veículo elétrico Tesla, onde as baterias causaram incêndios (WU et al., 2015). Acontecimentos como estes reforçam a necessidade de um sistema de segurança.

Sabe-se que o desempenho da segurança da bateria é afetado por vários fatores durante o funcionamento. As substâncias contidas na bateria podem apresentar riscos químicos. Em condições normais de operação a bateria não libera substâncias, porém em um caso de exposição acidental como ruptura do invólucro, perigos podem ser observados, já que os elementos químicos que compõem o eletrólito e os eletrodos podem ter características corrosivas e inflamáveis (RECHARGE INC, 2013).

As situações de operação abusiva são divididas em abuso térmico, abuso mecânico e abuso elétrico (WU et al., 2015). O abuso térmico foi apresentado na subseção 3.1.4 e o abuso mecânico não será abordado no presente trabalho.

Nestas condições, esta seção trata de abusos elétricos, especialmente sobretensão (OV - *overvoltage*) e subtensão (UV - *overdischarge*).

- *Sobretensão:*

Acontece a sobrecarga em uma célula de bateria quando a tensão da mesma ultrapassa o limite máximo (HLIM - *High Limit*). O valor limite é fornecido pelo fabricante e difere para cada tipo de bateria (WU et al., 2015). A sobrecarga normalmente está relacionada a uma alta taxa de corrente de carga aplicada por um tempo maior que o necessário sobre a bateria. Uma bateria que sofre uma extrema sobrecarga pode até mesmo explodir (HAQ et al., 2014). O sistema de proteção deve atuar sempre o que o processo de carga, descrito na seção 3.1.3 não acontecer corretamente.

- *Subtensão:*

Acontece a descarga excessiva em uma célula de bateria quando a tensão da mesma ultrapassa o limite mínimo (LLIM - *Low Limit*). Esse valor de limite também é fornecido pelo fabricante e também difere para cada tipo de bateria (WU et al., 2015). Análogo a sobrecarga, a *overdischarge* está relacionada a uma alta taxa de corrente de descarga aplicada por um tempo maior que o necessário. Porém, diferentemente da sobrecarga, uma descarga excessiva não tem risco de explosão, mas quando o processo ocorre repetidamente a vida útil da bateria é afetada, por esse motivo, o sistema de proteção deve atuar sempre que o processo de descarga não ocorrer de forma correta (HAQ et al., 2014).

Ainda pode-se citar conduções abusivas no processo de descarga das baterias. É necessário realizar proteções contra curto-circuito na descarga (SCD - *Short Circuit in Discharge*) e sobrecorrente na descarga (OCD - *Overcurrent in Discharge*). Em ambas as situações, por condições inadequadas, a corrente de descarga da bateria é extraída de forma inadequada.

3.2 ESTIMAÇÃO DO ESTADO DE CARGA

A estimação de estado de carga (SoC - *State of Charge*) é uma das funções principais de um BMS. Pode-se definir estado de carga como a porcentagem de carga máxima possível que está presente dentro de uma bateria recarregável (POP et al., 2008). Essa estimação depende de vários parâmetros, como Taxa-C, temperatura, eficiência de carga e descarga, entre outros. A correta estimação do SoC é fundamental para determinar o momento correto da recarga da bateria e assim aumentar a vida útil da mesma. Dentre as várias técnicas apresentadas na literatura, as mais utilizadas são: Medição Direta, Métodos de Contagem ou *Book-Keeping*, Sistemas Adaptativos e Métodos Híbridos (CHANG, 2013). Essas técnicas são descritas na sequência.

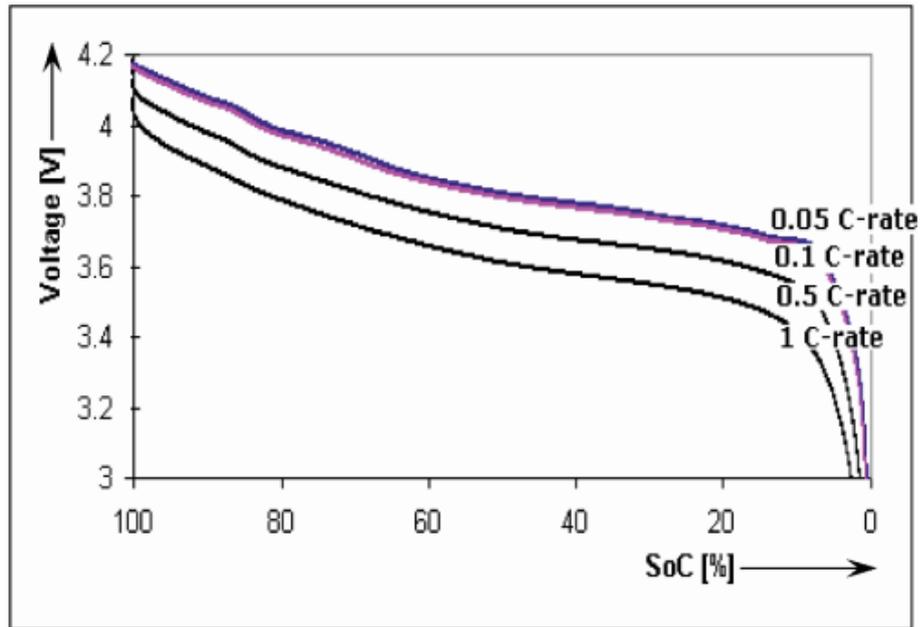
3.2.1 Medição Direta

Este método consiste em medir diretamente variáveis disponíveis na bateria como tensão (V), impedância (Z) e tempo de relaxação da tensão (τ), após a aplicação de um pulso de corrente. Normalmente as relações entre as variáveis da bateria e o SoC dependem da temperatura (T), então esse parâmetro também precisa ser medido. A principal vantagem dessa técnica é que o sistema de medição não precisa estar continuamente conectado à bateria e as medidas podem ser realizadas assim que a bateria for conectada ao sistema (POP et al., 2008). Dentro da técnica de medição direta existem diferentes abordagens:

3.2.1.1 Medição de Tensão de Circuito Aberto

Embora tenha sido uma das técnicas mais populares, a medição de tensão de circuito aberto (OCV - *Open Circuit Voltage*) não produz os resultados mais precisos, visto que determinar a energia restante em uma bateria medindo simplesmente sua tensão pode gerar resultados enganosos (POP et al., 2008). Mesmo que a tensão diminua durante o tempo, o nível de tensão em relação ao SoC varia muito com a temperatura e taxa de descarga. Este efeito pode ser observado na Figura 3.9. Ainda assim, o erro na estimação do SoC pode ser corrigido se a dependência entre a tensão da bateria e sua taxa de descarga for conhecida.

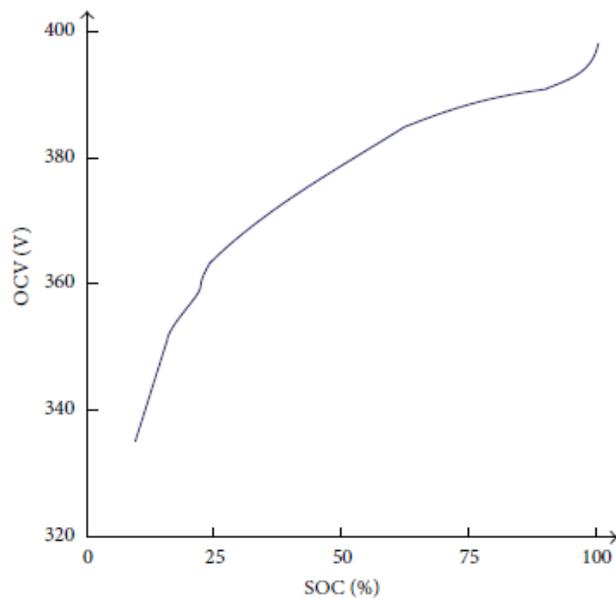
Figura 3.9 – Curvas SoC por OCV para diferentes taxas C em bateria de lítio à 25°C.



Fonte: (POP et al., 2008)

Para baterias de chumbo-ácido essa técnica ainda é bastante utilizada pois a relação da OCV com o SoC é aproximadamente linear e assim oferece melhores resultados. No caso de baterias de lítio esta relação não é linear (CHANG, 2013). A Figura 3.10 apresenta uma relação típica entre OCV e SoC para baterias de lítio.

Figura 3.10 – Relação típica entre SoC e OCV para banco de baterias de lítio



Fonte: (CHANG, 2013)

3.2.1.2 Medição de Tensão Terminal

Este método é também conhecido como Método EMF, o termo EMF refere-se a força eletromotriz, que é a força interna da bateria para fornecer energia a uma carga (POP et al., 2008).

O método de tensão terminal é baseado na queda desta tensão através da impedância interna da bateria quando a mesma é descarregada, assim a força eletromotriz é proporcional a tensão terminal. A relação entre EMF e SoC é aproximadamente linear e assim a relação da tensão terminal e SoC também é aproximadamente linear (CHANG, 2013). Este método tem sido aplicado para diferentes taxas de descarga e temperaturas e apresenta resultados satisfatórios. A desvantagem deste método é relacionada ao erro gerado quando a bateria está quase descarregada (CHANG, 2013).

3.2.1.3 Medição de Impedância

Assim como os outros métodos abordados, a medição de impedância consiste em obter uma relação entre o SoC e a impedância da bateria. A medição da impedância pode fornecer o conhecimento sobre muitos parâmetros e estes podem depender do SoC da bateria. Esse método também pode ser realizado através da medição da impedância através de uma larga banda de frequências para diferentes correntes de carga e descarga.

Este método oferece resultados satisfatórios mas depende de uma série de valores experimentais que devem ser realizados para cada bateria.

3.2.2 Métodos *Book-Keeping*

Estes métodos utilizam os dados de corrente de descarga como entrada. Nestes métodos é possível incluir algumas características internas da bateria, como auto-descarga, perda de capacidade e eficiência de descarga (CHANG, 2013). Dois métodos de contagem tem sido empregados: Contador de Coulomb ou, como conhecido na literatura, *Coulomb Counting* e o Método Modificado de *Coulomb Counting*.

3.2.2.1 *Coulomb Counting*

Este método mede a corrente de descarga ($I(t)$) da bateria e integra este valor em um período de tempo para fornecer uma estimativa de SoC. A Equação 3.1 apresenta o cálculo realizado para esta estimativa (CHANG, 2013).

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{I(t)}{Q_n} \Delta t \quad (3.1)$$

onde $SOC(t)$ é o SoC estimado, $SOC(0)$ é o valor inicial do SoC e Q_n representa a carga nominal da bateria.

A dificuldade em utilizar este método se dá principalmente ao fato de o valor inicial do SoC não estar disponível. Uma solução apresentada em (PURWADI et al., 2014) é a utilização de um método-adaptativo-modificado com *Coulomb Counting*.

Para que o método *Coulomb Counting* obtenha resultados precisos é necessário que a medição da corrente também seja a mais precisa possível (POP et al., 2008). Normalmente, os instrumentos de medição de corrente medem a tensão através de um resistor ligado em série ao sistema e converte a tensão em corrente, essa corrente é integrada para determinar o SoC. Desta forma, quanto mais preciso e cuidadoso for o processo de medição, melhor será o valor do SoC (POP et al., 2008).

3.2.2.2 *Coulomb Counting* Modificado

A fim de aprimorar o método *Coulomb Counting* é proposta a técnica do *Coulomb Counting* modificado. Este método utiliza uma corrente corrigida para melhorar a precisão da estimativa. A corrente corrigida é uma função da corrente de descarga, utiliza-se uma relação quadrática entre a corrente corrigida e a corrente de descarga da bateria (CHANG, 2013). A corrente corrigida é calculada através da Equação 3.2.

$$I_c(t) = k_2 I(t)^2 + k_1 I(t) + k_0 \quad (3.2)$$

onde k_2 , k_1 e k_0 são valores constantes obtidos através de dados experimentais.

No método modificado de *Coulomb Counting*, o SoC é calculado com base na Equação 3.3.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{I_c(t)}{Q_n} \Delta t \quad (3.3)$$

Os resultados experimentais apresentam um precisão superior no método modificado ao método convencional, porém o mesmo ainda apresenta a dificuldade de o SoC inicial não estar disponível e acrescenta o processo de obtenção dos parâmetros k_2 , k_1 e k_0 .

3.2.3 Sistemas Adaptativos

Com o desenvolvimento da inteligência artificial vários sistemas adaptativos vem sendo desenvolvidos (CHANG, 2013). Estes métodos propõem solucionar o principal problema na estimação do SoC: a imprevisibilidade do comportamento da bateria e do usuário (BERGVELD, 2001).

Dentre estes novos métodos pode-se citar as redes neurais, lógica Fuzzy, redes neurais Fuzzy e filtro de Kalman. Estas técnicas não são tratadas neste trabalho.

3.2.4 Métodos Híbridos

O objetivo de métodos híbridos é utilizar as vantagens de métodos diferentes em uma única aplicação e assim otimizar a performance de estimação de SoC. Uma vez que as informações disponíveis em um método são limitadas, métodos híbridos podem maximizar a disponibilidade de informações e assim garantir estimativas melhores. Exemplos de métodos híbridos são: combinação de *Coulomb Counting* e EMF; combinação de *Coulomb Counting* e Filtro de Kalman entre outros.

3.3 ESTIMAÇÃO DO ESTADO DE VIDA ÚTIL

O estado de vida útil (SoH - *State of Health*) pode ser definido como a capacidade de uma bateria de armazenar e fornecer energia em relação a sua capacidade inicial. O envelhecimento da bateria, devido a ciclos de carga e descarga e mudanças químicas, acaba afetando a sua performance, fazendo com que em determinado momento a bateria não efetue sua função de forma adequada e precise ser substituída (LE; TANG, 2011). Por isso, a estimação do SoH é de extrema importância, pois através desta o usuário saberá o momento de fazer a troca. O SoH de uma bateria de Li-Ion média é reduzido para 80% após 1000 ciclos de carga-descarga (CHENG et al., 2011).

Existem dois métodos comuns para calcular o SoH. O primeiro deles utiliza a medição da impedância para fazer a estimação e o segundo usa a capacidade para calcular a relação entre a capacidade atual e nominal da bateria, já que a capacidade é um dos parâmetros que envelhece junto com a mesma. Estes métodos permitem detectar células defeituosas em um banco de baterias e embora tenha havido muito progresso na estimação do SoH, os métodos são incertos e precisam de desenvolvimento (LE; TANG, 2011).

3.4 BMS'S COMERCIAIS

Para a implementação das funções de um BMS muitas empresas desenvolveram circuitos integrados (CI's) que são produzidos, em geral, para aplicações específicas e possuem funções que atendem estas aplicações. Atualmente, diversas empresas produzem diferentes famílias de circuitos para BMS's. Para aplicações em baterias é necessário observar o tipo de bateria em que o BMS pode ser empregado, a quantidade de células de baterias que o mesmo suporta, e quais funções estão disponíveis. Em geral, CI's para utilização em baterias possuem as funções básicas citadas (medição, gerenciamento de temperatura, balanceamento de células, proteção, algoritmos de carregamento e estimação de carga). Uma das funções apresentadas, a estimação de vida útil, não é uma função comum dos BMS's comerciais. Esta estimação é normalmente feita através de procedimentos de carga e descarga da bateria e ensaios eletroquímicos.

A Tabela 3.1 apresenta um levantamento realizado a fim de conhecer os principais BMS's comerciais e as funções que estes apresentam. Este levantamento também foi utilizado para a escolha do BMS utilizado neste trabalho.

Através desta comparação é possível determinar qual circuito será implementado neste trabalho.

Optou-se por utilizar o circuito BQ7693002DBT, da família de BMS's bq769x0, da empresa *Texas Instruments*. A escolha deste BMS se justifica pelo mesmo apresentar as funções principais desejadas à um CI de gerenciamento de baterias e principalmente pela possibilidade de adquiri-lo.

