



Sistema fotovoltaico autônomo para sistemas de iluminação utilizando células reutilizadas de lítio

Ulysses Souza Gonçalves

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Trabalho orientado por:

Prof. Doutor Orlando Manuel de Castro Ferreira Soares

Prof. Doutor José Luís Sousa de Magalhães Lima

Prof. Mestre Jorge Augusto Vasconcelos Alves

Bragança

2017



Sistema fotovoltaico autônomo para sistemas de iluminação utilizando células reutilizadas de lítio

Ulysses Souza Gonçalves

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Trabalho orientado por:

Prof. Doutor Orlando Manuel de Castro Ferreira Soares

Prof. Doutor José Luís Sousa de Magalhães Lima

Prof. Mestre Jorge Augusto Vasconcelos Alves

Bragança

2017

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Orlando Manuel de Castro Ferreira Soares pela preocupação na orientação e elaboração deste trabalho, por todo o tempo disponibilizado e pelo conhecimento transmitido.

Ao meu co-orientador Professor Doutor José Luís Sousa de Magalhães Lima pelo acompanhamento do trabalho desenvolvido, por sempre estar disponível para esclarecimento de dúvidas, pela preocupação e simpatia.

Ao meu co-orientador Professor Mestre Jorge Augusto Vasconcelos Alves pela preocupação com os alunos e a competência na coordenação do curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, campus Toledo, o qual teve disponibilidade de uma conversa sobre o trabalho desenvolvido, quando o mesmo esteve em Portugal.

Agradeço também à empresa Natureza Prima pelo investimento realizado nesta investigação, ao Engenheiro António Morais pelo interesse, orientação e disponibilidade para esclarecimento de dúvidas sobre o trabalho.

A minha mãe, irmã e namorada pelo apoio incondicional, paciência e incentivo, todos estes sentimentos demonstrados ao longo da minha estadia fora do Brasil. A todas as amizades feitas durante a minha estadia em Portugal, com todos os momentos vividos neste meio tempo, os quais aprendi e aprendo a crescer a cada dia mais. A todos que contribuíram para a realização e o bom funcionamento deste trabalho.

Minha sincera gratidão!

Resumo

A energia elétrica é um bem essencial nas vidas das pessoas. No entanto, ainda existem lugares afastados das cidades que não têm disponível a rede pública de distribuição de energia elétrica. Desta forma, surgiu a proposta de implementar um sistema capaz de garantir o fornecimento de duas horas de iluminação para corriças e estábulos, e lugares afastados dos centros urbanos, garantindo a gestão correta da carga/descarga controlada das baterias. Assim, o sistema é constituído por dispositivos de baixo custo encontrados no mercado, são eles: módulo fotovoltaico; SPPM (Seguimento do Ponto de Potência Máxima); sensores de corrente, tensão e temperatura; células de lítio reutilizadas; um *display* e um microcontrolador. O projeto foi realizado por meio do condicionamento de sinal, da programação do microcontrolador para o controlo das cargas e descargas das células de lítio e da parametrização inicial do microcontrolador por meio de uma plataforma gráfica desenvolvida. Para tal, foi utilizado o sensor de corrente que por meio de medidas das correntes nas células de lítio estima o seu estado de carga. Desta forma, o dispositivo informa o consumidor sobre a autonomia da bateria em horas. Além disso, o sistema grava os dados na memória interna do microcontrolador referentes às descargas, numa base diária, a fim de informar o técnico responsável, para que este possa adotar medidas preventivas.

Com os resultados obtidos por meio de testes realizados ao sistema, foi possível verificar que é possível o uso de células de lítio reutilizadas para um sistema fotovoltaico autônomo para iluminação, além de que este sistema permite a avaliação da carga/descarga destas células através dos dados gravados na memória interna do microcontrolador.

Palavras-chave: fotovoltaico; iluminação; reutilização; lítio; microcontrolador.

Abstract

The electric energy is an essential good in people's lives. However, there are still places far away from cities that don't have availability for the public electric power network. Therefore, it was proposed to implement a system that guarantees the supply of electricity for two hours in of lighting for corridors and stables, and places away from urban centers, ensuring the correct management of controlled charge/discharge of batteries. Thus, the system consists of low cost devices that are found in the market, they are: photovoltaic module; MPPT (Maximum Power Point Tracking); current, voltage and temperature sensors; reused lithium cells; a display and a microcontroller. The project's functionality is done through the signal conditioning, programming a microcontroller to control the lithium cells's charge and discharge, and the initial parameterization of the microcontroller by means of a developed graphical platform. Thus, the device informs the user about the battery life in hours. In addition, the system allows to record discharges's data in the internal memory of microcontroller on a daily basis, so that the responsible technician can collect the data, evaluate it and adopt preventive measures.

With the results obtained through tests carried out on the system, it was possible to verify that it is possible to use lithium cells reused for an autonomous photovoltaic system for illumination. In addition, this system allows the evaluation of the charge/discharge of these cells through stored in the microcontroller's internal memory.

Keywords: photovoltaic; lighting; reuse; lithium; microcontroller.

Conteúdo

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
1 Introdução	2
1.1 Enquadramento	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivos gerais	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Estrutura do Documento	4
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Radiação solar	5
2.2 Células e módulos fotovoltaicos	7
2.2.1 Efeito fotovoltaico	9
2.2.2 Tecnologia das células fotovoltaicas	10
2.2.3 Influência externas sobre módulos fotovoltaicos	13
2.3 Sistemas fotovoltaicos	14
2.3.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede	14
2.3.2 Sistemas fotovoltaicos isolados	15
2.3.3 Conversores CC-CC	17

2.4	Seguimento do ponto de potência máxima	19
2.5	Sistema de armazenamento eletroquímico	21
2.5.1	Funcionamento das células de lítio	22
2.5.2	Parâmetros utilizados nas células de lítio	23
2.5.3	Comportamento das células de lítio	24
2.5.4	Exemplos de tecnologias de lítio	29
2.6	<i>Battery Management System</i> (BMS)	30
3	Desenvolvimento do trabalho	32
3.1	Proposta inicial	32
3.2	Dimensionamento do sistema	33
3.2.1	Carga a alimentar	34
3.2.2	Taxa de irradiação solar	34
3.2.3	Dimensionamento do painel fotovoltaico	35
3.2.4	Dimensionamento da bateria	36
3.2.5	Conversor SPPM	39
3.3	Demais dispositivos utilizados	40
3.3.1	Arduino	42
3.3.2	Sensor de corrente	43
3.3.3	Relógio de tempo real	43
3.3.4	Estado de carga	44
3.3.5	Sensor de temperatura	45
3.3.6	Display	46
3.3.7	BMS	46
4	Metodologia	48
4.1	Primeira solução - células de lítio em paralelo	48
4.1.1	Implementação do circuito	48
4.1.2	Programação	51
4.2	Segunda solução - células de lítio em série	55

4.2.1	Implementação do circuito	55
4.2.2	Programação	58
5	Testes e resultados	65
5.1	Primeira solução - células de lítio em paralelo	65
5.2	Segunda solução - células de lítio em série	68
5.2.1	Testes realizados no sistema desenvolvido	68
6	Conclusões	81
6.1	Trabalhos futuros	83
A	Descarregamento das células de lítio	87
B	Carregamento das células de lítio	96
C	Artigo científico	112

Lista de Tabelas

2.1	Exemplos das tecnologias de células fotovoltaicas [11].	11
2.2	Síntese dos exemplos das tecnologias de lítio [16].	29
3.1	Dados de irradiação média para cada mês do ano (kWh/m ² /dia), PVGIS [19].	34
3.2	*Valores típicos de perdas encontrados em [20].	35
3.3	Especificações técnicas do painel fotovoltaico utilizado pela empresa.	36
3.4	Dados de temperatura durante um ano em Bragança [21].	37
3.5	Dados do dispositivo BQ24650 SPPM.	40
3.6	Caracterização do <i>hardware</i> do Arduino UNO [26].	42
3.7	Caracterização do dispositivo BMS.	47
5.1	Parâmetros das células de lítio utilizadas.	73
5.2	Medidas realizadas no funcionamento do Arduino UNO.	80

Lista de Figuras

2.1	Representação da variação solar durante um ano no hemisfério Norte [9].	6
2.2	Utilização da radiação solar, adaptado de [11].	7
2.3	Representação das diferentes bandas de valência, adaptado de [7].	8
2.4	Representação da junção p-n [7].	9
2.5	Efeito fotovoltaico, adaptado de [13].	10
2.6	Composição de um módulo fotovoltaico [7].	12
2.7	Variação de corrente devido à variação de irradiação solar [7].	13
2.8	Variação de tensão com a variação de temperatura [7].	14
2.9	Componentes de um sistema fotovoltaico conectados à rede. Fonte: http://www.realsolar.com/pics/sistema1.jpg	15
2.10	Componentes de um sistema fotovoltaico isolado, adaptado de [9].	16
2.11	Configuração em paralelo do sistema isolado, adaptado de [14].	16
2.12	Configuração em série do sistema isolado, adaptado de [14].	17
2.13	Conversor tipo <i>buck</i> , adaptado de [15].	18
2.14	Conversor tipo <i>boost</i> , adaptado de [15].	18
2.15	Gráfico das características I-V e P-V do painel fotovoltaico [7].	20
2.16	Gráfico das características I-V e P-V do painel fotovoltaico, com sombreamento de 50% [7].	20
2.17	Esquema representativo de uma típica célula de lítio, adaptado de [6].	23
2.18	Taxa de descarga a uma temperatura de 20 °C da célula de lítio SANYO UR18650E, adaptado de [13]	25

2.19	Comportamento da célula de lítio a uma taxa de descarga 1 C com variações em sua temperatura, adaptado de [13].	26
2.20	Característica de carga da célula de lítio SANYO com variações na temperatura, adaptado de [13].	27
2.21	Capacidade das células de acordo com a temperatura e o número de ciclos de vida, adaptado de [13].	27
2.22	Gráfico demonstrando o efeito de envelhecimento de duas células de lítio em diferentes situações Q_{d1} e Q_{d2} [6].	28
2.23	Exemplo de diagrama de blocos de um BMS, adaptado da fonte: https://apprenticeofart.deviantart.com/art/Battery-Icon-175541284	30
3.1	Sistema de iluminação autônomo da empresa Natureza Prima.	33
3.2	Conversor SPPM BQ24650.	39
3.3	Circuito 1.	41
3.4	Circuito 2.	41
3.5	Arduino Uno. Fonte: https://store.arduino.cc/genuino-uno-rev3	42
3.6	Sensor de corrente ACS712. Fonte: https://www.arduinoocia.com.br/2016/04/-como-usar-o-sensor-de-corrente-ac712.html	43
3.7	Relógio de tempo real, RTC. Fonte: https://ktechnics.com/shop/ds3231-at24c32-iic-precision-real-time-clock-module-memory-module-arduino-3/	44
3.8	Sensor de estado de carga MAX17043. Fonte: https://www.digikey.com/product-detail/en/sparkfun-electronics/TOL-10617/1568-1273-ND/5762423	44
3.9	Sensor de temperatura LM35 Texas Instruments. Fonte: https://www.roboelements.com/product/-lm35-temperature-sensor/	45
3.10	Display OLED. Fonte: https://www.makerfabs.com/0.96-I2C-OLED-128x64-Blue.html	46
3.11	Dispositivo BMS	47
4.1	Diagrama de blocos do sistema autônomo com células de lítio em paralelo.	49
4.2	Montagem na <i>breadboard</i> com as células de lítio em paralelo.	49

4.3	Esquema do circuito com as células de lítio em paralelo.	50
4.4	Máquina de estados utilizada na primeira solução.	52
4.5	Configuração inicial do sistema.	53
4.6	Leitura dos dados gravados do sistema.	53
4.7	Esquema do circuito com as células de lítio em série.	56
4.8	Prototipagem da placa de circuito impresso.	57
4.9	Segundo circuito implementado.	57
4.10	Suporte fabricado para as células de lítio.	58
4.11	Máquina de estados utilizado no segundo circuito.	60
4.12	Configuração inicial do sistema.	60
4.13	Máquina de estados, carga, descarga e <i>display</i>	61
4.14	Máquina de estados, temperatura alta.	62
4.15	Máquina de estados, sobrecarga.	63
4.16	Representação do circuito final.	64
5.1	Funcionamento do sistema.	66
5.2	Configuração diferenciador.	69
5.3	Configuração diferenciador.	69
5.4	Circuito para medição das tensões individuais das células de lítio.	71
5.5	Circuito para os testes.	72
5.6	Inicialização do sistema.	73
5.7	Dados coletados da tensão e corrente aplicada em cada célula de lítio.	74
5.8	Dados coletados na porta serial do Arduino receptor dos dados transmitidos pelo protocolo de comunicação TWI.	75
5.9	Gráfico representando o estado da carga (linha azul), carga drenada (linha verde) e corrente consumida (linha vermelha).	76
5.10	Gráfico representando a descarga das células de lítio, dividido em seis situações de testes.	76

5.11 Gráfico representando a carga das células de lítio, dividido em três situações de testes.	78
5.12 Leitura dos dados simulados na plataforma desenvolvida.	79

Siglas

AM *Air Mass.*

BMS *Battery Management System.*

CC-CC *Constant Current - Constant Current.*

CC-CV *Constant Current - Constant Voltage.*

DoC *Depth of Charge.*

DoD *Depth of Discharge.*

EVA *Ethylene Vinyl Acetate.*

EVs *Electric Vehicles.*

FF *Fator de Forma.*

HEVs *Hybrid Electric Vehicles.*

HSP *Horas de Sol Pleno.*

LED *Light Emitting Diode.*

MPP *Maximum Power Point.*

NOCT *Nominal Operating Cell Temperature.*

OLED *Organic Ligh-Emitting Diode.*

RTC *Real Time Clock.*

SoC *State of Charge.*

SPPM *Seguidor do Ponto de Potência Máxima.*

STC *Standard Test Conditions.*

TECMOS *Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor.*

TJB *Transístor de Junção Bipolar.*

TWI *Two Wire Interface.*

WDT *Watchdog timer.*

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo apresenta uma ideia geral do que será tratado ao longo da dissertação, sendo exposto o enquadramento, justificando o porquê da pesquisa, englobando seu impacto social, ambiental e o objetivo do seu desenvolvimento. Logo em seguida será descrita a organização, indicando o conteúdo de cada capítulo da presente dissertação.

1.1 Enquadramento

Ainda hoje existem diversas pessoas que vivem ou desenvolvem suas atividades cotidianas em locais afastados dos centros urbanos, lugares como corriças e estábulos, onde não há acesso a rede de distribuição pública de eletricidade, ocasionando a falta de iluminação em horários de indisponibilidade solar. Em alguns casos é adotado o uso de velas ou lâmpadas de querosene, gerando riscos de segurança, produzindo dióxido de carbono, além de possuir uma iluminação de baixa qualidade [1].

Boucar Diouf, [1] descreveu uma comparação, caracterizando uma vela de parafina que quando acesa produz uma média de 13 *lumens* (unidade de medida de fluxo luminoso) e 80 W de calor, gerando a eficácia de 0.16 lm/W, enquanto que uma lâmpada a LED de 5 W com 90 lm/W produz uma quantidade de luminosidade comparada a 35 destas velas.

Diante a isto, a proposta da presente dissertação é utilizar dispositivos de baixo custo encontrados no mercado para o desenvolvimento de um sistema de iluminação autônomo,

isto é, um sistema que não depende da rede pública de distribuição de energia elétrica, de forma que o mesmo seja acessível, inteligente e ecologicamente correto.

