

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

VILSON GARCIA

CONCEPÇÃO, ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
GERENCIAMENTO PARA BATERIAS DE ÍON LÍTIO, COM MONITORAMENTO DE
FORMA REMOTA

Joinville

2021

VILSON GARCIA

CONCEPÇÃO, ANÁLISE E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
GERENCIAMENTO PARA BATERIAS DE ÍON LÍTIO, COM MONITORAMENTO DE
FORMA REMOTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Diego Santos Greff

Joinville

2021

Dedico este trabalho à minha família, por sempre terem acreditado no meu potencial e sempre estarem torcendo pela minha vitória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus e à São Jose por terem iluminado e abençoado meu caminho ao longo do curso de graduação.

Aos meus professores e mestres, pela dedicação prestada em todos os momentos ao decorrer do curso de engenharia mecatrônica.

Ao meu orientador Dr. Diego Santos Greff, pela paciência e auxílio nos momentos que surgiam dúvidas ao longo de desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório GREEN (Group of Renewable Energy) por compartilharem suas experiências e, com isso, tornarem o processo de aprendizagem mais enriquecedor.

Aos meus familiares e amigos, por todo apoio nos momentos difíceis.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso ou pessoas fracassadas. O que existe são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles” (CURY, 2004).

RESUMO

As baterias estão cada vez mais presentes na sociedade moderna, ocorrendo o aumento da densidade de energia e vida útil das baterias, levando à necessidade da gestão energética das mesmas, a fim de evitar situações perigosas para o usuário. Este estudo tem como objetivo desenvolver um protótipo de sistema de gerenciamento de baterias (BMS) com monitoramento de maneira remota, para utilizá-lo em baterias de íon lítio. Assim, justifica-se este trabalho devido à necessidade de proteção das baterias e de melhoria no desempenho destas, por meio de: monitoramento de parâmetros, proteção da bateria contra sobrecargas na sua utilização, controle de carga e descarga, e principalmente, fazer o equilíbrio da carga entre suas células. Além do BMS, foi implementado um aplicativo para monitorar as informações da bateria de forma remota. O trabalho consiste em um estudo da arte, desenvolvimento do protótipo e realização dos testes de validação. Ao final do trabalho, são apresentados os resultados e recomendações para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Baterias. Sistema de Gerenciamento. Microcontroladores. Íon Lítio.

ABSTRACT

Batteries are increasingly present in modern society, with an increase in energy density and state of health, leading to the need to reduce them to avoid dangerous situations for the user. This study aims to develop a prototype of a battery management system (BMS) with remote monitoring, for use in lithium-ion batteries. Thus, this work is justified due to the need to protect the batteries and improve their performance, through monitoring of parameters, protection of the battery against overload in use, control of charge and discharge, and mainly, to balance the charge between your cells. In addition to the BMS, an application was implemented to monitor battery information remotely. The work consists of studying the art, developing the prototype, and carrying out validation tests. At the end of the work, results and recommendations for future work are needed.

Keywords: Batteries. Management system. Microcontrollers. Lithium Ion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes básicos de uma célula eletroquímica.....	14
Figura 2 – Evolução das baterias secundárias	17
Figura 3 – Estrutura genérica de um sistema de gerenciamento de baterias	19
Figura 4 – Circuito amplificador diferencial para medição de corrente por resistência shunt .	20
Figura 5 – Circuito de um amplificador diferencial para medição de tensão em células.....	21
Figura 6 – Desequilíbrio na tensão nas células da bateria.....	23
Figura 7 – Carga por tensão constante, incluindo limite de corrente, com resposta da bateria de tensão e corrente	25
Figura 8 – Carga com corrente constante e resposta em tensão e corrente	25
Figura 9 – Carga por CC-CV com resposta em tensão e corrente.....	26
Figura 10 - Diagrama de blocos do circuito desenvolvido	29
Figura 11 – Diagrama de pinos do BQ77PL900	30
Figura 12 – Fluxograma dos modos de operação: <i>host</i> ou <i>stand-alone</i> (independente)	31
Figura 13 – Circuito de carga e descarga, com realce aos MOSFET's.....	33
Figura 14 – Modo de operação do balanceamento quando opera no modo independente	34
Figura 15 – Configuração das portas e botão em um Arduino Uno	35
Figura 16 – Células de bateria íon lítio modelo 18650.....	35
Figura 17 – Módulo Wi-Fi ESP8266 conectado ao regulador de tensão	36
Figura 18 – Esquemático de funcionamento do Blynk	37
Figura 19 – <i>Layout</i> e resultado final do adaptador para o BQ77PL900.....	39
Figura 20 – Primeiro protótipo do BMS, montado na <i>proto-board</i>	39
Figura 21 – <i>Layout</i> 3D do segundo protótipo.....	40
Figura 22 – Segundo protótipo do BMS, completo com todos os componentes.....	41
Figura 23 – Circuito montado para o teste dos MOSFET's de carga e descarga	42
Figura 24 – Monitoramento da comunicação I2C com o CI	43
Figura 25 – Circuito montado para a realização dos testes em bancada	45
Figura 26 – Aplicativo de monitoramento criado com o auxílio do Blynk App.....	47
Figura 27 – Sistema BMS completo montado para validação do protótipo final.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características de cada um dos tipos de bateria	18
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS – *Battery Management System*

CI – *Circuito Integrado*

CV – *Constant Voltage*

CC – *Constant Current*

CC/CV – *Constant Current/Constant Voltage*

EEPROM – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*

EVM – *Evaluation Module*

GREEN – *Group of Renewable Energy*

I2C – *Inter-Integrated Circuit*

IoT – *Internet of Things*

Li-ion – *Íons de Lítio*

MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

NiCd – *Níquel Cádmio*

NiMH – *Níquel-Hidreto Metálico*

NTC – *Negative Temperature Coefficient*

OCD – *Overcurrent in Discharge*

OCV – *Open Circuit Voltage*

OV – *Overvoltage*

Pb-Acid – *Chumbo-Ácido*

PTC – *Positive Temperature Coefficient*

PTH – *Pin Through Hole*

SCD – *Short Circuit in Discharge*

SMD – *Surface-Mount Device*

SoC – *State of Charge*

SoH – *State of Health*

UV – *Undervoltage*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. BATERIAS	14
2.1. ESTRUTURA, CLASSIFICAÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS	14
2.2. TIPOS DE BATERIAS	16
3. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS	19
3.1. MONITORAMENTO DE CÉLULAS	20
3.1.1. Técnica de medição de corrente	20
3.1.2. Técnica de medição de tensão	21
3.2. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL	22
3.3. BALANCEAMENTO DE CÉLULAS	22
3.4. GERENCIAMENTO DE TEMPERATURA.....	23
3.5. CONTROLE DE CARGA.....	24
3.5.1. Carregamento por tensão constante (<i>Constant Voltage - CV</i>)	24
3.5.2. Carregamento por corrente constante (<i>Constant Current - CC</i>)	25
3.5.3. Carregamento por corrente constante e tensão constante (<i>Constant Current - CC / Constant Voltage - CV</i>)	26
3.6. ESTIMATIVA DO ESTADO DE CARGA	27
3.7. SEGURANÇA E PROTEÇÃO DE BATERIAS	28
4. METODOLOGIA	29
4.1 O BQ77PL900	30
4.2 O MICROCONTROLADOR	34
4.3 BATERIA ÍON LÍTIO	35
4.4 MÓDULO WI-FI – ESP8266.....	36
4.5 BLYNK	36
5. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	38
5.1 PROTÓTIPOS	38
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
6. CONCLUSÃO	49

REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DO SEGUNDO PROTÓTIPO.....	52
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO BMS NO PROCESSO DE CARGA E DESCARGA.....	53
APÊNDICE C – ALGORITMO IMPLEMENTADO.....	54
ANEXO A – DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO BQ77PL900.....	65

1. INTRODUÇÃO

As baterias estão cada vez mais presentes na sociedade moderna, e isso vem causando a redução do preço e evolução dos seus métodos de produção. Atualmente, existem várias aplicações e sistemas elétricos que utilizam baterias recarregáveis como, por exemplo: computadores portáteis, celulares e veículos elétricos. Estas aplicações podem usar várias tecnologias de baterias, tais como: Chumbo-ácido (Pb-Acid), Níquel-cádmio (NiCd), Níquel Hidreto Metálico (NiMH), Íon Lítio (Li-ion), entre outras (ALVES, 2015).

Diversas outras aplicações têm sido favorecidas por esta evolução. Em localidades mais isoladas, em que não há o fornecimento de energia elétrica, a produção de energia é realizada por meio fontes de energia renováveis. Nestes casos, os sistemas de armazenamento são essenciais para armazenar a energia gerada e utilizá-la nos momentos em que a produção de energia é menor ou inexistente (WHITTINGHAM, 2012).

Mais recentemente, com a crescente preocupação ambiental e o aumento desenfreado no preço dos combustíveis, os veículos elétricos e híbridos mostram-se como uma alternativa aos veículos a combustão. A crescente procura por estes veículos criou um novo mercado para as baterias, incentivando a pesquisa e desenvolvimento de baterias com cada vez maior densidade energética e segurança, permitindo aos veículos elétricos atingirem maiores autonomias (EHSANI *et al.*, 2009).

Todos os casos anteriores têm em comum a necessidade de um sistema de armazenamento de energia, sendo que os mais usados para estes fins são as baterias. A evolução das baterias, desde a sua criação até a atualidade, culminou num aumento da densidade de energia e vida útil que, por sua vez, levou à necessidade da gestão energética das mesmas. Esta necessidade acentua-se devido ao fato de que a utilização indevida de algumas tecnologias baterias, pode criar, em casos extremos, situações perigosas para o utilizador bem como levar à danificação das mesmas e ao não aproveitamento de todo o seu potencial energético (ALVES, 2015).

Nesse cenário, a motivação deste estudo surgiu diante dos relevantes papéis tanto dos sistemas de armazenamento de energia quanto dos respectivos sistemas de gerenciamento, os quais estão sendo cada vez mais desenvolvidos e aplicados no mundo todo.

Desse modo, a realização deste projeto justifica-se devido à necessidade de proteção das baterias e de melhoria no desempenho destas, por meio de: monitoramento de parâmetros, proteção da bateria contra sobrecargas na sua utilização, controle de carga e descarga, e

principalmente, fazer o equilíbrio da carga entre suas células. Com isso, o BMS (*Battery Management System*) é utilizado para atingir os requisitos citados anteriormente, em diversas aplicações e para diferentes tipos de baterias.

Assim, este trabalho envolve a realização de um estudo da arte e o desenvolvimento de um protótipo. Para a pesquisa bibliográfica nos referenciais teóricos, fez-se necessária a consulta em: sites, livros, revistas e artigos científicos relacionados ao tema abordado. A parte prática, por sua vez, constitui-se na aplicação da teoria para o desenvolvimento do protótipo e realização dos testes de validação. Também será implementado um aplicativo para possibilitar monitorar as informações da bateria de forma remota.

1.1. OBJETIVOS

Para buscar uma solução em relação à problemática de como garantir, durante o uso das baterias, a segurança, a máxima eficiência e monitoramento dos seus principais parâmetros, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos:

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo de sistema de gerenciamento de baterias (BMS) com monitoramento dos principais parâmetros de maneira remota, para utilizá-lo em baterias de íon lítio.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Compreender os conceitos básicos relacionados às baterias, suas características e as vantagens e desvantagens dos principais tipos de baterias;
- Entender o funcionamento de um sistema de gerenciamento de baterias e suas principais funções, bem como as tecnologias aplicadas em BMS's atualmente;
- Implementar um protótipo de BMS em placa de circuito impresso, realizando a integração com o algoritmo implementado software;
- Desenvolver um aplicativo de celular que receba as informações básicas das baterias: tensão, corrente e temperatura das células;
- Validar o protótipo através de testes experimentais.

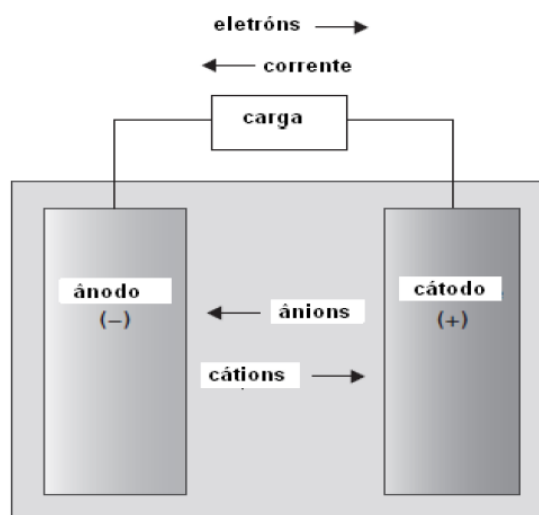
2. BATERIAS

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais relacionados às baterias, sua estrutura química, classificação e comparação entre os tipos de baterias mais utilizados na atualidade.

2.1. ESTRUTURA, CLASSIFICAÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS

Em seu processo, a bateria transforma energia química em energia elétrica, sendo que elas são compostas por uma ou mais células eletroquímicas que acompanham pelo menos três elementos ativos, que são: ânodo, cátodo e eletrólito. O ânodo (negativo) libera elétrons, o cátodo (positivo) recebe os elétrons, e a solução eletrolítica contém os íons móveis, sendo com cargas positivas e também negativas (cátions e ânions, respectivamente). Para que haja a movimentação de cargas entre seus terminais é necessário que aconteça o fechamento do circuito, e os íons da solução eletrolítica são os responsáveis por completar o circuito entre as células da bateria (ROOT, 2010).

Figura 1 – Componentes básicos de uma célula eletroquímica



Fonte: Adaptado de Root (2010, p. 51).

Permanecendo o circuito fechado, tem-se a movimentação de elétrons através do circuito externo do ânodo para o cátodo, sendo que os ânions da solução eletrolítica (íons

negativamente carregados) se movem do cátodo da célula para o ânodo, enquanto que os cátions (íons positivamente carregados) se movem do ânodo para o cátodo (ROOT, 2010).

As características da bateria, tais como tensão e capacidade, estão condicionadas a vários fatores, dentre eles estão os elementos químicos utilizados para compor o cátodo e o ânodo (ROOT, 2010).

Algumas baterias permitem apenas um ciclo de carga, ou seja, não permitem recarga, sendo estas denominadas baterias primárias. Já as baterias que aceitam vários ciclos de recarga são as secundárias (LINDEN *et al.*, 2001). Neste trabalho serão abordados apenas os arranjos de baterias secundárias e, por isso, esse termo será omitido.

Para diferenciar os tipos de baterias e suas características, é necessário compreender alguns conceitos importantes, como definido por Bergveld (2001):

- Célula: unidade eletroquímica básica usada para gerar energia elétrica a partir da energia química armazenada ou o inverso, ou seja, armazenar energia elétrica na forma de energia química.
- Bateria: duas ou mais células conectadas num arranjo em série e/ou paralelo, com o intuito de obter a tensão de operação necessária e a capacidade para uma determinada carga. O termo bateria também é frequentemente usado para células individuais. Essa denominação também será adotada neste trabalho, exceto quando for necessário distinguir células e baterias.
- *Pack* (pacote) de baterias: dependendo da tensão desejada e da corrente que será consumida pela carga, pode ser necessário conectar várias baterias idênticas ou células individuais idênticas, seja em série e/ou paralelo e isso é denominado *pack* (pacote) de baterias.
- Densidade de energia [Wh/l]: quantidade máxima de energia que pode ser armazenada por unidade de volume da bateria, expressa em watt-hora por litro;
- Energia específica [Wh/kg]: quantidade máxima de energia que pode ser armazenada por unidade de massa da bateria, expressa em watt-hora por quilograma;
- Capacidade [Ah]: quantidade de corrente elétrica que a bateria é capaz de fornecer no período de tempo de uma hora, expressa em ampères-hora;
- Taxa-C: é uma relação entre a corrente de carga ou descarga e a capacidade da bateria. Em outras palavras, é a medida da velocidade de carregamento ou descarregamento de uma bateria em relação à sua capacidade máxima. Por exemplo: se uma bateria totalmente carregada, com capacidade máxima de 5Ah,

fornece uma corrente de 5A, significa que ela está descarregando à taxa de 1C e a mesma irá descarregar totalmente em 1 hora;

- Ciclos de vida: quantidade de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada, sob condições específicas, sem que a capacidade atinja o valor mínimo, geralmente de 80% da capacidade nominal;
- Tensão de corte: tensão mínima, especificada pelo fabricante, que a bateria pode atingir quando está sendo descarregada, sem ser danificada;
- Taxa de autodescarga: perda da energia acumulada na bateria, geralmente expressa por mês, em porcentagem relacionada à capacidade nominal, a uma determinada temperatura;
- Efeito memória: declínio na capacidade efetiva devido a 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, após alguns ciclos completos de carga/descarga a bateria pode restaurar sua capacidade total.