Tabela 3.1 – Comparação entre os principais BMS's comercializados.

CI - Fabricante	Bloco de medição	Balanceamento de células	Algoritmos de carregamento	Proteção	Estimação de SoC	Estimação de SoH
AD7280A - Analog Devices	✓	✓	✓	✓		
ATA6870 - Atmel	✓	✓	✓	✓		
ATA6871 - Atmel	✓	✓	✓	✓		
I0SL9208 - Intersil	✓	✓	✓	✓		
ISL9216/17 - Intersil	✓	✓	✓	✓		
MC33771 - Freescale	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MC33772 - Freescale	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LTC6801 - Linear Technology	✓	✓	✓	✓		
LTC6802 - Linear Technology	✓	✓	✓	✓		
DS2726 - Maxim	✓	✓	✓	✓		
MAX11068 - Maxim	✓	✓	✓	✓		
bq29330- Texas Instruments	✓	✓	✓	✓		
bq78PL11X- Texas Instruments	✓	✓	✓	✓	✓	
bq769x0- Texas Instruments	✓	✓	✓	✓	✓	

Fonte: Própria autora.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do circuito analógico implementado para realizar o gerenciamento de baterias de íons de lítio. Como já tratado no Capítulo 3, neste trabalho é utilizado um circuito integrado da empresa *Texas Instruments*. O circuito bq7693002DBT é responsável por realizar o balanceamento das células de baterias, fornecer proteção de sobrecorrente e curto-circuito no processo de descarga, proteger as baterias contra sobretensão e subtensão, além de fornecer medições de corrente, tensão e temperatura. Este circuito também é responsável por realizar a estimação de carga.

4.1 O BQ7693002DBT

O bq7693002DBT pertence a família bq769x0 da empresa *Texas Instruments*. Nesta família de CI's estão disponíveis circuitos que controlam de 3 à 5 células de baterias (bq76920), de 6 à 10 células (bq76930) e de 11 à 15 células (bq76940). Este circuito integrado é utilizado para aplicações com baterias de lítio-íon e lítio-fosfato ligadas em série.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de pinos do circuito integrado utilizado neste trabalho e a Tabela 4.1 apresenta a descrição de cada pino.

A Figura 4.4 apresenta o diagrama de blocos funcional do bq76930. Este diagrama ilustra o funcionamento interno do circuito integrado e como cada elemento influencia no sistema.

A família bq769x0 é classificada como um dispositivo analógico de extremidade frontal (AFE- *Analog Front-End*). Dispositivos AFE são formados por um conjunto de circuitos de condicionamento do sinal analógico utilizando amplificadores analógicos sensíveis, filtros e circuitos integrados para fornecer um bloco eletrônico funcional, configurável e flexível que possa interagir com diferentes sensores, conversores analógico-digital e se necessário, com microcontroladores.

Dentre suas características de monitoramento AFE, o bq76930 possui uma interface puramente digital, um conversor analógico-digital interno responsável pela medição das tensões das células, da temperatura de junção do próprio circuito, conhecida na literatura como *Die Temperature* e temperaturas externas. Para realizar a estimação de carga a partir do método *Coulomb Counter* está disponível um conversor analógico-digital extra. Além disso, o bq76930 possui proteções de *hardware*. Estão disponíveis proteções de sobrecorrente e curto-circuito na descarga, sobretensão e subtensão ou descarga excessiva.

Tabela 4.1 – Descrição dos pinos do bq76930

Número	Nome	Tipo	Descrição
1	DSG	O	Acionamento do FET de descarga
2	CHG	O	Acionamento do FET de carga
3	VSS	-	Aterramento do chip
4	SDA	I/O	Sinal de dados da comunicação I2C
5	SCL	I	Sinal de <i>clock</i> da comunicação I2C
6	TS1	I	Terminal positivo do termistor n°1
7	CAP1	O	Capacitor aterrado
8	REGOUT	P	Saída LDO
9	REGSRC	I	Entrada da fonte para saída LDO
10	VC5x	P	Terminal negativo do termistor n°2
11	NC	-	Não conectado (curto para CAP2)
12	NC	-	Não conectado (curto para CAP2)
13	TS2	I	Terminal positivo do termistor n°2
14	CAP2	O	Capacitor para VC5x
15	BAT	P	Terminal para maior tensão das baterias
16	VC10	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°10
17	VC9	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°9
18	VC8	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°8
19	VC7	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°7
20	VC6	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°6
21	VC5B	I	Medida de tensão do terminal negativo da célula n°6
22	VC5	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°5
23	VC4	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°4
24	VC3	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°3
25	VC2	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°2
26	VC1	I	Medida de tensão do terminal positivo da célula n°1
27	VC0	I	Medida de tensão do terminal negativo da célula n°1
28	SRP	I	Medição de corrente negativa
29	SRN	I	Medição de corrente positiva
30	ALERT	I/O	Saída de alerta e substituição da entrada

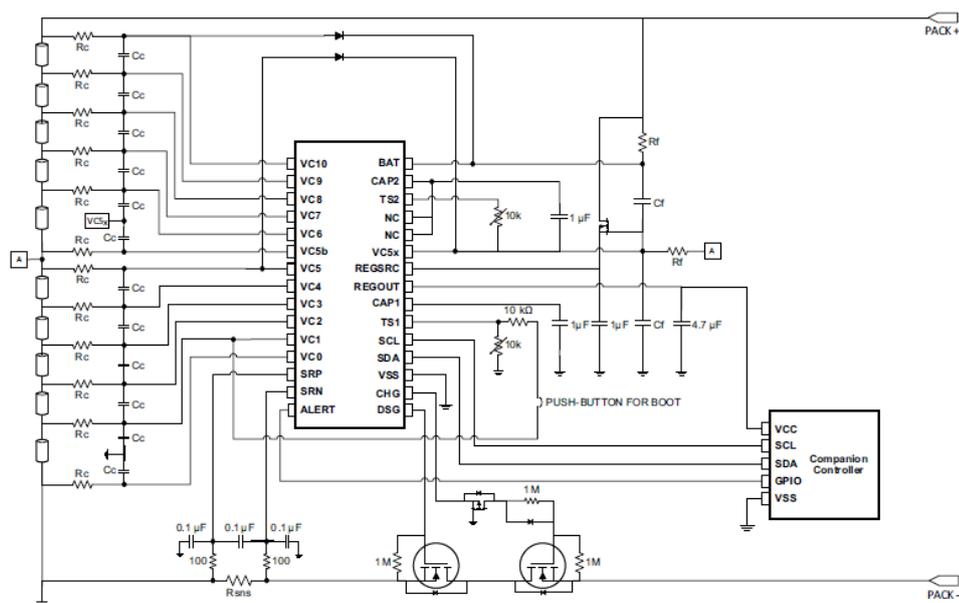
Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

Como características adicionais, o bq76930 fornece transistores de efeito de campo metal-óxido semicondutores (MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) integrados para o balanceamento das células, acionamento de MOSFET's para carga e descarga, sinal de alerta para interrupção do microcontrolador e regulador de tensão de saída de 2,5V ou 3,3V. Este circuito integrado não requer programação de memória não-volátil EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Ready-Only Memory*) e possui interface compatível com a comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*)

Dentre as aplicações sugeridas pelo fornecedor pode-se citar: veículos elétricos leves como bicicletas elétricas e *scooters* elétricas, ferramentas, sistemas de fonte de alimentação ininterruptas (UPS- *Uninterruptible Power Supply*) e bancos de bateria de 12V, 18V, 24V, 36V e 48V.

A Figura 4.3 apresenta um esquemático simplificado de circuito utilizando o bq76930.

Figura 4.3 – Circuito simplificado utilizando bq76930

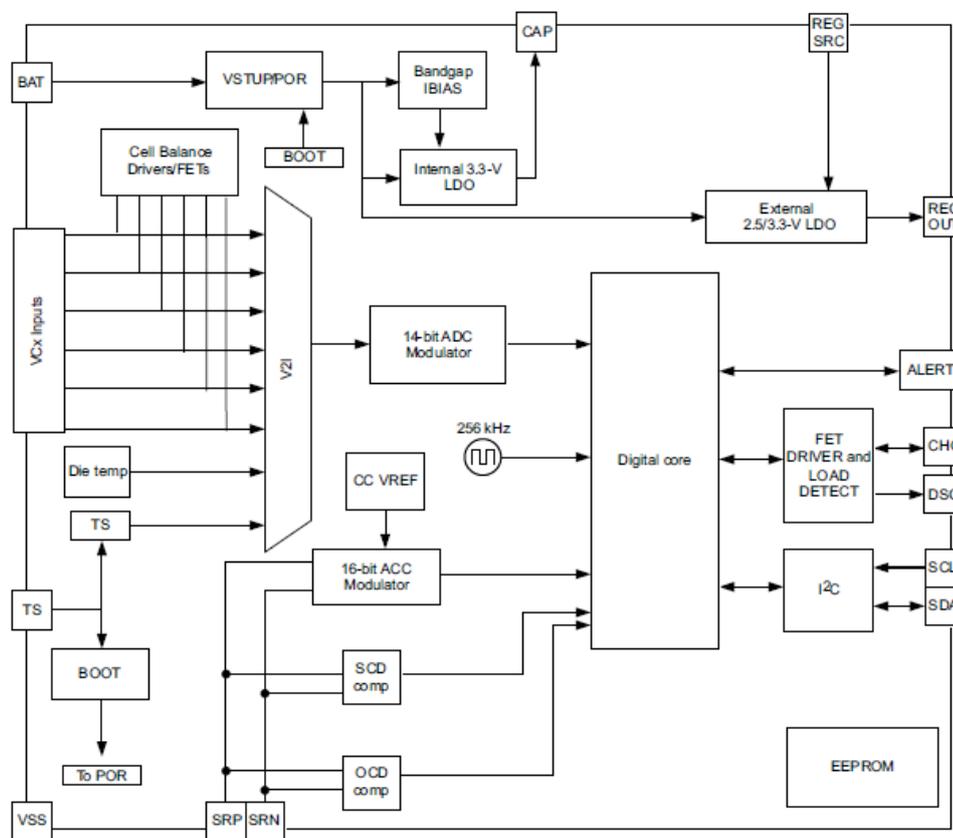


Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016)

A Figura 4.4 apresenta o diagrama de blocos funcional do bq76930. Este diagrama ilustra o funcionamento interno do circuito integrado e como cada elemento influencia no sistema.

O família bq769x0 possui três principais subsistemas: medição, proteção e controle. Estes subsistemas trabalham juntos para garantir que os parâmetros fundamentais do banco de baterias (tensão, corrente e temperatura) sejam medidos com precisão e estejam disponíveis de forma simples para um controlador *host* enquanto garantem que uma proteção em *hardware* seja atuada sempre que o controlador não estiver disponível. O bq769x0 requer o uso de um microcontrolador para realizar a leitura e escrita dos registradores que controlam o sistema e neste trabalho optou-se pelo ATmega2560 incorporado a um Arduino® Mega2560.

Figura 4.4 – Diagrama de blocos funcional do bq769x0



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016)

O subsistema de medição é responsável pela conversão digital da tensão de cada célula, da corrente do banco de baterias e da temperatura externa do sistema e temperatura de junção do CI. Também é fornecido a tensão do banco de baterias.

No caso de perda de comunicação com o microcontrolador, o subsistema de proteção fornece um nível secundário de *hardware* de proteção. Estas proteções incluem sobretensão, subtensão, sobre corrente ou curto-circuito na descarga e quando detectadas acionam o pino ALERT e automaticamente desabilitam os pinos DSG e CHG que são responsáveis por permitir que uma carga consuma energia das baterias. Sempre que uma proteção for acionada é necessário que o microcontrolador recupere a operação do sistema através de um algoritmo.

O controle é o subsistema responsável por implementar funções de grande utilidade do CI como, por exemplo, o acionamento do balanceamento de células, o acionamento dos MOSFET's de carga e descarga, a saída digital do pino ALERT e outros.

Estes subsistemas são descritos de forma mais detalhada na sequência.

4.1.1 Medição

Para garantir que as tensões de todas as células, as temperaturas e a corrente do banco de baterias estejam disponíveis facilmente para o microcontrolador este circuito possui dois conversores analógico-digital. A transferência de dados do bq7693003 para o Arduino é realizada através da comunicação I2C, utilizando simples comandos de leitura ou escrita nos registradores apropriados.

4.1.1.1 ADC 14 bits

Para medir a tensão de cada célula e as temperaturas do sistema é utilizado um ADC de 14 bits. Este ADC mede todas as tensões diferenciais das células e armazena o valor em registradores.

Este valor de tensão é armazenado em dois registradores, denominados VC_x_LO e VC_x_HI, onde x é o número da célula. Cada registrador armazena apenas 8 bits e por isso são necessários dois. O primeiro registrador é o denominado HIGH e recebe os 6 bits mais significativos, o segundo registrador é denominado LOW e recebe os 8 bits menos significativos. É necessário realizar a leitura de ambos os registradores na mesma transação.

Para realizar a medição de temperatura do sistema o bq7693002 disponibiliza dois pinos para conexão de termistores do tipo NTC de 10kΩ. O primeiro termistor é conectado entre os pinos TS1 e VSS e o segundo é conectado entre TS2 e VC5x. Esses termistores podem ser

posicionados em várias áreas do sistema. Pode-se medir, por exemplo, a temperatura de uma célula específica ou o aquecimento dos MOSFET's.

O ADC mede a tensão no termistor através de um resistor *pull-up* interno de $10k\Omega$ conectado a um regulador de tensão interno com valor nominal de 3,3V.

A medição da temperatura de junção do bq7693002 é realizada pelo bloco interno *Die Temperature Block* que gera uma tensão proporcional a esta temperatura. Quando a medição da temperatura de junção é ativada, o valor medido é armazenado nos registradores TS1_LO e TS1_HI, substituindo assim a medição de temperatura deste termistor. Em ambos os casos, uma nova medição é realizada a cada 2s.

Este ADC fornece estas medições em uma escala de 0-6,275V. Quando não há balanceamento de células é fornecida uma nova medição a cada 250ms e no caso de balanceamento este tempo é reduzido para a metade. É necessário habilitar, por meio do microcontrolador, este ADC.

4.1.1.2 ADC 16 bits

O segundo ADC possui 16 bits e é responsável pela medição de corrente e tensão do banco de baterias.

A medição de corrente é realizada através da queda de tensão em um resistor *shunt* conectado entre os pinos SRP e SRN. Este conversor é chamado de CC, referência ao método de estimação de carga utilizado neste BMS, o *Coulomb Counter*. O CC fornece a medição da carga acumulada no resistor (R_{SENSE}) em um período de integração de 250ms. É possível configurar o modo de operação do conversor: o modo ALWAYS ON fornece uma nova leitura a cada 250ms enquanto o modo 1-SHOT fornece apenas uma leitura. Neste trabalho opta-se pelo modo ALWAYS ON.

A medição da tensão do banco de baterias é realizada através do somatório das tensões das células que compõem o banco. Uma nova leitura é fornecida a cada 250ms.

4.1.2 Proteções

Um *hardware* integrado de proteção fornece uma segurança extra e complementa o conjunto de proteções padrão a serem incorporados pelo microcontrolador. Estas proteções não devem ser utilizadas como único recurso para proteger as baterias mas são úteis para fins de análise de modos de falhas e riscos (FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*) no caso do microcontrolador não conseguir reagir as situações que exigem proteção.

Todos os valores limites e o tempo de atuação da proteção de *hardware* devem ser definidos pelo microcontrolador durante a inicialização do sistema. Ainda assim, o AFE possui uma configuração destes parâmetros pré-definida, para o caso do microcontrolador não receber as configurações de proteção.

Neste dispositivo é possível configurar os parâmetros de proteção para quatro situações de risco: sobrecorrente na descarga (OCD - *Overcurrent in Discharge*), curto-circuito na descarga (SCD - *Short Circuit in Discharge*), sobretensão (OV - *Overvoltage*) e subtensão (UV - *Undervoltage*).