Considerando o elevado custo de armazenamento de energia utilizando baterias, pesquisas realizadas apresentam como alternativa a reutilização de baterias retiradas de carros elétricos e dispositivos eletrônicos, as quais possuem uma capacidade existente útil, permitindo seu uso uma segunda vez em sistemas de baixo consumo energético [1]–[5].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo da presente dissertação é projetar um sistema que alimente um refletor a LED instalado em edifícios rurais, onde não existe rede pública de distribuição de energia elétrica. O dispositivo desenvolvido deve possuir uma autonomia de duas a três horas, utilizando a energia armazenada nas células de lítio de segunda vida, carregadas com a energia produzida de um painel fotovoltaico e efetuar a gestão de carga e descarga do conjunto das células de lítio.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo do projeto fosse cumprido, foi preciso a seleção de componentes e sensores de baixo custo, que fossem adequados à aplicação, com os quais foi possível desenvolver e programar o sistema como um todo.

Para que o sistema operasse nos horários em que não houvesse irradiação solar, foram adotadas as células de lítio de segunda vida. As células de lítio possuem sensibilidade diante a sobrecarga e sobredescarga, ocasionando diminuição nos ciclos de vida. Com isto, foi necessário monitorizar o comportamento e controlar a carga e descarga, para não acelerar o desgaste e prevenir o risco de explosão [6].

O controle das baterias foi realizado por um microcontrolador juntamente com sensores e componentes analógicos, permitindo controlar a carga e descarga, estimar o estado de

carga e disponibilizar para o utilizador a estimativa da quantidade de tempo disponível em horas de iluminação, além de gravar a quantidade gasta de energia na memória interna do microcontrolador para avaliação do instalador.

Nesta dissertação são mostrados dois projetos de circuitos, os quais gerenciam e informam o usuário da quantidade de carga e descarga que há no sistema, além de disponibilizar os dados de quantidade de carga, temperatura e autonomia no barramento de comunicação *Two Wire Interface* (TWI).

1.3 Estrutura do Documento

Além deste capítulo apresentado como introdução, a presente dissertação conta com mais cinco capítulos, descritas as características de cada qual a seguir.

- Capítulo 2 - é descrita a revisão bibliográfica, expondo os principais conceitos e justificativas que serão aplicados nos capítulos subsequentes.
- Capítulo 3 - é apresentada a estimativa da carga a ser usada, o dimensionamento do painel fotovoltaico e da bateria, assim como a apresentação dos dispositivos de baixo custo aplicados no sistema.
- Capítulo 4 - são apresentadas duas propostas de solução para a presente dissertação, com o desenvolvimento da parte analógica juntamente com a parte de programação;
- Capítulo 5 - são mostrados os resultados referente às propostas apresentadas no capítulo 4;
- Capítulo 6 - apresentação das conclusões do trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Este capítulo sintetiza uma pesquisa sobre o tema e sobre os conceitos encontrados em referências bibliográficas, os quais foram utilizados para o desenvolvimento da presente dissertação e referenciadas a seguir.

2.1 Radiação solar

A vida e as fontes energéticas presentes no planeta Terra não seriam possíveis sem a presença do Sol. O Sol é uma esfera de gás incandescente, onde ocorre a liberação de energia por meio de reações termonucleares [7].

A radiação eletromagnética emitida pelo Sol sofre alterações até atingir a superfície terrestre. Isto ocorre devido a diversos fatores como: poluição, distância do planeta Terra ao Sol, gases existentes na atmosfera, inclinação do planeta Terra, localização latitudinal, entre outros [7].

As regiões de menor latitude possuem elevados níveis de radiação solar. A Figura 2.1 apresenta as variações solares durante um ano com as latitudes correspondentes ao hemisfério norte. A latitude de Portugal continental encontra-se entre os paralelos de 37° e 42° [8].

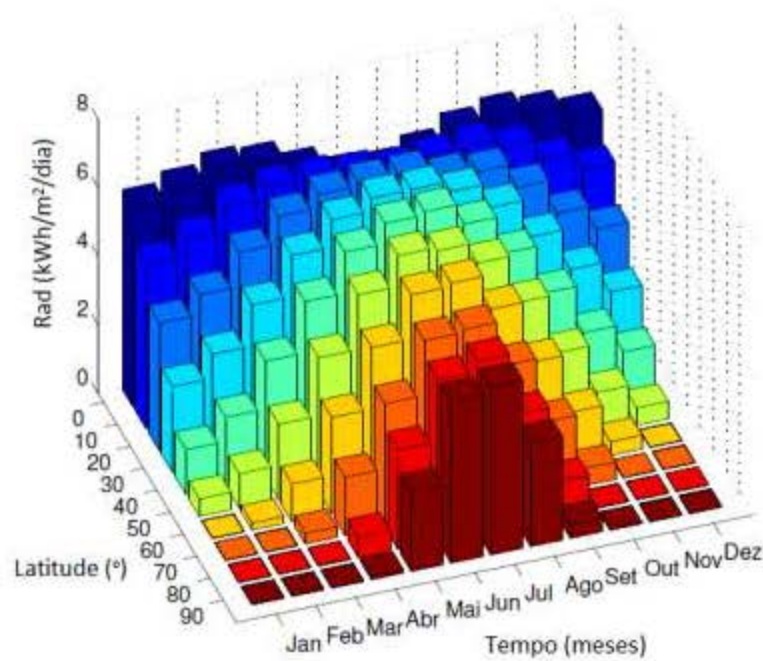


Figura 2.1: Representação da variação solar durante um ano no hemisfério Norte [9].

Portugal encontra-se numa região privilegiada devido à sua localização e à disponibilidade de radiação solar, pois nas horas de maior consumo energético, maior é a produção de energia elétrica por fontes renováveis, em particular os sistemas fotovoltaicos [10].

Desta forma a radiação solar possibilita a transformação em outros tipos de energia, exemplo mostrado na Figura 2.2, separadas em modo direto (dispositivos captadores de energia solar) e indireto (manifestações da natureza) [11].

A utilização da radiação solar direta na produção de energia elétrica com o uso de painéis fotovoltaicos é caracterizada por possuir baixa manutenção e baixo ruído, tornando o equipamento duradouro e confiável [11]. A seguir são apresentados as principais características e funcionamento de uma célula fotovoltaica.

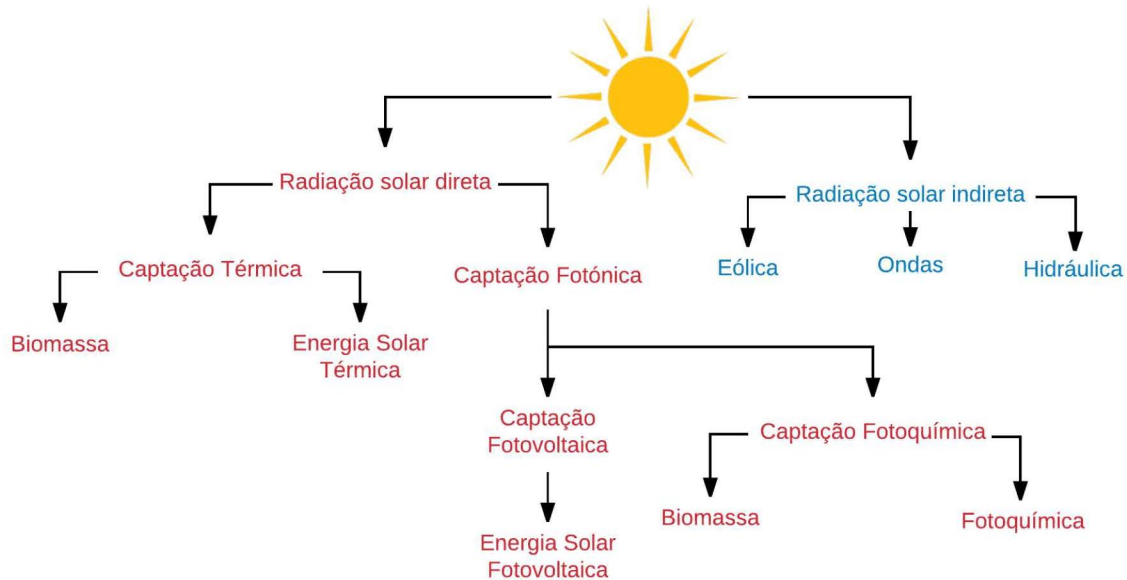


Figura 2.2: Utilização da radiação solar, adaptado de [11].

2.2 Células e módulos fotovoltaicos

Os átomos são compostos por um núcleo e por elétrons que orbitam à sua volta. Segundo a mecânica quântica os elétrons de um único átomo podem possuir distintos níveis de energias. Para aqueles elementos que possuem elétrons em múltiplas orbitais, os elétrons que estão mais próximos do núcleo possuem a característica de estar fortemente atraídos. Assim, dificilmente se desprendem e para que isso ocorra é preciso muita energia. Os elétrons que estão mais afastados do núcleo do átomo são os únicos que têm uma interação com elétrons de átomos vizinhos devido ao fato de estarem menos atraídos pelo núcleo. A localização dos elétrons fracamente ligados ao núcleo corresponde à camada ou banda de valência e os elétrons são chamados de elétrons de valência. Podem haver elétrons na banda de valência com grande quantidade de energia, permitindo saltar para uma banda superior. Esta banda superior é chamada de banda de condução, responsável por permitir aos elétrons de conduzirem eletricidade e calor. Existe uma fronteira entre os elétrons da banda de valência e da banda de condução conhecida como intervalo de banda. Desta forma, existe uma diferença entre três tipos de materiais, demonstrados na Figura 2.3 [12].

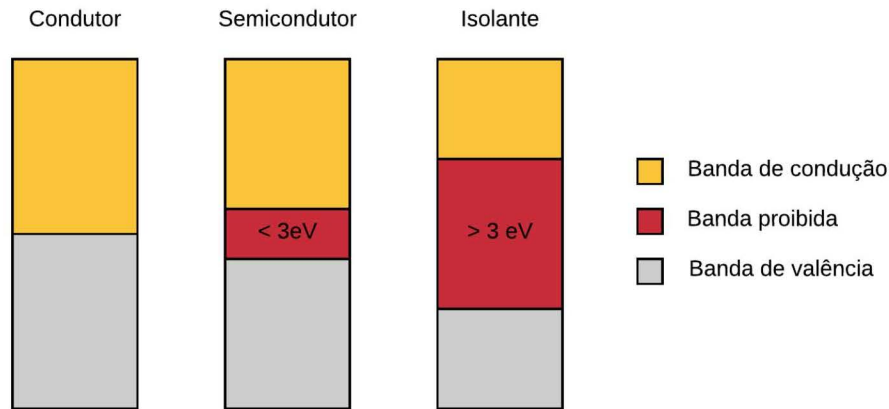


Figura 2.3: Representação das diferentes bandas de valência, adaptado de [7].

Os materiais isolantes são constituídos por uma larga faixa de banda proibida, sendo necessário aplicar muita energia (passagem de elétrons da banda de valência para de condução), isto se a intenção é torná-lo um condutor. Os materiais condutores possuem o valor de banda proibida quase inexistente, permitindo a passagem de elétrons da camada de valência para a de condução com facilidade. Exemplo de materiais condutores são os metais. Os materiais semicondutores possuem semelhanças com os materiais isolantes, o que difere é a quantidade de energia necessária para que os elétrons migrem da banda de valência para banda de condução, com um intervalo de banda proibida inferior a 3 eV (eletro-volts). Estes materiais são caracterizados por possuírem a banda de valência preenchida por elétrons e não haver elétrons na banda de condução [11], [13].

Existem dois tipos de semicondutores, os puros intrínsecos e os extrínsecos, conhecidos como dopados com impurezas. Os semicondutores intrínsecos possuem a facilidade de excitação dos elétrons por meios ópticos ou térmicos, permitindo aos elétrons deslocarem-se da camada de valência para a camada de condução, movendo-se livremente pelo cristal, formando um par lacuna-elétrão. No caso das células fotovoltaicas, estas não são constituídas por cristais de silício puro, pois os elétrons passariam para a camada de condução mas se recombinariam com as lacunas, não resultando na produção de corrente elétrica [13].

Os semicondutores extrínsecos passam por um processo de dopagem, consistindo em

adicionar elementos estranhos para alterar as suas propriedades elétricas. Desta forma, cria-se uma camada tipo-p, com excesso de cargas positivas, e uma camada tipo-n, com excesso de cargas negativas. Quando unidos os dois semicondutores diferentes do tipo-p e tipo-n, Figura 2.4, surge uma diferença de potencial, evitando a total recombinação de elétrons livres e lacunas presentes em ambos os lados [12].

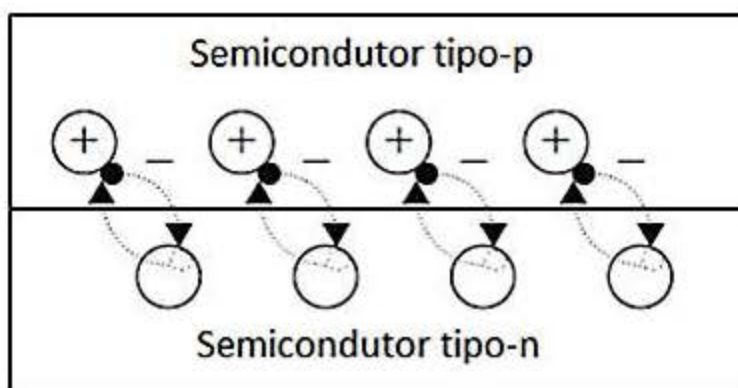


Figura 2.4: Representação da junção p-n [7].

2.2.1 Efeito fotovoltaico

O funcionamento de uma célula fotovoltaica é observado quando a junção p-n é exposta a fótons com energia superior à energia da banda proibida. Os elétrons que antes estavam localizados na banda de valência deslocam-se até a banda de condução, formando lacunas na banda de valência. Se os pares lacuna-elétron são gerados na região da junção p-n, forma-se um campo elétrico, separando-os, fazendo com que os elétrons sejam acelerados para o terminal negativo e as lacunas para o terminal positivo, verificando a tensão em circuito-aberto. Se houver ligação de uma carga externa aos terminais, os elétrons do lado negativo irão percorrer essa carga formando uma corrente elétrica. Todo este processo é designado por efeito fotovoltaico, a Figura 2.5 apresenta o modelo [9], [12].

Existem inconvenientes sobre o efeito fotovoltaico, pois apenas uma faixa de espectro solar torna possível a excitação dos elétrons nas células de silício, cada fóton consegue excitar um elétron e o excesso de energia dos fótons transforma-se em calor, reduzindo a

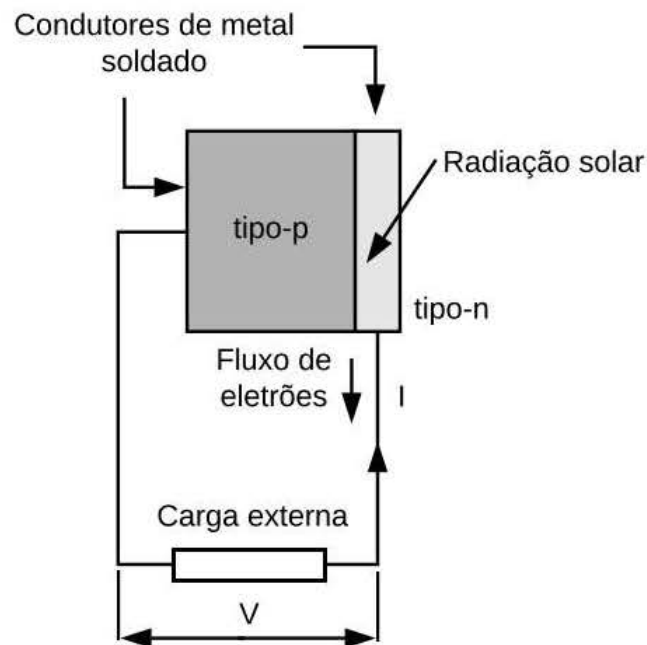


Figura 2.5: Efeito fotovoltaico, adaptado de [13].

eficiência da célula fotovoltaica [11].