O entendimento desses termos faz-se necessário para classificar os tipos de bateria de acordo com a sua aplicabilidade, levando em conta as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

2.2. TIPOS DE BATERIAS

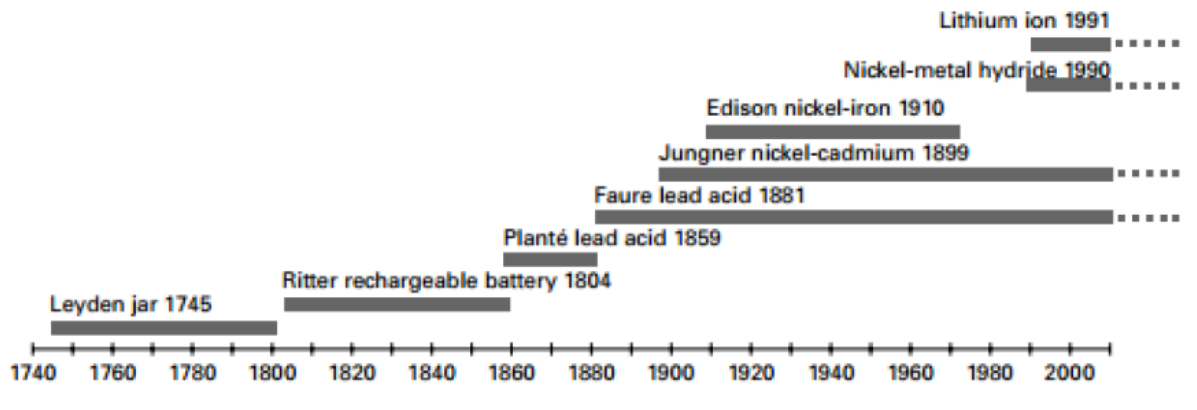
O aparecimento das baterias começou no ano de 1800, inventadas por Alessandro Volta, quando publicou os seus primeiros estudos. Alguns anos depois, surgiram as primeiras baterias recarregáveis. Desde então, as tecnologias evoluíram e foram criados diversos tipos de baterias secundárias, conforme pode ser visto na Figura 2.

As baterias podem ser classificadas de acordo com o tipo de metal e eletrólito empregados na sua fabricação. Dentre os vários tipos de baterias existentes no mercado, as mais conhecidas são: Chumbo-ácido (Pb-Acid), Níquel-cádmio (NiCd), Níquel Hidreto Metálico (NiMH) e Íon Lítio (Li-ion) (LINDEN et al., 2001).

A bateria de Chumbo-ácido (Pb-Acid) apresenta como principais vantagens: a facilidade de produção, a segurança e o baixo custo. Todavia, essa tecnologia apresenta várias limitações e desvantagens. Em termos físicos, observa-se um peso elevado e o material empregado é prejudicial ao meio ambiente. Quanto ao desempenho, há problemas com a baixa

densidade de energia e com a limitação de armazenamento em condição descarregada (LINDEN *et al.*, 2001).

Figura 2 – Evolução das baterias secundárias



Fonte: Root (2010, p. 34).

Já a bateria de Níquel-cádmio (NiCd) é uma tecnologia amplamente empregada comercialmente. Caracteriza-se pela baixa densidade de energia e alta capacidade de carga. E a principal desvantagem desta tecnologia é o efeito memória, que requer o uso até o total descarregamento, o que resulta em diminuição da vida útil quando não respeitado. Além disso, o material empregado Cádmio é tóxico e não adequado em termos ambientais. Como vantagens estão o rápido carregamento e o alto número ciclos de carga e descarga (LINDEN *et al.*, 2001).

As baterias de Níquel Hidreto Metálico (NiMH) possuem uma alta densidade de energia, um menor efeito memória quando comparadas às baterias de NiCd e fazem o uso de um metal não tóxico. Entretanto, o processo de autodescarga é alto e o custo também é maior em relação à tecnologia NiCd (LINDEN *et al.*, 2001).

Por fim, as baterias de Íon Lítio (Li-ion) são as mais utilizadas na atualidade, principalmente por esta oferecer maior tensão nominal, energia específica, densidade de energia, menor peso e suportar mais ciclos de carga/descarga, além de não possuir efeito memória. No entanto, apresentam como desvantagem: alto custo devido aos materiais e métodos de produção, não aceitam sobrecargas como as de chumbo-ácido, eletrólito pode ser inflamável (devem evitar altas temperaturas) e os BMS's para este tipo de bateria devem ser mais robustos para garantir que não ocorram sobrecargas (LINDEN *et al.*, 2001).

A Tabela 1 apresenta uma comparação das características dos diferentes tipos de baterias citados anteriormente.

Tabela 1 – Principais características de cada um dos tipos de bateria

Índice	Pb-Acid	NiCd	NiHM	Li-ion
<i>Tensão nominal [V]</i>	2	1,2	1,2	3,6
<i>Energia específica [Wh/kg]</i>	30 ~ 35	30 ~ 35	35 ~ 65	100 ~ 160
<i>Densidade de energia [Wh/L]</i>	130	150	200	270 ~ 360
<i>Ciclos de vida</i>	200	500	500 ~ 1000	500 ~ 2000
<i>Temperatura [°C]</i>	-10 ~ 50	0 ~ 50	0 ~ 60	-20 ~ 70
<i>Efeito memória</i>	Não	Sim	Sim	Não
<i>Impacto ambiental</i>	Alto	Alto	Baixo	Baixo

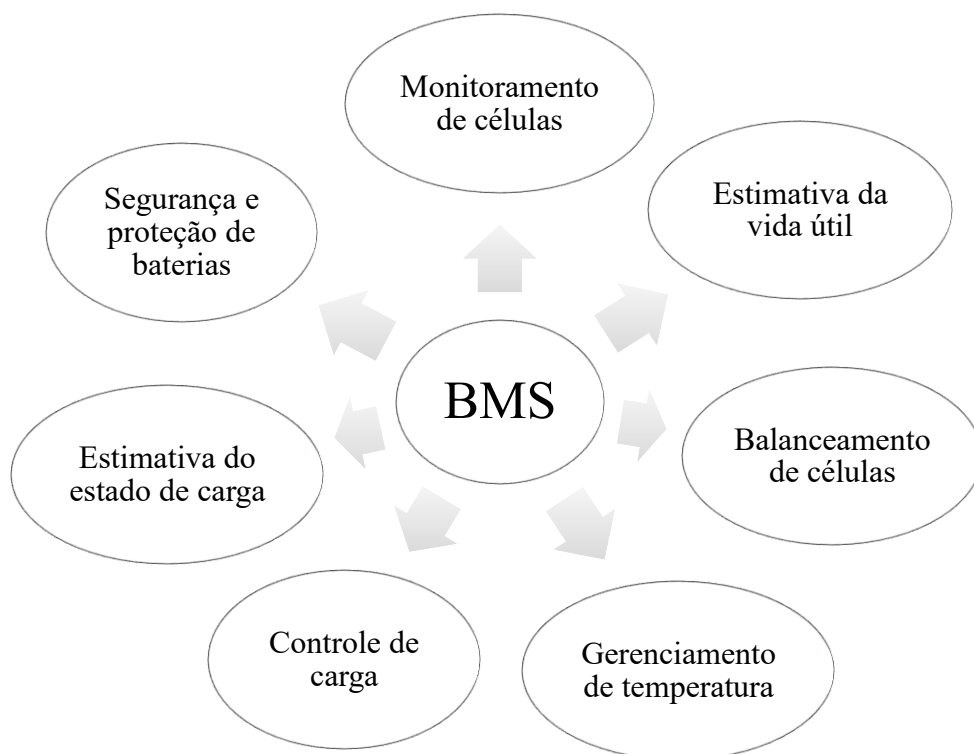
Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2015, p. 2454).

O foco deste trabalho será as baterias de íons de lítio por serem as mais utilizadas na atualidade e, também, devido ao seu excelente desempenho quando comparado aos outros tipos, conforme visto na tabela acima.

3. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIAS

O sistema de gerenciamento de baterias, mais conhecido por BMS (sigla para *Battery Management System*), é um elemento essencial para tornar o uso da bateria mais eficiente, confiável e segura. O BMS atua sobre diversos parâmetros, não apenas controlando ativamente as condições operacionais da bateria para prolongar sua vida útil e garantir sua segurança, mas também fornece uma estimativa do estado de carga (*State of Charge – SoC*) e da vida útil (*State of Health – SoH*) (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013). Assim, o BMS deve implementar uma série de funções para cumprir as tarefas mencionadas anteriormente, sendo apresentado na Figura 3 uma estrutura genérica.

Figura 3 – Estrutura genérica de um sistema de gerenciamento de baterias



Fonte: Adaptado de Rahimi-Eichi *et al.* (2013, p. 7).

No entanto, os recursos e características implementadas num BMS estão diretamente ligados ao tipo de tecnologia de bateria que está sendo gerenciada. A complexidade e sofisticação deste sistema depende da quantidade das funções que este possui, sendo que alguns

recursos podem ou não estarem presentes em sistemas comerciais ou naqueles desenvolvidos para aplicações específicas (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

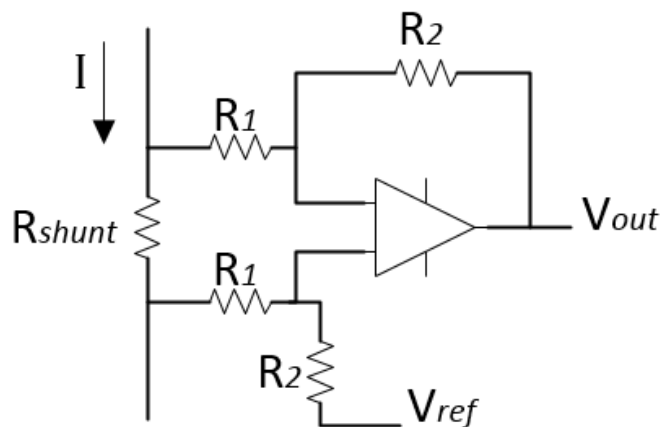
3.1. MONITORAMENTO DE CÉLULAS

A premissa para realizar as tarefas do BMS é, antes de tudo, a aquisição da corrente e tensão. Para isso, diversos fabricantes desenvolvem circuitos integrados para esse monitoramento, podendo ser ajustáveis de acordo com as necessidades de cada aplicação. As técnicas utilizadas para medir a tensão e corrente variam de acordo com o tipo de tecnologia de bateria empregada na aplicação (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

3.1.1. Técnica de medição de corrente

A medição de corrente, em geral, é realizada de duas maneiras: por meio de uma resistência shunt ou sensores de efeito hall. A primeira técnica consiste em medir a queda de tensão em um resistor de baixo valor (*shunt*) adicionado ao circuito. Assim, sabendo a tensão e o valor da resistência será possível calcular a corrente. No entanto, devido ao fato de o resistor *shunt* ser de baixo valor, a queda de tensão nesse componente também é baixa, sendo necessária a utilização de um circuito amplificador para obter níveis de tensão adequados e evitar erros de medição ou ruídos (INFINEON INC, 2009).

Figura 4 – Circuito amplificador diferencial para medição de corrente por resistência shunt



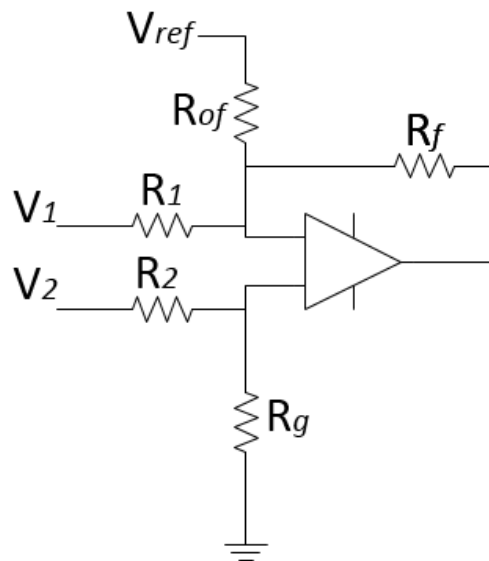
Fonte: Oening (2017, p. 30).

Já o sensor “*Hall*” produz um sinal que é diretamente proporcional à densidade de fluxo magnético que passa pelo mesmo, gerando uma relação entre a corrente imposta na entrada e a grandeza que o sensor converte na saída. A saída pode ser em tensão ou corrente, sendo que, quando em corrente é adicionada uma resistência para medir a queda de tensão provocada por essa corrente de saída (INFINEON INC, 2009).

3.1.2. Técnica de medição de tensão

Os *packs* de baterias são formados por diversas baterias conectadas em série ou paralelo, portanto existe uma dificuldade em medir a tensão em cada célula. O principal método é a medição direta que utiliza amplificadores diferenciais acoplados às células que compõem a bateria, podendo ser necessária a utilização de um divisor de tensão para ajustar a tensão a valores adequados à leitura pelo conversor analógico-digital (INFINEON INC, 2009).

Figura 5 – Circuito de um amplificador diferencial para medição de tensão em células



Fonte: Oening (2017, p. 31).

Para medir a tensão existem outras soluções, tais como optoacopladores e sensores de efeito *hall*, porém a mais simples e utilizada é a medição direta (INFINEON INC, 2009).

3.2. ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL

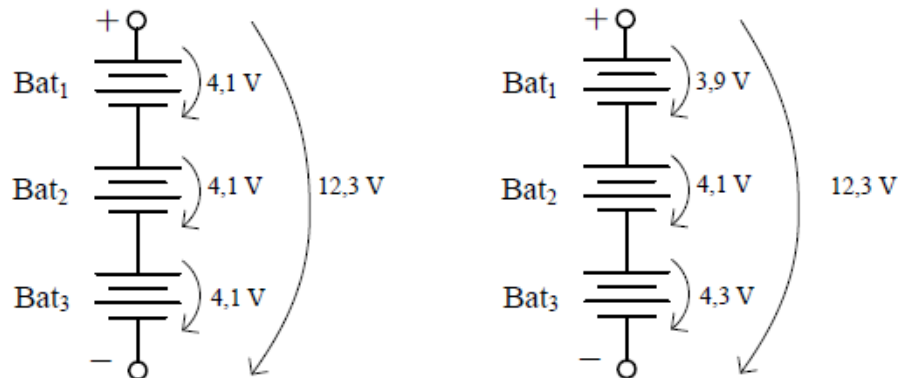
A vida útil (*State of Health* – SoH) de uma bateria é definida como a capacidade de armazenar energia em relação à sua capacidade inicial. Devido aos vários ciclos de carga e descarga, a bateria vai se desgastando e o seu desempenho tende a diminuir, fazendo com que a bateria precise ser substituída, pois nessa condição a mesma não efetua sua função de forma adequada. Por esse motivo, a estimativa da vida útil é importante para detectar células defeituosas ou degradadas, possibilitando ao usuário ter a informação do momento que deve realizar a troca da bateria (LE; TANG, 2011).

Existem vários métodos para estimar a vida útil da bateria, embora seja uma tarefa complexa e os métodos disponíveis não são totalmente confiáveis. Um dos métodos a serem utilizados consiste em utilizar a medição da impedância para uma larga faixa de espectro de frequência e, com isso, é possível obter informações sobre a degradação dos materiais que compõem a bateria. Outro método, mais simples que o anterior, relaciona a capacidade atual e nominal da bateria indicada pelo fabricante, pois a capacidade é um dos parâmetros que diminui com o tempo (BARSUKOV *et al.*, 2006). Estes métodos permitem detectar células defeituosas em um banco de baterias e embora tenha havido muito progresso nessa área, os métodos são incertos e precisam de desenvolvimento.

3.3. BALANCEAMENTO DE CÉLULAS

Em diversas aplicações é útil fazer associações de baterias quer em paralelo para aumentar a capacidade, quer em série para aumentar a tensão em seus terminais. Cada célula é distinta devido ao seu processo fabricação, portanto, pode apresentar variações na capacidade, tensão e resistência interna. Durante o carregamento, se uma célula atingir sua carga completa antes que as outras, sofrerá sobrecarga enquanto as demais células atingem sua carga total. Da mesma forma, a célula com menor capacidade irá descarregar antes das outras. Essas variações de tensão muitas vezes são percebidas apenas ao medir a tensão nas células individuais, pois é possível que a tensão no pack de baterias não apresente desequilíbrio mesmo que a tensão nas células individuais seja divergente (SPELTINO *et al.*, 2010). A ilustração desse problema pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 – Desequilíbrio na tensão nas células da bateria



Fonte: Oening (2017, p. 32).

Para reduzir esse efeito e prolongar a vida útil da bateria, deve ser desenvolvido um mecanismo eficaz de balanceamento de células que mantenha os níveis de capacidade das células individuais em uma bateria o mais próximo possível. Os principais métodos de balanceamento de células podem ser separados em dois tipos: dissipativo e não dissipativo. Ambos os métodos são dedicados a diminuir ou até mesmo eliminar o desequilíbrio de tensão nas células (SPELTINO *et al.*, 2010).