Para as proteções de OCD e SCD são utilizados comparadores analógicos amostrados de 32kHz que monitoram continuamente a tensão sobre R_{SENSE} , quando o sistema opera no modo NORMAL. Após detectar uma tensão que excede os valores limites de OCD e SCD, o contador começa a contagem do tempo de atuação programado. No caso de ambos os valores serem ultrapassados, o registrador SYS_STAT, responsável por monitorar o estado do sistema, recebe a indicação de falha e assim desabilita a descarga das baterias.

As proteções de OV e UV também possuem parâmetros de valores limites e de tempo de atuação que devem ser configurados. O monitoramento é realizado através da comparação entre as tensões das células e o valor limite definido e quando as condições de tensão e tempo forem excedidas, o registrador SYS_STAT também recebe uma indicação de falha e desabilita a carga ou descarga das baterias.

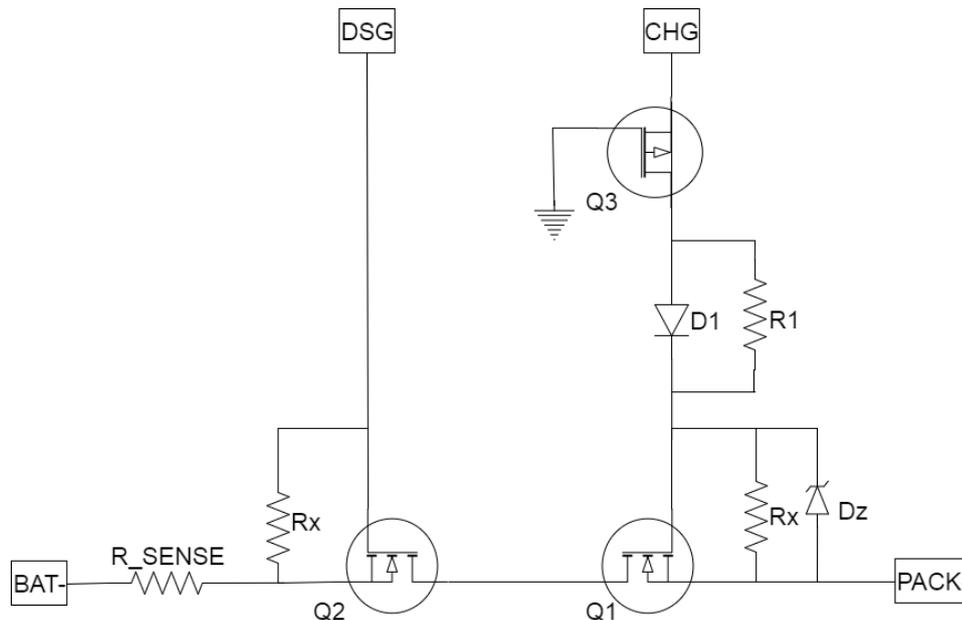
4.1.3 Controle

O dispositivo bq769x0 é responsável por comparar os parâmetros medidos com os parâmetros definidos no microcontrolador e efetuar ações que estabilizam ou otimizam a transferência de energia do banco de baterias para uma carga.

4.1.3.1 Acionamento dos MOSFET's

Cada dispositivo bq769x0 fornece dois pinos para acionamento de MOSFET's. Estes pinos são nomeados de CHG e DSG e podem controlar a polarização de MOSFET's do tipo canal N (NCH- *N Channel*), fornecendo até 16V. A Figura 4.5 apresenta esses transistores e como eles são implementados no sistema.

Figura 4.5 – Circuito de carga e descarga



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016)

O transistor Q_3 é responsável por garantir que o pino CHG não receba tensão negativa no caso de uma conexão invertida do dispositivo de carregamento. O diodo D_1 fornece um caminho para rápida polarização do transistor Q_1 no caso de corrente suficientemente alta, enquanto o resistor R_1 limita a corrente no pino CHG.

Os resistores R_x garantem que os transistores Q_1 e Q_2 não sejam acionados indevidamente e o diodo zener D_z é utilizado para limitar a tensão de acionamento de Q_1 , este componente é opcional. R_{SENSE} é um resistor *shunt* onde é medida a corrente de carga ou descarga do banco de baterias.

A descarga do banco de baterias só acontece quando o pino DSG fornece tensão suficiente para polarizar Q_2 . Nesta condição, a corrente de descarga flui pelo canal de Q_2 e pelo diodo intrínseco de Q_1 .

A carga do banco de baterias acontece de forma semelhante: é necessário que a tensão fornecida pelo pino CHG seja suficiente para polarizar o transistor Q_1 , e nesta condição, a corrente de descarga flui através canal deste e do diodo intrínseco de Q_2 .

Porém, o processo de carga ou descarga só ocorre se as proteções de tensão e corrente das baterias não estiverem acionadas. A Tabela 4.2 apresenta o estado dos pinos CHG e DSG quando uma proteção é atuada. Entende-se que quando o pino está habilitado seu estado é alto, ou 1, e quando o mesmo está desabilitado, seu estado é baixo, ou 0. Não existe condição em que o dispositivo bq769x0 habilite automaticamente CHG e DSG.

Tabela 4.2 – Estados de CHG e DSG em resposta a eventos de proteções.

Proteção	CHG	DSG
OV	0	1
UV	1	0
SCD	1	0
OCD	1	0
ALERT	0	0

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

4.1.3.2 Detecção de Carga

Um circuito de detecção de carga está presente interno ao pino CHG e é ativado sempre que o transistor Q1 está desativado (CHG=0). Este circuito detecta se o pino CHG é externamente puxado para alto quando o resistor deveria oferecer um caminho de alta impedância, aproximadamente $1M\Omega$, e manter o valor de CHG em VSS. Este circuito também é útil para determinar o valor de PACK- (que não é um pino do dispositivo) está sendo mantido em alta tensão, isso pode ocorrer quando a carga permanece conectada enquanto os FET's estão desativados.

A informação de carga detectada pode ser lida no bit LOAD_PRESENT do registrador SYS_STAT.

Sempre uma falha de OCD e SCD ocorrer, o pino DSG é desabilitado, como visto anteriormente. Para que o circuito de detecção de carga seja ativado é necessário também desabilitar o pino CHG.

É recomendado realizar a leitura do bit LOAD_PRESENT periodicamente.

4.1.3.3 Balanceamento de Células

O bq7693002DBT fornece o acionamento de um circuito externo que realiza o balanceamento das células. A decisão e os critérios para realizar o balanceamento de uma célula são definidos pelo microcontrolador através de um algoritmo. Quando definido qual célula precisa de balanceamento, o microcontrolador deve setar o bit correspondente desta célula nos registradores CELLBAL1 e CELLBAL2. Cada registrador contém 5 células.

Múltiplas células podem ser balanceadas, porém células adjacentes não devem ser balanceadas simultaneamente.

O método de balanceamento utilizado nos dispositivos bq769x0 é o método dissipativo, que consiste em extrair a energia das células mais carregadas e dissipá-la em um resistor até que as cargas se igualem a célula menos carregada.

Quando o comando de balanceamento é enviado ao registrador, o bq7693002DBT impõe tensão de aproximadamente 0V no pino correspondente a célula e assim ativa o balanceamento. Para realizar o balanceamento são utilizados transistores do tipo canal-P.

4.1.3.4 Alerta

O pino ALERT serve como um sinal digital de interrupção e é conectado em um pino de aplicação geral do tipo entrada/saída do microcontrolador. Este sinal é resultado de uma operação booleana OU com o registrador SYS_STAT, isso significa que quando qualquer bit deste registrador estiver em 1, o alarme será acionado. A ação tomada a partir da atuação do alarme é definida pelo microcontrolador, sua principal função é indicar que alguma falha está ocorrendo. Após a falha ser tratada e os bits do registrador SYS_STAT voltarem a zero, o alarme é desabilitado.

4.1.3.5 Saída de Tensão Regulada

Um regulador de tensão de saída ajustável (LDO - *Low Drop-Out*) está disponível na família ba769x0 para facilitar a alimentação de componentes adicionais do sistema, como o microcontrolador ou LEDs. O LDO recebe uma configuração de fábrica que define seu valor em 2,5V ou 3,3V. No caso do CI usado neste trabalho, o valor configurado é de 3,3V e por isso pode ser usado para alimentar o Arduino.

4.2 COMUNICAÇÃO I2C

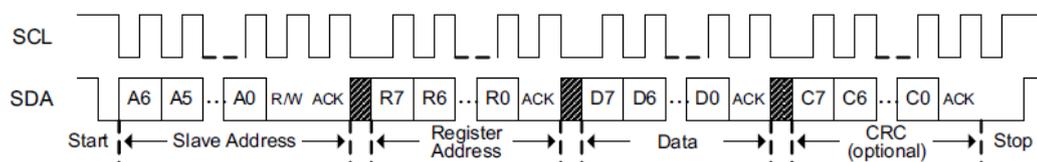
O bq769300DBT realiza a comunicação com o microcontrolador através do protocolo I2C. Este protocolo consiste em transmitir dados entre dois ou mais dispositivos conectados no mesmo barramento. O dispositivo que envia as informações é chamado de mestre (*master*) e o dispositivo que recebe estas informações é chamado de escravo (*slave*). É possível realizar a comunicação com vários escravos no mesmo barramento. Desta forma, o Arduino age como *master* enquanto o bq7693002DBT age como *slave*.

O protocolo I2C envia dados de forma ordenada através de dois sinais de transmissão. Um sinal é chamado de SCL e define o *clock* ou frequência em que cada bit pode ser enviado, o AFE implementa uma transmissão a 100kHz. O outro sinal é chamado de SDA e realiza a transmissão de dados.

Para realizar a escrita (Figura 4.6) em um registrador é necessário enviar primeiramente o endereço I2C do escravo, isso garante que em um sistema com vários escravos apenas o

escravo correto receba e aceite a informação, este endereço é definido na fabricação do circuito integrado e neste caso não pode ser alterado. O endereço I2C do bq7693002DBT é 0x08. Para que a próxima informação seja enviada, é necessário que escravo aceite o bit de reconhecimento (ACK - *Acknowledge*). A segunda informação enviada deve ser o endereço do registrador em que se deseja configurar os dados e assim, a terceira informação deve ser o dado de configuração desejado. Alguns CI's da família bq769x0 possuem a verificação de redundância cíclica (CRC - *Cyclic Redundancy Check*). O CRC é código polinomial, neste caso o polinômio é $x^8 + x^2 + x + 1$. Deve ser enviado o valor do CRC calculado pelo microcontrolador para que o CI faça a verificação e grave os valores enviados anteriormente, isso garante uma comunicação rápida e robusta.

Figura 4.6 – Processo de escrita I2C



Fonte:(TEXAS INSTRUMENTS, 2016)

Um exemplo de código utilizado para escrita de bits através do Arduino é apresentado abaixo:

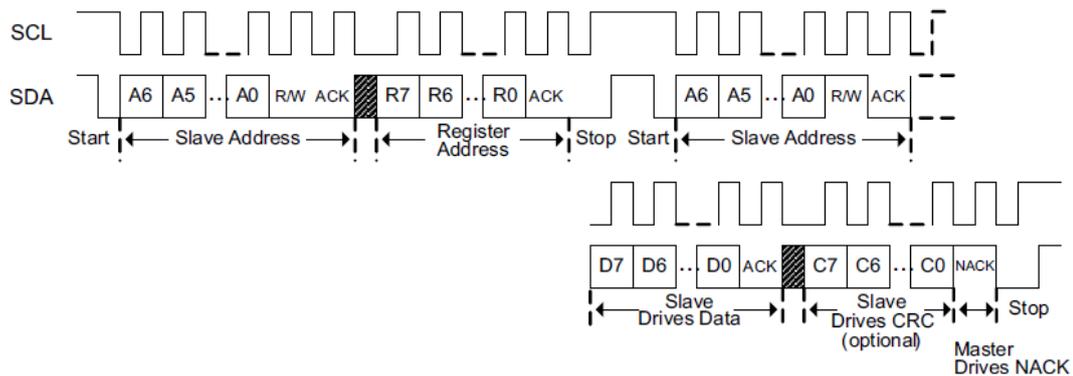
```

1  Wire.beginTransmission(0x08); // envia endereço I2C do CI
2  Wire.write(0x02); // envia endereço do registrador
3  Wire.write(0x42); // envia dado desejado para o registrador
4  Wire.endTransmission(); // encerra a transmissão

```

No processo de leitura deve-se então informar o endereço I2C do escravo e o endereço do registrador que se deseja conhecer a informação. O escravo responde confirmando o endereço do registrador e oferecendo a informação binária contida no mesmo, e por fim, envia o cálculo do CRC para o microcontrolador confirmar. A Figura 4.7 mostra o processo de leitura I2C.

Figura 4.7 – Processo de leitura I2C



Fonte:(TEXAS INSTRUMENTS, 2016)

Um exemplo de código de leitura de bits utilizando o Arduino é apresentado abaixo.

```

1  Wire.beginTransmission(0x08); // envia o endereço I2C do CI
2  Wire.write(0x02); // envia endereço do registrador
3  Wire.endTransmission(); // encerra a transmissão
4  Wire.requestFrom(0x08, 1); // pede pra o CI a informação de
   1 byte
5  int ss =Wire.read(); // salva a informação na variável ss
6  Serial.println(ss, HEX); // mostra no monitor a informação
   na forma hexadecimal

```

O código que realiza a comunicação I2C entre o bq7693002DBT e o Arduino é apresentado no Apêndice A deste trabalho.

4.3 REGISTRADORES

Para a inicialização do sistema de gerenciamento é necessário realizar a configuração dos registradores do bq7693002DBT. Estas informações estão disponíveis em (TEXAS INSTRUMENTS, 2016), porém para melhor compreensão estas informações também são disponibilizadas neste documento. É importante enfatizar que a escolha pelo modo de configuração dos registradores foi realizada pela autora do trabalho e para esta aplicação específica, podendo ser alterada conforme a necessidade de outra aplicação.

Os circuitos integrados do tipo bq76930 possuem 42 registradores, sendo 11 do tipo leitura/escrita e 31 do tipo leitura. Nas Subseções 4.3.1 e 4.3.2 esses registradores são tratados de forma detalhada.

4.3.1 Configuração dos Registradores

Como mencionado anteriormente, no bq7693002DBT é necessário realizar a configuração de onze registradores do tipo leitura/escrita (R/W - *Read/Write*). A Tabela 4.3 apresenta o mapa destes registradores e como os mesmo estão inicialmente configurados neste trabalho. Na sequência é realizado o detalhamento de cada registrador apresentando o estado padrão destes registradores e a configuração inicializada neste trabalho.

Tabela 4.3 – Configuração dos registradores do bq7693002DBT.

Nome	Endereço	Configuração
SYS_STAT	0x00	0x00
CELLBAL1	0x01	0x00
CELLBAL2	0x02	0x00
SYS_CTRL1	0x04	0x18
SYS_CTRL2	0x05	0x42
PROTECT1	0x06	0x9F
PROTECT2	0x07	0x5F
PROTECT3	0x08	0x50
OV_TRIP	0x09	0xC9
UV_TRIP	0x0A	0x9F
CC_CFG	0x0B	0x19

Fonte: Própria autora.

- **SYS_STAT**: neste registrador será configurado o estado do sistema. No primeiro momento sua configuração é realizada através de um comando de escrita, enviando o valor 0x00, porém ao decorrer da utilização do circuito seus bits são setados automaticamente e indicam uma mudança no estado do sistema. É necessário realizar a leitura deste registrador periodicamente e para limpar o bit é necessário escrever 1 no mesmo.

A Tabela 4.4 apresenta a descrição dos bits do registrador SYS_STAT.