2.2.2 Tecnologia das células fotovoltaicas

Grande parte das células fotovoltaicas utilizadas no mundo são compostas por Silício. Este é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre. Além do Silício, existem vários outros tipos de tecnologias em torno das células fotovoltaicas [9], [11], [12].

- Silício Policristalino;
- Silício Monocristalino;
- Silício Amorfo;
- Telureto de Cádmio;
- Disseleneto de Cobre Índio.

As duas últimas células apresentadas anteriormente utilizam materiais tóxicos (Cádmio, Telúrio e Selênio), sendo que estes e Índio são raros na natureza, proporcionando uma barreira para disseminação do uso desta tecnologia [9].

A Tabela 2.1 apresenta os materiais usados na composição das células fotovoltaicas referidas anteriormente e seu respectivo rendimento [11].

Tabela 2.1: Exemplos das tecnologias de células fotovoltaicas [11].

Material da Célula Fotovoltaica	Rendimento em laboratório (%)	Rendimento em produção industrial (%)
Silício Monocristalino	25	13 - 14
Silício Policristalino	21	11 - 14
Silício Amorfo	15	7
Telureto de Cádmio	18	7
Disseleneto de Cobre Índico	16	7

Uma única célula fotovoltaica possui baixa potência. No intuito de tornar possível o seu uso em sistemas que necessitam maiores potências, as células são ligadas eletricamente nas configurações série (aumento de tensão), paralelo (aumento de corrente) ou misto e que encapsuladas, formam o módulo fotovoltaico. A quantidade de células fotovoltaicas dentro de um módulo depende da aplicação onde o mesmo será utilizado. Depois das células fotovoltaicas serem unidas pelo processo de soldagem, é feito o encapsulamento com a finalidade de proteção contra intempéries, proporcionando resistência mecânica ao módulo fotovoltaico [7], [11].

A Figura 2.6 apresenta o esquema dos componentes constituintes de um módulo fotovoltaico.

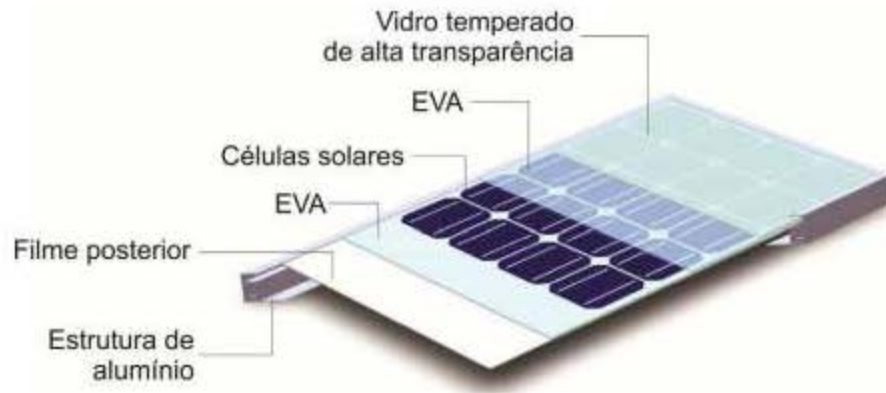


Figura 2.6: Composição de um módulo fotovoltaico [7].

O módulo fotovoltaico é composto por: um vidro temperado de alta transparência, para diminuir a reflexão solar usa-se *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) em português Etileno Acetato de Vinila, as células fotovoltaicas, o EVA novamente e um filme isolante posterior. O contorno do módulo é constituído por uma moldura em alumínio para proteção mecânica e na parte inferior o módulo possui a caixa de conexão elétrica [7], [11]. Os módulos fotovoltaicos são testados em condições padrão de ensaio, *Standard Test Conditions* STC, com o uso de 1000 W/m^2 de potência luminosa e a distribuição de espectro de massa de ar, do inglês *Air Mass* (AM) 1.5, temperatura padrão de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Com estes testes são obtidas as especificações encontrada nas folhas de dados, que são úteis para escolha do módulo a ser usado. São eles [7]:

Corrente de curto-circuito (I_{SC}): valor máximo da corrente gerada pelo painel fotovoltaico.

Tensão de circuito aberto (V_{OC}): valor máximo da tensão nos terminais quando não há cargas.

Ponto de Potência Máxima MPP: o MPP é adquirido por meio de um ensaio com as condições padrões, são registrados os valores de corrente e tensão, a multiplicação destes valores obtém-se a potência. Existe somente um ponto em que a potência é máxima, sendo este valor fornecido pelos fabricantes.

Tensão de máxima potência (V_{max}): valor máximo de tensão no ponto de máxima potência.

Corrente de máxima potência (I_{max}): valor máximo de corrente no ponto de máxima potência.

Nominal Operating Cell Temperature NOCT: no português (Temperatura Nominal de Operação da Célula), este dado normalmente encontrado nas folhas de dados refere-se à temperatura em que o módulo se encontra quando submetido a uma luminosidade de 800 W/m^2 , com a temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e velocidade do vento de 1 m/s . Significa que quanto menor a temperatura apresentada nas folhas de dados do módulo, melhor ele será, devido às perdas de eficiência causadas pelo aumento na temperatura.

Fator de Forma FF: o fator de forma representa a relação da potência MPP e o produto da tensão em circuito aberto com a corrente de curto-circuito. Quanto mais próximo de um retângulo os gráficos I-V, melhor a qualidade dos módulos.

2.2.3 Influência externas sobre módulos fotovoltaicos

Eventos naturais como temperatura e radiação solar incidente são fatores externos que influenciam o comportamento da quantidade de energia produzida por um painel fotovoltaico. O comportamento do módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino é mostrado na Figura 2.7, representando o aumento da corrente devido ao aumento da irradiação solar [7].

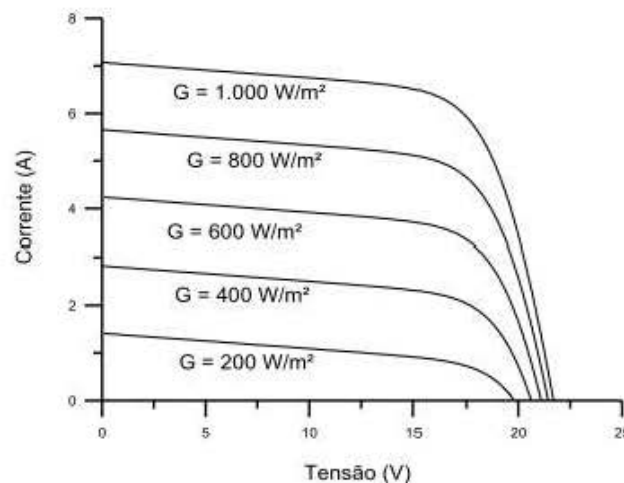


Figura 2.7: Variação de corrente devido à variação de irradiação solar [7].

Na Figura 2.8 é mostrado a diminuição da tensão e um aumento muito baixo na corrente quando se tem um aumento na temperatura do módulo fotovoltaico [7].

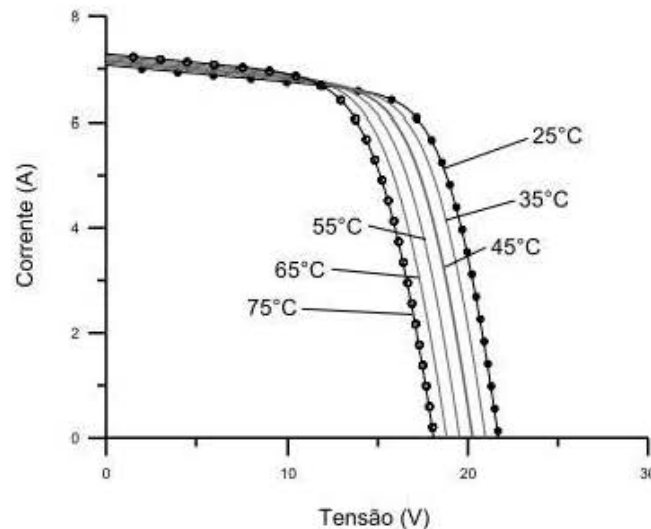


Figura 2.8: Variação de tensão com a variação de temperatura [7].

2.3 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são classificados como sistemas conectados à rede de distribuição de energia elétrica e os sistemas fotovoltaicos autônomos, os mesmos serão explicados nas próximas seções.

2.3.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de distribuição dispensam a utilização de baterias, pois a energia produzida possibilita sua utilização pela carga ou usada para ser injetada na rede elétrica de distribuição com a conversão de corrente contínua para corrente alternada. Quando não há produção pelos painéis fotovoltaicos, o consumo advém da rede de distribuição de energia elétrica. Este sistema é usualmente empregado para complementar o uso da energia elétrica fornecida pela rede de distribuição de energia elétrica [7], [11].

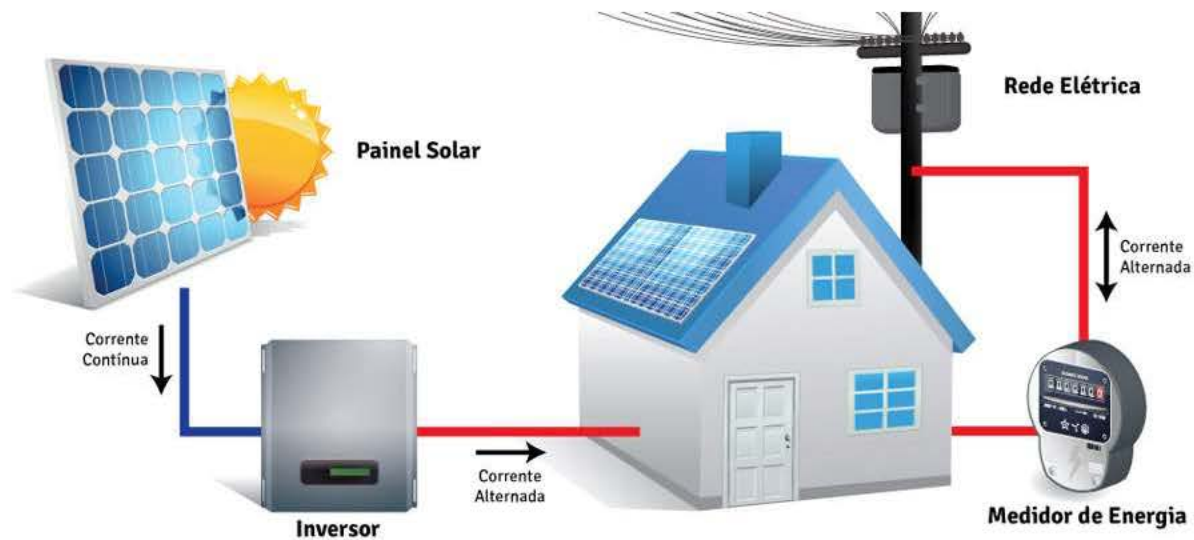


Figura 2.9: Componentes de um sistema fotovoltaico conectados à rede. Fonte: <http://www.r-ealsolar.com/pics/sistema1.jpg>.

A Figura 2.9 mostra os componentes de um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica, composto por: um painel fotovoltaico; um inversor, o qual faz a conversão da corrente contínua produzida pelo painel fotovoltaico para corrente alternada; a casa, representando a carga. Caso a produção exceda o que é consumida pela casa, o excesso da energia gerada é injetado na rede elétrica de distribuição, caso contrário, a rede elétrica de distribuição injeta energia elétrica na casa.

2.3.2 Sistemas fotovoltaicos isolados

Os sistemas fotovoltaicos isolados não possuem ligação à rede pública de distribuição de energia elétrica. Nestes sistemas ocorrem oscilações entre a produção e o consumo. Uma forma de solucionar este problema é a utilização de baterias, fazendo com que eleve o custo do sistema. A Figura 2.10 mostra um exemplo de aplicação de um sistema isolado, composto por um painel fotovoltaico, um regulador de tensão, carga em corrente contínua, um quadro elétrico e um inversor de frequência para consumo das cargas em corrente alternada.

Há duas configurações de sistemas isolados apresentado em [14] caracterizado como

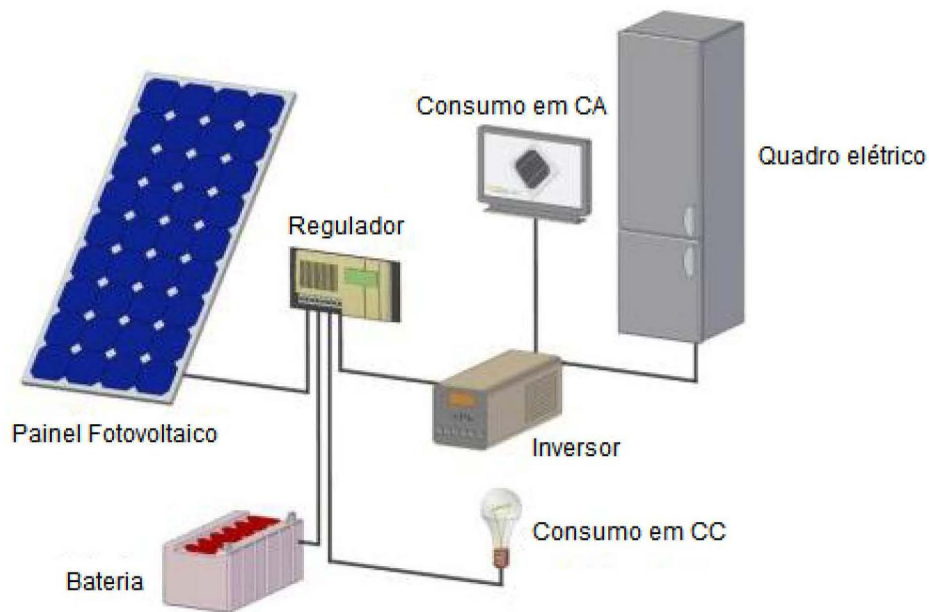


Figura 2.10: Componentes de um sistema fotovoltaico isolado, adaptado de [9].

paralelo e série. A Figura 2.11 mostra o diagrama de blocos da configuração em paralelo de um sistema isolado contendo um carregador Seguidor do Ponto de Potência Máxima SPPM, as baterias e o conversor elevador. Desta forma, quando a bateria se encontra totalmente carregada, a mesma pode ser isolada do sistema, possibilitando a carga ser alimentada por meio da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, diminuindo o desgaste da bateria. Sendo assim, a bateria é utilizada quando a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos for inferior ao que a carga consoma [14].

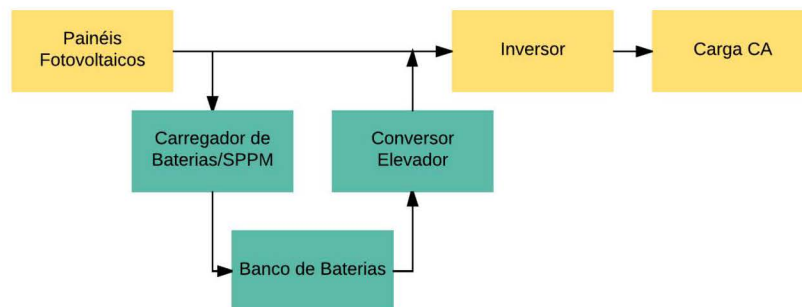


Figura 2.11: Configuração em paralelo do sistema isolado, adaptado de [14].