Os métodos dissipativos possuem baixa eficiência, pois utilizam-se elementos resistivos para igualar a tensão nas células, extraíndo o excesso de energia das células e dissipando-o na forma de calor, por meio dos resistores. Já os métodos não dissipativos são considerados mais eficientes, visto que utilizam transformadores, indutores ou capacitores para transmitir a energia em excesso de uma célula para outra com menos energia, até que ambas atinjam a mesma tensão. Por isso, essa técnica é mais complexa que a anterior (SPELTINO *et al.*, 2010).

3.4. GERENCIAMENTO DE TEMPERATURA

A temperatura é um fator importante na operação de uma bateria, pois além do problema de segurança definido pela faixa de temperatura, a eficiência da bateria também é afetada pela temperatura ambiente devido à degradação de sua capacidade e ao aumento da resistência interna.

Os parâmetros importantes da bateria, tais como estado de carga e vida útil, são influenciados pela sua temperatura de operação. Assim, faz-se necessário monitorar a

temperatura das células. A solução mais utilizada são termistores, que são componentes cuja resistência varia com a temperatura, sejam eles com coeficiente de temperatura positivo ou negativo. Caso a resistência seja diretamente proporcional à temperatura, neste caso os termistores são denominados PTC (*Positive Temperature Coefficient*) e caso seja inversamente proporcional, são denominados NTC (*Negative Temperature Coefficient*) (BERGVELD, 2001).

A necessidade de dissipar o calor produzido pelas células da bateria devido a reações eletroquímicas será maior quando várias células forem compactadas em um *pack* de baterias. O gerenciamento térmico permite determinar a distribuição de calor dentro da bateria e incorporar canais para remover o calor usando ar ou um líquido, se necessário (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

3.5. CONTROLE DE CARGA

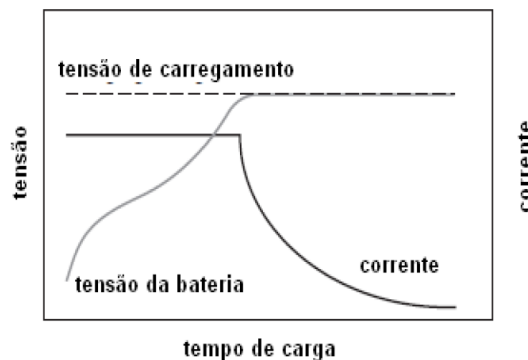
Na construção de um equipamento para carregamento de baterias, a implementação de controle de carga é uma tarefa importante, pois no processo de carga devem ser consideradas as limitações específicas para cada tipo de bateria, até mesmo nos dispositivos de carregamento de uso geral. A falha no carregamento de uma bateria pode levar ao mau funcionamento, perda de desempenho, vazamentos, incêndio ou explosão. Por isso, o BMS deve ter esse recurso de gerenciar, otimizar e proteger a bateria, controlando a taxa de carregamento em conformidade com as limitações químicas e estruturais da mesma (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

Existem diferentes algoritmos de carregamento para diferentes baterias. Dentre os existentes, os mais comuns são: tensão constante, corrente constante e corrente constante seguido de tensão constante (ROOT, 2010).

3.5.1. Carregamento por tensão constante (*Constant Voltage - CV*)

Neste método de carregamento controla-se a tensão durante a carga da bateria e a corrente de carga é limitada por seus parâmetros internos. A tensão de carga é ajustada para um nível em que se carregue a bateria o mais rápido possível, respeitando os limites de tensão da célula e temperatura, para não gerar reações indesejáveis, tais como sobreaquecimento, carregamento insuficiente ou mesmo causar danos à bateria. Para que isso não ocorra, a corrente é limitada no início do processo.

Figura 7 – Carga por tensão constante, incluindo limite de corrente, com resposta da bateria de tensão e corrente



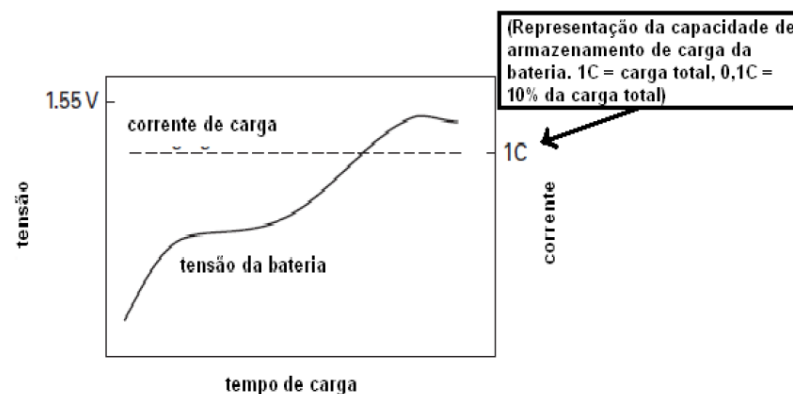
Fonte: Adaptado de Root (2010, p. 188).

No momento em que se inicia o processo de carga por esse método, a corrente pode ir a níveis muito elevados, gerando aquecimento e provocando diminuição da vida útil da bateria. Por isso, conforme a Figura 7, no início do processo a corrente é limitada pela fonte de alimentação para evitar que ela atinja valores altos. A corrente aplicada diminui à medida que a bateria atinge sua capacidade total e finaliza o processo de carga (ROOT, 2010).

3.5.2. Carregamento por corrente constante (*Constant Current – CC*)

Neste método é aplicado uma corrente constante na bateria até ela atingir a carga completa, conforme a Figura 8 que demonstra o processo de carregamento utilizando essa técnica. O gráfico abaixo mostra a carga com corrente constante, sendo a resposta em tensão e em corrente da bateria.

Figura 8 – Carga com corrente constante e resposta em tensão e corrente



Fonte: Adaptado de Root (2010, p. 190).

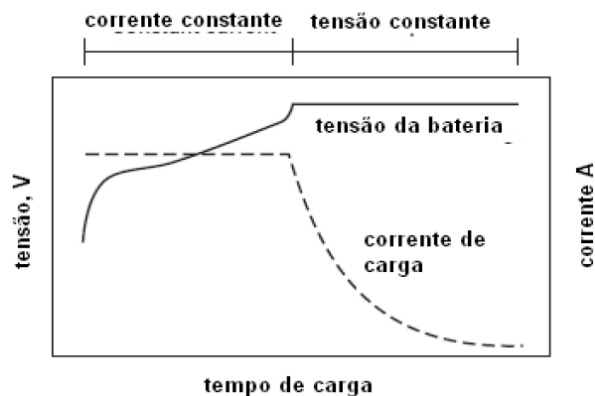
Apesar deste método constituir uma alternativa simples e econômica, ele apresenta algumas desvantagens críticas para um sistema de carga sobretudo para baterias íon lítio, dos quais podemos destacar: formação de “furos” na superfície dos eletrodos, resultado da baixa corrente de carga aplicada que gera reações em sua superfície, diminuindo os ciclos de carga/descarga da bateria; se desejar diminuir o tempo de carga terá que aumentar a intensidade de corrente, o que pode provocar sua sobrecarga devido ao aquecimento interno, ou ainda diminuição da eficiência do processo de carga (TAVARES, 2009).

3.5.3. Carregamento por corrente constante e tensão constante (*Constant Current – CC / Constant Voltage – CV*)

Este método de carga rápida junta as características dos dois algoritmos de carregamento mencionados anteriormente, sendo composto por dois estágios. No primeiro estágio sistema de carga deve aplicar corrente constante uma taxa que pode variar de 0,1C até 1C. A escolha da taxa de corrente aplicada ao sistema influencia no tempo de carga, sendo que para taxas de carregamento menores teremos um tempo de carga maior. Na etapa de carga por corrente constante a bateria se carrega até cerca 70 a 80% de sua capacidade (ROOT, 2010).

Quando a bateria de íon lítio atinge cerca de 4,2 volts, que é a tensão de carga máxima de cada célula, o carregamento passa ser por tensão constante, sendo esse um valor máximo recomendado. Quando a bateria está sendo carregada por tensão constante a corrente diminui com o tempo e o carregamento se finaliza quando essa corrente atinge um valor em torno de 0,1C de sua capacidade nominal (ROOT, 2010).

Figura 9 – Carga por CC-CV com resposta em tensão e corrente



Fonte: Adaptado de Root (2010, p. 191).

Trata-se de um método que é frequentemente usado em baterias de Íon Lítio e de Chumbo-Ácido, sendo que o fim de carga ocorre quando a corrente atinge valores próximos de zero (BERGVELD, 2001). Os valores da corrente de carga na etapa de corrente constante, tensão máxima e a corrente de fim de carga variam de acordo com o tipo de bateria (ROOT, 2010).

3.6. ESTIMATIVA DO ESTADO DE CARGA

O estado de carga (*State of Charge* – SoC) é um indicador que representa a carga disponível em relação à capacidade total da bateria. Informações precisas do estado de carga são importantes em aplicações práticas, onde é necessário determinar quando parar de carregar e descarregar, pois sobrecarga e descarga excessiva podem causar danos internos permanentes. Logo, é necessário a utilização de um BMS que estime esse parâmetro e mantenha a bateria dentro de uma faixa de operação segura e confiável, prevendo a quantidade real de energia que ainda resta na mesma (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013).

A determinação do SoC é uma tarefa complexa que depende de vários parâmetros, tais como a Taxa-C, temperatura, eficiência de carga e descarga, entre outros. Na literatura, várias abordagens foram propostas para a determinação do estado de carga, sendo que as mais utilizadas são: medição direta de tensão, método *Coulomb Counting* e sistemas adaptativos.

O método de medição direta consiste em medir a tensão de circuito aberto (*Open Circuit Voltage* – OCV), embora seja uma técnica mais simples de implementar, não fornece resultados muito precisos, pois determinar a quantidade restante de energia em uma bateria simplesmente medindo sua tensão pode produzir resultados enganosos. Ainda que a tensão diminua com o tempo, o nível de tensão em relação ao estado de carga altera de acordo com a temperatura e taxa de descarga. Entretanto, o erro na estimativa do SoC pode ser compensado se a relação entre a tensão na bateria e a sua taxa de descarga for conhecida (POP *et al.*, 2005).

O método *Coulomb Counting*, é fundamentado na integração dos valores de corrente elétrica medidos no decorrer da carga e descarga da bateria. Geralmente, é feito o cálculo e integração da corrente elétrica que é obtida utilizando-se a queda de tensão medida numa resistência colocada em série com a bateria. Devido ao fato de os valores medidos serem continuamente integrados ao longo do tempo, pequenos erros nas medições podem originar erros na determinação do estado de carga (POP *et al.*, 2005).

Os sistemas adaptativos são uma ótima solução, pois o modelo é baseado na comparação entre os valores estimados e os medidos utilizando um dos métodos anteriores ou a combinação de ambos. Assim, algumas soluções possíveis são filtros de Kalman, lógica Fuzzy, Redes Neurais, entre outros, com o objetivo de adaptar a estimativa do estado de carga conforme a utilização da bateria (POP *et al.*, 2005).

3.7. SEGURANÇA E PROTEÇÃO DE BATERIAS

Uma das principais funções do BMS é garantir a segurança da bateria e protegê-la de operar em condições prejudiciais à mesma e aos usuários. Condições perigosas são causadas principalmente pelas características químicas da bateria. A segurança no decorrer do funcionamento da bateria depende de fatores térmicos, mecânicos e elétricos (WU *et al.*, 2015). Porém, os fatores mecânicos não serão abordados neste trabalho. A temperatura operacional, que é determinada pelas reações eletroquímicas no interior da bateria e pelas condições ambientais da aplicação, é um elemento igualmente importante na segurança da bateria, especialmente nas baterias de íons de lítio.

O BMS define limites de segurança para proteger a bateria de trabalhar além da faixa de temperatura segura que é, por exemplo, 0 ~ 60 °C para carregamento e 20 ~ 60°C para armazenamento e descarga de uma bateria de Íon Lítio (RAHIMI-EICHI *et al.*, 2013). A bateria, quando utilizada em condições normais de operação, não libera substâncias. Porém, no caso da ruptura do invólucro, os elementos que compõem a mesma podem apresentar características corrosivas e inflamáveis (RECHARGE INC, 2013).

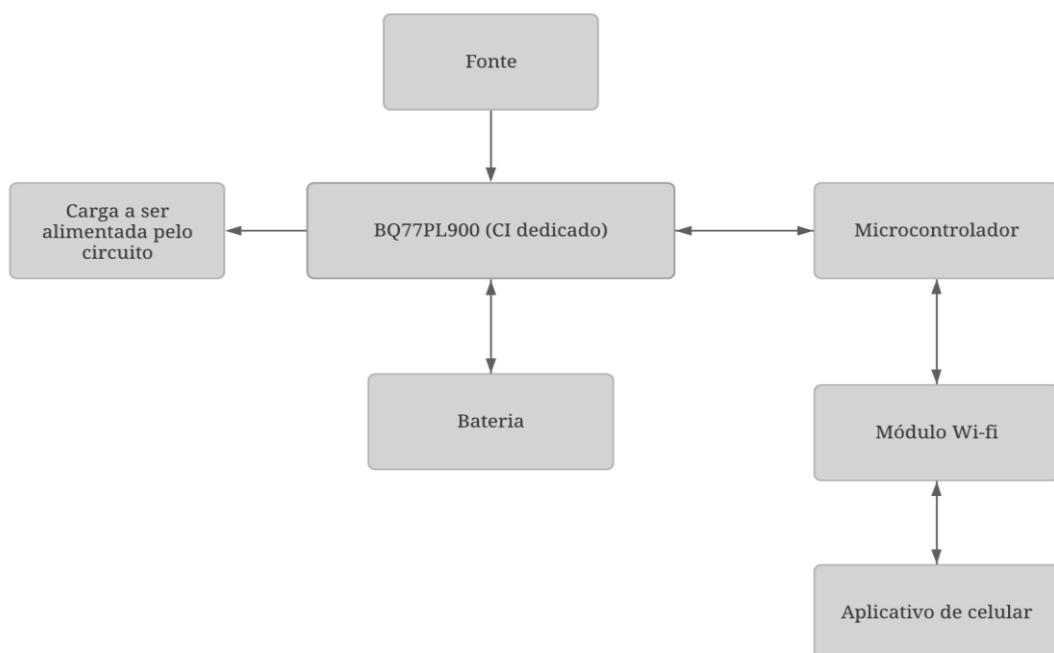
Com relação aos fatores elétricos, os principais são: sobretensão (*Overvoltage* – OV), que ocorre quando uma ou mais células da bateria ultrapassam o limite de tensão máxima; e subtensão (*Undervoltage* – UV), que ocorre quando uma ou mais células ficam abaixo do valor mínimo de tensão. Além disso, é necessário implementar proteções contra curto-circuito na descarga (*Short Circuit in Discharge* – SCD) e sobrecorrente no processo de descarga (*Overcurrent in Discharge* – OCD). Nas duas situações, por condições inadequadas, a corrente de descarga da bateria é extraída de forma inadequada (WU *et al.*, 2015).

4. METODOLOGIA

O presente estudo caracterizou-se, primeiramente, por uma pesquisa bibliográfica, em que foram consultados alguns fundamentos teóricos de sites, livros, revistas e artigos científicos que abordam assuntos relacionados a baterias e sistemas de monitoramento e proteção para as mesmas. Nesta etapa foram apresentados: os conceitos fundamentais relacionados às baterias, os diferentes tipos de baterias utilizados atualmente, suas características químicas e elétricas; os recursos que um sistema de gerenciamento de baterias (BMS) possui, bem como a explicação sobre o funcionamento e a forma como estes mecanismos podem ser implementados. Em seguida, propõe-se a elaboração de um protótipo de BMS, aplicando na prática todos os conhecimentos adquiridos no estudo dos referenciais teóricos.

Dessa forma, foi de grande relevância obter uma leitura teórica e metodológica para que o tema escolhido pudesse ser compreendido e contextualizado. Quanto ao tipo de pesquisa, como foi implementado um protótipo em laboratório com testes das funções de um BMS, o estudo em questão pode ser classificado como uma pesquisa experimental. Na Figura 10 é apresentado um diagrama de blocos do circuito desenvolvido para o protótipo do BMS.

Figura 10 - Diagrama de blocos do circuito desenvolvido



Fonte: Autoria própria (2020).

Abaixo serão apresentados os principais componentes necessários para o desenvolvimento do BMS implementado, inclusive com as suas principais características e possibilidades de funcionamento.