Tabela 4.4 – Registrador SYS_STAT (0x00)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	CC_READY	RSVD	DEVICE_XREADY	OVRD_ALERT	UV	OV	SCD	OCD
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	0	0	0	0	0	0	0
Acesso	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

CC_READY (Bit 7): indicação de que uma nova leitura do *Coulomb Counter* está disponível. Depois de ler e armazenar a leitura atual é necessário limpar o bit para receber a indicação de uma nova leitura.

0 = uma nova leitura CC não está disponível;

1 = uma nova leitura CC está disponível.

RSVD (Bit 6): bit reservado, não deve ser utilizado.

DEVICE_XREADY (Bit 5): este bit indica uma falha interna do circuito integrado. Caso seu valor seja 1 é necessário limpar o bit e caso a falha permaneça é necessário averiguar as possíveis causas.

0 = dispositivo não possui falha interna;

1 = falha interna detectada, é necessário limpar o bit.

OVRD_ALERT (Bit 4): indicador do pino ALERT. Só é ativado se este pino não está recebendo tensão de um circuito externo.

0 = nenhuma sobreposição externa detectada;

1 = sobreposição externa detectada, o bit deve ser limpo.

UV (Bit 3): indicador de falha de subtensão.

0 = Falha de UV não detectada;

1 = Falha UV detectada, é necessário limpar o bit.

OV (Bit 2): indicador de falha de sobretensão.

0 = Falha de OV não detectada;

1 = Falha OV detectada, é necessário limpar o bit.

SCD (Bit 2): indicador de falha de curto circuito na descarga.

0 = Falha de SCD não detectada;

1 = Falha SCD detectada, é necessário limpar o bit.

OCD (Bit 3): indicador de falha de sobrecorrente da descarga.

0 = Falha de OCD não detectada;

1 = Falha OCD detectada, é necessário limpar o bit.

- **CELLBAL1:** este registrador é responsável por comandar o balanceamento das cinco primeiras células de bateria. O algoritmo que define qual célula deve ser balanceada é

de responsabilidade do microcontrolador. O circuito integrado apenas fornece o acionamento do circuito utilizado no balanceamento. A Tabela 4.5 apresenta este registrador e a descrição dos seus bits.

Tabela 4.5 – Registrador CELLBAL1 (0x01)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	-	-	-	CB5	CB4	CB3	CB2	CB1
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	0	0	0	0	0	0	0
Acesso	R	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

CBx (Bits 4 à 0): indica que a célula "x" está recebendo balanceamento.

0 = Balanceamento na célula "x" está desabilitado;

1 = Balanceamento na célula "x" está habilitado.

- **CELLBAL2:** este registrador é responsável por comandar o balanceamento das cinco últimas células de bateria. A Tabela 4.6 apresenta este registrador e a descrição dos seus bits.

Tabela 4.6 – Registrador CELLBAL2 (0x02)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	-	-	-	CB10	CB9	CB8	CB7	CB6
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	0	0	0	0	0	0	0
Acesso	R	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

CBx (Bits 4 à 0): indica que a célula "x" está recebendo balanceamento.

0 = Balanceamento na célula "x" está desabilitado;

1 = Balanceamento na célula "x" está habilitado.

- **SYS_CTRL1:** neste registrador são configurados parâmetros de controle do sistema de gerenciamento. A Tabela 4.7 apresenta os bits que compõem o registrador.

Tabela 4.7 – Registrador SYS_CTRL1 (0x04)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	LOAD_PRESENT	-	-	ADC_EN	TEMP_SEL	RSVD	SHUT_A	SHUT_B
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	0	0	1	1	0	0	0
Acesso	R	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

LOAD_PRESENT(Bit 7): este bit é o tipo leitura e indica se uma carga externa está presente. É necessário que o bit **CHG_ON** do registrador SYS_CTRL2 esteja em 0 para que este bit possa estar em 1. Por se tratar de um bit apenas de leitura, o mesmo é automaticamente limpo quando a carga é removida.

0 = a carga não está conectada ou **CHG_ON=1**;

1 = a carga está conectada.

ADC_EN(Bit 4): este bit habilita ou não o ADC responsável pelas medidas de tensão e temperatura do sistema. Uma vez habilitado o conversor, a proteção OV também é habilitada, o mesmo acontece quando o ADC é desabilitado.

0 = desabilita as leituras do ADC e a proteção OV;

1 = habilita as leituras do ADC e a proteção OV.

TEMP_SEL(Bit 3): determina que tipo de leitura da temperatura será armazenada.

0 = armazena a leitura referente a temperatura interna do CI nos registradores TS1_HI e TS1_LO;

1 = armazena as leituras referente aos termistores utilizados no circuito em seus devidos registradores.

RSVD(Bit 2): este bit é reservado e não deve ser setado para 1.

SHUT_A(Bit 1) e SHUT_B(Bit 0): estes bits devem ser utilizados para desligar o sistema de gerenciamento. É necessário realizar uma sequência específica para que o comando seja realizado. A sequência para desligamento é apresentada na sequência.

SHUT_A=0 e SHUT_B=0;

SHUT_A=0 e SHUT_B=1;

SHUT_A=1 e SHUT_B=0;

- **SYS_CTRL2:** neste registrador também são configurados parâmetros de controle do sistema de gerenciamento. A Tabela 4.8 apresenta os bits que compõem o registrador.

Tabela 4.8 – Registrador SYS_CTRL2 (0x05)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	DELAY_ DIS	CC_EN	CC_ ONESHOT	RSVD	RSVD	RSVD	DSG_ ON	CHG_ ON
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	1	0	0	0	0	2	0
Acesso	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

DELAY_DIS(Bit 7): neste bit é possível desabilitar o atraso na atuação das proteções, fazendo com que estas atuem em aproximadamente 250ms.

0 = atrasos configurados nas proteções;

1 = atrasos nas proteções desativados.

CC_EN(Bit 6): habilita a operação contínua do ADC responsável pelo CC - *Coulomb Counter*.

0 = desabilita a operação contínua do CC;

1 = habilita a operação contínua do CC.

CC_ONESHOT(Bit 5): habilita a operação do ACD responsável pelo CC - *Coulomb Counter* para apenas uma leitura durante 250ms, após este período o conversor é desabilitado. O mesmo só deve ser habilitado se **CC_EN=0** e **CC_READY=0**.

0 = nenhuma ação;

1 = Disponibiliza uma única leitura CC.

RSVD: reservado, não deve ser usado.

DSG_ON (Bit 1): este bit habilita ou não o sinal de controle do acionamento do MOSFET de descarga.

0 = descarga desabilitada;

1 = descarga habilitada.

CHG_ON (Bit 0): este bit habilita ou não o sinal de controle do acionamento do MOSFET de carga.

0 = carga desabilitada;

1 = carga habilitada.

- **PROTECT1:** este registrador define os limites de tensão e atraso para a atuação da proteção de curto-circuito na descarga (SCD). A Tabela 4.9 apresenta os bits que compõem esse registrador.

Tabela 4.9 – Registrador PROTECT1 (0x06)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	RSNS	-	RSVD	SCD_D1	SCD_D0	SCD_T2	SCD_T1	SCD_T0
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	1	0	0	1	1	1	1	1
Acesso	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

RSNS (Bit 7): este bit permite dobrar os limites de tensão das proteções SCD e OCD, simultaneamente.

0 = limites devem ser projetados para menor variação;

1 = limites podem ser projetados para maior variação.

RSVD (Bit 5): Reservado, não deve ser usado.

SCD_D1 (Bit 4) e SCD_D0 (Bit 3): estes dois bits definem o limite de atraso da atuação de SCD. Por recomendação do fabricante utiliza-se 400 μ s e para isso é escrito 0x03 nestes bits.

SCD_T2 (Bit 2), SCD_T1 (Bit 1) e SCD_T0 (Bit 0): estes três bits definem a tensão máxima de curto-circuito na descarga. Optou-se por utilizar 200mV de limite com base nos valores fornecidos pelo fabricante e para isso é escrito 0x07 nestes bits.

- **PROTECT2:** este registrador define os limites de tensão e atraso para a atuação da proteção de sobrecorrente na descarga. A Tabela 4.10 apresenta os bits que compõem esse registrador.

Tabela 4.10 – Registrador PROTECT2 (0x07)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	-	OCD_D2	OCD_D1	OCD_D0	OCD_T3	OCD_T2	OCD_T1	OCD_T0
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	1	0	1	1	1	1	1
Acesso	R	R/W						

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

OCD_D2 (Bit 6), OCD_D1 (Bit 5) e OCD_D0 (Bit 4): estes três bits definem o limite de atraso da atuação de OCD. Por recomendação do fabricante utiliza-se 320ms e para isso é escrito 0x05 nestes bits.

OCD_T3 (Bit 3), OCD_T2 (Bit 2), OCD_T1 (Bit 1) e OCD_T0 (Bit 0): estes quatro bits definem a tensão máxima de para atuação da OCD. Optou-se por utilizar 100mV com base nos valores fornecidos pelo fabricante e para isso é escrito 0x0F nestes bits.

- **PROTECT3**: neste registrador são configurados os limites de atraso na atuação das proteções de OV e UV. A Tabela 4.11 apresenta os bits que compõem este registrador.

Tabela 4.11 – Registrador PROTECT3 (0x08)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	UV_D1	UV_D0	OV_D1	OV_D0	RSVD	RSVD	RSVD	RSVD
Configuração	0	1	0	1	0	0	0	0
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Acesso	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

UV_D1 (Bit 7), UV_D0 (Bit 6): estes dois bits realizam a configuração do limite de atraso da atuação de UV. Optou-se por utilizar 4s com base nos valores fornecidos pelo fabricante e para isso é necessário escrever 0x01 nestes bits.

OV_D1 (Bit 5), OV_D0 (Bit 4): estes dois bits realizam a configuração do limite de atraso da atuação de OV. Optou-se por utilizar 2s com base nos valores fornecidos pelo fabricante e para isso é necessário escrever 0x01 nestes bits.

- **OV_TRIP**: neste registrador é configurado a tensão limite para atuação da proteção de sobretensão. A Tabela 4.12 apresenta este registrador.

Tabela 4.12 – Registrador OV_TRIP (0x09)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	OV_T7	OV_T6	OV_T5	OV_T4	OV_T3	OV_T2	OV_T1	OV_T0
Padrão	1	0	1	0	1	1	0	0
Configuração	1	1	0	0	1	0	0	1
Acesso	R/W							

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

OV_T7 (Bit 7) à OV_T0 (Bit 0): estes oito bits definem a tensão de atuação da proteção. Para transformar estes bits em um valor de tensão é necessário adicionar dois bits na posição mais significativa setados em 0x02 e 4 bits na posição menos significativa, setados em 0x08 e ainda adicionar o valor de GAIN e OFFSET. O valor de tensão desta proteção será comparado ao valor do ADC armazenado em cada célula.

O valor padrão configurado é 0xAC que corresponde ao limite de 4,18V por célula. Como esse limite é muito próximo ao valor de uma célula de lítio totalmente carregada, aproximadamente 4,10V, desejou-se um valor limite maior, de 4,35V, e para isso foi configurado 0xC9 neste registrador.

- **UV_TRIP:** neste registrador é configurado a tensão limite para atuação da proteção de subtensão. A Tabela 4.12 apresenta este registrador.

Tabela 4.13 – Registrador UV_TRIP (0x09)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	UV_T7	UV_T6	UV_T5	UV_T4	UV_T3	UV_T2	UV_T1	UV_T0
Padrão	1	0	0	1	0	1	1	1
Configuração	1	0	0	1	1	1	1	1
Acesso	R/W							

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

UV_T7 (Bit 7) à UV_T0 (Bit 0): estes oito bits definem a tensão de atuação da proteção. Assim como no registrador OV_TRIP, para transformar estes bits em um valor de tensão é necessário adicionar dois bits na posição mais significativa setados em 0x01 e 4 bits na posição menos significativa, setados em 0x00 e ainda adicionar o valor de GAIN e OFFSET. O valor de tensão desta proteção será comparado ao valor do ADC armazenado em cada célula.

O valor padrão configurado é 0x97 que corresponde ao limite mínimo de 2,50V por célula. Esse valor foi considerado adequado e essa configuração foi mantida.

- **CC_CFG:** neste registrador é configurado a operação do conversor CC, responsável pela medição de corrente para a estimativa de carga. A Tabela 4.14

Tabela 4.14 – Registrador CC_CFG (0x0B)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Nome	-	-	CC_CFG5	CC_CFG4	CC_CFG3	CC_CFG2	CC_CFG1	CC_CFG0
Padrão	0	0	0	0	0	0	0	0
Configuração	0	0	0	1	1	0	0	1
Acesso	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

CC_CFG5 (Bit 5) à CC_CFG0 (Bit 0): nestes bits, por recomendação do fabricante, deve-se escrever 0x19 na inicialização do dispositivo. Segundo o fabricante, esta configuração garante ótima performance.

4.3.2 Leitura dos Registradores

Os registradores que permitem apenas a leitura de seus dados são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Registradores de Leitura do bq7693002DBT.

Nome	Endereço
VC1_HI	0x0C
VC1_LO	0x0D
VC2_HI	0x0E
VC2_LO	0x0F
VC3_HI	0x10
VC3_LO	0x11
VC4_HI	0x12
VC4_LO	0x13
VC5_HI	0x14
VC5_LO	0x15
VC6_HI	0x16
VC6_LO	0x17
VC7_HI	0x18
VC7_LO	0x19
VC8_HI	0x1A
VC8_LO	0x1B
VC9_HI	0x1C
VC9_LO	0x1D
VC10_HI	0x1E
VC10_LO	0x1F
BAT_HI	0x2A
BAT_LO	0x2B
TS1_HI	0x2C
TS1_LO	0x2D
TS2_HI	0x2E
TS2_LO	0x2F
CC_HI	0x32
CC_LO	0x33
ADCGAIN1	0x50
ADCOFFSET	0x51
ADCGAIN2	0x59

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

- VCx_HI e VCx_LO: na composição destes dois registradores é armazenado o valor medido pelo ADC referente a tensão da célula x. É necessário ler ambos os registradores no mesmo comando para que o valor seja coerente. Para converter o valor lido em Volts utiliza-se a Equação (4.1), onde os parâmetros OFFSET e GAIN são definidos em fábrica e é necessário realizar a leitura de ambos.

$$V_{cell} = GAIN \cdot ADC(cell) + OFFSET \quad (4.1)$$

- BAT_HI e BAT_LO: nestes dois registradores é armazenado o valor medido pelo ADC referente a tensão do banco de baterias. Essa medição é realizada através do somatório da tensão de cada célula e fornecida a cada 250ms. A conversão do valor lido nos registradores para o valor em V é realizado através da Equação (4.2).

$$V_{BAT} = 4 \cdot GAIN \cdot ADC(cell) + N_{cell} \cdot OFFSET \quad (4.2)$$

onde N_{cell} é o número de células que compõem o banco de baterias.

- TSx_HI e TSx_LO: estes registradores são responsáveis por armazenar o valor medido pelo ADC referente a temperatura. É necessário realizar a leitura dos dois registradores no mesmo comando. Para realizar a conversão do valor lido no registrador em resistência é necessário realizar a Equação (4.3).

$$R_{TS} = \frac{10.000 \cdot V_{TSx}}{3,3 - V_{TSx}} \quad (4.3)$$

onde $V_{TSx} = ADC(em\ decimal) \cdot 382\mu V / LSB$.

Para converter o valor da resistência R_{TS} em temperatura é necessário utilizar a relação fornecida pelo fabricante do termistor.

No caso de selecionar a medição da temperatura de junção seu valor é salvo nos registradores TS1_HI e TS1_LO. A Equação (4.4) apresenta a conversão de tensão para temperatura.

$$TEMP_{die} = 25^\circ - \frac{V_{TSx} - 1,2}{0,0042} \quad (4.4)$$

onde $V_{TSx} = ADC(em\ decimal) \cdot 382\mu V / LSB$.