Na configuração série a bateria está sujeita a receber carga e descarga devido à sua localização no sistema, demonstrado no diagrama de blocos da Figura 2.12. Este sistema possui a desvantagem de desgastar a bateria devido ao contínuo fluxo de energia [14].

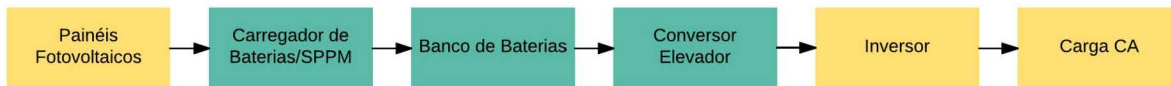


Figura 2.12: Configuração em série do sistema isolado, adaptado de [14].

A presente dissertação utiliza a configuração em série, pois o sistema é projetado para alimentar refletores LED à noite e carregar as células de lítio durante o dia possibilitando a economia de componentes no sistema.

2.3.3 Conversores CC-CC

Os conversores de *Current Constant - Current Constant* (CC-CC) no português Corrente Constante - Corrente Constante são dispositivos utilizados quando se pretende obter variação na amplitude da tensão de saída por meio de uma fonte de tensão constante na entrada. A tensão média desejada na saída é regulada de acordo com o tempo em que a saída permanece ligada à entrada. Isto é obtido com o uso de díodos, elementos passivos como bobina e condensador, dispositivo de comutação em alta frequência como TJB e TECMOS ou MOSFET [15].

Os conversores CC-CC são encontrados em diversos dispositivos e aplicações devido à necessidade na mudança de tensão sem haver perdas significativas no processo de conversão.

Nesta dissertação são usadas duas topologias, do tipo *buck*, conhecida como abaixador e do tipo *boost*, conhecida como elevador. A Figura 2.13 apresenta a topologia do tipo *buck*, composta por uma chave S , podendo ser os transistores referidos anteriormente mais o diodo, bobina, condensador e resistência. Esta configuração é utilizada no dispositivo SPPM da presente dissertação.

A topologia do tipo *buck* é caracterizada por ter na saída uma tensão menor ou aproximadamente igual à tensão de entrada, isto é realizado com a comutação de S . Quando

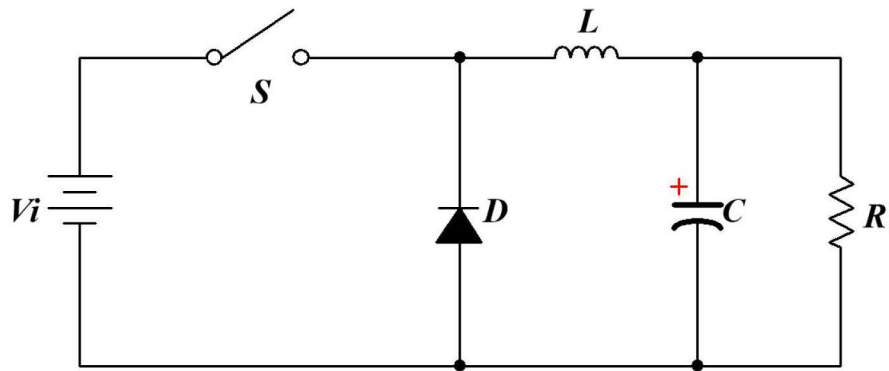


Figura 2.13: Conversor tipo *buck*, adaptado de [15].

esta se encontra fechada o díodo D encontra-se inversamente polarizado, não conduzindo, permanecendo desta forma enquanto S não for aberto. Nesta etapa a corrente flui de maneira exponencial passando pela bobina L e a carga R . Assim que a chave S se abre, a corrente que antes estava armazenada na bobina L diminui gradualmente até se anular, produzindo uma tensão de polaridade oposta, fazendo com que o díodo se torne diretamente polarizado e permitindo fluir a corrente restante armazenada na bobina. O chaveamento de S é realizado em alta frequência, tornando a saída o mais linear possível [15]. Normalmente os conversores abaixadores de tensão possuem maior eficiência [7].

O conversor do tipo *boost* eleva a tensão de saída, o esquema do circuito é apresentado na Figura 2.14.

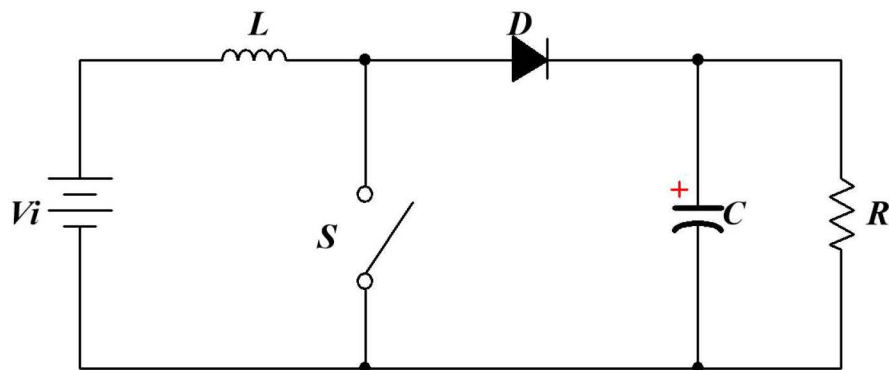


Figura 2.14: Conversor tipo *boost*, adaptado de [15].

Esta configuração é usada na presente dissertação para elevar a tensão das células de

lítio em paralelo. No conversor do tipo *boost* a tensão de saída possui aproximadamente o valor da tensão de entrada até um múltiplo deste valor, realizada por meio da comutação da chave S . Quando a mesma se encontra fechada a tensão na bobina torna-se a mesma da fonte, a corrente aumenta gradualmente fazendo com que a bobina magnetize, armazenando assim energia. Depois que a chave é aberta a bobina descarrega a sua corrente de forma abrupta até o condensador por meio do diodo. Logo em seguida a polaridade da tensão na bobina é invertida, somando-se à tensão de entrada, elevando a tensão de saída. A corrente que antes fluía em S , agora percorre o caminho em L , D , C para a carga, repetindo o ciclo continuamente de acordo com a frequência de chaveamento [15].

A seguir é apresentado o uso da técnica de controle no semicondutor atuador como chave no conversores CC-CC do tipo buck, para encontrar e extrair Máximo Ponto de Potência (MPP) na produção de energia elétrica com o uso de painel fotovoltaico.

2.4 Seguimento do ponto de potência máxima

A qualidade da produção de energia elétrica num módulo fotovoltaico apresenta características dependentes de fatores externos, havendo variações na corrente e tensão durante o dia. Como visto no tópico 2.2.3, a corrente depende da quantidade de irradiação num módulo fotovoltaico, e a tensão depende da irradiação e temperatura em que o módulo se encontra. Quanto maior a temperatura, menor a tensão, não havendo diminuição significativa na corrente. Assim, a potência gerada por módulos fotovoltaicos está intimamente ligada à irradiação e à temperatura a que se encontra. Na Figura 2.15 é mostrada a curva característica I-V de seis módulos de setenta e duas células em série [7].

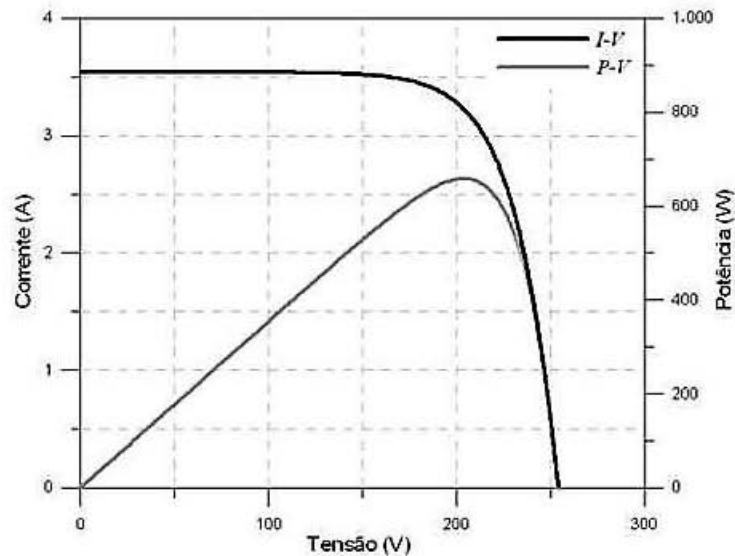


Figura 2.15: Gráfico das características I-V e P-V do painel fotovoltaico [7].

A curva de tensão e corrente apresenta distorções quando o painel fotovoltaico é impedido de receber a irradiação total. Isto ocorre com a existência de interferência externa devido o sombreamento de nuvens, folhas, entre outros. A Figura 2.16 caracteriza a diminuição da produção energética quando há interferência externa.

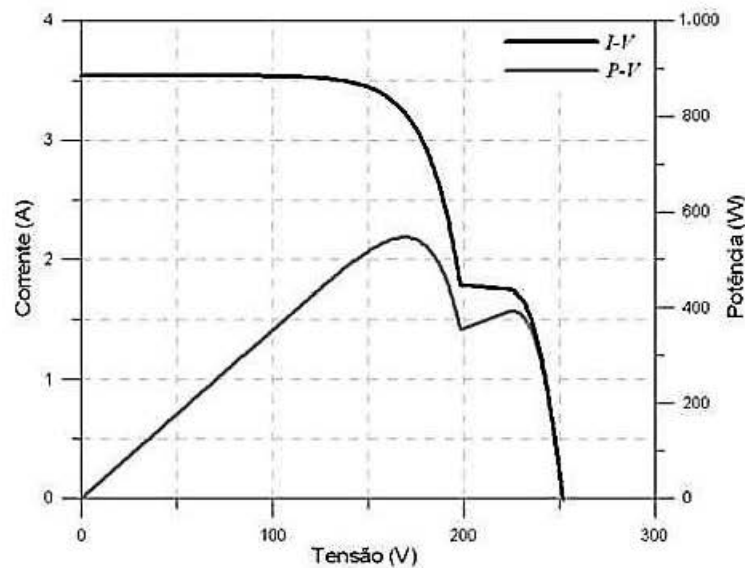


Figura 2.16: Gráfico das características I-V e P-V do painel fotovoltaico, com sombreamento de 50% [7].

Deste modo, torna-se importante a instalação de um sistema eletrônico que permita a obtenção da máxima potência produzida. Isto é realizado por meio de um sistema de controle atuante no chaveamento do conversor CC-CC, garantindo a máxima eficiência na produção de energia elétrica nos módulos fotovoltaicos. A Figura 2.11 e Figura 2.12 são exemplos de sistemas isolados caracterizados por diagramas de blocos com o uso do dispositivo Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM) [7].

Na referência [7] são apresentadas duas maneiras de se obter a potência máxima com o uso de algoritmos, possibilitando o controle da comutação dos conversores, são eles: modo indireto e modo direto. O modo indireto utiliza os parâmetros especificados do painel fotovoltaico com o uso de modelos matemáticos. Este método é pouco utilizado pois não prevê o efeito de sombreamento, envelhecimento, acumulação de sujeira, tornando, desta forma, impreciso a sua atuação. O modo direto são os mais utilizados, pois realizam medições de tensão e corrente em tempo real, sem a necessidade de informações prévias sobre o gerador fotovoltaico utilizado e sendo capaz de se adaptar a mudanças de radiação com rapidez [7].

Nos sistemas fotovoltaicos isolados não há produção de energia elétrica em períodos de ausência de radiação solar e desta forma são usadas as baterias como meio de contornar esta deficiência do sistema. No próximo tópico são apresentadas duas tecnologias armazenadoras de energia eletroquímica.

2.5 Sistema de armazenamento eletroquímico

Apresentado na seção 2.4, sistemas fotovoltaicos isolados dependem das baterias (conjunto de células em série ou paralelo) para momentos em que não há radiação solar. Para resolver deste problema, existem diversas tecnologias de armazenamento eletroquímico, que nestas aplicações são tipicamente utilizadas as baterias de chumbo ácido, as quais possuem preço reduzido e facilidade no controle de carga e descarga [7].

Por sua vez, a tecnologia das baterias de lítio possuem elevado custo, dificuldade em gerenciamento de carga e descarga e a necessidade de um dispositivo externo para proteção

contra o envelhecimento e explosão. No entanto, conta com diversas vantagens face às baterias de chumbo ácido, como: elevada densidade energética, elevada durabilidade e baixa taxa de auto descarga.

As baterias de lítio usadas em *Electric Vehicles* (EVs) em português Veículos Elétricos e *Hybrid Electric Vehicles* (HEVs) em português (Veículos Híbridos Elétricos) possuem limitado tempo de vida devido à sua utilização em altas taxas de carga e descarga, exposição às altas e baixas temperaturas, vibrações entre outros [3]. Estas baterias são normalmente substituídas quando se encontram no limite de 70% a 80% do seu estado de vida, permitindo a sua reutilização em outros sistemas com reduzidas taxas de carga e descarga [2]–[4]. Com estas informações, a presente dissertação fez uso de células reutilizadas de lítio, o que possibilita a realização de um sistema compacto e de baixo custo [5]. Nas secções seguintes são abordados o funcionamento interno das células de lítio, a descrição sobre alguns parâmetros utilizados para caracterização das células, o comportamento durante o carregamento e descarregamento, tendo em consideração os efeitos causadores do envelhecimento e a descrição do sistema de prevenção e segurança.

2.5.1 Funcionamento das células de lítio

Internamente as células de lítio são divididas em cinco regiões, mostrado na Figura 2.17. A primeira região compreende a parte do coletor de corrente, feita de cobre; seguida do ânodo (elétrodo negativo), normalmente composto por grafite; outra camada, o eletrólito, designado na figura como separador, cuja função é permitir as passagens de iões (normalmente um sal dissolvido em um solvente orgânico PF_6^-); a região do cátodo (elétrodo positivo), constituída pelo metal óxido de lítio, podendo ser Óxido de Lítio-Cobalto ($LiCoO_2$), ou Óxido de Lítio Manganês ($LiMn_2O_4$) que são os armazenadores dos iões de lítio e por fim o coletor em alumínio [6], [16].

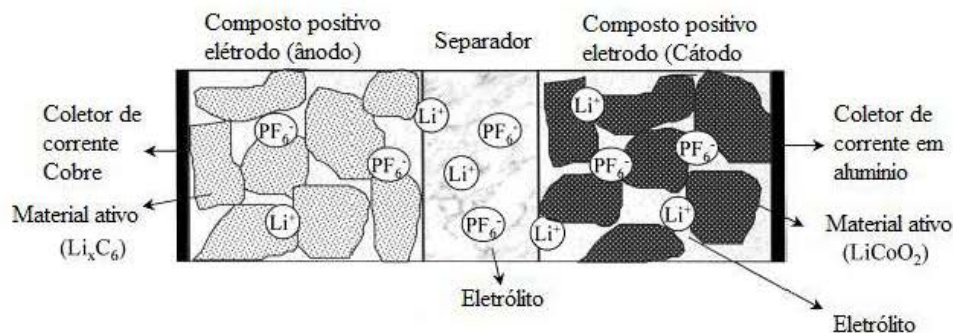


Figura 2.17: Esquema representativo de uma típica célula de lítio, adaptado de [6].

Na etapa de carregamento da célula de lítio os íons fluem do eletrodo positivo para o eletrodo negativo atravessando o eletrólito, atraídos pelos elétrons que fluem por um circuito externo e são recombinados com os íons de lítio. Quando não houver mais íons de lítio no eletrodo positivo da célula, esta encontra-se totalmente carregada.