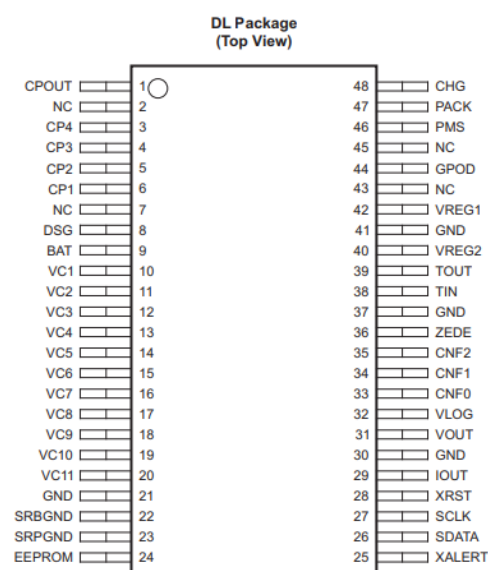
4.1 O BQ77PL900

Como já tratado anteriormente, neste trabalho é utilizado um circuito integrado da empresa Texas Instruments, o BQ77PL900. Ele é capaz de realizar o balanceamento das células de baterias, fornecer proteção contra temperaturas elevadas, sobrecorrente e curto-circuito no processo de descarga, sobretensão e subtensão, além de fornecer medições de corrente e de tensão em cada célula.

O BQ77PL900 controla de 5 a 10 células de baterias ligadas em série e é utilizado para aplicações com baterias de lítio-íon (*Lithium-Ion*) e lítio-polímero (*Lithium-Polymer*). Entretanto, como a maioria dos BMS's comerciais, este circuito não possui estimativa do estado de carga (SoC) e nem de vida útil (SoH).

A Figura 11 apresenta o diagrama de pinos do circuito integrado utilizado neste trabalho e, para mais detalhes técnicos, basta consultar a folha de dados (*datasheet*) no site do fabricante. O Anexo A apresenta o diagrama de blocos funcional, o qual ilustra o funcionamento interno do circuito integrado e como cada elemento influencia no sistema.

Figura 11 – Diagrama de pinos do BQ77PL900

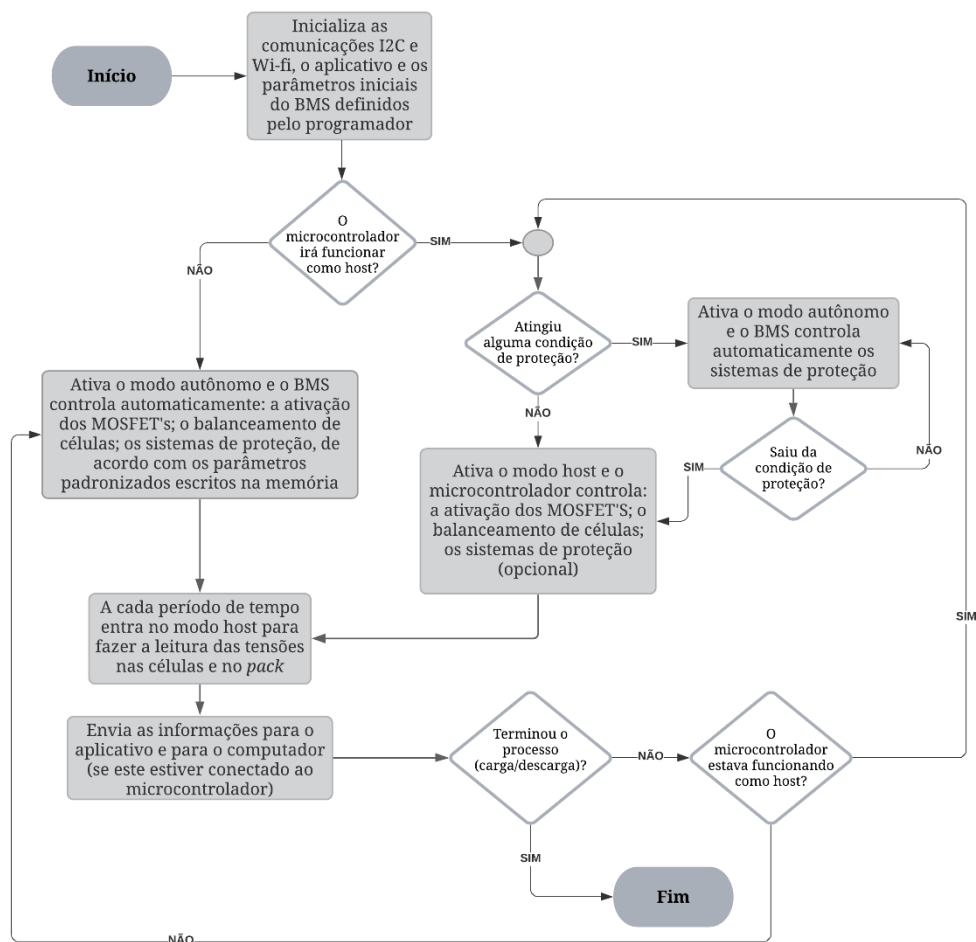


Fonte: Texas Instruments (2008, p. 4).

Este circuito integrado (CI) realiza a comunicação com o microcontrolador através do protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*), que transmite 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 microcontrolador age como mestre enquanto o CI age como escravo, sendo que o endereço I2C deste é 0x20.

O circuito integrado pode trabalhar de duas formas: funcionando de maneira independente (autônoma) ou controlado por um microcontrolador (*host*), conforme a Figura 12, a qual apresenta um fluxograma do funcionamento e os recursos que o CI disponibiliza em cada um dos modos.

Figura 12 – Fluxograma dos modos de operação: *host* ou *stand-alone* (independente)



Fonte: Autoria própria (2020).

Quando configurado para funcionar em conjunto com o microcontrolador, este assume o controle de todos os sistemas de proteção, balanceamento de células e monitoramento das tensões nas células e corrente no *pack* de baterias. Mesmo assim, o próprio circuito integrado implementa as funções de proteção em hardware e elas funcionam mesmo quando controlado pelo microcontrolador, a não ser que o projetista deseje desativar tal recurso. Quando opera neste modo, as configurações são feitas por meio de escrita nos registradores e a forma de operação dependerá de como o algoritmo é implementado pelo projetista.

Já funcionando de maneira autônoma, o próprio circuito integrado assume o controle dos sistemas de proteção e balanceamento de células, porém os limites de proteção e ativação do balanceamento de células dependerá de reprogramação da memória não volátil deste. Ainda assim, o monitoramento das tensões nas células e corrente no *pack* de baterias devem ser feitos pelo microcontrolador, o qual também pode realizar a leitura dos registradores com a finalidade de obter as informações do estado atual do sistema e apresentá-las ao usuário.

Este circuito integrado não necessita programação da memória não-volátil (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* – EEPROM), a não ser que haja interesse em ativar o modo de operação autônoma e configurar os parâmetros relacionados à ativação do balanceamento de células e aos limites de tensão e atraso de tempo para detecção a atuação dos sistemas de proteção.

O BQ77PL900 possui três principais subsistemas: medição, proteção e controle. Estes subsistemas trabalham juntos para garantir que os parâmetros fundamentais do *pack* de baterias (tensão e corrente) 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 subsistema de medição é responsável pela aquisição da tensão em cada célula e da tensão e corrente no *pack* de baterias, com objetivo de transmitir esses dados analógicos para o microcontrolador ou outro dispositivo externo. Dessa forma, o microcontrolador comunica, por meio de comandos de leitura e escrita, qual parâmetro (tensão ou corrente) deseja medir e o circuito integrado fornece a tensão correspondente no pino VOUT ou IOU, para que o microcontrolador faça a conversão analógico-digital e aplique os ganhos constantes no *datasheet* do BQ77PL900, dependendo da grandeza que deseja medir.

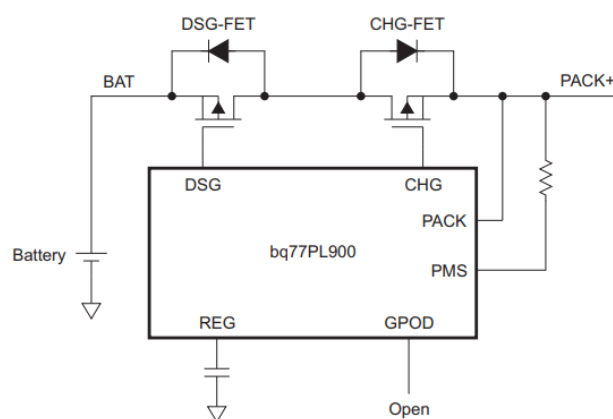
O subsistema de proteção conta com um hardware integrado de proteção, o qual fornece um conjunto de proteções padrão e também permite ao projetista complementar ou criar suas próprias funções a serem incorporados pelo microcontrolador. Por padrão, neste dispositivo é possível configurar os parâmetros de proteção para quatro situações de risco:

sobrecorrente na descarga (*Overcurrent in Discharge – OCD*), curto-circuito na descarga (*Short Circuit in Discharge – SCD*), sobretensão (*Overvoltage – OV*) e subtensão (*Undervoltage – UV*).

Quando alguma dessas situações é detectada, automaticamente um pino que alerta o microcontrolador é acionado e os pinos que acionam os MOSFET's de carga e descarga são desabilitados. Se estiver operando com o microcontrolador como *host*, os valores limites e o tempo de atuação da proteção de hardware podem ser definidos pelo microcontrolador durante a inicialização do sistema ou optar pelas configurações pré-definidas. Se estiver operando de maneira independente (autônoma), esses valores limites e tempo de atuação podem ser definidos de acordo com a configuração nos registradores da memória não volátil, a EEPROM.

O subsistema de controle é responsável por comparar os parâmetros medidos com os parâmetros definidos por padrão ou pelo microcontrolador, e atuar no sistema com ações que garantam o correto funcionamento da bateria e o aumento da sua vida útil. O circuito integrado BQ77PL900 fornece três pinos para acionamento de transistores MOSFET's, sendo: um para carga (CHG), um para descarga (DSG) e um para pré-carga (GPOD). No entanto, neste trabalho não será utilizado o MOSFET de pré-carga, pois estaremos considerando que todas as células já estão com a tensão mínima para o correto funcionamento. A Figura 13 apresenta esses transistores são implementados no sistema.

Figura 13 – Circuito de carga e descarga, com realce aos MOSFET's



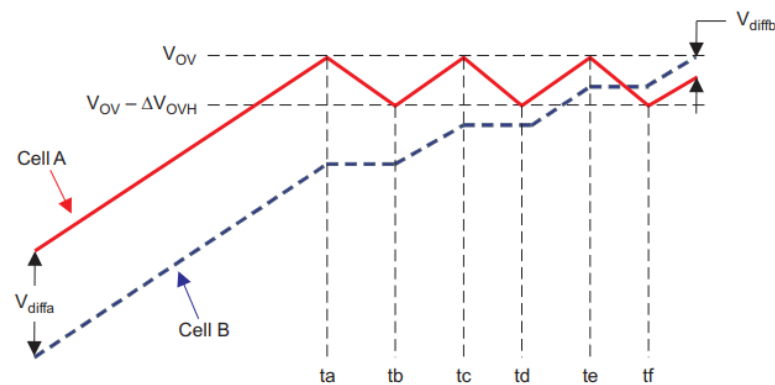
Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2008, p. 51).

O método de balanceamento utilizado no BQ77PL900 é o método dissipativo, que consiste em extrair a energia das células mais carregadas e dissipá-la em um resistor interno até que as cargas destas se igualem às células menos carregadas. Existem duas possibilidades para

realizar o balanceamento das células: de maneira autônoma ou conforme algoritmo incorporado pelo microcontrolador.

Se estiver operando de maneira independente (autônoma), o balanceamento é realizado da seguinte forma: quando uma célula atinge o limite de tensão máxima pré-definida, o CI interrompe o MOSFET de carga e ativa o balanceamento nessa célula. Com isso, a tensão nessa célula diminui até atingir um determinado valor mínimo para iniciar novamente o carregamento da bateria. E esse processo, como pode ser visto na Figura 14, repete-se até que todas as células estejam totalmente carregadas.

Figura 14 – Modo de operação do balanceamento quando opera no modo independente



Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2008, p. 34).

Se estiver operando com o microcontrolador como host, os critérios para realizar o balanceamento de uma célula são definidos por meio do algoritmo implementado pelo projetista. Neste modo, quando definido pelo algoritmo qual célula precisa de balanceamento, o microcontrolador deve “setar” o bit correspondente à célula que deseja iniciar o balanceamento e fica a critério do projetista quando deve parar o balanceamento.

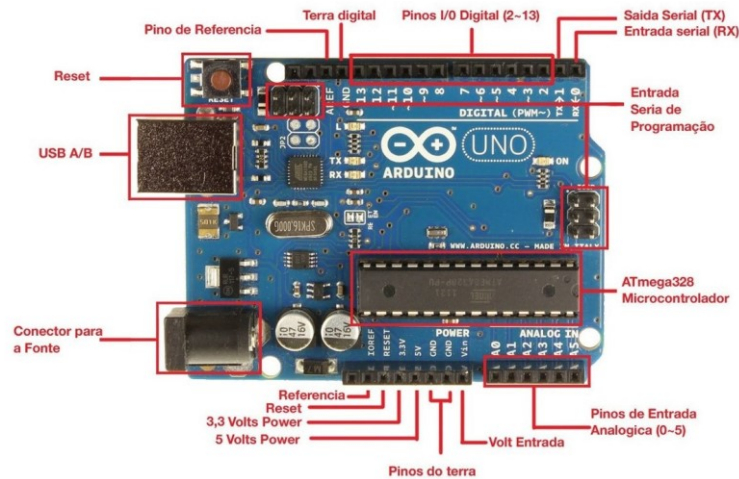
No entanto, cabe ressaltar que este circuito integrado está descontinuado pela Texas Instruments. Para substituir este, surgiram novas famílias de BMS's que, além de realizarem as mesmas tarefas do BQ77PL900, implementam alguns recursos adicionais, tais como: estimativa do estado de carga (SoC) e estimativa da vida útil (SoH).

4.2 O MICROCONTROLADOR

O BQ77PL900 requer o uso de um microcontrolador para realizar a leitura da tensão e corrente nas células do *pack* de baterias. Neste trabalho optou-se pelo ATmega328

incorporado a um Arduino® Uno. O detalhamento das portas e elementos que o compõem é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Configuração das portas e botão em um Arduino Uno



Fonte: Adaptado de Souza (2013).

A escolha deste dispositivo ocorreu devido ao baixo custo do equipamento, facilidade de implementação da comunicação I2C e integração com o hardware responsável pelo envio dos dados para o aplicativo móvel.

4.3 BATERIA ÍON LÍTIO

A bateria utilizada foi do tipo Li-Ion 18650, com 2.200mAh e tensão nominal de 3,7V. É recarregável, mas não pode ultrapassar o limite de tensão máxima de 4,2V.

Figura 16 – Células de bateria íon lítio modelo 18650



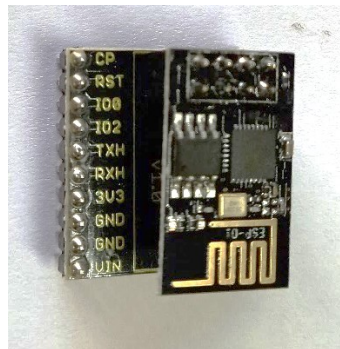
Fonte: Aatoria própria (2020).

Com isso, foi montado um pequeno *pack* de baterias para a realização dos testes utilizando essas 6 células apresentadas na Figura 16. Desse modo, poderão ser feitos os experimentos de carga, descarga, entre outras condições de falha.

4.4 MÓDULO WI-FI – ESP8266

O módulo Wi-Fi ESP8266 é muito utilizado juntamente com o Arduino, pois ele permite que o projeto se conecte à internet através da rede Wi-Fi. Com ele, o Arduino pode enviar e receber informações por meio de um servidor web, por exemplo, ou até mesmo controlar o acionamento de dispositivos que estejam conectados à internet.

Figura 17 – Módulo Wi-Fi ESP8266 conectado ao regulador de tensão



Fonte: Autoria própria (2020).

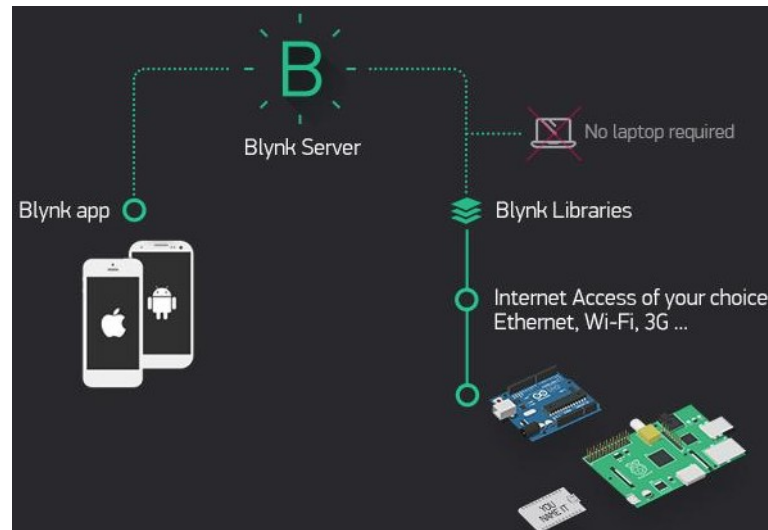
Esse módulo possui um processador na placa poderoso o suficiente para ser capaz de integração com sensores e outras aplicações específicas, com necessidade de pouco desenvolvimento. Por ser um chip bastante completo, ele requer pouquíssimos componentes na placa, o que torna a placa muito pequena ocupando pouco espaço no projeto. Entretanto, o ESP8266 não é capaz de fazer alterações em nível lógico de 5V para 3,3V, e vice-versa, por isso, ele é utilizado junto com o um regulador de tensão de 3.3V e os conversores de nível lógicos necessários para utilização com o Arduino.