- ADCGAIN1 e ADCGAIN2: estes dois registradores armazenam o valor que define a variável GAIN, utilizada no cálculo das tensões. O valor GAIN é formado por 5 bits, onde os dois bits mais significativos são compostos pelos bits 3 e 2 do registrador ADCGAIN1 e os três bit menos significativos são compostos pelo bits 7, 6 e 5 do registrador ADCGAIN2. Para transformar a leitura dos 5 bits em um valor de tensão utiliza-se a Equação (4.5). A leitura desta variável resultou em $377\mu V$.

$$GAIN = 365\mu + ADC(5bits) \cdot \mu \quad (4.5)$$

- ADCOFFSET: neste registrador está armazenado o valor da variável OFFSET utilizada no cálculo das tensões. Este valor é apresentado em uma escala completa de $-128mV$ à

127mV conforme Tabela 4.16. O valor lido neste registrador durante o desenvolvimento deste trabalho é de 49mV.

Tabela 4.16 – Registrador ADCOFFSET (0x51).

ADCOFFSET	OFFSET(mV)
0x00	0
0x01	1
0x7F	127
0x80	-128
0x82	-127
0xFF	-1

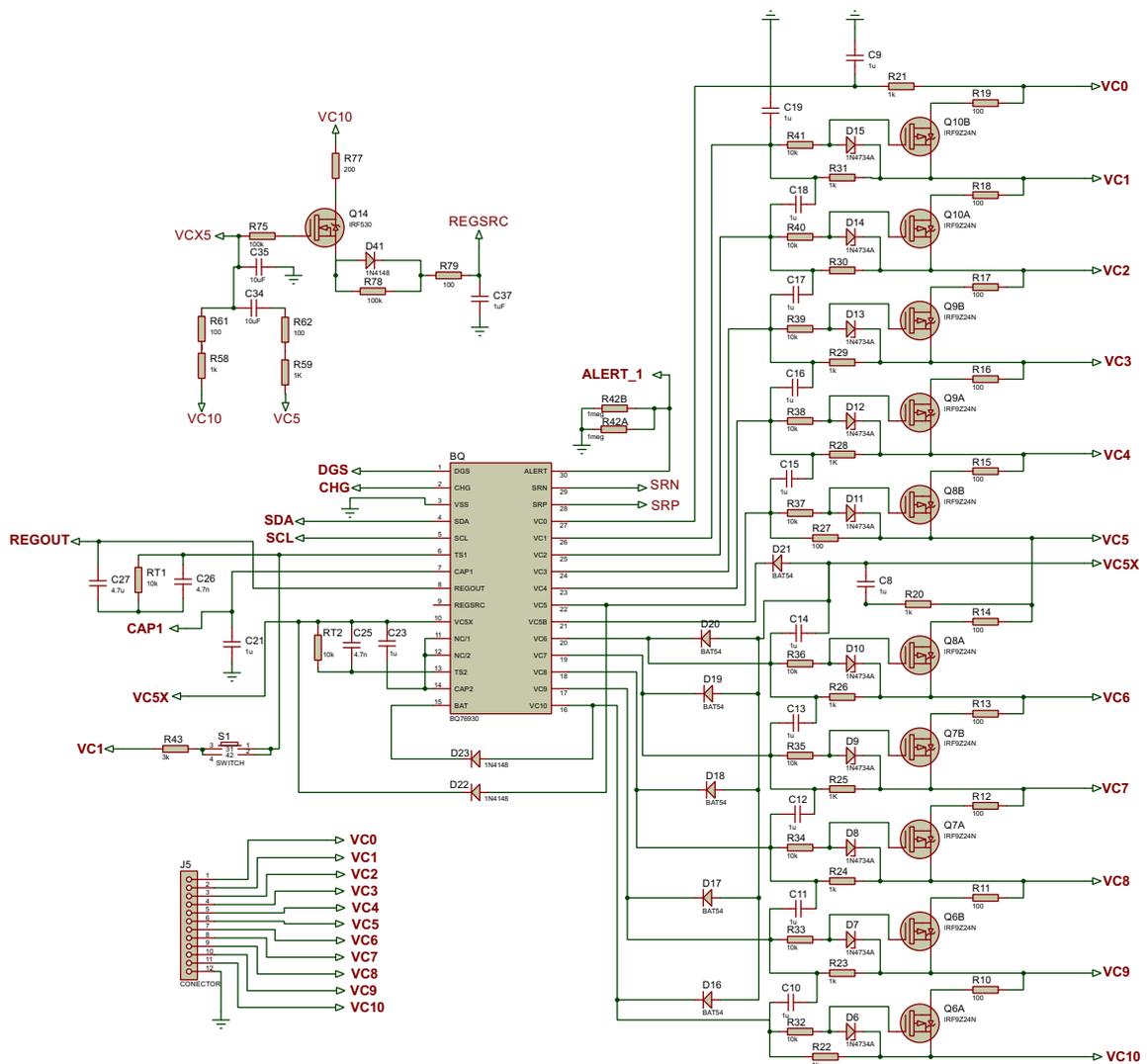
Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

4.4 CIRCUITO IMPLEMENTADO

Para realizar a implementação deste trabalho utilizou-se o circuito recomendado pela *Texas Instruments* disponível em (TEXAS INSTRUMENTS, 2014). Este circuito é disponibilizado no Guia do Usuário do Módulo de Avaliação (EVM - *Evaluation Module*). Alguns dos componentes eletrônicos recomendados foram substituídos por componentes similares de fácil acesso. Pequenas adaptações foram realizadas para efetuar a comunicação através do Arduino, uma vez que a recomendação é utilizar um circuito integrado extra também da *Texas Instruments*.

A Figura 4.8 apresenta o circuito principal que incorpora o balanceamento das células, o botão S1 que inicializa o sistema, capacitores e resistores de filtro recomendados pelo fabricante e resistor *pull-down* no pino de alerta, também recomendado pelo fabricante.

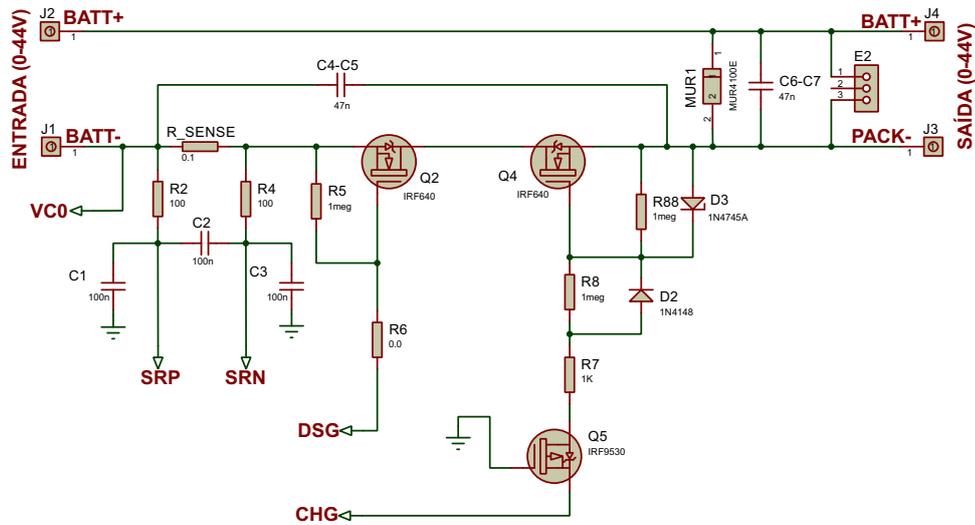
Figura 4.8 – Circuito de balanceamento do bq7693002DBT



Fonte: Própria autora

O circuito de proteção apresentado na Figura 4.9 foi discutido anteriormente na Seção 4.1.3. Este circuito é responsável por conectar o banco de baterias à carga.

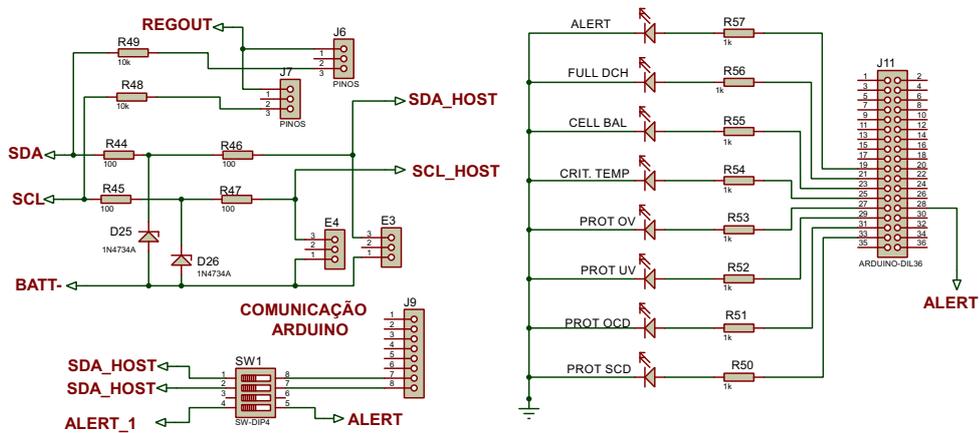
Figura 4.9 – Circuito de proteção do bq7693002DBT



Fonte: Própria autora

O barramento de comunicação e os LEDs de sinalização são apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Circuito de comunicação do bq7693002DBT



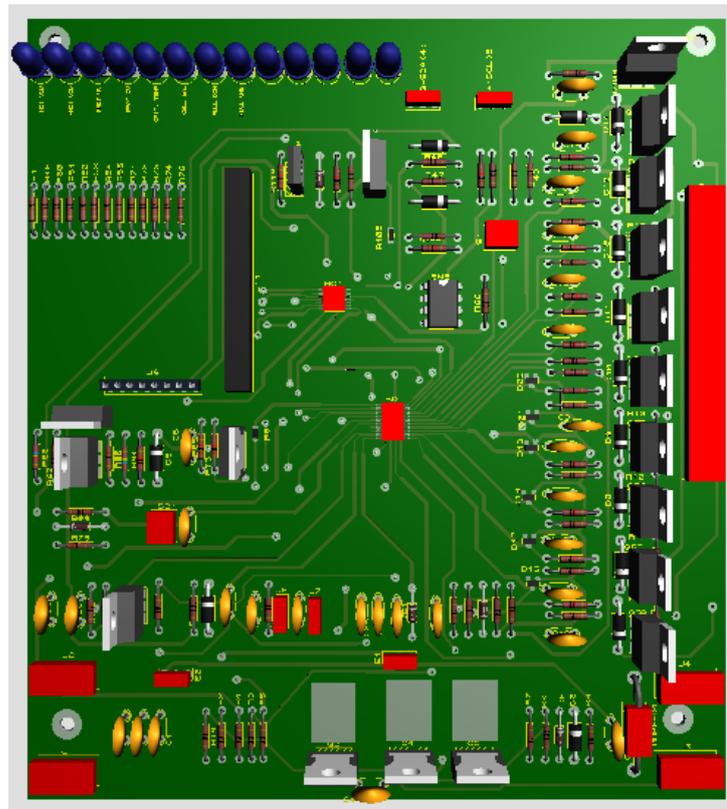
Fonte: Própria autora

4.5 PROTÓTIPO

A fim de realizar os testes e a implementação do circuito proposto pela *Texas Instruments* é confeccionado um protótipo. Este protótipo foi construído inteiramente na universidade.

No primeiro momento é elaborado o esquemático e o *layout* do circuito através do *software* Proteus[®]. A Figura 4.11 apresenta uma imagem 3D gerada pelo *software*.

Figura 4.11 – Imagem 3D do protótipo

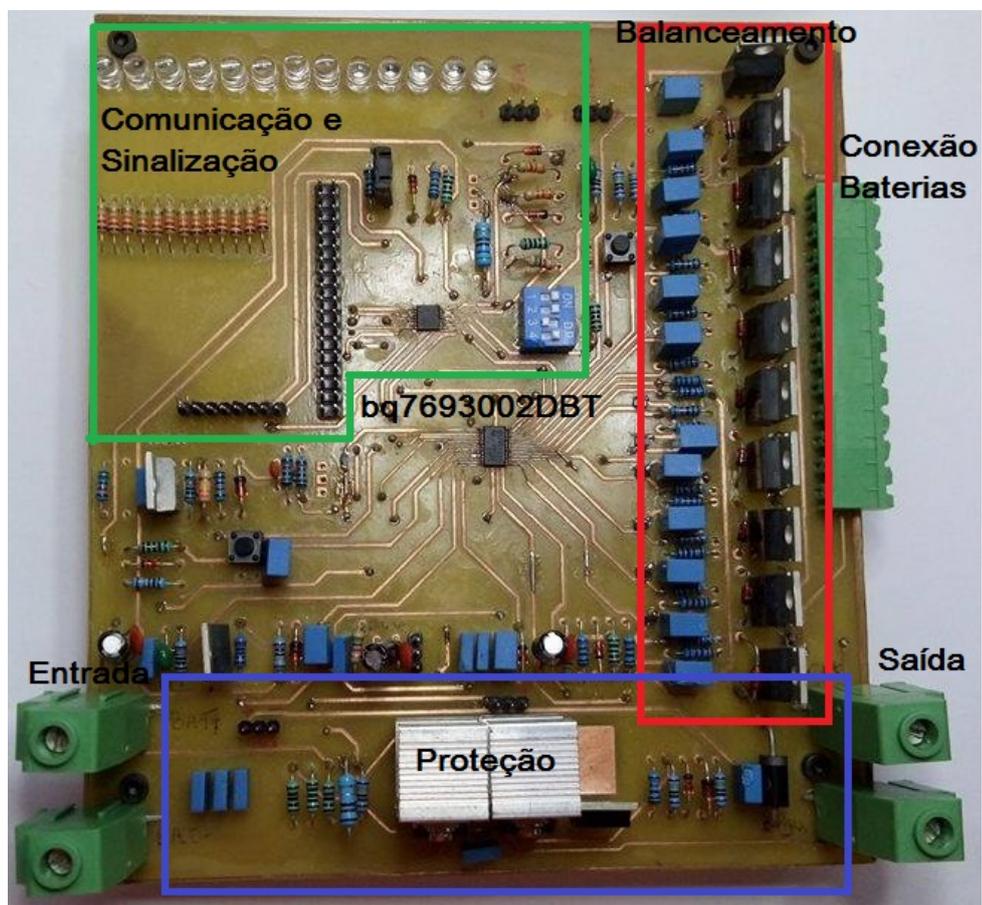


Fonte: Própria autora

Neste protótipo acrescentou-se um circuito integrado para realizar a estimação de vida útil das baterias. Este CI, o bq34z100-G1, também da *Texas Instruments* não é utilizado neste trabalho por ser uma proposta para trabalhos futuros.

Para que o processo de corrosão se tornasse possível, haja vista as dimensões do bq76930-02DBT, foi utilizado o método de transferência fotossensível, que possui melhor precisão. Com este processo tornou-se possível realizar a corrosão da placa no laboratório da universidade. A Figura 4.12 apresenta uma imagem do protótipo confeccionado pela autora deste trabalho.

Figura 4.12 – Protótipo desenvolvido para realização de testes



Fonte: Própria autora

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo é apresentado o procedimento de testes e os resultados obtidos durante os mesmos.

5.1 PROCEDIMENTO DE TESTES

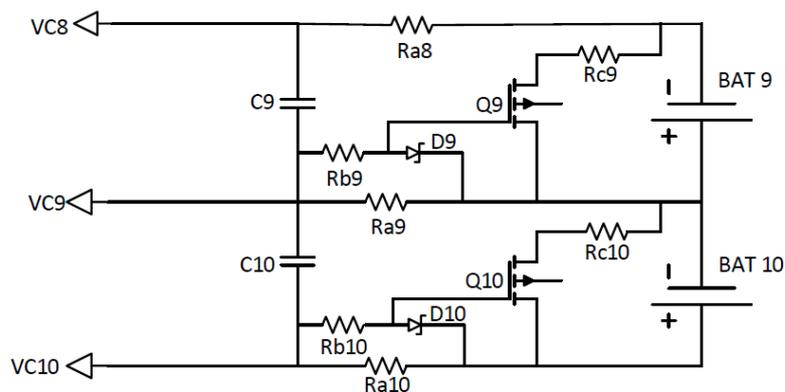
No primeiro momento realizam-se testes nos circuitos auxiliares do protótipo para garantir que os mesmos atuem de forma correta ao receber um comando do BMS. Estes testes foram realizados nos circuitos de balanceamento e proteção sem o bq7693002 instalado no protótipo.