Na descarga o processo é inverso, os elétrons fluem do terminal negativo para o positivo por meio de um circuito externo. Internamente os íons de lítio passam pelos eletrodos sendo atraídos pelos elétrons ali depositados. Quando não houver mais íons no eletrodo negativo significa que a célula está totalmente descarregada [6], [16].

2.5.2 Parâmetros utilizados nas células de lítio

O uso crescente das células de lítio em diversas aplicações está ligado às suas vantagens mencionada na secção 2.5 face a outras tecnologias de armazenamento. Estas tecnologias apresentam diversas nomenclaturas encontradas em suas folhas de dados, desta forma é importante compreender algumas destas que serão utilizadas ao longo da dissertação [6].

- **Ampere-hora (Ah)** – Medida da carga elétrica definida como o produto da corrente em amperes e o tempo em horas.
- **Medida coulomb (C)** – Usada para descrever a corrente de descarga na ordem da capacidade disponível numa bateria. Exemplo de uma bateria que será descarregada a uma taxa de 1 C, entende-se que a bateria numa hora será descarregada com sua corrente nominal;

- **Ciclos de vida** – Representa a quantidade de vezes que uma bateria possibilita o seu carregamento e descarregamento sem ocorrer perdas significativas na capacidade original de armazenamento. Cada ciclo corresponde a uma carga e uma descarga;
- **Tensão de corte** – Menor tensão, medida em volts, numa bateria ou célula, considerando-a esgotada;
- **Profundidade de descarga** – Descrito como *Depth of Discharge* (DoD) é a quantidade de carga que pode ser retirada de uma bateria, expressa em percentagem;
- **Profundidade de carga** – Descrito como *Depth of Charge* (DoC) é a capacidade de carga que pode ser inserida em uma bateria, expressa em percentagem;
- **Estado de carga** – Descrito como *State of Charge* (SoC) é a capacidade existente de energia armazenada em determinado momento numa bateria, expressa em percentagem.

2.5.3 Comportamento das células de lítio

O desempenho das células de lítio está ligada ao modo em que foi utilizada, sendo de extrema importância caracterizar os fatores externos aceleradores do processo de envelhecimento. Prevenir e evitar estes fatores faz com que seja prolongado o seu tempo de vida. Mediante isto, são descritos alguns desses em [13], [16]:

- Exposição e operação em altas temperaturas (aumento do desempenho mas redução dos ciclos de vida);
- Operação em baixas temperaturas (aumento da resistência interna, redução das reações químicas internas, redução da capacidade de descarga e quando carregadas eleva-se a temperatura);
- Altas taxas de profundidade de descarga;
- Altas taxas de profundidade de carga.

Reddy et al., [13] afirma não haver diferenças significativas no comportamento das diversas tecnologias de células de lítio. Assim, o mesmo apresenta diversos testes realizados na célula de Óxido de Lítio-Cobalto (LiCoO_2), modelo UR18650F, marca SANYO. A Figura 2.18 mostra como a tensão se comporta quando se aplica diferentes taxas de descarga. Quanto maior a taxa de descarga mais rápido a célula tende a ficar totalmente descarregada.

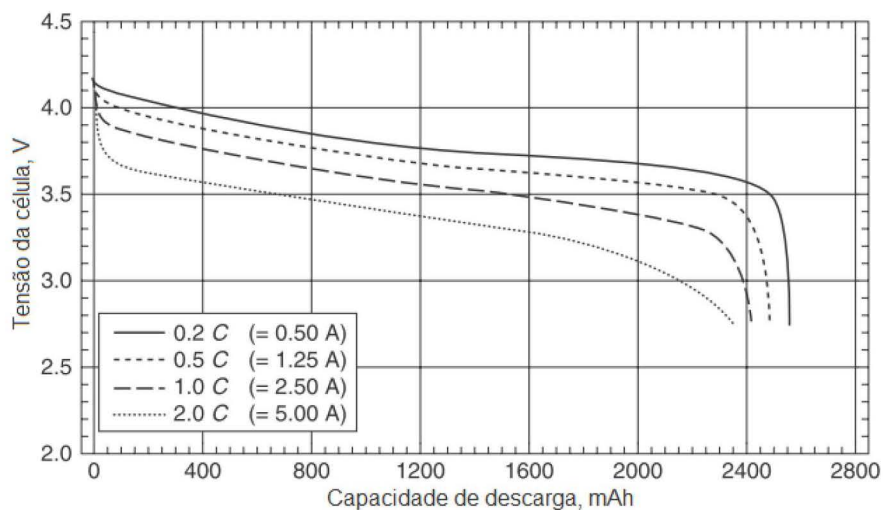


Figura 2.18: Taxa de descarga a uma temperatura de 20 °C da célula de lítio SANYO UR18650E, adaptado de [13]

É apresentado na Figura 2.19 o comportamento do mesmo modelo de célula quando submetida a uma taxa de descarga de 1 C variando sua temperatura. Quanto menor temperatura menor a capacidade entregue a carga, sendo o inverso quando a temperatura é elevada.

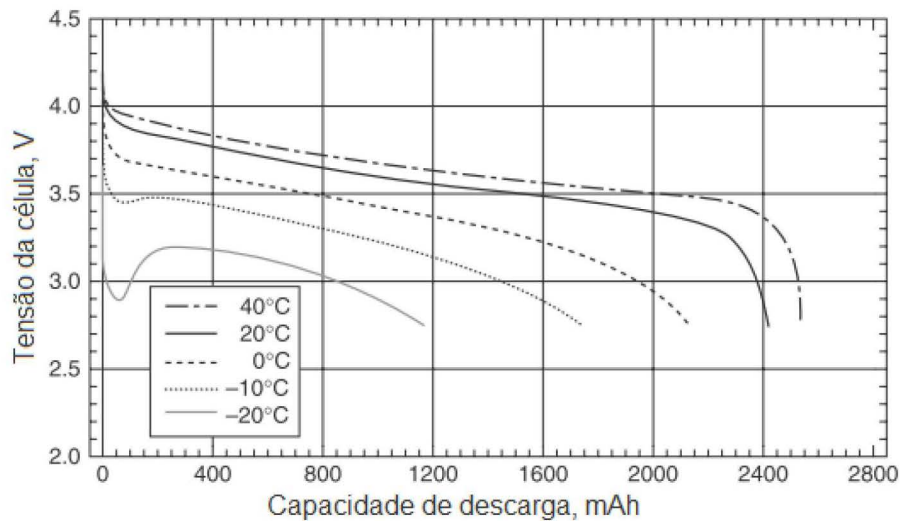


Figura 2.19: Comportamento da célula de lítio a uma taxa de descarga 1 C com variações em sua temperatura, adaptado de [13].

As células de lítio são carregadas por meio do método *Current Constant - Voltage Constant* CC-CV, no português Corrente Constante - Tensão Constante. A Figura 2.20 mostra o comportamento da célula com as variações de temperatura. É visto que quanto maior temperatura, mais rápido a célula atinge o total de sua carga havendo um incremento em sua capacidade. Como consequência, há o desgaste interno e redução no tempo de vida das mesmas.

Como apresentado anteriormente, as células de lítio reagem de acordo com a temperatura de operação, fazendo com que haja envelhecimento e perdas nos números de ciclos de vida. A Figura 2.21 retrata o comportamento da capacidade de acordo com a quantidade de ciclos de vida em duas células com diferentes temperaturas. A célula submetida a uma temperatura de 23 °C possui maior capacidade por ciclo de vida enquanto a outra célula submetida a 45 °C tem uma redução da sua capacidade por números de ciclos de vida.

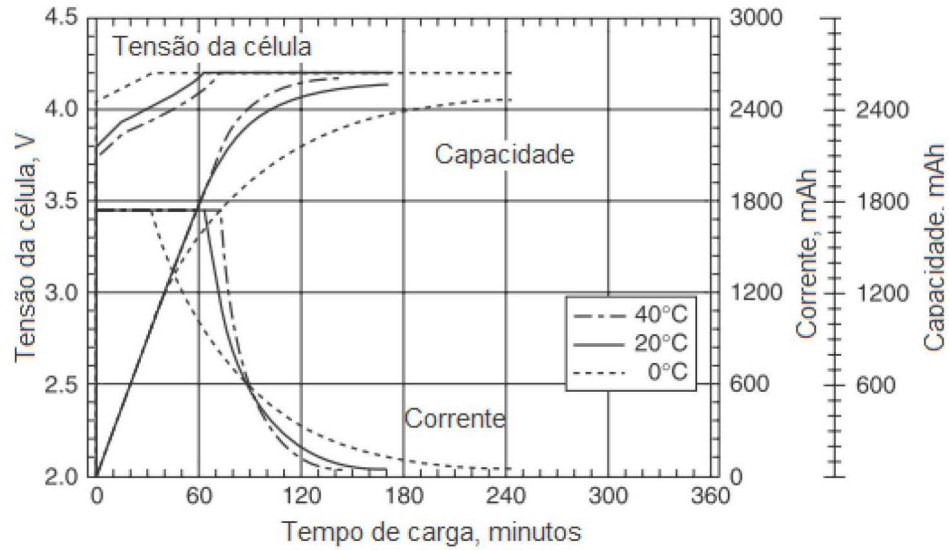


Figura 2.20: Característica de carga da célula de lítio SANYO com variações na temperatura, adaptado de [13].

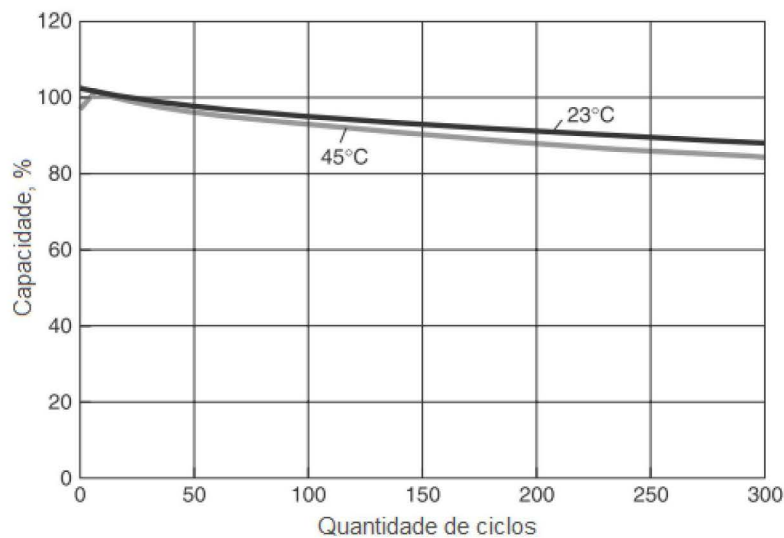


Figura 2.21: Capacidade das células de acordo com a temperatura e o número de ciclos de vida, adaptado de [13].

Pop et al., [6] aplicou um teste em duas células de lítio do mesmo modelo, em uma temperatura de 25 °C, com o propósito de demonstrar como o efeito de envelhecimento está ligado ao modo em que a célula é carregada. A primeira célula Q_{d1} da Figura 2.22 foi carregada com o modo CC-CV. Quando a célula está próxima da carga completa, a corrente decresce, aproximando-se de zero. Depois desta fase é aplicado uma corrente de quatro vezes a carga nominal, e em seguida a célula é colocada em repouso durante 30 minutos. Depois disto a célula é submetida a uma descarga com taxa de 0.5 C. Este processo termina quando a célula alcança a tensão de três volts. O processo é repetido e os dados coletados são mostrados no gráfico da Figura 2.22 onde se pode verificar o quanto a célula de lítio sofre o efeito de envelhecimento, diminuindo os ciclos de vida e sua capacidade, quando se aplica uma sobrecarga.

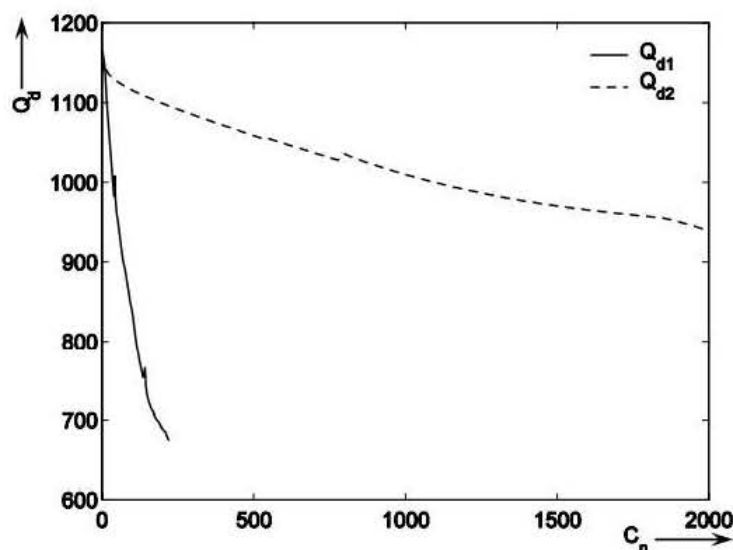


Figura 2.22: Gráfico demonstrando o efeito de envelhecimento de duas células de lítio em diferentes situações Q_{d1} e Q_{d2} [6].

O mesmo autor realiza um outro teste em outra célula, definindo os limites de 30% e 70% de descarga e carga, respectivamente. Aplica-se o método de CC-CV para carregar a célula e descarregar a uma taxa de 0.5 C. Desta forma a Figura 2.22 demonstra o comportamento da célula que passou por este processo, Q_{d2} . Nota-se o aumento do número de ciclos de vida e a quantidade de carga disponível na célula devido aos limites

colocados de carga e descarga, visto que o processo de envelhecimento ocorreu mas não tão significativamente quanto a célula anterior.

2.5.4 Exemplos de tecnologias de lítio

Há diversas composições químicas presentes nas células de lítio, diferindo cada qual nas suas características. A Tabela 2.2 expõe algumas tecnologias, como: LiNiMnCoO_2 (Lítio Níquel Manganês Óxido de Cobalto), LiFePO_4 (Lítio Ferro Fosfato) e $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (Óxido de Titânio Lítio), apresentando as principais aplicações de cada uma.

Tabela 2.2: Síntese dos exemplos das tecnologias de lítio [16].

Especificações	LiNiMnCoO_2	LiFePO_4	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
Tensão Nominal (V)	3.6 ou 3.7	3.2 ou 3.3	2.4
Capacidade (Wh/kg)	150 – 220	90 – 120	70 – 80
Carga Taxa Coulomb	0.7 - 1C	1C	1C - 5C
Descarga Taxa Coulomb	1 C e 2 C em algumas células	1 C, 25 C em algumas células	10 C possível
Ciclo de vida	1000 – 2000	1000 - 2000	3000 - 7000
Aplicações	Bicicletas elétricas, dispositivos médicos, indústria.	Dispositivos portáteis estacionários que necessitam de alta taxa de corrente e resistência.	UPS, postes de iluminação com energia solar.

A empresa *A123 System* tem vindo a ser destacada pela sua especialidade em desenvolver e fabricar células de Lítio Ferro Fosfato, com o que tem de mais inovador em sua tecnologia, sendo aplicado em veículos elétricos urbanos e de competição. A empresa *A123* é parceira tecnológica com os veículos de competição *Porsche 919 Híbrido* [17].

O uso das células de lítio sem um sistema confiável de monitorização e proteção pode provocar redução significativa no tempo de vida e risco de explosão. Desta forma, torna-se necessário o uso de circuitos de proteção, os quais monitorizam e controlam quantidade

de carga e descarga nas células [6]. Estes circuitos são nomeados *Battery Management System* (BMS) apresentado na próxima secção.