4.5 BLYNK

O surgimento de serviços conectados à internet e o conceito de IoT (*Internet Of Things*) aumentaram a demanda por dispositivos que possuam conectividade e, assim,

proporcionem o envio de dados à internet e o controle destes dispositivos de forma remota. Neste contexto surgiu o Blynk, este serviço que é baseado em um aplicativo personalizável que permite controlar remotamente um hardware programável, bem como reportar dados do hardware ao aplicativo.

Figura 18 – Esquemático de funcionamento do Blynk



Fonte: Serrano (2018).

O Blynk App é disponibilizado gratuitamente para ser baixado. O acesso ao Servidor Blynk é ilimitado e as bibliotecas também são gratuitas. No entanto, cada widget custa determinada quantia de *energy* (uma espécie de moeda virtual) e é disponibilizada uma quantidade inicial de 2000 *energy* para ser utilizada nos projetos. Mais *energy* pode ser comprada para desenvolver projetos mais complexos (ou outros projetos). Em virtude da quantidade de *energy* disponível gratuitamente e da limitação de espaço na tela do celular, será possível apresentar as tensões de até 5 células de bateria no aplicativo desenvolvido.

5. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os protótipos, os testes realizados em bancada e seus respectivos resultados.

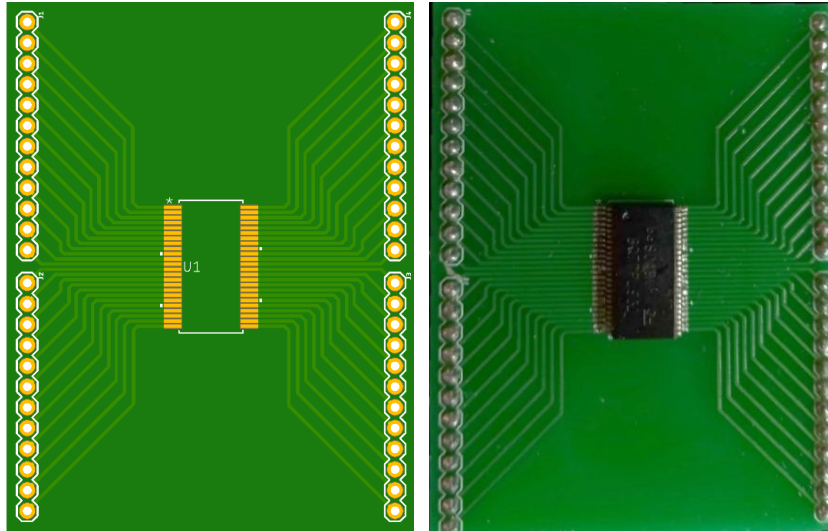
5.1 PROTÓTIPOS

Para realizar a implementação deste BMS, utilizou-se como base o circuito recomendado pela Texas Instruments, sendo este disponibilizado no Guia do Usuário do Módulo de Avaliação (*Evaluation Module – EVM*). Contudo, os componentes eletrônicos recomendados eram SMD's (*Surface-Mount Device*) e, por isso, foram substituídos por componentes similares na versão PTH (*Pin Through Hole*). Pequenas adaptações foram realizadas para efetuar a comunicação através do Arduino, uma vez que a recomendação é utilizar um circuito integrado extra do mesmo fabricante.

A fim de realizar os testes e a implementação, em primeiro momento é utilizado o *software* Eagle para produzir o esquemático e *layout* de um adaptador feito em placa de circuito impresso simples, somente para viabilizar a conexão do CI em uma *protoboard*, visto que não foi encontrado um adaptador de SMD para PTH para o soquete do BQ77PL900.

Inicialmente, a ideia era utilizar o processo de corrosão na placa, permitindo produzir a placa de circuito impresso na própria universidade, mas não foi possível garantir o nível de precisão necessário, haja vista as dimensões do circuito integrado. Conseqüentemente, fez-se necessário o envio do *layout* para uma empresa especializada na fabricação de placas, no caso o autor deste trabalho optou pela JLC PCB, que produz e envia o produto da China para qualquer lugar no mundo com um ótimo custo-benefício.

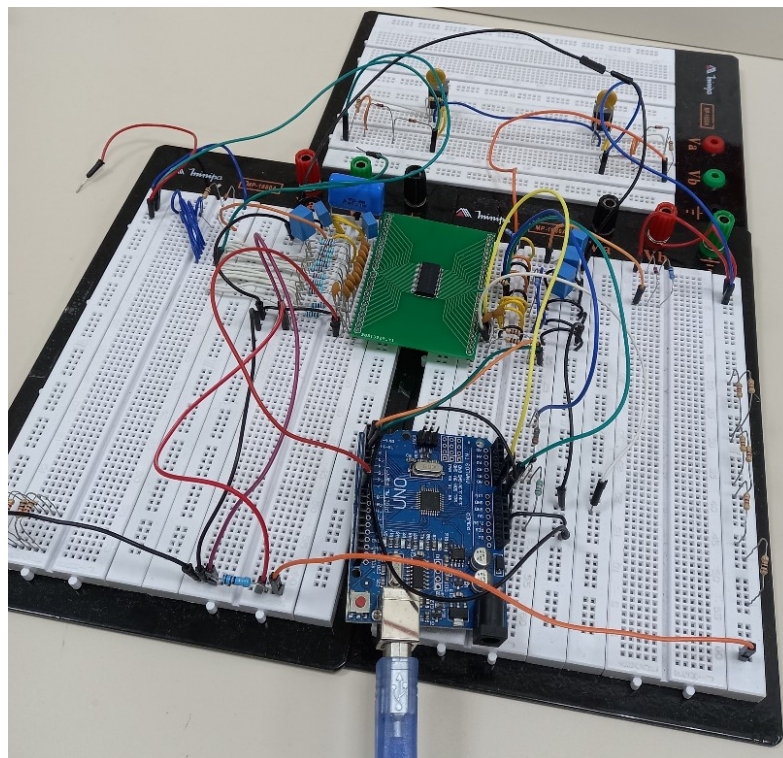
Figura 19 – *Layout* e resultado final do adaptador para o BQ77PL900



Fonte: Autoria própria (2020).

Com o adaptador pronto, o primeiro protótipo é montado na *protoboard*, conforme demonstrado na Figura 20. Desse modo, iniciam-se os primeiros testes já com o circuito integrado acoplado na *protoboard*, juntamente com o microcontrolador e o *pack* de baterias composto por 6 células.

Figura 20 – Primeiro protótipo do BMS, montado na *protoboard*

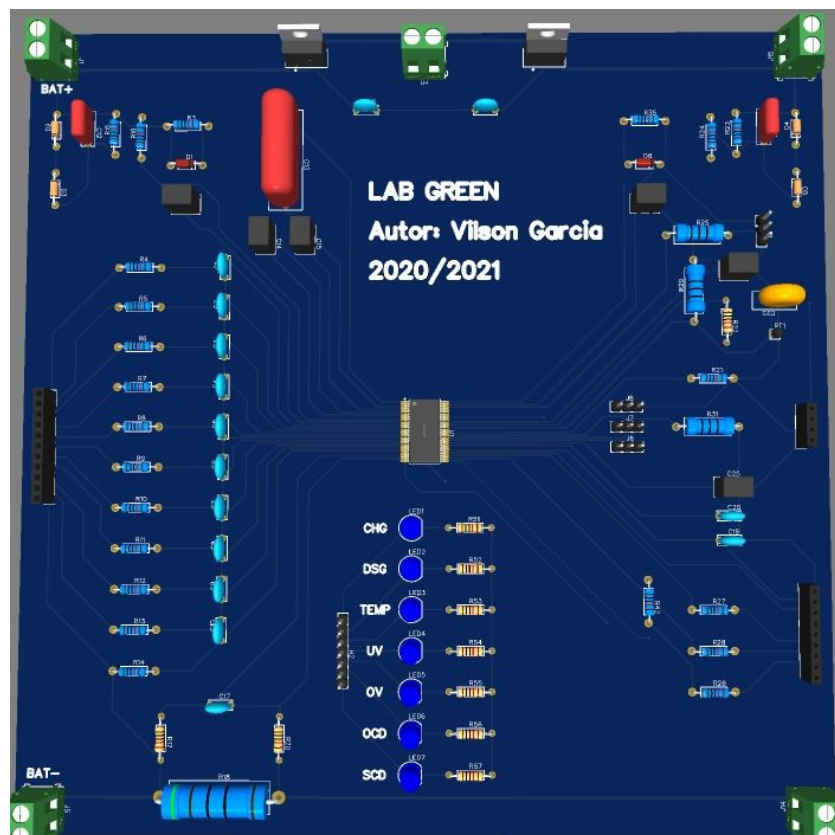


Fonte: Autoria própria (2020).

Após a definição dos componentes, realização dos testes e validação do circuito do BMS montado em bancada, fez-se necessário a criação de outra placa de circuito impresso para todo esse circuito montado na *protoboard*. A fabricação também foi efetuada pela JLC PCB, porém, dessa vez o autor preferiu utilizar a ferramenta online EasyEDA, que possui uma enorme biblioteca de componentes e é integrada com a JLC PCB, o que facilita o processo de construção da placa. O esquemático completo da placa está exposto no Apêndice A, e o *layout* 3D gerado pelo *software*, na Figura 20.

Por fim, após todo o processo de fabricação desse segundo protótipo, o resultado final já com todos os componentes soldados é apresentado na Figura 22. Nesse protótipo final foram adicionados alguns recursos que podem ser úteis, como: saídas de 3,3V e 5V para alimentação do microcontrolador com a própria energia de alimentação do BMS; possibilidade de configurar a quantidade de células por meio de *jumpers* inseridos na placa, evitando de alterar alguma linha de código no microcontrolador.

Figura 21 – *Layout* 3D do segundo protótipo



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 22 – Segundo protótipo do BMS, completo com todos os componentes



Fonte: Autoria própria (2020).

No segundo protótipo do BMS, foram inseridos alguns *leds* para indicar o acionamento dos transistores MOSFET's de carga ou descarga e o acionamento dos principais sistemas de proteção. Porém, esses *leds* dependem de comandos do microcontrolador para serem acionados.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

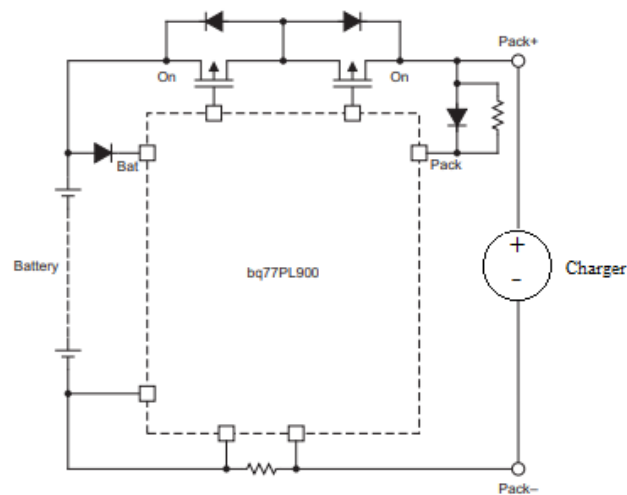
Com a finalidade de entender o funcionamento do BQ77PL900 e construir o BMS, foram necessários vários testes e análise dos resultados obtidos. O fluxograma simplificado do funcionamento do BMS, utilizado como base para construção do código, está exposto no Apêndice B, assim como o algoritmo implementado com todas as funções que serão relatadas ao longo do texto consta no Apêndice C.

Primeiramente, cabe ressaltar que os ensaios foram iniciados ainda com o primeiro protótipo da placa conectada na *protoboard*. A ideia principal dessa primeira parte era implementar as funções mais básicas de um BMS, com o mínimo de recursos e componentes eletrônicos. Assim, ao longo do processo, essas funções são aprimoradas e são inseridos os demais componentes similares aos recomendados pelo fabricante no Guia do Usuário do Módulo de Avaliação (EVM).

Porém, antes de realizar qualquer teste, fez-se necessária a implementação de toda a parte de comunicação I2C com o circuito integrado. Para essa tarefa, utilizou-se como base a interface de comunicação disponibilizada pela própria Texas Instruments, que seria para utilizar juntamente com o hardware de comunicação comercializado por eles. Nesse contexto também foi escrita a função para ativar o modo host, permitindo que o microcontrolador configure e controle todos os recursos do CI, sendo extremamente importante para a realização dos experimentos.

O primeiro teste consiste em verificar se o circuito integrado aciona os MOSFET's de carga e descarga. Para verificar o acionamento do MOSFET de carga, um lado conecta-se à fonte de alimentação e o outro são colocados 5 resistores de $1k\Omega$, simulando a bateria a ser recarregada. Com o código para comunicação I2C já implementado e o microcontrolador como *host*, o autor do trabalho envia comandos para ativação do MOSFET de carga e faz requisição para receber os dados contidos nos registradores. Dessa forma, são avaliados se os registradores responsáveis por essa função estão recebendo e armazenando esses dados. Além disso, a tensão nos resistores é aferida, e caso apareça queda de tensão nos mesmos significa que o MOSFET de carga está cumprindo a sua tarefa.

Figura 23 – Circuito montado para o teste dos MOSFET's de carga e descarga



Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2008, p. 21).

Após isso, é feita a inversão, ou seja, a fonte de alimentação é conectada no lado da bateria para simular uma bateria carregada, e os resistores citados anteriormente são conectados no lado da carga. No entanto, esse teste não funcionou e o autor demorou para encontrar o problema, pois as causas poderiam ser inúmeras: defeito no MOSFET ou no próprio CI, falha

na comunicação, erro no código implementado, entre outras. Por fim, o problema foi encontrado: como o próprio CI implementa em hardware a proteção contra subtensão, os cabos referentes ao monitoramento da tensão nas células deveriam estar conectados aos resistores, que estavam simulando células de uma bateria, para evitar um falso alerta de subtensão. Com isso, o problema foi sanado e o MOSFET de descarga passou a ser acionado normalmente.

O segundo teste envolve o monitoramento da tensão nas células e no *pack* de baterias. Para isso, a tensão fornecida pela fonte de alimentação foi configurada em 20V, fornecendo cerca de 4V para cada célula. Além disso, a saída de tensão no pino VOUT foi conectada a um dos pinos de entrada analógicos do Arduino, pois o próprio microcontrolador pode fazer essa conversão de sinal analógico para digital.

Em *software*, o algoritmo responsável pelo monitoramento da tensão ativa essa função, faz a configuração do modo e seleciona se deseja medir a tensão em uma célula ou no *pack* de baterias, por meio da escrita em registradores. Depois disso, o trabalho é no próprio Arduino que faz a leitura do sinal na entrada analógica, converte-o para um valor correspondente digital e aplica os ganhos que constam no *datasheet*. A Figura 24, retirada da tela de monitoramento do *software* Arduino, apresenta os resultados das leituras de tensão nas células, no *pack* de baterias e as informações contidas nos registradores.

Figura 24 – Monitoramento da comunicação I2C com o CI

```
MOSFET de carga (CHG) acionado!
Celula 1 [V] = 3.98
Celula 2 [V] = 3.96
Celula 3 [V] = 3.95
Celula 4 [V] = 3.98
Celula 5 [V] = 3.92
BAT (Bateria) [V] = 19.81
PACK (Carregador/carga) [V] = 19.81
STATUS = 0x80
OUTPUT_CONTROL = 0x04
STATE_CONTROL = 0x42
FUNCTION_CONTROL = 0x09
CELL_BALANCE = 0x00
CELL_SEL = 0x00
OV_CFG = 0x00
UV_CFG = 0x00
OCV&UV_DELAY = 0x00
OCD_CFG = 0x00
SCD_CFG = 0x00
EEPROM = 0x00
```

Fonte: Autoria própria (2020).

De acordo com o *datasheet* do BQ77PL900, o fabricante informa que a taxa de erro deve ser de até 2% para mais ou para menos. Entretanto, é recomendado realizar a calibração

do sistema, por meio da montagem de um circuito externo utilizando amplificador diferencial para que, a partir da diferença entre a tensão medida e a referência, sejam feitos os ajustes nos ganhos que o microcontrolador aplica ao sinal.