Para testar o circuito de balanceamento (Figura 5.1) aplica-se uma tensão de 8V no pino VC10. Essa tensão bloqueia o transistor Q10, do tipo canal P, não permitindo a passagem de corrente por Rc10, utilizado para descarregar a bateria.

Por se tratar de um transistor canal P, quando não é aplicada nenhuma tensão em VC10, Q10 está polarizado e o balanceamento é realizado. Como já citado, utiliza-se a técnica dissipativa de balanceamento, na qual as baterias de carga elevada são descarregadas até se equipotencializarem com a bateria de menor carga.

O mesmo teste é realizado para os outros ramos de balanceamento, como por exemplo, aplicando tensão no pino VC9.

Figura 5.1 – Teste 1 - Circuito para balanceamento



Fonte: Própria autora

A realização deste teste confirma que o balanceamento será realizado caso o bq7693002 seja capaz de aplicar a tensão mínima de 8V, essa informação não é disponibilizada pelo fabricante.

Para realizar o teste do acionamento dos MOSFET's de proteção (Figura 4.5), aplica-se uma tensão de 15V nos pinos DSG e CHG, separadamente. Neste teste, espera-se que os transistores Q1 e Q2 entrem em condução com a tensão aplicada e permitam a transferência de energia das baterias para a carga, no caso DSG, e do carregador para as baterias, no caso de CHG.

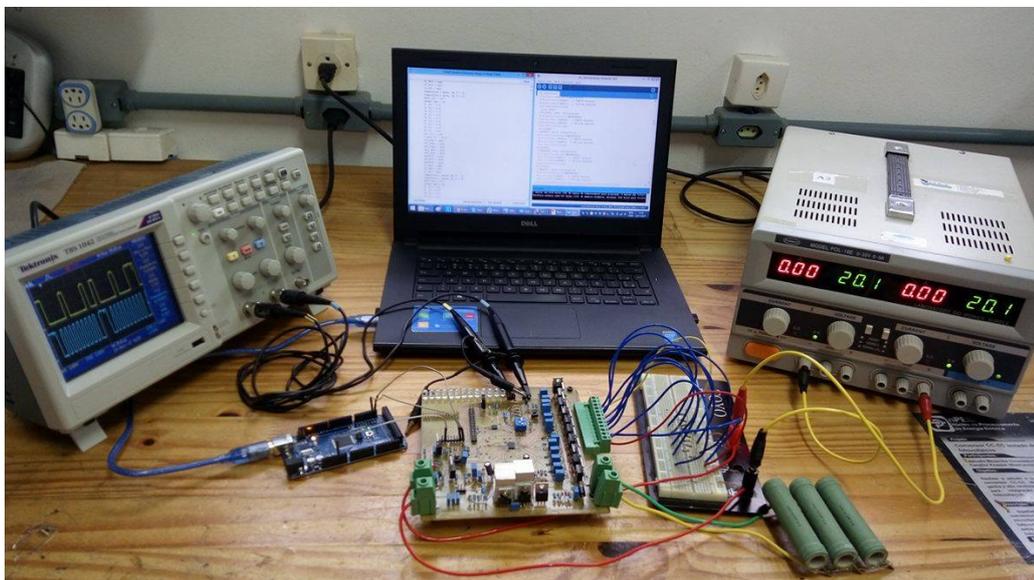
Nesta etapa opta-se por adicionar dissipadores em Q1 e Q2, para que ambos atuem com segurança se utilizada a corrente nominal das baterias (3,2A).

A realização deste teste demonstra que os MOSFET's atuam de forma desejada. No caso dos pinos CHG e DSG a informação fornecida pelo fabricante é de que ambos podem aplicar até 20V.

Após realizar os testes dos circuitos auxiliares, adiciona-se o bq7693002 ao protótipo para a próxima etapa de testes.

Para realizar a alimentação do circuito, inicialmente utiliza-se uma fonte de tensão DC e uma rede resistiva composta por dez resistores em série $1,5k\Omega$, a Figura 5.2 apresenta a bancada de teste para este ensaio. Estes resistores permitem que sejam simuladas as tensões das baterias. Neste teste mede-se os valores de tensão em cada pino do bq7693002 para avaliar se os mesmos encontram-se na faixa de operação recomendada pelo fabricante.

Figura 5.2 – Bancada de testes utilizando fonte DC



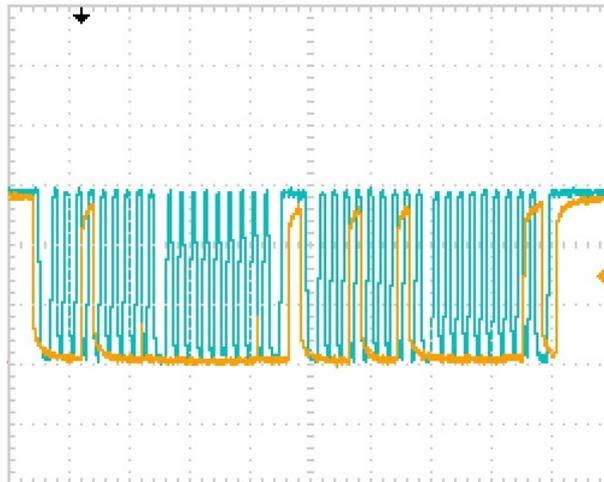
Fonte: Própria autora

Após garantir que o sistema opera nas condições recomendadas, inicializa-se o processo de comunicação entre o bq7693002DBT e o Arduino. Primeiramente realiza-se a leitura dos registradores e efetua-se o cálculo das tensões de cada célula e do banco de bateria. A Figura 5.3 apresenta um exemplo dos sinais de comunicação no processo de leitura medidos através de um osciloscópio, onde o sinal em cor azul é a medição do *clock* e o sinal em cor amarela é

a medição da informação (*data*). A escala dos sinais é de 1V por divisão, no eixo vertical e de 50 μ s, no eixo horizontal.

Neste exemplo realiza-se a leitura do registrador SYS_STAT, cujo endereço é 0x00 e cuja informação lida também é 0x00. A leitura é consistente com a operação inicial do sistema.

Figura 5.3 – Leitura do registrador SYS_STAT (Escala: 1V/div e 50 μ s)



Fonte: Própria autora

A Figura 5.4, retirada da tela de monitoração do *software* do Arduino, apresenta os resultados das leituras de tensão das células, do banco de baterias, as temperaturas dos termistores e dos registradores. Neste teste utiliza-se a fonte de tensão DC configurada em aproximadamente 40V, oferecendo assim, cerca de 4V para cada célula simulada. As tensões apresentadas mostram a funcionalidade do processo de leitura, já que este parâmetro pode ser medido através de outro instrumento e comparado. A leitura dos registradores também ocorre de forma adequada, uma vez que os valores lidos correspondem aos valores de configuração padrão apresentados em (TEXAS INSTRUMENTS, 2016), exceto pelo registrador SYS_CTRL1 onde o valor 0x10 significa que o ADC está habilitado e pelo CC_CFG que apresenta o valor 0x42, que não é o padrão, porém não possui influência nesta etapa de testes.

Figura 5.4 – Teste de leitura - Tensões e Registradores

```

GAIN [uV] = 377
OFFSET [mV] = 49
V1 [V] = 3.97
V2 [V] = 3.97
V3 [V] = 4.07
V4 [V] = 4.07
V5 [V] = 4.07
V6 [V] = 4.07
V7 [V] = 3.97
V8 [V] = 4.07
V9 [V] = 3.97
V10 [V] = 3.88
V pack [V] = 39.67
SYS_STAT = 0x00
SYS_CTRL1 = 0x10
SYS_CTRL2 = 0x00
CELL_BAL1 = 0x00
CELL_BAL2 = 0x00
PROTECT1 = 0x00
PROTECT2 = 0x00
PROTECT1 = 0x00
OV_TRIP = 0xAC
UV_TRIP = 0x97
CC_CFG = 0x42
Temperatura 1 aprox. em °C = 30
Temperatura 2 aprox. em °C = 30

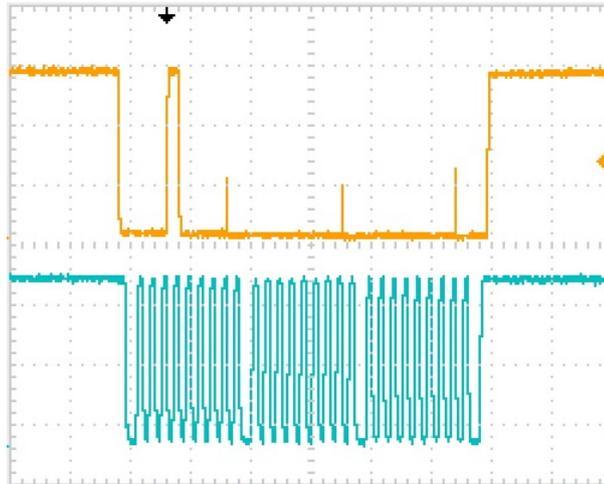
```

Fonte: Do próprio autor

Durante esta etapa de testes realiza-se a variação da tensão aplicada através da fonte DC para observar o funcionamento das medições do ADC e os resultados mostram-se positivos, uma vez que as medições acompanhavam de forma rápida a variação da tensão aplicada. Também verifica-se a variação das temperaturas quando adicionada uma fonte de calor nas proximidades dos termistores.

Em sequência realiza-se testes de escrita nos registradores. A Figura 5.5 apresenta a medição dos sinais de comunicação para a escrita no registrador SYS_STAT adquirida através de um osciloscópio, onde o sinal em cor azul é a medição do *clock* e o sinal em cor amarela é a medição da informação (*data*). A escala dos sinais é de 1V por divisão, no eixo vertical e de 50 μ s por divisão, no eixo horizontal. Como já mencionado, o endereço deste registrador é 0x00 e a informação escrita no mesmo também é 0x00.

Figura 5.5 – Escrita do registrador SYS_STAT (Escala: 1V/div e 50 μ s)



Fonte: Própria autora

A Figura 5.6, também retirada da tela de monitoração do *software* do Arduino, apresenta a configuração realizada nos registradores e as medições de tensão e temperatura. Nota-se que o registrador CC_CFG não atualiza seu valor, porém a folha de dados fornecida pelo fabricante não informa o significado de valores diferentes do recomendado, 0x19. Desta forma não é possível avaliar a influência deste valor no sistema.

Nestes primeiros testes, opta-se por não habilitar a descarga das baterias ou o fornecimento de corrente da fonte DC. Este procedimento só deve ser executado quando a funcionalidade do sistema de gerenciamento do banco de baterias estiver garantida.

Figura 5.6 – Teste de escrita em SYS_STAT

```

GAIN [uV] = 377
OFFSET [mV] = 49
V1 [V] = 3.97
V2 [V] = 3.97
V3 [V] = 4.07
V4 [V] = 4.07
V5 [V] = 4.07
V6 [V] = 3.97
V7 [V] = 4.07
V8 [V] = 4.07
V9 [V] = 4.07
V10 [V] = 3.97
V pack [V] = 40.04
SYS_STAT = 0x00
SYS_CTRL1 = 0x18
SYS_CTRL2 = 0x40
CELL_BAL1 = 0x00
CELL_BAL2 = 0x00
PROTECT1 = 0x9F
PROTECT2 = 0x5F
PROTECT1 = 0x50
OV_TRIP = 0xC9
UV_TRIP = 0x9F
CC_CFG = 0x42
Temperatura 1 aprox. em °C = 30
Temperatura 2 aprox. em °C = 30

```

Fonte: Própria autora

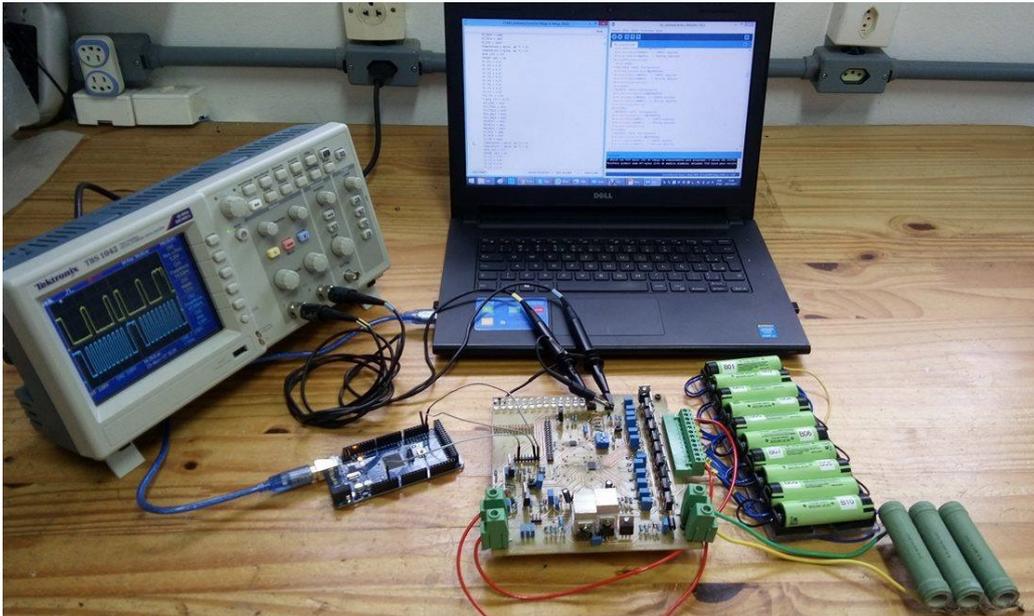
Outro teste importante realizado nesta etapa é a simulação de sobretensão e subtensão utilizando a fonte DC. O valor de limite superior de tensão configurado no registrador OV_TRIP é de 4,35 V por célula e o limite inferior de tensão configurado em UV_TRIP é 2,5V. Para testar a atuação destas proteções aplicam-se tensões que ultrapassem estes limites e verifica-se o registrador SYS_STAT.

Aplica-se, então, 45V através da fonte DC e o bit 2 do registrador SYS_STAT é setado automaticamente, anunciando que a proteção de sobretensão foi atuada. Em seguida, aplica-se 24V através da fonte DC e o bit 3 do SYS_STAT também é setado automaticamente, anunciando a proteção de subtensão. Para que os bits 2 e 3 não permaneçam setados é necessário limpar o bit.

Após verificar o funcionamento primário do sistema de gerenciamento é possível utilizar o banco de baterias e retirar a fonte DC, a Figura 5.7 apresenta a bancada de testes utilizando o banco de baterias.

São utilizadas dez células de baterias de íons de lítio da empresa Panasonic[®], com tensão nominal de 3,6V, capacidade de corrente de 3200mAh, densidade de energia de 676Wh/l e energia específica de 243Wh/kg. Estas baterias são conectadas em série para alimentar o sistema de gerenciamento. Os testes são realizados novamente para confirmar o funcionamento do sistema após a inclusão das baterias.

Figura 5.7 – Bancada de testes utilizando banco de baterias



Fonte: Própria autora

Diante das dificuldades encontradas ao realizar a comunicação entre o bq7693002 e o Arduino não realizou-se testes de descarga das baterias. Os testes seguintes aos apresentados nesta seção são discutidos na Seção 6.1

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho realizou-se o estudo de baterias e sua importância no desenvolvimento tecnológico, através da busca de dispositivos eficientes de armazenamento de energia. Neste contexto, a partir das vantagens técnicas, escolheu-se utilizar baterias de íons de lítio para a implementação deste trabalho.