2.6 *Battery Management System* (BMS)

O BMS é um circuito eletrónico com a função de monitorizar e controlar a carga, descarga e temperatura em que a bateria se encontra, assegurando o seu funcionamento em uma região segura, prevenindo o excesso de envelhecimento e risco de explosões [6].

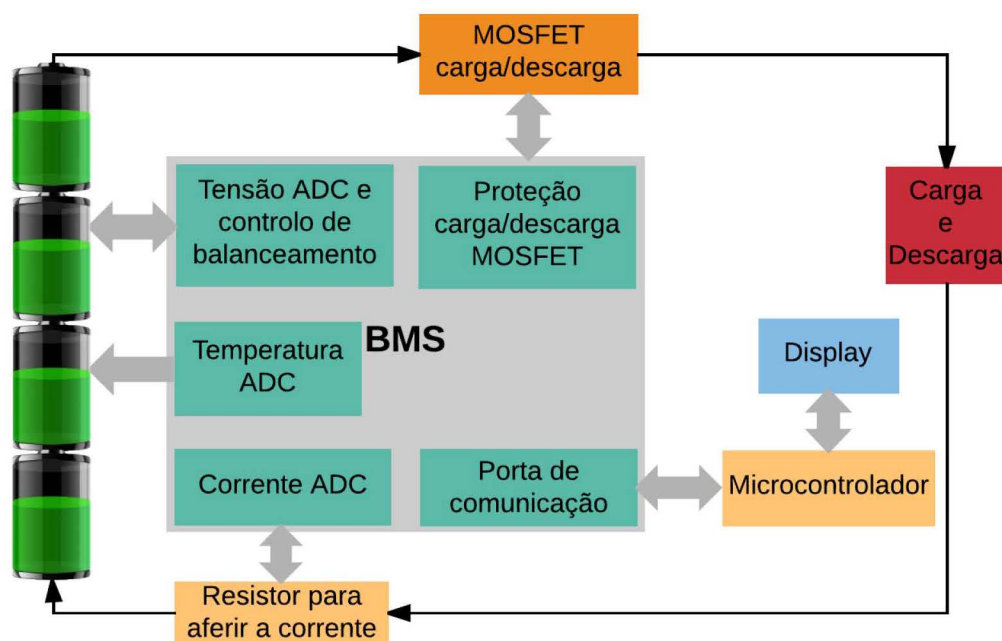


Figura 2.23: Exemplo de diagrama de blocos de um BMS, adaptado da fonte: <https://apprenti-ceofart.deviantart.com/art/Battery-Icon-175541284>

A Figura 2.23 mostra um exemplo de diagrama de blocos no qual o BMS gere a temperatura da bateria, mede a corrente de carga e descarga da bateria, verifica a tensão das células, controla o balanceamento das células que compõe a bateria, e disponibiliza a comunicação para um microcontrolador, no qual possibilita a visualização dos parâmetros pretendidos.

As medidas aferidas pelos blocos que compõe o BMS como tensão, corrente e temperatura, são utilizadas para estimar o estado de carga com o uso de algoritmos próprios.

Esta estimativa é utilizada para tomada de decisões sobre o controle da carga e descarga da bateria [6].

A complexidade interna nas reações químicas das células de lítio torna a avaliação do estado de carga imprecisa, sendo um desafio projetar um sistema fiel que consiga estimar de forma razoável o seu estado atual [13].

Capítulo 3

Desenvolvimento do trabalho

O objetivo deste capítulo é apresentar a descrição da proposta sugerida da presente dissertação, justificar o dimensionamento e escolha dos componentes adotados para alcançar a solução do problema proposto.

3.1 Proposta inicial

Como referido no Capítulo 1, o objetivo desta dissertação é projetar um sistema capaz de gerir o carregamento e descarregamento das células reutilizadas de lítio, contabilizar a carga e descarga do sistema, gravando estes dados diariamente na memória interna do microcontrolador, para que estes dados possam ser analisados pelo instalador do sistema com a finalidade de avaliar os resultados e verificar possíveis falhas na bateria.

Primeiramente é mostrado na Figura 3.1 o sistema utilizado pela empresa Natureza Prima, a qual sugeriu a proposta da dissertação. Constituído por um painel fotovoltaico de 10 W, um refletor a LED de 10 W, um regulador de tensão e uma bateria de chumbo ácido de 12 V com capacidade de 7 Ah.



Figura 3.1: Sistema de iluminação autônomo da empresa Natureza Prima.

Este sistema foi projetado para possuir uma autonomia de duas horas por dia para todos os dias do ano. Utilizado em corriças e estábulos, garante uma iluminação adequada para as atividades de pessoas que não possuem acesso à rede de distribuição de energia elétrica.

A empresa possui um produto com a mesma finalidade do projeto desta dissertação, porém o mesmo enfrenta o problema de não permitir o conhecimento da quantidade de carga e descarga que está a ser utilizada diariamente, a não gestão da descarga fazendo com que as baterias tivessem uma descarga abaixo do seu limite, estragando-as, além de apresentar as limitações quanto ao uso de baterias de chumbo ácido, as quais apresentam reduzidos ciclos de vida, excesso de peso e maiores dimensões.

3.2 Dimensionamento do sistema

Inicialmente, foi necessário conhecer as características da carga a ser alimentada, assim como as perdas nos componentes do sistema; em seguida, a localização onde o sistema será implantado, verificando a radiação existente no local, tornando estes dados relevantes para o processo de dimensionamento do painel fotovoltaico.

Os dados relativos a radiação solar serão obtidos utilizando um software online denominado PVGIS, sendo avaliadas as médias diárias das taxas de radiação durante os meses do ano na região de Trás-os-Montes, em Portugal.

Logo em seguida, será feita uma análise da tecnologia de armazenamento adotada, com o intuito de dimensionar e prever o comportamento da mesma, levando em conta a carga a ser usada, as perdas do sistema e as variações climáticas na região de Trás-os-Montes.

3.2.1 Carga a alimentar

Como visto na secção passada, inicialmente, é preciso determinar o consumo diário da carga a ser utilizada. O sistema deve consumir o mínimo de energia possível, satisfazer a luminosidade e autonomia requerida. Desta forma, devido ao baixo consumo, longevidade, facilidade em sua alimentação em corrente contínua, além de ser ecologicamente correta, será adotada uma luminária a LED de 10 W [18].

O sistema pretende alimentar a carga somente de duas a três horas. Sendo assim, a empresa optou escolher o menor tempo de descarga para o dimensionamento da carga. A quantidade total de energia elétrica consumida pela carga em base diária será obtida pela fórmula (3.1).

$$E_{\text{dia}} = 10 \text{ W} \cdot 2 \text{ h/dia} = 20 \text{ Wh/dia} \quad (3.1)$$

3.2.2 Taxa de irradiação solar

A avaliação da quantidade de irradiação será feita *online* por meio do software PVGIS. Este *software* utiliza um extenso banco de dados, que permite obter o total de irradiação diária média durante todos os meses do ano e o ângulo ótimo para instalação do painel fotovoltaico [19].

É mostrado na Tabela 3.1 os níveis de irradiação média para cada mês do ano na região de Trás-os-Montes, com um ângulo ótimo de 34° direcionado para o Sul geográfico.

Tabela 3.1: Dados de irradiação média para cada mês do ano (kWh/m²/dia), PVGIS [19].

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Irradiação	2770	4420	5500	5560	6300	6900	7320	7280	6450	4760	3330	2730	5280

Com estes dados é conclusivo que a média anual para uma inclinação ótima na região de Trás-os-Montes é de 5280 Wh/m²/dia e que a menor irradiação nesta região corresponde a 2730 Wh/m²/dia no mês de dezembro. Uma análise importante no dimensionamento do sistema é garantir que o painel fotovoltaico produza a quantidade suficiente de energia elétrica durante todos os dias do ano. Para isto, será considerado o pior caso, sendo utilizado a menor taxa de irradiação solar durante o ano [7].

3.2.3 Dimensionamento do painel fotovoltaico

O dimensionamento do painel fotovoltaico juntamente com os componentes do sistema será realizado por meio da quantidade de irradiação incidente na localidade de instalação do mesmo e o consumo de energia da carga a ser alimentada, ambos mencionados em secções anteriores. Além disto, os componentes que atuam no sistema apresentam perdas, as quais devem ser levadas em consideração.

Para estimar as perdas nas canalizações, nas células de lítio, no conversor CC-CC, é utilizado os valores encontrados na Tabela 3.2, que são valores padronizados encontrados na referência [20].

Tabela 3.2: *Valores típicos de perdas encontrados em [20].

Dados de dimensionamento	Valores
Carga instalada	10 W
Consumo diário de energia elétrica	20 Wh/dia
Média mensal da irradiação diária	2730 Wh/dia/m ²
Eficiência das canalização*	98%
Eficiência da bateria*	95%
Eficiência do Conversor CC-CC*	90%

Com o valor da quantidade média de irradiação solar durante os dias de cada mês do ano apresentada na secção anterior, será conveniente obter o valor acumulado da energia gerada em número de horas de Sol pleno, isto é, o número de horas em que a irradiação solar permanece igual a 1000 W/m²/dia. Na secção anterior foi justificado o uso da menor irradiação durante o ano para o dimensionamento do painel fotovoltaico.

Assim será utilizado 2730 Wh/m²/dia para obter o número de Horas de Sol Pleno (HSP) [7], [20]:

$$HSP = \frac{2730 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}}{1000 \text{ W/m}^2} = 2.73 \text{ h/dia} \quad (3.2)$$

Com os valores da Tabela 3.2 e a quantidade em Horas de Sol Pleno é obtido a potência mínima do painel fotovoltaico:

$$P_{\min} = \frac{20 \text{ Wh/dia}}{2.73 \text{ h/dia}} = 7.33 \text{ W} \quad (3.3)$$

E a potência corrigida devido às perdas no sistema:

$$P_{\min\text{Corr}} = \frac{7.33 \text{ W}}{0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.9} = 8,75 \text{ W} \quad (3.4)$$

O painel fotovoltaico disponibilizado pela empresa possui as especificações técnicas apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Especificações técnicas do painel fotovoltaico utilizado pela empresa.

Caracterização	Valores
Máxima Potência	10 W
Tensão da Máxima Potência	17.1 V
Corrente de Máxima Potência	0.59 A
Tensão de Circuito Aberto	21.8 V
Corrente de Curto-Circuito	0.65 A
Eficiência do Painel	15%

3.2.4 Dimensionamento da bateria

O sistema desenvolvido possui a necessidade da utilização de bateria para o armazenamento de energia elétrica produzida pelo painel fotovoltaico, para alimentar um projetor a LED nos horários em que não se tem radiação solar.

Os sistemas fotovoltaicos autónomos possuem como principal característica o preço elevado quando são utilizadas as baterias. Desta forma, torna-se imprescindível entender

o funcionamento da tecnologia adotada, a qual foi justificada na secção 2.5 do Capítulo 2. Assim, aplicar o controlo de carga e descarga fazendo com que haja um aumento significativo no tempo de vida útil da mesma.

O dimensionamento da bateria utilizada é realizada considerando a autonomia do sistema, o comportamento da profundidade de descarga em relação ao número de ciclos e a temperatura a que a mesma está sujeita.

A autonomia corresponde à quantidade de tempo em que a energia armazenada na bateria permite alimentar a carga, não havendo reposição de energia devido aos dias com radiação solar reduzida. Isto é um fator que está diretamente ligado ao custo total do sistema [7].

Na secção 2.5.3 do Capítulo 2 foi apresentado o comportamento das células de lítio em relação a profundidade de descarga e o comportamento da mesma quando submetida a diferentes temperaturas. Desta forma, é preciso conhecer as temperaturas onde o sistema será implantado assim como a carga dimensionada na secção anterior.

A Tabela 3.4 mostra as temperaturas médias mensais durante um ano na cidade de Bragança, com os valores de temperatura mínima, média e máxima mensal.

Tabela 3.4: Dados de temperatura durante um ano em Bragança [21].

Temperatura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mínima (°C)	0.1	0.7	3.3	4.8	7.5	10.9	12.9	12.7	10.5	6.9	3.2	0.8
Média (°C)	3.9	5.5	8	10.2	12.9	17.3	20.2	20.3	16.9	12.2	7.5	4.4
Máxima (°C)	7.7	10.4	12.7	15.7	18.4	23.8	27.5	27.9	23.4	17.5	11.9	8

Tendo em conta o pior caso, a menor temperatura que se espera nesta região é de 0.1 °C e a maior temperatura é de 27.9 °C. A temperatura máxima não apresenta mudança significativa quanto ao desempenho das células de lítio, enquanto que a temperatura mínima possui a desvantagem de diminuir a performance na carga e descarga das células de lítio [22].

Pelas folha de dados das células de lítio modelo 18650 e a Figura 2.19 [13], quando há variação na temperatura de 20 °C para 0 °C há uma diminuição de aproximadamente

10% na sua capacidade de descarga, permitindo obter um valor aproximado de correção para o dimensionamento da mesma.

Um dos fatores que aceleram o processo de envelhecimento das células de lítio são as altas taxas de descarga e de carga, reduzindo os ciclos de vida. A presente dissertação utiliza células de lítio reutilizadas, portanto será considerado um desgaste e com isto deverá haver a redução da taxa de descarga para que as mesmas possam atuar por maior tempo e ciclos de vida possíveis.

Com as informações apresentadas anteriormente, é realizado o dimensionamento do banco de células de lítio [20]. Primeiramente será realizado o cálculo do consumo diário de descarga, ou seja, a capacidade da bateria:

$$C_{\text{dia}} = \frac{\text{Consumo de potência em horas}}{\text{Número de células} \cdot \text{tensão nominal}} = \frac{20 \text{ Wh}}{4 \cdot 3.7 \text{ V}} = \frac{20 \text{ Wh}}{14.8 \text{ V}} = 1.35 \text{ Ah} \quad (3.5)$$

Consumo da descarga levando em consideração as perdas:

$$C_{\text{diaCorr}} = \frac{1.35 \text{ Ah}}{0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.9} = 1,61 \text{ Ah} \quad (3.6)$$

Um dado descrito no Manual e Guia Técnico de Energia caracterizado como empírico é a quantidade de dias em que a bateria deve alimentar a carga sem haver "dias de Sol", possuindo uma autonomia de 2 a 3 dias no verão e 3 a 4 dias no inverno [23]. Baseado na experiência do produto oferecido pela empresa Natureza Prima, foi escolhido uma autonomia de dois dias para o sistema. Além deste fator, para o dimensionamento foi escolhido a profundidade de descarga de 70% devido a utilização de células reutilizadas de lítio e um coeficiente para correção relativo as variações de temperatura ao longo do ano, descrito anteriormente. Assim, é obtido:

$$C_{\text{total}} = \frac{\text{Autonomia[dias]} \cdot \text{Consumo[Ah]}}{\text{DoD} \cdot \text{Coeficiente de correção da temperatura}} = \frac{2 \cdot 1.61 \text{ Ah}}{0.7 \cdot 0.9} = 5.11 \text{ Ah} \quad (3.7)$$

Deste modo, será preciso contabilizar a quantidade de carga em cada célula de lítio e fazer arranjos em paralelo para alcançar a corrente dimensionada e em série para elevar a tensão até à desejada. Isto será realizado com o uso do carregador IMAX B6 da empresa SKYRC com as funções de contabilizar a quantidade de carga em cada célula por meio da carga e descarga, além de informar a resistência interna de cada célula [24].