Os valores medidos nesse caso foram satisfatórios, com erro de até 0,1V nos piores casos, ou seja, quando o sinal de tensão é maior. Assim, as taxas de erro podem ser consideradas dentro do esperado, já que não foi realizada a calibração do sistema. A calibração não foi realizada porque não é um processo tão simples, pois a alteração dos ganhos impacta em toda a faixa de medição de tensão, fazendo com que fossem necessários testes para garantir que a diminuição do erro em uma faixa não leve ao aumento do erro em outra faixa de tensão. Além disso, os erros não foram altos o suficiente a ponto de justificar a aquisição de todos os materiais e o tempo necessários para executar esse procedimento.

O próximo teste abrange a medição da corrente de carga ou descarga do pack de baterias. Esse processo foi similar ao anterior, pois o próprio CI fornece um sinal analógico de tensão proporcional à corrente que passa por um resistor de baixo valor ôhmico, sendo este utilizado como um sensor de corrente. Entretanto, os valores medidos, quando comparados ao aferido com o multímetro foram bem diferentes, o que indica que existe algum problema.

No *datasheet* do BQ77PL900, o fabricante recomenda a utilização de um resistor de $1\text{m}\Omega$ para que ele consiga medir a queda de tensão correspondente à corrente, mas esse valor de resistência foi encontrado apenas na opção SMD, que não era o intuito de utilizar no trabalho. No entanto, as proteções contra curto-circuito e sobrecarga excessiva foram avaliadas e continuam funcionando, não prejudicando o desempenho do BMS. E, isso também leva a concluir que o problema deve ser o ajuste do resistor que é 10 vezes maior do que o recomendado. Provavelmente, essa alteração no resistor também causou alterações no limite de corrente para ser considerado uma sobrecarga, mas esse detalhe não foi analisado. Mesmo assim, o autor do trabalho deixou a opção para colocar um circuito externo para fazer a medição de corrente.

A etapa seguinte foi instalar o termistor, os capacitores e demais componentes que faltavam para ativar as demais funções relacionadas à proteção da bateria. Além disso, implementou-se as funções para desativar os MOSFET's em caso de subtensão, sobretensão, altas temperaturas ou qualquer outra falha que possa ocorrer.

Inicialmente, a ideia era não alterar os dados na EEPROM, apesar que a sua alteração possibilitaria ativar e configurar o CI para proteger o sistema contra subtensão, sobretensão, sobrecorrente, curto-circuito no processo de descarga e altas temperaturas, tudo isso de maneira independente. Embora a medição de tensão e corrente ainda seja necessário ser feita pelo

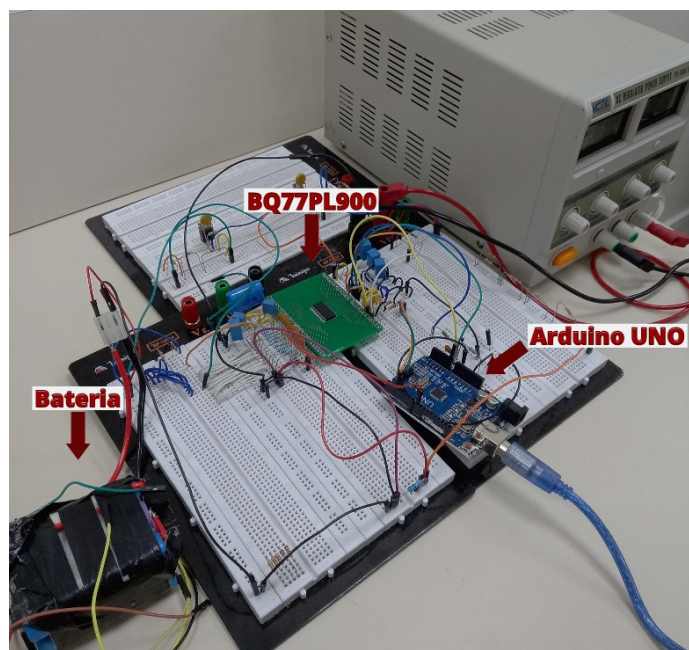
microcontrolador, o fato de o próprio BQ77PL900 assumir as funções de proteção é bem útil, visto que evita os atrasos e falhas que podem ocorrer na atuação do sistema, principalmente aqueles devido à comunicação.

Desse modo, seguindo os passos que constam no *datasheet*, foi escrito o algoritmo para alterar os registradores da EEPROM. O processo de alteração dos dados na EEPROM funcionou corretamente e todas as configurações, inclusive a ativação do balanceamento de forma automática, foram ajustadas pelo autor deste trabalho.

Para avaliar a funcionalidade desses recursos, fez-se necessário a utilização do pack de baterias composto por 6 células, citado anteriormente neste trabalho. Como as células já estavam com carga baixa e desbalanceadas, primeiramente foi necessário conectá-las ao BQ77PL900 e ativar o modo de funcionamento automático. Com isso, o próprio CI ativa o MOSFET de carga e realiza o balanceamento sozinho, sendo que esse processo foi monitorado pelo autor deste trabalho, tanto pelo multímetro quanto pela leitura dos registradores e das tensões nas células.

Consequentemente, o teste de condição de sobretensão foi realizado junto, uma vez que todas as células atingiram a tensão máxima configurada de 4,2V, e o MOSFET de carga foi desativado automaticamente pelo circuito. A Figura 25 demonstra o primeiro protótipo já com o CI acoplado na *proto-board* e o circuito montado para esse teste, juntamente com o microcontrolador e a bateria composta por 6 células.

Figura 25 – Circuito montado para a realização dos testes em bancada



Fonte: Autoria própria (2020).

Além disso, o teste de subtensão foi realizado colocando uma carga no lugar da fonte de alimentação e, automaticamente, o MOSFET de descarga foi acionado até atingir a tensão mínima estabelecida de 3V. Já para sobrecorrente foi colocado um resistor com baixo valor ôhmico para simular uma carga exigindo alta corrente e o sistema desativou o MOSFET de descarga, como esperado. O teste de curto-circuito foi realizado unindo os terminais que seria conectada a carga, e o sistema também atuou para prevenir problema nas células da bateria.

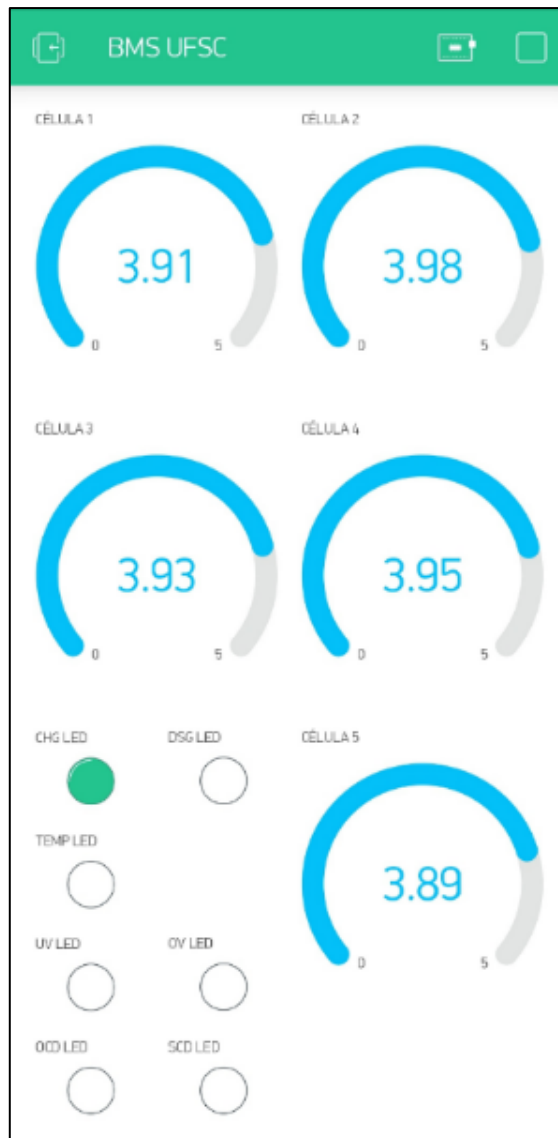
O ensaio de temperatura ocorreu colocando uma fonte de calor, no caso um secador de cabelo, próximo ao termistor, sendo que o CI realmente desativou os recursos e protegeu o sistema quando atingiu alta temperatura. Porém, não é possível medir qual é essa temperatura máxima, o fabricante apenas informa que, utilizando o resistor com valor ôhmico recomendado, a temperatura máxima é de 60°C antes de entrar em modo de proteção.

Posteriormente, houve a concepção do segundo protótipo do BMS. Enquanto a segunda placa estava sendo fabricada, o autor do trabalho passou a encarregar-se da parte de envio das informações para um dispositivo móvel, permitindo o monitoramento dos dados de maneira remota. Para isso, foi utilizado o ESP8266 que é um módulo Wi-Fi muito utilizado para transmissão de dados pela rede.

Todavia, não basta transmitir os dados para o dispositivo, é necessário desenvolver alguma plataforma ou aplicativo para apresentar esses dados. Nessa tarefa, foi utilizado um aplicativo chamado Blynk, que oferece vários recursos para apresentar os dados no aplicativo de celular. Apesar do aplicativo ser pago, oferece acesso às ferramentas mais básicas, as quais já atendem a necessidade da aplicação que irá exibir as informações do BMS.

O aplicativo foi testado enviando as informações de tensão e dos recursos de proteção do CI. Conforme visto na Figura 26, os gráficos de tensão variam de 0 a 5V e os mesmos apresentam pequenas taxas de erro, as mesmas apresentadas nos testes anteriores. Além disso, o aplicativo possui *leds* que indicam o acionamento dos recursos de proteção e ativação dos MOSFET's, no caso da figura acima o MOSFET de carga está acionado e com seu *led* correspondente aceso. Portanto, o aplicativo atendeu as expectativas ao apresentar todos os dados necessários, exceto pela limitação no espaço da tela que permitiu mostrar a tensão de apenas 5 células e o pequeno atraso devido à conexão Wi-Fi, que é mais lenta.

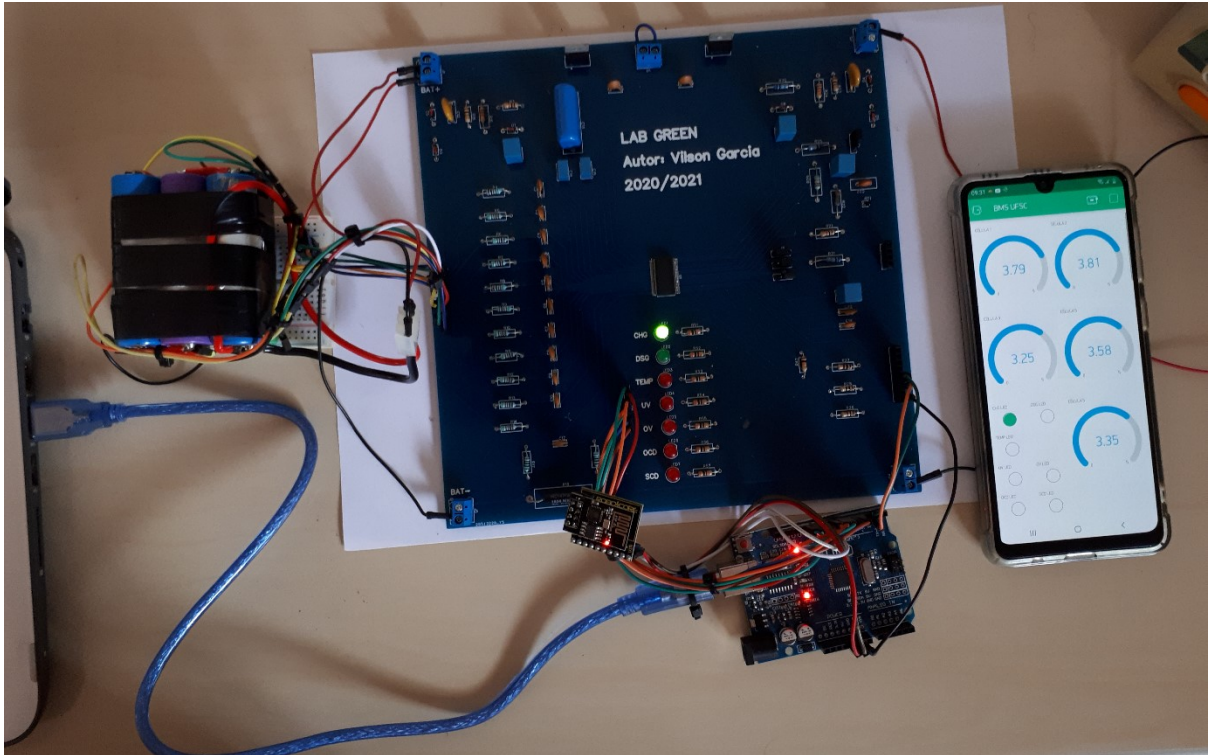
Figura 26 – Aplicativo de monitoramento criado com o auxílio do Blynk App



Fonte: Autoria própria (2020).

Após a finalização da fabricação do segundo protótipo, este precisou passar por todos os testes relatados anteriormente para efetuar a sua validação. No entanto, dessa vez o pack de baterias e o aplicativo foram empregados em todos os ensaios. A Figura 27 apresenta o sistema completo montado.

Figura 27 – Sistema BMS completo montado para validação do protótipo final



Fonte: Autoria própria (2020).

Assim, foi possível testar também o acionamento dos *leds* na própria placa e a integração com o aplicativo de celular. O único ponto negativo foi que houve um pequeno atraso de tempo de até 1 segundo para atualização das informações no aplicativo.

6. CONCLUSÃO

Este estudo buscou focar na concepção, análise e implementação de um sistema de gerenciamento (BMS) para baterias de íon lítio, com monitoramento de forma remota. Para cumprir os objetivos propostos, primeiramente, mostrou-se essencial a consulta de vários referenciais teóricos para entendimento sobre os principais tipos e características das baterias, assim como os sistemas de gerenciamento para as mesmas. Num segundo momento, iniciou-se a confecção dos protótipos, implementação do código e os primeiros testes. Além disso, foi desenvolvido o aplicativo para apresentar os dados, permitindo monitorar o sistema de maneira remota. Por fim, os ensaios foram repetidos no protótipo final para validação do mesmo.

Assim, cabe ressaltar que os resultados foram satisfatórios, exceto na tarefa de medição de corrente, pois as medições mostravam valores errôneos, provavelmente devido à utilização de um resistor com valor diferente do recomendado pelo fabricante, no datasheet. Provavelmente, essa alteração também deve ter causado alterações no limite da proteção contra sobrecarga, mas esse detalhe não foi analisado pelo acadêmico. A falta de espaço na tela do aplicativo desenvolvido e a impossibilidade de diminuir mais o tamanho dos mostradores das tensões também foi um ponto negativo, que fez com que pudessem ser apresentadas no aplicativo as tensões de apenas 5 células do *pack* de baterias.

Diante dos relevantes papéis tanto dos sistemas de armazenamento de energia quanto dos respectivos sistemas de gerenciamento, os quais estão sendo cada vez mais desenvolvidos e aplicados no mundo todo, a possibilidade de adquirir conhecimento sobre esses assuntos, tanto na teoria quanto na prática, será enriquecedora para a carreira profissional do acadêmico e esse é um grande ponto positivo na realização deste trabalho.

Como proposta para trabalhos futuros pode ser implementada uma série de melhorias, entre as quais:

- Utilizar circuito externo para realizar a estimativa tanto do estado de carga (SoC) quanto da vida útil (SoH), ou outro CI similar ao empregado neste trabalho já com estes recursos implementados;
- Avaliar o problema referente às falhas na medição de corrente e propor uma solução;
- Realizar uma melhor distribuição dos componentes na placa e, com isso, reduzir o seu tamanho;
- Implementar um sistema de balanceamento através de métodos não dissipativos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, P. J. O. **Desenvolvimento de um Sistema Ativo de Gestão de Baterias para Aplicações de Mobilidade Elétrica**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Portugal, 2015.
- BARSUKOV, Y.; FREEMAN, D. **Better Battery Management Through Digital Control**. Power Electronics. 2006. Disponível em: <https://www.powerelectronics.com/technologies/portable-power-management/article/21858388/better-battery-management-through-digital-control>. Acesso em: 10 de ago. 2020.
- BERGVELD, H. J. **Battery Management Systems: design by modelling**. Dissertação (Mestrado) – Proefschrift Universiteit Twente, Enschede, Nederlands, 2001.
- EHSANI, M.; GAO, M.; EMADI, A. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. Power Electronics and Applications Series. 2 ed. Florida: CRC Press, 2009.
- INFINEON INC. **Current Sensing Using Linear Hall Sensors**. Application Note. v. 1. 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.
- LINDEN, D.; REDDY, T. **Handbook of Batteries**. 3 ed. New York: McGraw Hill Professional, 2001.
- OENING, T. **Estudo e Implementação de Sistema de Gerenciamento de Baterias de Lítio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- POP, V.; BERGVELD, H. J.; NOTTEN, P. H. L.; REGTIEN, P. P. L. State-of-the-art of battery state-of-charge determination. **Measurement science and technology Journal**. v. 16. 2005.
- 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 vol. 7. n. 2. p. 4-16. June, 2013.
- RECHARGE INC. **Safety of Lithium Ion Batteries**. Brussels, Belgium: [s.n.], 2013. The European Association for Advanced Rechargeable Batteries.
- ROOT, M. **The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design, and Use**. New York: McGraw Hill Education, 2010.