Para garantir as condições ideais de funcionamento do banco de baterias, foi proposto o estudo e implementação de um sistema de gerenciamento que realize a medição e o controle dos parâmetros importantes para a bateria e que atue proteções sempre que necessário. Estes sistemas de gerenciamento de baterias são produzidos por diversas empresas, para diferentes tipos de baterias e com funções que atendem diferentes aplicações.

Após o estudo dos BMS's e de suas funções, é realizada a escolha pelo bq7693002 da *Texas Instruments*.

Para realizar a implementação deste sistema foi desenvolvido um protótipo a partir do circuito recomendado pelo fornecedor e com este protótipo foram realizados testes para comprovar a funcionalidade do dispositivo.

Os testes apresentaram resultados positivos em relação a medição da tensão das células, tensão do banco de baterias e da temperatura. Com estes parâmetros é possível atuar proteções de sobretensão e subtensão, além de realizar o monitoramento e controle da temperatura.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a funcionalidade de um sistema de gerenciamento de baterias, para uma abordagem total das funções disponíveis no dispositivo utilizado é recomendado a realização de testes de descarga e a realização de balanceamento das células, quando necessário. Também indica-se realizar a estimativa de carga do banco de baterias e comparar com resultados de outras literaturas.

Para a melhoria do trabalho realizado, é sugerido o desenvolvimento de um novo protótipo com adição de pontos de medição dos sinais de comunicação próximo aos pinos correspondentes do bq7693002, isso proporciona um melhor controle do sinal de comunicação. Também é recomendado realizar uma melhor distribuição dos componentes e a inclusão de um circuito de alimentação do Arduino no protótipo, a fim de não ser necessário utilizar um *laptop* durante os testes. Outra melhoria proposta é a adição de uma *display* para exibir parâmetros importantes, como tensão e temperatura do banco de baterias, corrente de descarga e o estado de carga.

Para expansão deste trabalho, sugere-se a implementação do CI bq34z100-G1, já adicionado ao protótipo utilizado neste trabalho. Este circuito realiza a estimação de vida útil de baterias de íons de lítio, completando assim, as funções principais de um BMS. Outra proposta de expansão deste trabalho é a implementação de um sistema de equalização das baterias através de métodos não dissipativos, como por exemplo, o balanceamento utilizando conversores CC-CC (*Constant Current to Constant Current*), do tipo bidirecional isolado, como abordado em (DUARTE, 2013). Neste caso, é realizada a transferência de energia entre as baterias em busca de um valor médio de carga. Propõe-se também uma análise comparativa entre o método de estimação de carga realizado pelo bq7693002, o *Coulomb Counter* e um método computacional, como por exemplo, o filtro de Kalman.

Diante do entendimento da importância deste trabalho e da necessidade de um sistema de gerenciamento que controle bancos de baterias com maior tensão, também é proposto o desenvolvimento de um sistema utilizando dois CI's da família bq76940, que suportam até 15 células, cada. Com este sistema, seria possível gerenciar um banco de baterias de íons de lítio de até 125V, alimentando uma carga de aproximadamente 400W.

Pensando em expandir as pesquisas relacionadas as baterias, porém abordando outra área de estudo, pode-se sugerir o desenvolvimento de um carregador de baterias utilizando o método CC-CV em busca de mais eficiência neste processo, uma vez que o tempo necessário para carregar baterias ainda é bastante longo e dificulta a consolidação de tecnologias como veículos elétricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENTLEY, W. F. Cell balancing considerations for lithium-ion battery systems. In: **The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances**. Dallas, EUA: [s.n.], 1997. p. 223–226.
- BERGVELD, H. J. **Battery Management Systems-Design by Modelling**. Dissertação (Mestrado) — Proefschrift Universiteit Twente, Enschede, Nederlands, 2001.
- CAO, J.; SCHOFIELD, N.; EMADI, A. Battery balancing methods: A comprehensive review. In: **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. Habin, China: [s.n.], 2008. p. 1–6.
- CHANG, W. The state of charge estimating methods for battery: A review. **IRSN Applied Mathematics**, 2013. July 2013.
- CHENG, K. W. E.; DIVAKAR, B. P.; WU, H.; DING, K.; HO, H. F. Battery-management system (bms) and soc development for electrical vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2011. v. 60, n. 1, p. 76–88, January 2011.
- DUARTE, B. R. A. **Desenvolvimento de um BMS para Aplicações de Mobilidade Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2013.
- ERSHAG, O. **A Balancing and Monitoring System for Battery Cell Stacks in Eletrical Vehicles**. Dissertação (Mestrado) — Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2008.
- HAQ, I. N.; LEKSONO, E.; IQBAL, M.; SODAMI, F. X. N.; NUGRAHA; KURNIADI, D.; YULIARTO, B. Development of battery management system for cell monitoring and protection. In: **International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS)**. Bali, Indonesia: [s.n.], 2014. p. 203–208.
- INFINEON INC. **Current Sensing Using Linear Hall Sensors**. Munich, Germany: [s.n.], 2009.
- LE, D.; TANG, X. Lithium-ion battery state of health estimation using ah-v characterization. In: **Proceedings of the Annual Conference of Prognostics and Health Management (PHM) Society**. Montreal, QC, Canada: [s.n.], 2011. p. 367–373.
- LI, J.; ZHU, Z. **Battety Thermal Management Systems of Electric Vehicles**. Dissertação (Mestrado) — Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2014.
- MOO, C. S.; HSIEH, Y. C.; TSAI, I. S. Charge equalization for series-connected batteries. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 2003. v. 39, n. 2, p. 704–710, April 2003.
- PAUL, G. H. **Estudo de métodos de armazenamento de energia e implementação de um sistema CAES para aplicações com fontes renováveis**. Joinville, SC: [s.n.], 2015.
- PESARAN, A.; KEYSER, M.; KIM, G.; SANTHANAGOPALAN, S.; SMITH, K. **Tools for Designing Thermal Management of Batteries in Electric Drive Vehicles**. Pasadena, California: [s.n.], 2013. Advanced Automotive Battery Conference.

- POP, V.; BERGVELD, H.; DANILOV, D.; REGTIEN, P.; NOTTEN, P. State-of-the-art of battery state-of-charge determination. In: **Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Application**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, (Philips Research Book Series). cap. 2, p. 11–45.
- PURWADI, A.; RIZQIAWAN, A.; KEVIN, A.; HERYANA, N. State of charge estimating method for lithium battery using combination of coulomb counting and adaptive system with considering the effect of temperature. **The Second IEEE Conference of Power Engineering and Renewable Energy**, 2014. p. 91–95, 2014.
- RAHIMI-EICHI, H.; OJHA, U.; BARONTI, F.; CHOW, M. Battery management system - an overview of its application in the smart grid and electric vehicles. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2013. p. 4–16, June 2013.
- RECHARGE INC. **Safety of Lithium Ion Batteries**. Brussels, Belgium: [s.n.], 2013. The European Association for Advanced Rechargeable Batteries.
- RINCON-MORA, G. A.; CHEN, M. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2006. v. 21, p. 504–511, May 2006.
- ROOT, M. **The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design and Use**. [S.l.]: McGrawHill, 2010. 1-43 p.
- SPELTINO, C.; STEFANOPOULOU, A.; FIENGO, G. Cell equalization in battery stacks through state of charge estimation polling. In: **Proceedings of the 2010 American Control Conference**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 5050–5055.
- SUN, K.; SHU, Q. Overview of the types of battery models. **Chinese Control Conference (CCC)**, 2011. p. 3644–3648, July 2011.
- TEXAS INSTRUMENTS. **bq76930 and bq76940 Evaluation Module - User's Guide**. [S.l.], 2014.
- TEXAS INSTRUMENTS. **bq769x0 3-Series to 15-Series Cell Battery Monitor Family for Li-Ion and Phosphate Applications**. [S.l.], 2016. Rev. G.
- TREMBLAY, O.; DESSAINT, L. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. **World Electric Vehicle Journal**, 2009. v. 3, p. 289–298, May 2009.
- WESSELLS, C. D.; HUGGINS, R. A.; CUI, Y. Copper hexacyanoferrate battery electrodes with long cycle life and high power. **Nature Communications**, 2011. v. 2, n. 550, November 2011.
- WU, C.; SUN, J.; ZHU, C.; GE, Y.; ZHAO, Y. Research on overcharge and overdischarge effect on lithium-ion batteries. In: **2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- YOUNG, K.; WANG, C.; WANG, L. Y.; STRUNZ, K. **Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks**. 3. ed. New York, USA: Springer, 2013. 15-56 p.
- ZHOU, Y.; LI, X. Overview of lithium-ion battery SOC estimation. **International Conference on Information and Automation**, 2015. p. 2454–2455, August 2015.

APÊNDICE A - CÓDIGO DE COMUNICAÇÃO DO ARDUINO

Neste apêndice, apresenta-se o código utilizado neste trabalho para escrita e leitura de registradores do bq7693002DBT. Este código é desenvolvido usando a linguagem de programação C++ e compilada em um Arduino Mega2560.

```
1 //Inicialização das variáveis
2 #define BQ76930 0x08 //endereço I2C do BMS
3 //REGISTRADORES DE CONFIGURAÇÃO W/R
4 #define SYS_STAT 0x00
5 #define CELLBAL1 0x01
6 #define CELLBAL2 0x02
7 #define SYS_CTRL1 0x04
8 #define SYS_CTRL2 0x05
9 #define PROTECT1 0x06
10 #define PROTECT2 0x07
11 #define PROTECT3 0x08
12 #define OV_TRIP 0x09
13 #define UV_TRIP 0x0A
14 #define CC_CFG 0x0B
15 //REGISTRADORES DE LEITURA (ONLY-READ)
16 #define VC1_HI 0x0C
17 #define VC1_LO 0x0D
18 #define VC2_HI 0x0E
19 #define VC2_LO 0x0F
20 #define VC3_HI 0x10
21 #define VC3_LO 0x11
22 #define VC4_HI 0x12
23 #define VC4_LO 0x13
24 #define VC5_HI 0x14
25 #define VC5_LO 0x15
26 #define VC6_HI 0x16
27 #define VC6_LO 0x17
28 #define VC7_HI 0x18
29 #define VC7_LO 0x19
30 #define VC8_HI 0x1A
31 #define VC8_LO 0x1B
32 #define VC9_HI 0x1C
33 #define VC9_LO 0x1D
34 #define VC10_HI 0x1E
35 #define VC10_LO 0x1F
36 //
37 #define BAT_HI 0x2A
38 #define BAT_LO 0x2B
39 #define TS1_HI 0x2C
40 #define TS1_LO 0x2D
41 #define TS2_HI 0x2E
42 #define TS2_LO 0x2F
```

```

43 #define CC_HI      0x32
44 #define CC_LO      0x33
45 #define ADCGAIN1  0x50
46 #define ADCOFFSET 0x51
47 #define ADCGAIN2  0x59
48
49 #include <Wire.h>
50
51 int led_SCD = 22, led_OCD = 24, led_UV = 26, led_OV = 28; //
    sinalização
52 int led_TEMP = 30, led_BALANC = 32, led_DCH = 34, led_ALERT = 36;
    //sinalização
53 float v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10;
54 float vcell1, vcell2, vcell3, vcell4, vcell5, vcell6, vcell7,
    vcell8, vcell9, vcell10;
55 byte ss, cb1, cb2, sc1, sc2, prot1, prot2, prot3, ovtrip,
    uvtrip, cc;
56 int bal=0, dado;
57 float GAIN, OFFSET, V_BAT, BAT, CC, V_min;
58 long interval=1000, previousMillis=0;
59 int cc_2compl, TEMP1, TEMP2;
60 float cc_uV, SOC1, SOC;
61
62
63 void setup() //ambiente onde é realizada a inicialização
64 {
65     pinMode(led_SCD, OUTPUT); // define a porta dos leds como saí
        da
66     pinMode(led_OCD, OUTPUT);
67     pinMode(led_UV, OUTPUT);
68     pinMode(led_OV, OUTPUT);
69     pinMode(led_TEMP, OUTPUT);
70     pinMode(led_BALANC, OUTPUT);
71     pinMode(led_DCH, OUTPUT);
72     pinMode(led_ALERT, OUTPUT);
73
74     Wire.begin(); // biblioteca de comunicação
75     Serial.begin(9600);
76
77     readGAIN1 (); // leitura do reg. ADCGAIN1
78     readGAIN2 (); // leitura do reg. ADCGAIN2
79     readOFFSET (); //leitura do reg. ADCPFSET
80     Serial.print("GAIN [uV]= ");
81     Serial.println(GAIN); // Apresenta o valor na tela
82     Serial.print("OFFSET [mV]");
83     Serial.println(OFFSET);
84
85     //CONFIGURAÇÃO INICIAL DOS REGISTRADORES DE LEITURA E ESCRITA