3.2.5 Conversor SPPM

Apresentado o conceito na secção 2.4 no Capítulo 2, os painéis fotovoltaicos são submetidos a diferentes níveis de irradiação ao longo do dia, havendo oscilações na geração de energia elétrica. Para garantir o máximo proveito da potência gerada pelo painel fotovoltaico e garantir maior eficiência no carregamento da bateria, será utilizado um conversor SPPM, Figura 3.2, contendo o circuito integrado de controle BQ24650 da empresa Texas Instruments™. Este circuito integrado garante o chaveamento do conversor abaixador de maneira que se extraia a máxima potência produzida pelo painel fotovoltaico e disponibiliza em sua saída uma tensão regulada, possibilitando o carregamento da bateria de lítio.



Figura 3.2: Conversor SPPM BQ24650.

Para o processo de carga primeiramente o sistema verifica a tensão nos terminais da bateria, se a mesma apresentar tensão abaixo do limite configurado, é aplicado uma corrente de 1/10 da nominal durante trinta minutos, com a intenção de carregar a bateria profundamente descarregada. Caso a tensão da mesma não atinja um limite de operação, o modo de carregamento do dispositivo é desligado e o dispositivo emite um alerta; Caso a bateria esteja em condições de receber o carregamento, a mesma é submetida ao processo

CC-CV mostrado na secção 2.5.3, Figura 2.20, a carga termina quando a corrente decai a 1/10 da corrente nominal configurada, logo em seguida uma tensão é aplicada para compensar o efeito de auto descarga, sendo de 100 a 200 mV a mais do limite da tensão constante de carregamento.

Na Tabela 3.5 é descrito os dados do dispositivo SPPM utilizado.

Tabela 3.5: Dados do dispositivo BQ24650 SPPM.

Característica	Parâmetros
Potência máxima do painel solar	80 W
Tensão de entrada painel solar	5 a 28 V
Tensão de saída	4.2 a 28 V
Precisão tensão de carga regulada	$\pm 0.5\%$
Precisão corrente de carga regulada	$\pm 3\%$
Tensão de entrada regulada	$\pm 0.6\%$

3.3 Demais dispositivos utilizados

Para solução do problema proposto são apresentadas duas soluções, as quais serão descritas em pormenor no próximo capítulo. A diferença entre as duas soluções é a configuração das células de lítio, sendo que a primeira solução utiliza células de lítio em paralelo enquanto que a segunda solução utiliza as células de lítio em série. Desta forma, a Figura 3.3 apresenta o primeiro sistema. As setas que estão dentro do quadrado azul representam um tipo de comunicação. Os blocos com duas setas representam a comunicação *Two Wire Interface* (TWI), os blocos com uma seta verde representam a comunicação por meio de portas analógicas e uma seta vermelha representa as ações de controle por meio do uso de portas digitais. O Arduino atua como gestor das cargas e descargas, além de comandar os periféricos analógicos que controlam o sistema. Isto é realizado por meio das medidas adquiridas pelas portas analógicas ligadas aos sensores de corrente e temperatura. O *Real Time Clock* (RTC) é utilizado para contabilizar os dias para gravação da carga consumida diariamente e para contabilizar o estado de carga das células de lítio é utilizado o MAX17043. Com estas medidas são realizadas operações

matemáticas que permitem apresentar no *display* OLED os dados relativos à quantidade de carga, temperatura e autonomia em horas da funcionalidade do sistema.

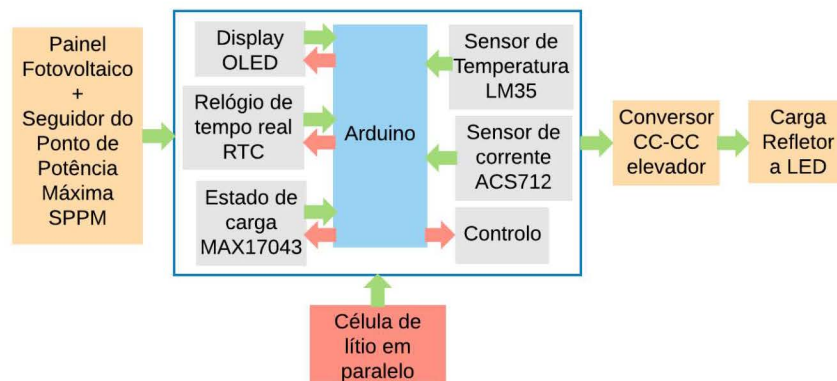


Figura 3.3: Circuito 1.

No segundo circuito apresentado na Figura 3.4, foram retirados o RTC e o MAX17043, sendo os mesmos substituído por funções programadas no microcontrolador. Além disto, o segundo circuito conta com a modificação da configuração das células de lítio, agora em série, juntamente com o dispositivo responsável por balancear a carga das células de lítio, o *Battery Management System* (BMS).

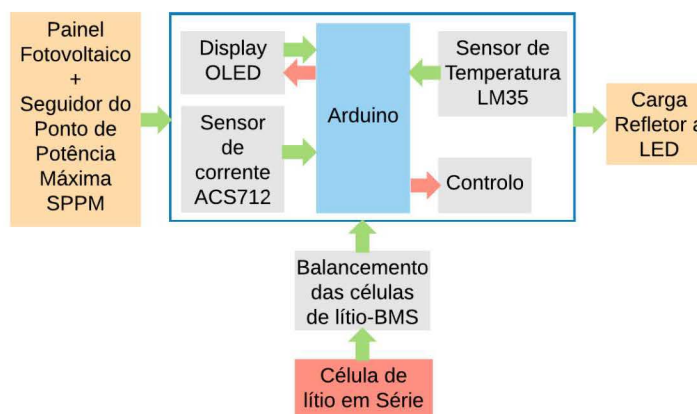


Figura 3.4: Circuito 2.

Depois de apresentado os dois circuitos desenvolvidos, as secções seguintes são descritos em pormenor os periféricos utilizados no sistema.

3.3.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma embarcada que permite programar e interagir com dispositivos e sensores externos por meio de suas portas analógicas e digitais disponíveis como entradas e saídas. A plataforma é constituída por um microcontrolador Atmel AVR, um cristal oscilador, um regulador de tensão linear e comunicação serial com USB. A programação é realizada em um ambiente de desenvolvimento integrado, sendo feito o carregamento da programação baseada em C em sua memória interna. Tanto o *hardware* como *software* do Arduino são de domínio público, permitindo o uso para qualquer propósito. São apresentados algumas características deste dispositivo na Tabela 3.6 [25].

Tabela 3.6: Caracterização do *hardware* do Arduino UNO [26].

Característica	Parâmetros
Microcontrolador	Atmega 328P
Tensão operacional	5 V
Tensão de alimentação	7 - 12 V
Entradas e saídas digitais	14 (6 PWM)
Entradas analógicas	6
Corrente por pino	40 mA
Memória Flash	32 KB
EEPROM	1 KB
Clock	16 MHz

Na Figura 3.5 é mostrado a plataforma utilizada nesta dissertação.



Figura 3.5: Arduino Uno. Fonte: <https://store.arduino.cc/genuino-uno-rev3>.

3.3.2 Sensor de corrente

O projeto da dissertação conta com um sensor de corrente de efeito Hall, cuja função é realizar a medição da corrente de carga e descarga da bateria de lítio. O modelo usado ACS712 da empresa Allegro™ possui a sensibilidade de 66 a 185 mV/A, e pode ser utilizado em corrente alternada ou contínua. O valor da corrente é obtido com a variação da tensão da saída analógica do sensor. A Figura 3.6 mostra a imagem do sensor e a nomenclatura dos seus respectivos terminais.



Figura 3.6: Sensor de corrente ACS712. Fonte: <https://www.arduinoecia.com.br/2016/04/-como-usar-o-sensor-de-corrente-ac712.html>

O sensor ACS712 é do tipo invasivo, isto é, sua funcionalidade depende de uma interrupção no circuito. O pino **GND** corresponde à massa do circuito; a **Saída Analógica** é ligada ao terminal analógico do Arduino, onde se obtém o valor da tensão de acordo com a intensidade da corrente entre os **Bornes**; **Vcc** é o pino de alimentação com tensão entre 4,5 a 8 Volts.

3.3.3 Relógio de tempo real

Conhecido como *Real Time Clock* (RTC), utilizado para informar as horas no formato de 12 ou 24 horas, como também os dias e meses do ano de forma automática. O dispositivo mostrado na Figura 3.7 conta com o circuito integrado DS3231 da empresa Maxim Integrated™. O mesmo possui uma bateria externa garantindo que não haja perda em seu horário, caso ocorra falha na alimentação. Sua comunicação com o Arduino é realizada pelo protocolo de comunicação TWI.

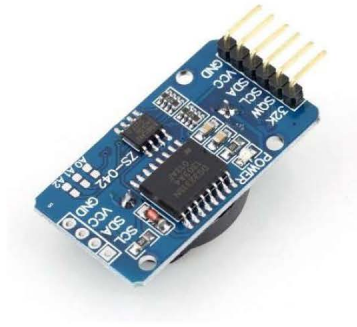


Figura 3.7: Relógio de tempo real, RTC. Fonte: <https://ktechnics.com/shop/ds3231-at24c32-iic-precision-real-time-clock-module-memory-module-arduino-3/>

3.3.4 Estado de carga

Na secção 2.5.3 do Capítulo 2 foi mostrado como as células de lítio necessitam de uma atenção mais cuidadosa quando se trata de excesso de carga e descarga. Desta forma, torna-se essencial o uso de um dispositivo capaz de monitorizar o estado da carga da bateria, para haver controle e ação face a eventos de carga e descarga. Para isto, foi empregue na presente dissertação o sensor MAX17043 da empresa Maxim Integrated™ apresentado na Figura 3.8, de modo a verificar o estado de carga das células de lítio quando estão na configuração paralelo.

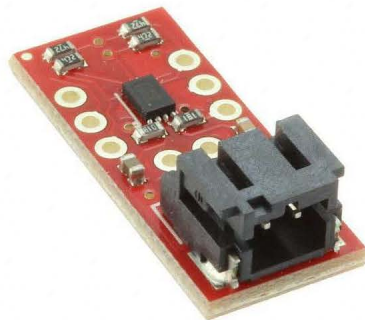


Figura 3.8: Sensor de estado de carga MAX17043. Fonte: <https://www.digikey.com/product-detail/en/sparkfun-electronics/TOL-10617/1568-1273-ND/5762423>

O módulo MAX17043 apresenta dimensão compacta, baixo custo, baixo consumo, não

necessita de resistor externo para aferir a corrente e conseqüentemente o estado da carga de uma célula de lítio. A obtenção da medida do estado de carga e tensão é realizado pelo protocolo de comunicação TWI. Este dispositivo conta com o algoritmo patenteado ModelGauge™, com erro máximo próximo aos 6%. De acordo com a folha de dados, o modelo considera a impedância interna da bateria e as reações químicas presentes na mesma, assegurando não haver acumulação de erros durante o tempo, comparado com métodos tradicionais como a contagem de Coulomb.

3.3.5 Sensor de temperatura

Devido à sensibilidade das células de lítio quando submetidas a algum estresse inesperado, é importante a monitorização da temperatura das mesmas. Para isto o sensor LM35 da Texas Instruments™ será utilizado. Com a medida obtida por este sensor, será feito o gerenciamento de ligar ou desligar o sistema, protegendo o usuário e os componentes próximo a bateria.



Figura 3.9: Sensor de temperatura LM35 Texas Instruments. Fonte: <https://www.roboeleme-nts.com/product/-lm35-temperature-sensor/>

Mostrado na Figura 3.9, o sensor de temperatura LM35 contém 3 terminais, nesta dissertação o mesmo é ligado a fonte de tensão **Vcc**, outro ligado a uma porta analógica **Saída Analógica** do microcontrolador e por fim um ligado ao **GND** ou massa. Estes terminais não são necessariamente ligados desta forma, podendo ser utilizado em outros

circuitos para obter outras funcionalidades. Sua sensibilidade é linear com $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, consumo reduzido de corrente, com a gama de operação entre $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ a $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.6 Display

A intenção do sistema no seu todo é economizar tanto no custo dos seus periféricos como a energia gasta nos mesmos. Assim, será dotado de um *display* OLED, devido à sua nitidez e consumo energético reduzido. O modelo possui dimensão de 128 mm por 64 mm. O mesmo apresenta o driver de controle SSD1306 da empresa Solomon Systech, responsável por fazer a comunicação TWI entre o *display* e o microcontrolador. Na Figura 3.10 é mostrado o *display* utilizado.



Figura 3.10: Display OLED. Fonte: <https://www.makerfabs.com/0.96-I2C-OLED-128x64-Blue.html>

Deste modo, o display informa ao utilizador a quantidade disponível de carga na bateria, a temperatura da bateria e as horas restantes de atuação do sistema.

3.3.7 BMS

Como visto na secção 2.6 Capítulo 2 o BMS é o dispositivo responsável por balancear e fazer o controle das correntes de carga e descarga para as células de lítio em série. O BMS modelo CF-4S30A-A, Figura 3.11, adotado possui as características descritas na Tabela 3.7.

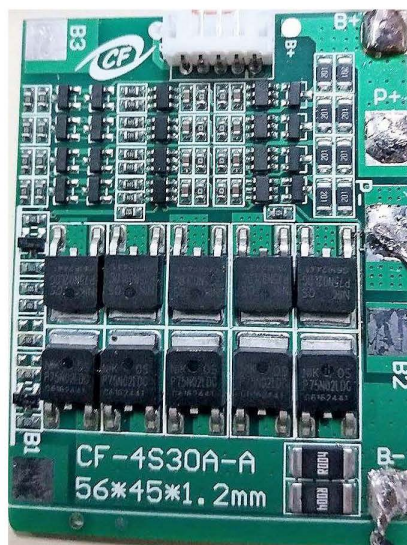


Figura 3.11: Dispositivo BMS

Sua escolha foi fundamentada por possibilitar o balanceamento das células de lítio, prevenindo o carregamento desigual entre as células conectadas em série.

Tabela 3.7: Caracterização do dispositivo BMS.

Característica	Limites
Detecção de sobrecarga	4.28 ± 0.05 V
Detecção de subcarga	2.55 ± 0.08
Limite de temperatura	-30 a 80 °C
Corrente de balanceamento	60 mA
Limite de corrente de trabalho	30 A

Capítulo 4

Metodologia

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do projeto com os dispositivos referidos no Capítulo 3 e aplicação dos conceitos descritos no Capítulo 2. Assim este capítulo apresenta duas propostas de solução para o problema apresentado.

4.1 Primeira solução - células de lítio em paralelo

4.1.1 Implementação do circuito

A implementação do projeto foi realizada na configuração em série descrita no Capítulo 2, na qual a bateria está sempre sujeita a carga e descarga, sendo a sua escolha justificada na secção 2.3.2. O diagrama de blocos apresentado na Figura 4.1 representa o sistema inicial, o qual utilizou as células de lítio na configuração em paralelo. A parte tracejada da imagem representa a primeira fase de desenvolvimento do *hardware*. Os componentes deste circuito foram apresentados na Figura 3.2 do Capítulo 3.