SERRANO, T. M. **Introdução ao Blynk App**. Embarcados. Publicado em: 08 mai. 2018. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-blynk-app/>. Acesso em: 18 de nov. 2020.

SOUZA, F. **Arduino UNO**. Embarcados. Publicado em: 29 nov. 2013. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>. Acesso em: 02 de out. 2020.

SPELTINO, C.; STEFANOPOULOU, A.; FIENGO, Giovanni, Cell Equalization In Battery Stacks Through State Of Charge Estimation Polling. **American Control Conference**, Baltimore, MD, USA, 2010.

TAVARES, D. F. M. **Soluções técnicas para sistemas de carga de veículos eléctricos**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.

TEXAS INSTRUMENTS. **BQ77PL900**: Five to Ten Series Cell Lithium-Ion or Lithium-Polymer Battery Protector and Analog Front End. Datasheet. jun. 2008.

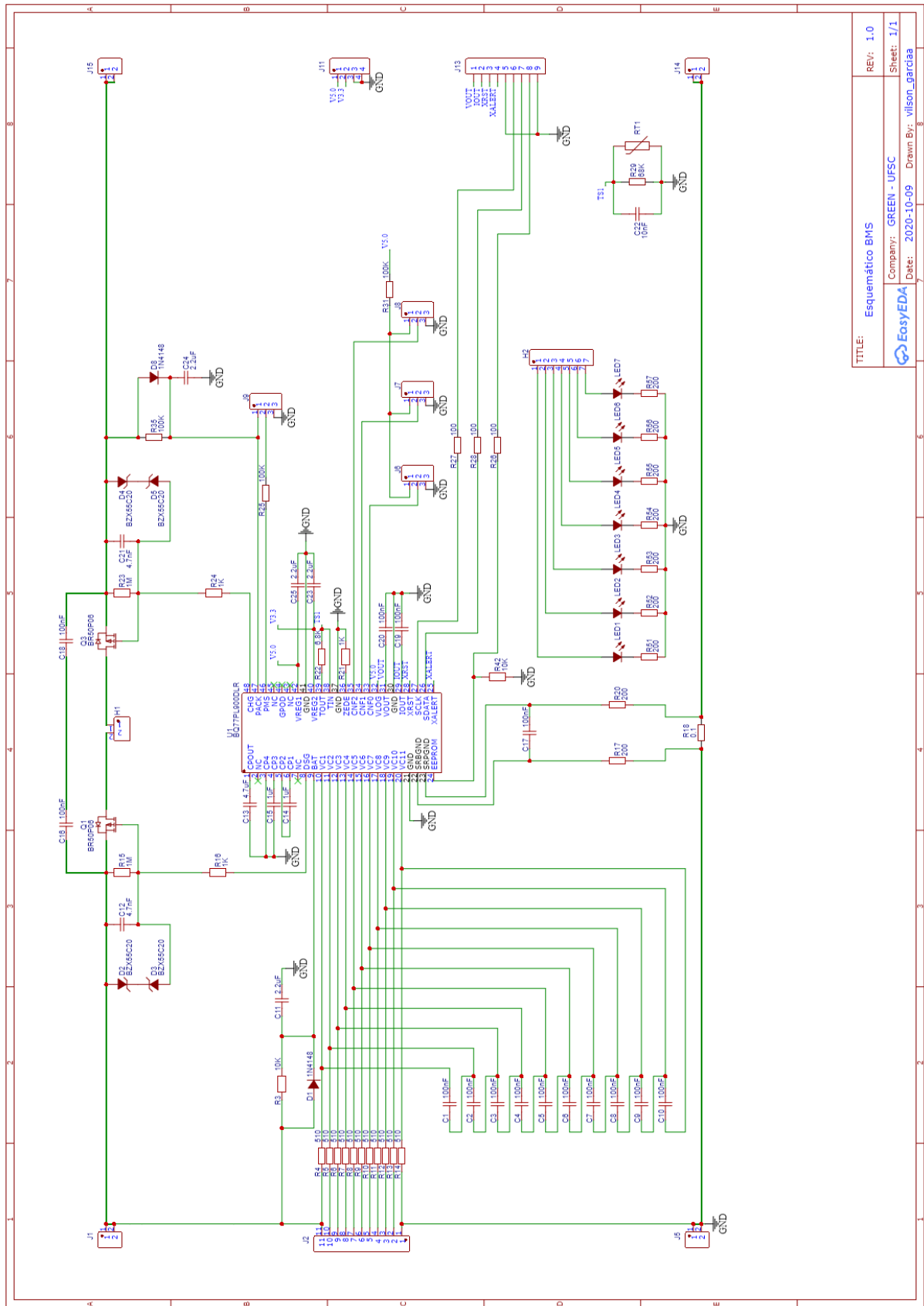
_____. **BQ77PL900 Evaluation Module - User's Guide**. jul. 2008.

WHITTINGHAM, M. S. History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. **Proceedings of the IEEE**, Special Centennial Issue, v. 100, abr. 2012.

WU, C.; SUN, J.; ZHU, C.; GE, Y.; ZHAO, Y. Research on overcharge and overdischarge effect on lithium-ion batteries. **IEEE Vehicle Power and Propulsion**, v. 5, n. 1, dec. 2015.

ZHOU, Y.; LI, X. Overview of lithium-ion battery SOC estimation. **IEEE International Conference on Information and Automation**, 2015, p. 2454-2455, ago. 2015.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DO SEGUNDO PROTÓTIPO

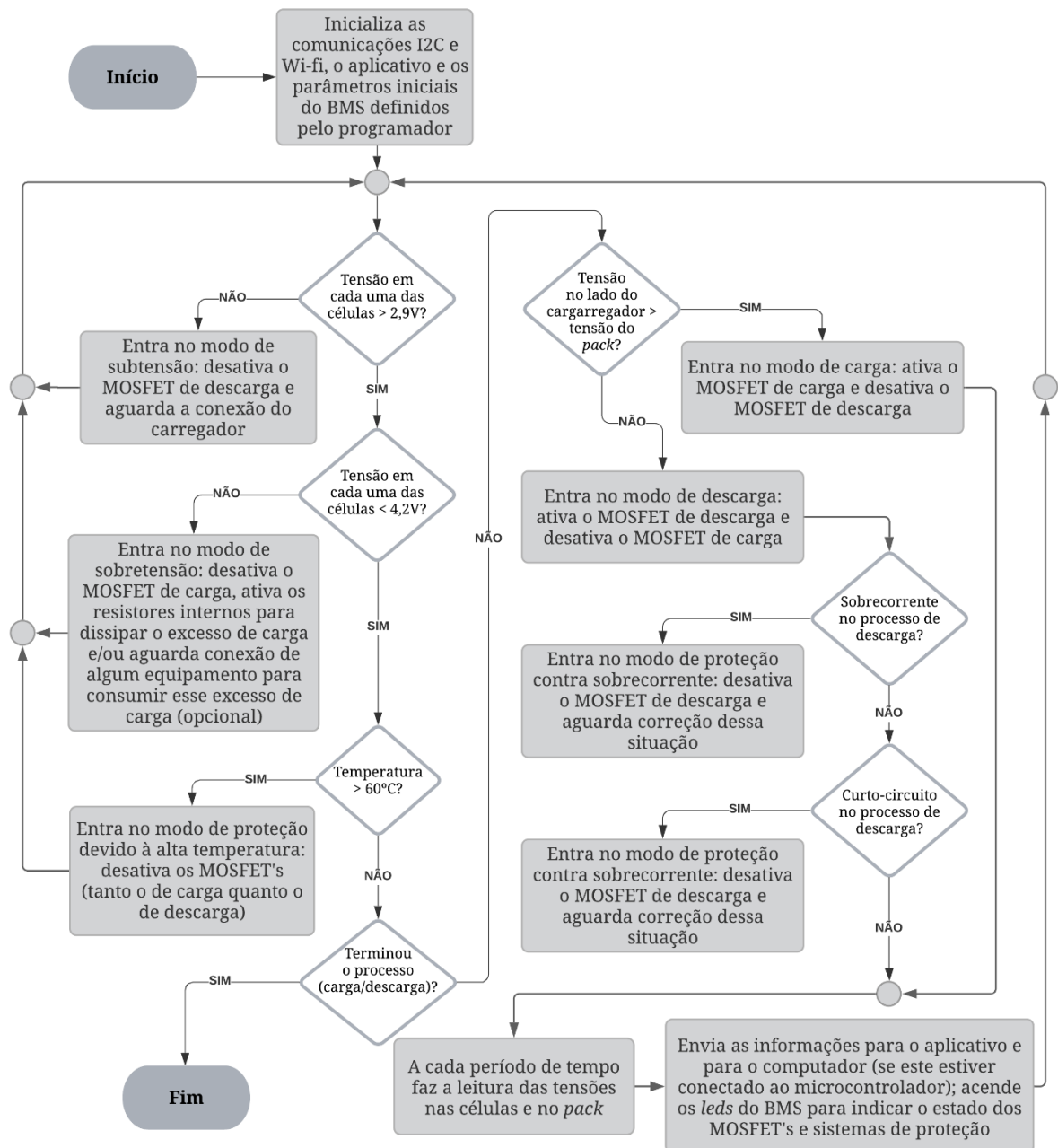


TITLE: Esquemático BMS	REV: 1.0
Company: GREEN - UFSC	Sheet: 1/1
Date: 2020-10-09	Drawn By: wilson_garcia

Fonte: Autoria própria (2020).

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO BMS NO PROCESSO DE CARGA E DESCARGA

Neste apêndice, apresenta-se o fluxograma simplificado de funcionamento do BMS, o qual também foi usado como base para construção do código utilizado neste trabalho.



Fonte: Autoria própria (2020).

APÊNDICE C – ALGORITMO IMPLEMENTADO

Neste apêndice, apresenta-se o código utilizado neste trabalho para estabelecer a comunicação, controle e atuação sobre o circuito integrado BQ77PL900. O código foi desenvolvido em linguagem de programação C e deve ser executado no Arduino Uno.

```

/**
 * Algoritmo implementado para funcionamento do BMS
 * Autor: Vilson Garcia
 */

//Bibliotecas referentes ao Blynk
#include <ESP8266_Lib.h>
#include <BlynkSimpleShieldEsp8266.h>
#include <SoftwareSerial.h>

// Definições referentes ao I2C
#define SCL_PIN 2
#define SCL_PORT PORTD
#define SDA_PIN 3
#define SDA_PORT PORTD
#define I2C_SLOWMODE 1
#define bq77pl900_addr 0x20 //endereço I2C do circuito integrado

//Endereços dos Registradores do CI
#define STATUS 0x00
#define OUTPUT_CONTROL 0x01
#define STATE_CONTROL 0x02
#define FUNCTION_CONTROL 0x03
#define CELL_BALANCE 0x04
#define CELL_SEL 0x05
#define OV_CFG 0x06
#define UV_LEVEL 0x07
#define OCV_UV_DELAY 0x08
#define OCD_CFG 0x09
#define SCD_CFG 0x0a
#define EEPROM_REGISTER 0x0b

//definição pino para entrada do sinal de tensão
#define ANALOG_IN A0

//definição pino reservado para habilitar escrita na EEPROM
#define EEPROM_ENABLE_PIN 13

//definição dos pinos digitais que acionam os leds na placa
#define CHG_PIN 12
#define DSG_PIN 9
#define TEMP_PIN 8
#define UV_PIN 7
#define OV_PIN 6
#define OCD_PIN 5
#define SCD_PIN 4

```

```

//definição dos pinos virtuais que acionam os leds no app
WidgetLED led1(V12);
WidgetLED led2(V9);
WidgetLED led3(V8);
WidgetLED led4(V7);
WidgetLED led5(V6);
WidgetLED led6(V5);
WidgetLED led7(V4);

// Definições referentes ao Blynk
#define BLYNK_PRINT Serial
#define ESP8266_BAUD 9600
char auth[] = "ZoTXFH87i90x54aFoQYjU4LBRq_HB9W"; //Token gerado no app
char ssid[] = "YourNetworkName"; //Nome da rede
char pass[] = "YourPassword"; //Senha da rede
SoftwareSerial EspSerial(10, 11); // RX, TX
ESP8266 wifi(&EspSerial);
BlynkTimer timer;

#include <SoftI2CMaster.h> //biblioteca referente ao I2C

//Funções auxiliares implementadas
void myTimerEvent();
boolean writei2c(byte reg_addr, byte data);
boolean readi2c(byte reg_addr, byte *data);
boolean bat_voltage_measurement(float *voltage);
boolean pack_voltage_measurement(float *voltage);
boolean cell_voltage_measurement(int cell, float *voltage);
boolean write_eeprom(byte reg_addr, byte data);
boolean set_host_mode(boolean status);
boolean set_charge_on();
boolean set_discharge_on();
boolean set_all_mosfets_off();
boolean cell_balance_individual(int cell, boolean status);
boolean set_thermistor_on();

void setup() {
  Serial.begin(9600); //configura a taxa de transferência da porta serial

  //Inicializa a comunicacao I2C
  if (!i2c_init())
    Serial.println("Erro na inicializacao da comunicacao I2C");
  else
    Serial.println("Comunicacao I2C iniciada");

  //Configurações baud rate e wi-fi
  EspSerial.begin(ESP8266_BAUD);
  delay(10);
  Blynk.begin(auth, wifi, ssid, pass);

  pinMode(EEPROM_ENABLE_PIN, OUTPUT); //utilizado para escrita na EEPROM

  //Inicializando os pinos que acionam os leds na placa
  pinMode(CHG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DSG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(TEMP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(UV_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OV_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OCD_PIN, OUTPUT);
  pinMode(SCD_PIN, OUTPUT);

```



```

//Configura o timer para chamar a função a cada 1 segundo
timer.setInterval(1000L, myTimerEvent);
}

void loop() {
  Blynk.run(); //Inicia a conexão com a rede e sincronização com o app
  timer.run(); //Inicia o timer
}

// =====

////////////////////////////////////
//                               FUNÇÕES AUXILIARES                               //
//                                                                           //
////////////////////////////////////

/**
 * Evento ocorre quando disparado o timer.
 *
 * Esta função é executada toda vez que o timer chega ao fim.
 * O autor escolheu programar o timer para 1 segundo.
 */
void myTimerEvent()
{
  byte data_read;
  float num;
  //verifica o status dos sistemas de proteção
  if(!readi2c(STATUS, &data_read)) return;

  //Analisa o transistor de carga
  if((data_read & B10000000) == 1 << 7) {
    led1.on(); //acende o led no app
    digitalWrite(CHG_PIN, HIGH); //acende o led na placa
  }
  else {
    led1.off();
    digitalWrite(CHG_PIN, LOW);
  }

  //Analisa o transistor de descarga
  if((data_read & B01000000) == 1 << 6) {
    led2.on();
    digitalWrite(DSG_PIN, HIGH);
  }
  else {
    led2.off();
    digitalWrite(DSG_PIN, LOW);
  }

  //Analisa se ativou proteção por alta temperatura
  if((data_read & B00010000) == 1 << 4) {
    led3.on();
    digitalWrite(TEMP_PIN, HIGH);
  }
  else {
    led3.off();
    digitalWrite(TEMP_PIN, LOW);
  }
}

```

```

//Analisa se ativou proteção de subtensão
if((data_read & B00001000) == 1 << 3) {
  led4.on();
  digitalWrite(UV_PIN, HIGH);
}
else {
  led4.off();
  digitalWrite(UV_PIN, LOW);
}

//Analisa se ativou proteção de sobretensão
if((data_read & B00000100) == 1 << 2) {
  led5.on();
  digitalWrite(OV_PIN, HIGH);
}
else {
  led5.off();
  digitalWrite(OV_PIN, LOW);
}

//Analisa se ativou proteção de sobrecarga
if((data_read & B00100000) == 1 << 1) {
  led6.on();
  digitalWrite(OCD_PIN, HIGH);
}
else {
  led6.off();
  digitalWrite(OCD_PIN, LOW);
}

//Analisa se ativou proteção de curto-circuito
if((data_read & B00000001) == 1) {
  led7.on();
  digitalWrite(SCD_PIN, HIGH);
}
else {
  led7.off();
  digitalWrite(SCD_PIN, LOW);
}

//medida tensão na célula 1
cell_voltage_measurement(1, &num);
Blynk.virtualWrite(V15, num);
Serial.print("Celula 1 [V] = ");
Serial.println(num);

//medida tensão na célula 2
cell_voltage_measurement(2, &num);
Blynk.virtualWrite(V16, num);
Serial.print("Celula 2 [V] = ");
Serial.println(num);

//medida tensão na célula 3
cell_voltage_measurement(3, &num);
Blynk.virtualWrite(V17, num);
Serial.print("Celula 3 [V] = ");
Serial.println(num);

//medida tensão na célula 4
cell_voltage_measurement(4, &num);
Blynk.virtualWrite(V18, num);