```

```
86 // SYS_STAT (0x00) Configuration
87 Wire.beginTransaction(BQ76930);
88 Wire.write(SYS_STAT);
89 Wire.write(0x00);
90 Wire.endTransmission();
91 //CELLBAL1 (0x01) Configuration
92 Wire.beginTransaction(BQ76930);
93 Wire.write(CELLBAL1);
94 Wire.write(0x00);
95 Wire.endTransmission();
96 //CELLBAL2 (0x02) Configuration
97 Wire.beginTransaction(BQ76930);
98 Wire.write(CELLBAL2);
99 Wire.write(0x00);
100 Wire.endTransmission();
101 //SYS_CTRL1 (0x04) Configuration
102 Wire.beginTransaction(BQ76930);
103 Wire.write(SYS_CTRL1);
104 Wire.write(0x18);
105 Wire.endTransmission();
106 //SYS_CTRL2 (0x05) Configuration
107 Wire.beginTransaction(BQ76930);
108 Wire.write(SYS_CTRL2);
109 Wire.write(0x42);
110 Wire.endTransmission();
111 //PROTECT1 (0x06) Configuration
112 Wire.beginTransaction(BQ76930);
113 Wire.write(PROTECT1);
114 Wire.write(0x9F);
115 Wire.endTransmission();
116 //PROTECT2 (0x07) Configuration
117 Wire.beginTransaction(BQ76930);
118 Wire.write(PROTECT2);
119 Wire.write(0x5F);
120 Wire.endTransmission();
121 //PROTECT3 (0x08) Configuration
122 Wire.beginTransaction(BQ76930);
123 Wire.write(PROTECT3);
124 Wire.write(0x50);
125 Wire.endTransmission();
126 //OV_TRIP (0x09) Configuration
127 Wire.beginTransaction(BQ76930);
128 Wire.write(OV_TRIP);
129 Wire.write(0xC9);
130 Wire.endTransmission();
131 //UV_TRIP (0x0A) Configuration
132 Wire.beginTransaction(BQ76930);
133 Wire.write(OV_TRIP);
```

```
134 Wire.write(0x9F);
135 Wire.endTransmission();
136 //CC_CFG (0x0B) Configuration
137 Wire.beginTransaction(BQ76930);
138 Wire.write(CC_CFG);
139 Wire.write(0x19);
140 Wire.endTransmission();
141 // FIM DO SETUP
142 }
143 //Registadores que armazenam o ganho e o offset podem ser
    lidos apenas uma vez
144 void readGAIN1 () {
145     Wire.beginTransaction(BQ76930);
146     Wire.write(ADCGAIN1);
147     Wire.endTransmission();
148     Wire.requestFrom(BQ76930,1);
149     int GAIN1 = Wire.read();
150     int G32=GAIN1&0b00001100;
151     }
152 void readGAIN2 () {
153     Wire.beginTransaction(BQ76930);
154     Wire.write(ADCGAIN2);
155     Wire.endTransmission();
156     Wire.requestFrom(BQ76930,1);
157     int GAIN2 = Wire.read();
158     int G765=GAIN2&0b11100000;
159     int G32;
160     int GAIN_ADC=(G32<<1) | (G765>>5);
161     int GAIN=(365+GAIN_ADC);
162     }
163 void readOFFSET () {
164     Wire.beginTransaction(BQ76930);
165     Wire.write(ADCOFFSET);
166     Wire.endTransmission();
167     Wire.requestFrom(BQ76930,1);
168     int offset = Wire.read();
169     if(offset>127) {
170         int OFFSET= offset-256;
171     }
172     else OFFSET= offset;
173     }
174
175 void loop() {
176     //leitura das tensões de cada célula e print
177     Wire.beginTransaction(BQ76930);
178     Wire.write(VC1_HI);
179     Wire.endTransmission();
180     Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
```

```
181 int v1=Wire.read()<<8|Wire.read();
182 float vc1=GAIN*0.0001*(float)v1+(float)OFFSET*0.01;
183 Serial.print("V1 [V] = ");
184 Serial.println(vc1);
185 //
186 Wire.beginTransmission(BQ76930);
187 Wire.write(VC2_HI);
188 Wire.endTransmission();
189 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
190 int v2=Wire.read()<<8|Wire.read();
191 float vc2=GAIN*0.0001*(float)v2+(float)OFFSET*0.01;
192 Serial.print("V2 [V] = ");
193 Serial.println(vc2);
194 //
195 Wire.beginTransmission(BQ76930);
196 Wire.write(VC3_HI);
197 Wire.endTransmission();
198 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
199 int v3=Wire.read()<<8|Wire.read();
200 float vc3=GAIN*0.0001*(float)v3+(float)OFFSET*0.01;
201 Serial.print("V3 [V] = ");
202 Serial.println(vc3);
203 //
204 Wire.beginTransmission(BQ76930);
205 Wire.write(VC4_HI);
206 Wire.endTransmission();
207 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
208 int v4=Wire.read()<<8|Wire.read();
209 float vc4=GAIN*0.0001*(float)v4+(float)OFFSET*0.01;
210 Serial.print("V4 [V] = ");
211 Serial.println(vc4);
212 //
213 Wire.beginTransmission(BQ76930);
214 Wire.write(VC5_HI);
215 Wire.endTransmission();
216 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
217 int v5=Wire.read()<<8|Wire.read();
218 float vc5=GAIN*0.0001*(float)v5+(float)OFFSET*0.01;
219 Serial.print("V5 [V] = ");
220 Serial.println(vc5);
221 //
222 Wire.beginTransmission(BQ76930);
223 Wire.write(VC6_HI);
224 Wire.endTransmission();
225 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
226 int v6=Wire.read()<<8|Wire.read();
227 float vc6=GAIN*0.0001*(float)v6+(float)OFFSET*0.01;
228 Serial.print("V6 [V] = ");
```

```
229 Serial.println(vc6);
230 //
231 Wire.beginTransaction(BQ76930);
232 Wire.write(VC7_HI);
233 Wire.endTransmission();
234 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
235 int v7=Wire.read()<<8|Wire.read();
236 float vc7=GAIN*0.0001*(float)v7+(float)OFFSET*0.01;
237 Serial.print("V7 [V] = ");
238 Serial.println(vc7);
239 //
240 Wire.beginTransaction(BQ76930);
241 Wire.write(VC8_HI);
242 Wire.endTransmission();
243 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
244 int v8=Wire.read()<<8|Wire.read();
245 float vc8=GAIN*0.0001*(float)v8+(float)OFFSET*0.01;
246 Serial.print("V8 [V] = ");
247 Serial.println(vc8);
248 //
249 Wire.beginTransaction(BQ76930);
250 Wire.write(VC9_HI);
251 Wire.endTransmission();
252 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
253 int v9=Wire.read()<<8|Wire.read();
254 float vc9=GAIN*0.0001*(float)v9+(float)OFFSET*0.01;
255 Serial.print("V9 [V] = ");
256 Serial.println(vc9);
257 //
258 Wire.beginTransaction(BQ76930);
259 Wire.write(VC10_HI);
260 Wire.endTransmission();
261 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
262 int v10=Wire.read()<<8|Wire.read();
263 float vc10=GAIN*0.0001*(float)v10+(float)OFFSET*0.01;
264 Serial.print("V10 [V] = ");
265 Serial.println(vc10);
266 // Leitura da tensão do banco de baterias
267 Wire.beginTransaction(BQ76930);
268 Wire.write(BAT_HI);
269 Wire.endTransmission();
270 Wire.requestFrom(BQ76930, 2);
271 int bat=Wire.read()<<8|Wire.read();
272 float BAT=4*GAIN*0.0001*bat+10*OFFSET*0.01;
273 Serial.print("V pack= ");
274 Serial.println(BAT);
275 // Leitura dos registradores de configuração
276 Wire.beginTransaction(BQ76930);
```

```
277 Wire.write(SYS_STAT);
278 Wire.endTransmission();
279 Wire.requestFrom(BQ76930, 1);
280 int ss =Wire.read();
281 Serial.print("SYS_STAT = 0x");
282 Serial.println(ss, HEX);
283 //
284 Wire.beginTransmission(BQ76930);
285 Wire.write(SYS_CTRL1);
286 Wire.endTransmission();
287 Wire.requestFrom(BQ76930, 1);
288 int sc1 =Wire.read();
289 Serial.print("SYS_CTRL1 = 0x");
290 Serial.println(sc1, HEX);
291 //
292 Wire.beginTransmission(BQ76930);
293 Wire.write(SYS_CTRL2);
294 Wire.endTransmission();
295 Wire.requestFrom(BQ76930, 1);
296 int sc2 =Wire.read();
297 Serial.print("SYS_CTRL2 = 0x");
298 Serial.println(sc2, HEX);
299 //
300 Wire.beginTransmission(BQ76930);
301 Wire.write(CELLBAL1);
302 Wire.endTransmission();
303 Wire.requestFrom(BQ76930, 1);
304 int CB1=Wire.read();
305 Serial.print("CELL_BAL1= 0x");
306 Serial.println(CB1, HEX);
307 //
308 Wire.beginTransmission(BQ76930);
309 Wire.write(CELLBAL2);
310 Wire.endTransmission();
311 Wire.requestFrom(BQ76930, 1);
312 int CB2=Wire.read();
313 Serial.print("CELL_BAL2= 0x");
314 Serial.println(CB2, HEX);
315 //
316 Wire.beginTransmission(BQ76930);
317 Wire.write(PROTECT1);
318 Wire.endTransmission();
319 Wire.requestFrom(BQ76930,1);
320 int prot1=Wire.read();
321 Serial.print("PROTECT1 = 0x");
322 Serial.println(prot1, HEX);
323 //
324 Wire.beginTransmission(BQ76930);
```

```
325 Wire.write(PROTECT2);
326 Wire.endTransmission();
327 Wire.requestFrom(BQ76930,1);
328 int prot2=Wire.read();
329 Serial.print("PROTECT2 = 0x");
330 Serial.println(prot2, HEX);
331 //
332 Wire.beginTransmission(BQ76930);
333 Wire.write(PROTECT3);
334 Wire.endTransmission();
335 Wire.requestFrom(BQ76930,1);
336 int prot3=Wire.read();
337 Serial.print("PROTECT3 = 0x");
338 Serial.println(prot3, HEX);
339 //
340 Wire.beginTransmission(BQ76930);
341 Wire.write(OV_TRIP);
342 Wire.endTransmission();
343 Wire.requestFrom(BQ76930,1);
344 int ov_trip=Wire.read();
345 Serial.print("OV_TRIP = 0x");
346 Serial.println(ov_trip, HEX);
347 //
348 Wire.beginTransmission(BQ76930);
349 Wire.write(UV_TRIP);
350 Wire.endTransmission();
351 Wire.requestFrom(BQ76930,1);
352 int uv_trip=Wire.read();
353 Serial.print("UV_TRIP = 0x");
354 Serial.println(uv_trip, HEX);
355 //
356 Wire.beginTransmission(BQ76930);
357 Wire.write(CC_CFG);
358 Wire.endTransmission();
359 Wire.requestFrom(BQ76930,2);
360 int CC=Wire.read()<<8|Wire.read();
361 Serial.print("CC_CFG = 0x");
362 Serial.println(CC, HEX);
363 // Leitura do Coulomb Counter
364 // Ativar apenas quando houver descarga/carga das baterias
365 Wire.beginTransmission(BQ76930);
366 Wire.write(CC_HI);
367 Wire.endTransmission();
368 Wire.requestFrom(BQ76930,2);
369 int counter=Wire.read()<<8|Wire.read();
370 Serial.print("colomb counter= 0x");
371 Serial.println(counter, HEX);
372 // leitura das temperaturas
```

```

373 Wire.beginTransmission(BQ76930);
374 Wire.write(TS1_HI);
375 Wire.endTransmission();
376 Wire.requestFrom(BQ76930,2);
377 int TEMP1=Wire.read()<<8|Wire.read();
378 float vtemp1=TEMP1*0.000382;
379 float rtemp1=(10000*vtemp1)/(3.3-vtemp1);
380 if (rtemp1<8000){
381 rtemp1=30;
382 }
383 Serial.print("Temperatura 1 aprox. em °C = ");
384 Serial.println(rtemp1);
385 //
386 Wire.beginTransmission(BQ76930);
387 Wire.write(TS2_HI);
388 Wire.endTransmission();
389 Wire.requestFrom(BQ76930,2);
390 int TEMP2=Wire.read()<<8|Wire.read();
391 float vtemp2=TEMP2*0.000382;
392 float rtemp2=(10000*vtemp2)/(3.3-vtemp2);
393 if (rtemp2<8000){
394 rtemp2=30; }
395 Serial.print("Temperatura 2 aprox. em °C = ");
396 Serial.println(rtemp2);
397 //*****\\
398 //Estimação de carga
399 //Ativa apenas quando houver descarga/carga das baterias
400 //Nota: este código inicial só oferece resultados coerentes
    se
401 //o sistema for iniciado com as baterias totalmente
    carregadas
402 //possuindo aprox. 41V.
403 //Esta função não foi testada neste trabalho
404 unsigned long currentMillis = millis();
405 if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
406     previousMillis = currentMillis; // faz a contagem de 1s
407     Wire.beginTransmission(BQ76930);
408     Wire.write(CC_HI);
409     Wire.endTransmission();
410     Wire.requestFrom(BQ76930,2);
411     int counter=Wire.read()<<8|Wire.read();;
412     cc_2compl=~counter;
413     cc_uV==cc_2compl*8.44*10^-6;
414     int t=1; // tempo de intervalo de 1s
415     float Rsense=0.1; // resistencia shunt de 100m Ohms
416     SOC=SOC1-(cc_uV*t/Rsense)/(3.2*3600); //soc(t)=soc(t-1)-[I
        .(delta t)/Qn]
417     SOC1=SOC;

```

```

418     Serial.print("ESTADO DE CARGA= ");
419     Serial.println(SOC);
420     //*****\\
421
422     //código para limpar os bits de SYS_STAT
423     byte alert=ss&0b00010000;
424     if(alert>0) { //TRUE = pino alerta ativado
425         digitalWrite(led_ALERT, HIGH); // acende o led
426     }
427     byte dvc_ready=ss&0b00100000;
428     if(dvc_ready>0) { //dispositivo com falha
429         Wire.beginTransmission(BQ76930);
430         Wire.write(SYS_STAT);
431         Wire.write(ss); //seta o bit 5 do sys_stat
432         Wire.endTransmission();
433     }
434     byte uv=ss&0b00001000;
435     if(uv>0) { //dispositivo com falha
436         digitalWrite(led_UV, HIGH);
437         Wire.beginTransmission(BQ76930);
438         Wire.write(SYS_STAT);
439         Wire.write(ss); //seta o bit 3 do sys_stat
440         Wire.endTransmission();
441     }
442     byte ov=ss&0b00000100;
443     if(ov>0) { //dispositivo com falha
444         digitalWrite(led_OV, HIGH);
445         Wire.beginTransmission(BQ76930);
446         Wire.write(SYS_STAT);
447         Wire.write(ss); //seta o bit 2 do sys_stat
448         Wire.endTransmission();
449     }
450     byte scd=ss&0b00000010;
451     if(scd>0) { //dispositivo com falha
452         digitalWrite(led_SCD, HIGH);
453         Wire.beginTransmission(BQ76930);
454         Wire.write(SYS_STAT);
455         Wire.write(ss); //seta o bit 1 do sys_stat
456         Wire.endTransmission();
457     }
458     byte ocd=ss&00000001;
459     if(ocd>0) { //dispositivo com falha
460         digitalWrite(led_OCD, HIGH);
461         Wire.beginTransmission(BQ76930);
462         Wire.write(SYS_STAT);
463         Wire.write(ss); //seta o bit 0 do sys_stat
464         Wire.endTransmission();
465     }

```

```

466 //*****\
467 //BALANCEAMENTO DAS CÉLULAS
468
469 //define qual a menor tensão
470 if (vcell1<vcell2){V_min==vcell1;}
471 else {V_min==vcell2;}
472 if(V_min>vcell3){V_min==vcell3;}
473 if(V_min>vcell4){V_min==vcell4;}
474 if(V_min>vcell5){V_min==vcell5;}
475 if(V_min>vcell6){V_min==vcell6;}
476 if(V_min>vcell7){V_min==vcell7;}
477 if(V_min>vcell8){V_min==vcell8;}
478 if(V_min>vcell9){V_min==vcell9;}
479 if(V_min>vcell10){V_min==vcell10;}
480 //verifica se a diferença entre as células é maior que a loterâ
      ncia de 100mV
481 int tol=100;
482 if(bal=0){
483     if(vcell1-V_min>tol){ // verifica se a tensão é maior que
          referência
484         dado==0x01; // seta o bit referente para realizar o
          balancemanto
485         bal=1; digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
486 if(bal=0){
487     if(vcell2-V_min>tol){
488         dado==0x02;
489         bal=1;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
490 if(bal=0){
491     if(vcell3-V_min>tol){
492         dado==0x04;
493         bal=1;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
494 if(bal=0){
495     if(vcell4-V_min>tol){
496         dado==0x08;
497         bal=1;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
498 if(bal=0){
499     if(vcell5-V_min>tol){
500         dado==0x10;
501         bal=1;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
502 if(bal=0){
503     if(vcell6-V_min>tol){
504         dado==0x01;
505         bal=2;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
506 if(bal=0){
507     if(vcell7-V_min>tol){
508         dado==0x02;
509         bal=2;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}}
510 if(bal=0){

```

```
511   if(vcell18-V_min>tol){
512     dado==0x04;
513     bal=2;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}
514   if(bal=0){
515     if(vcell19-V_min>tol){
516       dado==0x08;
517       bal=2;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}
518   if(bal=0){
519     if(vcell110-V_min>tol){
520       dado==0x10;
521       bal=2;digitalWrite(led_BALANC, HIGH);}
522     //transmissão de dados
523   if(bal=1){
524     if((vcell11-V_min<=tol)|| (vcell12-V_min<=tol)|| (vcell13-V_min<=
525         tol)|| (vcell14-V_min<=tol)|| (vcell15-V_min<=tol)){
526       dado==0x00;
527       bal=0;
528       digitalWrite(led_BALANC, LOW);}
529       Wire.beginTransaction(BQ76930);
530       Wire.write(CELLBAL1); // CONFIG register
531       Wire.write(dado); // Setting register
532       Wire.endTransmission();
533   }
534   if(bal=2){
535     if((vcell16-V_min<=tol)|| (vcell17-V_min<=tol)|| (vcell18-V_min<=
536         tol)|| (vcell19-V_min<=tol)|| (vcell110-V_min<=tol)){
537       dado==0x00;
538       bal=0;
539       digitalWrite(led_BALANC, LOW);}
540       Wire.beginTransaction(BQ76930);
541       Wire.write(CELLBAL2);
542       Wire.write(dado);
543       Wire.endTransmission();
544   }
545   delay(1000);
546 }
547 }
```