```

```

Serial.print("Celula 4 [V] = ");
Serial.println(num);

//medida tensão na célula 5
cell_voltage_measurement(5, &num);
Blynk.virtualWrite(V19, num);
Serial.print("Celula 5 [V] = ");
Serial.println(num);
}

/**
 * Escreve o dado no registrador.
 * Sobrescreve sobre os dados já existentes.
 *
 * @param reg_addr endereço do registrador que será escrita a informação
 * @param data dado que será escrito no registrador
 * @return verdadeiro se o dado foi escrito com sucesso
 *         falso caso contrário
 */
boolean writei2c(byte reg_addr, byte data) {
    if (!i2c_start(bq77pl900_addr | I2C_WRITE)) return false;
    if (!i2c_write(reg_addr)) return false;
    if (!i2c_write(data)) return false;
    i2c_stop();

    return true;
}

/**
 * Lê o dado contido no registrador e armazena na variável
 *
 * @param reg_addr endereço do registrador que contém a informação
 * @param data ponteiro para armazenar a informação
 * @return verdadeiro se o dado foi lido com sucesso
 *         falso caso contrário
 */
boolean readi2c(byte reg_addr, byte *data) {
    if (!i2c_start(bq77pl900_addr | I2C_WRITE)) return false;
    if (!i2c_write(reg_addr)) return false;
    if (!i2c_rep_start(bq77pl900_addr | I2C_READ)) return false;
    *data = i2c_read(true);
    i2c_stop();

    return true;
}

/**
 * Medição da tensão no pino BAT
 *
 * @param voltage ponteiro para armazenar o valor da tensão medida
 * @return verdadeiro se for possível medir a tensão do pino BAT
 *         falso caso contrário
 */
boolean bat_voltage_measurement(float *voltage) {
    byte mode;
    byte data;

    if(!readi2c(STATE_CONTROL, &mode)) return false;
    //entra no modo host para habilitar a medição da tensão
    writei2c(STATE_CONTROL, B00000010);
}

```

```

if(!readi2c(FUNCTION_CONTROL, &data)) return false;
data &= B11110111; //desabilita o monitoramento da tensão PACK
data |= B00010000; //habilita o monitoramento da tensão BAT
data |= B00000001; //habilita a saída de tensão no pino VOUT
writei2c(FUNCTION_CONTROL, data);
delay(100); //aguarda a tensão estabilizar
int value = analogRead(ANALOG_IN);
//aplicação do ganho, conforme consta no datasheet
*voltage = value * (5.0/1023.0) * 50;
writei2c(STATE_CONTROL, mode); //volta para o modo de operação anterior
return true;
}

/**
 * Medição da tensão no pino PACK
 *
 * @param voltage ponteiro para armazenar o valor da tensão medida
 * @return verdadeiro se for possível medir a tensão do pino PACK
 *         falso caso contrário
 */
boolean pack_voltage_measurement(float *voltage) {
    byte mode;
    byte data;
    //armazena o modo de operacao atual
    if(!readi2c(STATE_CONTROL, &mode)) return false;
    writei2c(STATE_CONTROL, B00000010); //entra no modo host
    if(!readi2c(FUNCTION_CONTROL, &data)) return false;
    data &= B11101111; //desabilita o monitoramento da tensão PACK
    data |= B00001000; //habilita o monitoramento da tensão BAT
    data |= B00000001; //habilita a saída de tensão no pino VOUT
    writei2c(FUNCTION_CONTROL, data);
    delay(100); //aguarda a tensão estabilizar
    int value = analogRead(ANALOG_IN);
    //aplicação do ganho, conforme consta no datasheet
    *voltage = value * (5.0/1023.0) * 50;
    writei2c(STATE_CONTROL, mode); //volta para o modo de operação anterior
    return true;
}

/**
 * Medição da tensão em determinada célula
 *
 * @param cell célula que deseja medir a tensão, que varia entre 1 e 10
 * @param voltage ponteiro para armazenar o valor da tensão medida
 * @return verdadeiro se for possível medir a tensão da célula
 *         falso caso contrário
 */
boolean cell_voltage_measurement(int cell, float *voltage) {
    byte mode;
    byte data;
    int value;

    //armazena o modo de operacao atual
    if(!readi2c(STATE_CONTROL, &mode)) return false;
    writei2c(STATE_CONTROL, B00000010); //entra no modo host

    if(!readi2c(FUNCTION_CONTROL, &data)) return false;
    data &= B11100111; //desabilita o monitoramento da tensão BAT e PACK
    data |= B00000001; //habilita a saída de tensão no pino VOUT
    writei2c(FUNCTION_CONTROL, data);

```

```

switch(cell) {
  case 1:
    writei2c(CELL_SEL, B00000000);
    break;
  case 2:
    writei2c(CELL_SEL, B00000001);
    break;
  case 3:
    writei2c(CELL_SEL, B00000010);
    break;
  case 4:
    writei2c(CELL_SEL, B00000011);
    break;
  case 5:
    writei2c(CELL_SEL, B00000100);
    break;
  case 6:
    writei2c(CELL_SEL, B00000101);
    break;
  case 7:
    writei2c(CELL_SEL, B00000110);
    break;
  case 8:
    writei2c(CELL_SEL, B00000111);
    break;
  case 9:
    writei2c(CELL_SEL, B00001000);
    break;
  case 10:
    writei2c(CELL_SEL, B00001001);
    break;
  default:
    return false;
    break;
}
delay(100); //aguarda a tensão estabilizar
value = analogRead(ANALOG_IN);
//aplicação do ganho, conforme consta no datasheet
*voltage = (0.975 - (value * (5.0/1023.0))) * (1.0/0.15);
writei2c(STATE_CONTROL, mode); //volta para o modo de operação anterior
return true;
}

// =====

////////////////////////////////////
// A FUNÇÃO SEGUINTE É NECESSÁRIA PARA ALTERAÇÃO DA EEPROM          //
//                                                                    //
////////////////////////////////////

/**
 * Escreve o dado no registrador da memória EEPROM.
 * Sobrescreve sobre os dados já existentes.
 *
 * @param reg_addr endereço do registrador que será escrita a informação
 * @param data dado que será escrito no registrador, que deve conter 1
byte
 * @return verdadeiro se o dado foi escrito com sucesso na EEPROM
 *         falso caso contrário
 */
boolean write eeprom(byte reg addr, byte data) {

```

```

byte mode;
byte data_read;
if(!readi2c(STATE_CONTROL, &mode)) return false; //armazena o modo de
operacao atual
writei2c(STATE_CONTROL, B00000010); //entra no modo host para habilitar
a medição da tensão
//procedimento descrito pelo fabricante para escrita na EEPROM
writei2c(reg_addr, data);
writei2c(EEPROM_REGISTER, B01100010);
if(readi2c(reg_addr, &data_read) {
    Serial.print("O dado que sera escrito na EEPROM: ");
    Serial.println(data_read, BIN);
} else return false;
writei2c(0x0b, B01000001);
delay(10);
if(!readi2c(STATUS, &data_read)) return false;
if(!((data_read & B00100000) == 1 << 5)) return false;
//ativa a escrita na EEPROM
digitalWrite(EEPROM_ENABLE_PIN, HIGH);
delay(100);
writei2c(EEPROM_REGISTER, B00000000);
digitalWrite(EEPROM_ENABLE_PIN, LOW);
if(readi2c(reg_addr, &data_read) {
    Serial.print("Registrador depois da alteracao: ");
    Serial.println(data_read, BIN);
} else return false;
writei2c(STATE_CONTROL, mode); //volta para o modo de operação anterior
return true;
}

// =====

////////////////////////////////////
// AS FUNÇÕES SEGUINTE SÃO NECESSÁRIAS CASO UTILIZE O MODO HOST //
// NÃO SERÃO UTILIZADAS SE OPTAR PELO MODO DE OPERAÇÃO INDEPENDETE //
// IMPORTANTE: O MODO HOST DEVE SER ATIVADO //
////////////////////////////////////

/**
 * Ativa ou desativa o modo Host
 * Necessário ativar o modo host para o funcionamento das funções
 * seguintes
 *
 * @return verdadeiro se o modo host foi alterado
 * falso caso contrário
 */
boolean set_host_mode(boolean status) {
    if(status) {
        writei2c(STATE_CONTROL, B00000010);
    } else {
        writei2c(STATE_CONTROL, B00000000);
    }
    return true;
}

/**
 * Aciona o MOSFET de carga
 * Caso o MOSFET de descarga esteja acionado, o mesmo será desabilitado
 *
 * @return verdadeiro se o MOSFET de carga for acionado com sucesso
 * falso caso contrário
 */

```

```

*/
boolean set_charge_on() {
    byte data;
    if(!readi2c(OUTPUT_CONTROL, &data)) return false;
    data &= B11111101; //desabilita o MOSFET de descarga
    data |= B00000100; //habilita o MOSFET de carga
    writei2c(OUTPUT_CONTROL, data);

    return true;
}

/**
 * Aciona o MOSFET de descarga
 * Caso o MOSFET de carga esteja acionado, o mesmo será desabilitado
 *
 * @return verdadeiro se o MOSFET de descarga for acionado com sucesso
 *         falso caso contrário
 */
boolean set_discharge_on() {
    byte data;
    if(!readi2c(OUTPUT_CONTROL, &data)) return false;
    data &= B11111011; //desabilita o MOSFET de carga
    data |= B00000010; //habilita o MOSFET de descarga
    writei2c(OUTPUT_CONTROL, data);

    return true;
}

/**
 * Desabilita todos os MOSFETs
 * Tanto o MOSFET de carga quanto o de descarga serão desabilitados
 *
 * @return verdadeiro se os MOSFETs foram desabilitados com sucesso
 *         falso caso contrário
 */
boolean set_all_mosfets_off() {
    byte data;
    if(!readi2c(OUTPUT_CONTROL, &data)) return false;
    data &= B11111001; //desabilita os MOSFETs de carga e de descarga
    writei2c(OUTPUT_CONTROL, data);

    return true;
}

/**
 * Balanceamento individual de células
 *
 * @param cell célula que deseja realizar o balanceamento
 * @param status caso queira ativar deve ser "true", e "false" caso
 * contrário
 * @return verdadeiro se for possível ativar o balanceamento da célula
 *         falso caso contrário
 */
boolean cell_balance_individual(int cell, boolean status) {
    byte data;
    switch(cell) {
        case 1:
            if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
            if(status) data |= B00000001; //habilita o balanc. da célula 1
            else data &= B11111110; //desabilita o balanceamento da célula 1
            writei2c(CELL_BALANCE, data);

```

```

    break;
case 2:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B00000010; //habilita o balanc. da célula 2
    else data &= B11111101; //desabilita o balanceamento da célula 2
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 3:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B00000100; //habilita o balanc. da célula 3
    else data &= B11111011; //desabilita o balanceamento da célula 3
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 4:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B00001000; //habilita o balanc. da célula 4
    else data &= B11110111; //desabilita o balanceamento da célula 4
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 5:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B00010000; //habilita o balanc. da célula 5
    else data &= B11101111; //desabilita o balanceamento da célula 5
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 6:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B00100000; //habilita o balanc. da célula 6
    else data &= B11011111; //desabilita o balanceamento da célula 6
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 7:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B01000000; //habilita o balanc. da célula 7
    else data &= B10111111; //desabilita o balanceamento da célula 7
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 8:
    if(!readi2c(CELL_BALANCE, &data)) return false;
    if(status) data |= B10000000; //habilita o balanc. da célula 8
    else data &= B01111111; //desabilita o balanceamento da célula 8
    writei2c(CELL_BALANCE, data);
    break;
case 9:
    if(!readi2c(FUNCTION_CONTROL, &data)) return false;
    if(status) data |= B01000000; //habilita o balanc. da célula 9
    else data &= B10111111; //desabilita o balanceamento da célula 9
    writei2c(FUNCTION_CONTROL, data);
    break;
case 10:
    if(!readi2c(FUNCTION_CONTROL, &data)) return false;
    if(status) data |= B10000000; //habilita o balanc. da célula 10
    else data &= B01111111; //desabilita o balanceamento da célula 10
    writei2c(FUNCTION_CONTROL, data);
    break;
default:
    return false;
    break;
}
return true;
}

```

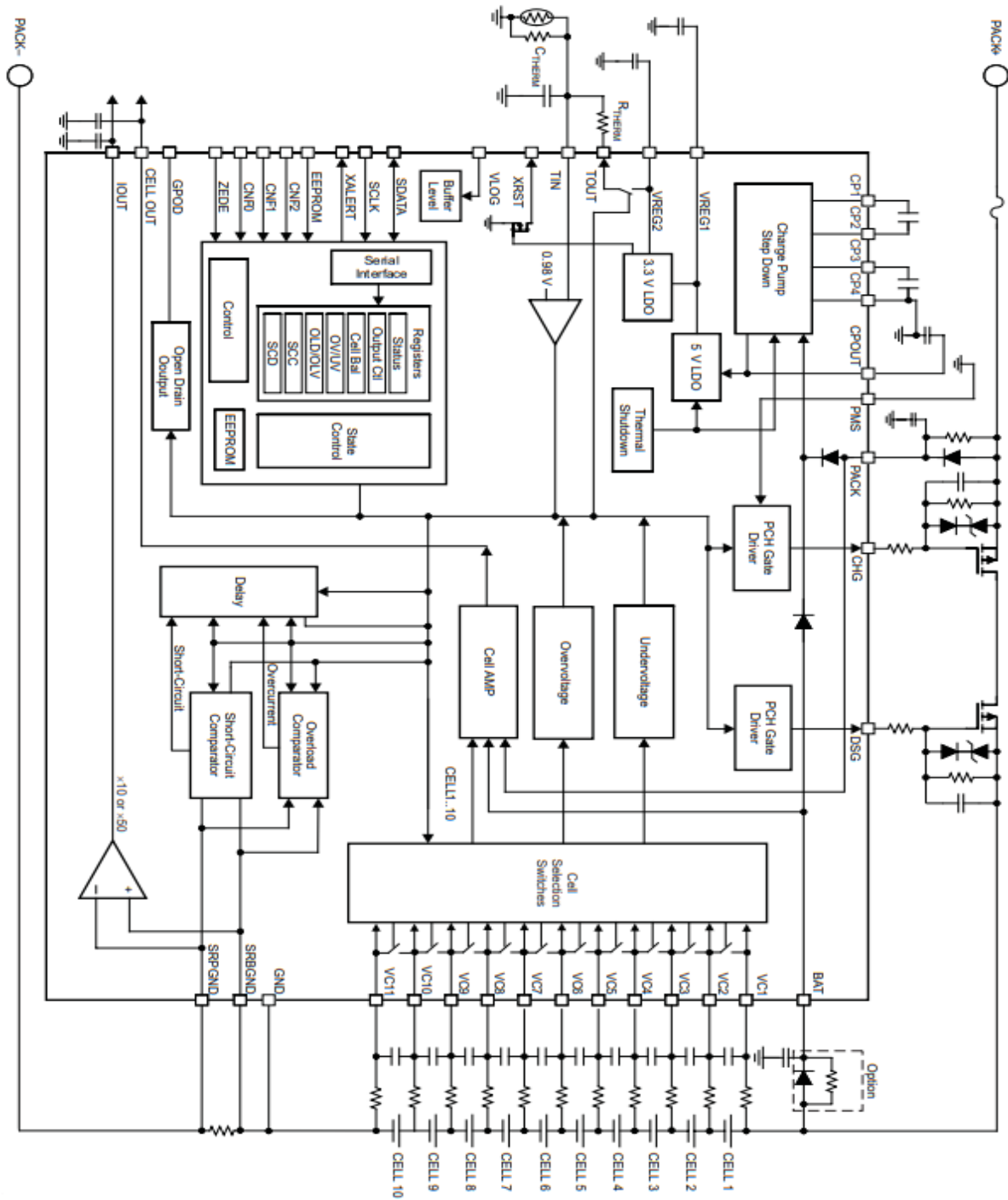


```
/**
 * Aciona o Termistor para proteção em caso de altas temperaturas.
 *
 * @return verdadeiro se o termistor for acionado com sucesso
 *         falso caso contrário
 */
boolean set_thermistor_on() {
    byte data;
    if(!readi2c(FUNCTION_CONTROL, &data)) return false;
    //habilita o termistor
    data |= B00100000;
    writei2c(FUNCTION_CONTROL, data);

    return true;
}
```

ANEXO A – DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO BQ77PL900

O diagrama de blocos funcional do BQ77PL900, o qual ilustra o funcionamento interno do circuito integrado, é apresentado abaixo.



Fonte: Texas Instruments (2008, p. 6).