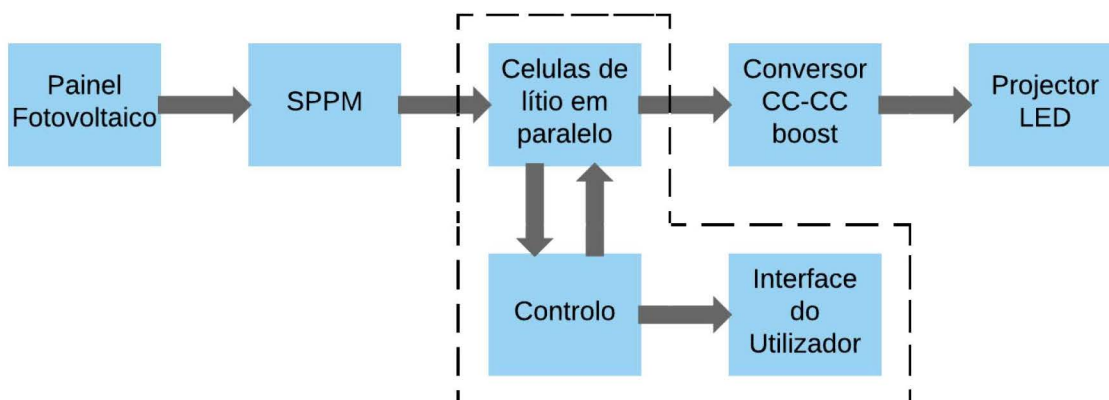


Figura 4.1: Diagrama de blocos do sistema autônomo com células de lítio em paralelo.

Esta primeira configuração foi adotada devido à facilidade de gerir as células de lítio tanto na carga como na descarga, não havendo preocupação no balanceamento individual das mesmas.

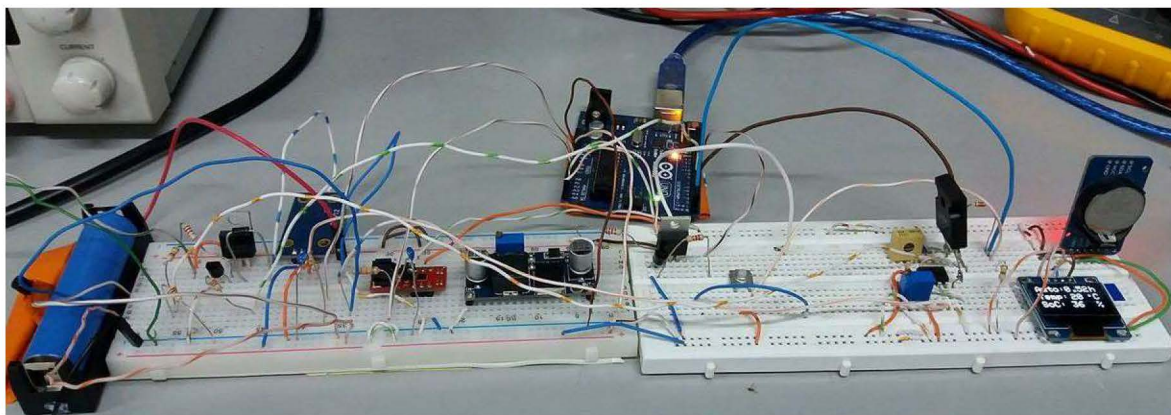


Figura 4.2: Montagem na *breadboard* com as células de lítio em paralelo.

Na Figura 4.2 é mostrado o circuito montado na *breadboard* e a Figura 4.3 representa os componentes do primeiro circuito projetado, sendo dividida em dois blocos principais e os demais dispositivos utilizados para realização da configuração inicial do projeto.

na configuração comparador. O mesmo compara a tensão de saída do sensor ACS712 e a tensão de entrada do bloco 1 vinda do SPPM, ambos ligados nos terminais positivos de cada amplificador; no terminal negativo é colocado a referência de comparação. Se o terminal positivo for maior do que esta referência, a tensão de saída do amplificador tende para a tensão de alimentação do mesmo, caso contrário, a saída tende a zero. A saída do amplificador operacional possui dois díodos, com a finalidade de bloquear possíveis correntes reversas. No terminal de saída dos díodos foi conectado um *pull-down*. Ambos os terminais INTERRUPCAO1 e INTERRUPCAO2 são conectados ao Arduino com a finalidade de reativar o microcontrolador, como será explicado na próxima secção.

4.1.2 Programação

A programação realizada neste projeto tem como finalidade colocar o microcontrolador em modo *sleep*, diminuindo significativamente o consumo de energia do sistema; ativar somente quando houver um evento como carga e descarga; controlar os níveis de carga e descarga do banco das células de lítio; tomar ações preventivas de acordo com a temperatura das células; e contabilizar a quantidade de energia consumida em base diária, sendo os dias incrementados por meio do RTC; gravar os dados na memória interna do microcontrolador e por fim disponibilizar ao utilizador dados importantes relacionado capacidade, temperatura da bateria e tempo restante de atuação do sistema. A realização destas etapas estão descritas na máquina de estados da Figura 4.4.

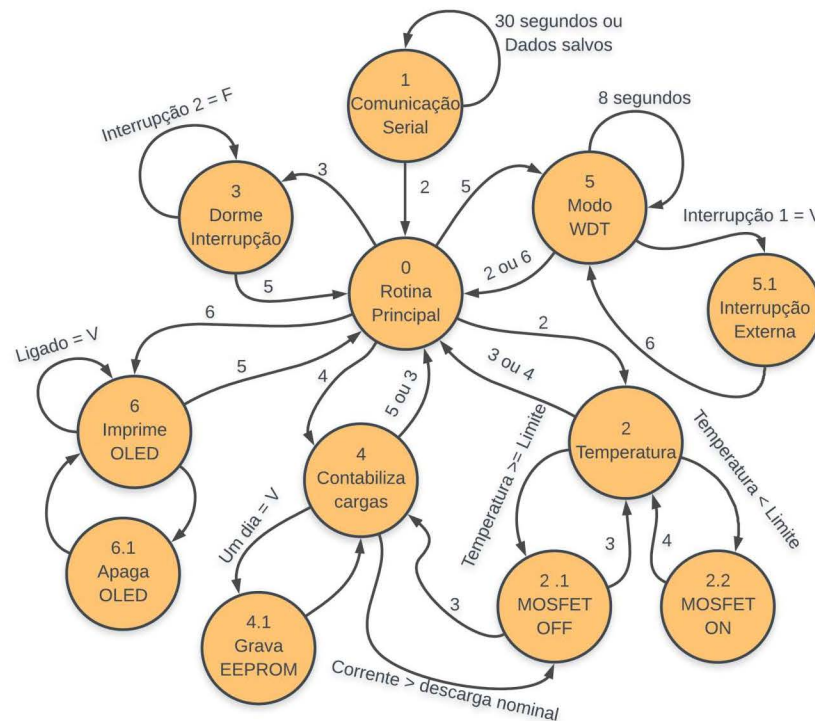


Figura 4.4: Máquina de estados utilizada na primeira solução.

O primeiro estado consiste em realizar a configuração inicial do sistema, por meio da aplicação desenvolvida no programa Microsoft® Visual Studio, mostrado na Figura 4.5 e Figura 4.6.

Na Figura 4.5 é apresentado o aplicativo que proporciona a comunicação do microcontrolador com o computador, por meio da escolha da porta de conexão e taxa de transmissão (*Baud Rate*). Nesta imagem é mostrado o separador das configurações iniciais do sistema, descritas como:

- Corrente de descarga: Máxima corrente consumida pela carga;
- Capacidade nominal: Capacidade total do banco das células de lítio;
- Corte descarga: Limite em percentagem do nível máximo de descarga nas células de lítio;
- Corte carga: Limite em percentagem do nível máximo de carga nas células de lítio;

- Corte temperatura: Limite em graus celsius da temperatura máxima nas células de lítio.



Figura 4.5: Configuração inicial do sistema.

Na Figura 4.6 é mostrado a parte de leitura dos dados gravados na memória interna do microcontrolador, podendo ser salvo os dados em um arquivo de texto ou limpar a memória interna do microcontrolador.



Figura 4.6: Leitura dos dados gravados do sistema.

Prosseguindo com a explicação do funcionamento da máquina de estados, se for estabelecido conexão série, o microcontrolador aguarda os dados a serem salvos, caso não haja comunicação série o microcontrolador aguarda 30 segundos, e depois destes dois processos o estado presente será o 2, não sendo mais utilizado o estado 1. No estado 2 será verificada a temperatura no banco das células de lítio, caso a temperatura esteja acima do limite configurado anteriormente, o sistema é desligado por meio dos MOSFETs de carregamento quanto do descarregamento e o microcontrolador entra no modo *sleep* no estado 3, no qual só voltará a atividade se houver uma reinicialização do sistema ou pressionado o botão para ligar o *display*. Se a temperatura estiver abaixo do que foi configurado, o sistema e o pino digital 3 do Arduino estiver em nível lógico 0, o próximo estado será o 3 e o microcontrolador entra em modo *sleep*, caso o pino digital 3 do Arduino estiver em nível lógico 1 devido à corrente que flui da descarga, causando a mudança de tensão na saída do sensor ACS712, ou uma tensão no divisor de tensão do SPPM, ou o botão do *display* pressionado, todos estes fatores isolados ou em conjunto faz com que o próximo estado seja o 5, o qual será feito o teste verificando se o botão do *display* fora pressionado, depois disto é realizado a contabilização da corrente de descarga/carga. Se a corrente for maior do que a corrente nominal configurada, o próximo estado será o 4, função que desliga tanto a carga como a descarga, colocando o estado 3 como próximo estado, fazendo com que o microcontrolador entre em modo *sleep*, caso contrário será verificado se passou um dia com o uso do RTC, se sim, será gravado a corrente total contabilizada de descarga e carga na memória EEPROM do microcontrolador, se não, o próximo estado será o 5, o qual será verificado se o botão do *display* foi pressionado, se não foi pressionado o microcontrolador entra no modo *sleep* durante oito segundos e volta a atividade com o *overflow* do *Watchdog timer* (WDT) e o ciclo é repetido anteriormente explicado, começando novamente pelo estado 2. Caso o botão do *display* for pressionado em qualquer lugar em que o programa estiver na linha de código, será gerado uma interrupção nos dois pinos de interrupção externa, a interrupção com maior prioridade será tratada fazendo com que o microcontrolador, independente do estado que estiver, desloca para o estado 5 verificando se houve uma interrupção externa do pino digital 2, mudando seu estado para o 6 e mostra

os dados no *display*, aguardando um tempo na apresentação das medidas, depois disto o estado direcionado será o 5, repetindo o processo, verificando todas as possibilidades mencionadas anteriormente.

4.2 Segunda solução - células de lítio em série

4.2.1 Implementação do circuito

O segundo circuito segue a mesma configuração referida na secção 4.1 em que a bateria está sempre sujeita a carga e descarga. A Figura 4.7 mostra os componentes do circuito, desta vez as células de lítio estão conectadas em série por meio de um *Battery Management System* (BMS) apresentado na secção 3.3.7. Portanto, não é preciso o conversor *boost* para elevar a tensão, pois as células em série disponibilizam a tensão suficiente para alimentar a carga. Foi retirado o MAX17043, sendo implementado uma função no microcontrolador que contabiliza a quantidade de carga presente nas células de lítio. Foi também retirado o RTC, sendo este substituído por uma função na programação do microcontrolador com a mesma funcionalidade.

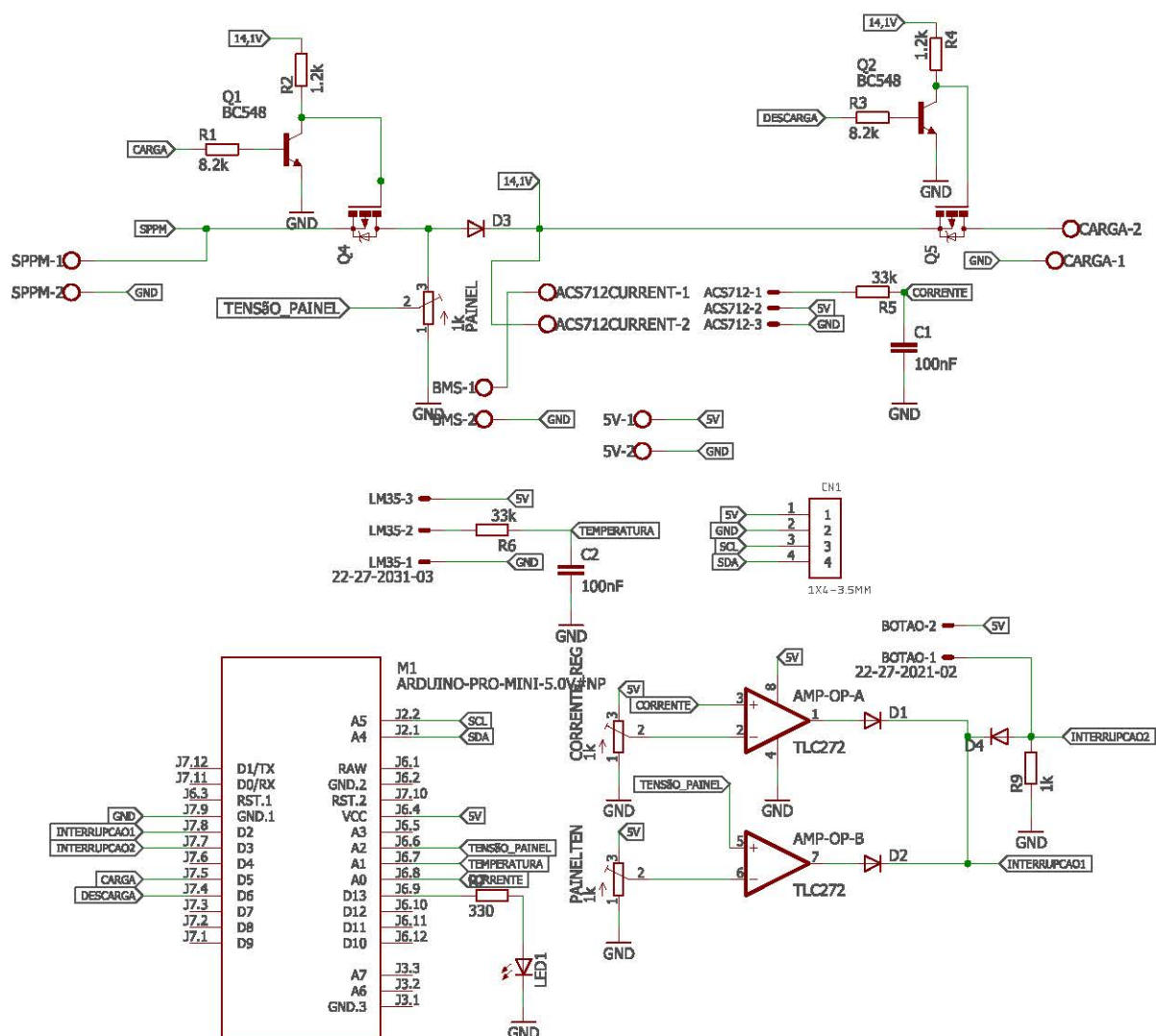


Figura 4.7: Esquema do circuito com as células de lítio em série.

Primeiramente este circuito foi implementado na *breadboard*, foi verificado o funcionamento do sistema, e após isto, foi realizada a prototipagem de uma placa de circuito impresso mostrada na Figura 4.8.

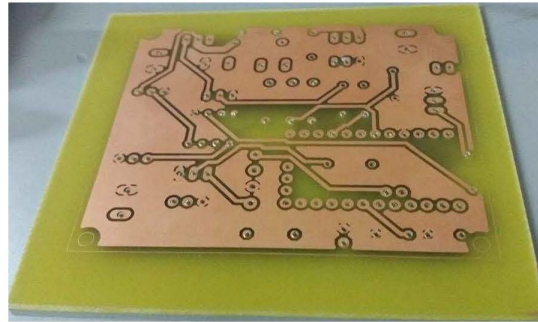


Figura 4.8: Prototipagem da placa de circuito impresso.

Em seguida, foi realizada a montagem do sistema, como mostrado na Figura 4.9 utilizando o Arduino UNO.

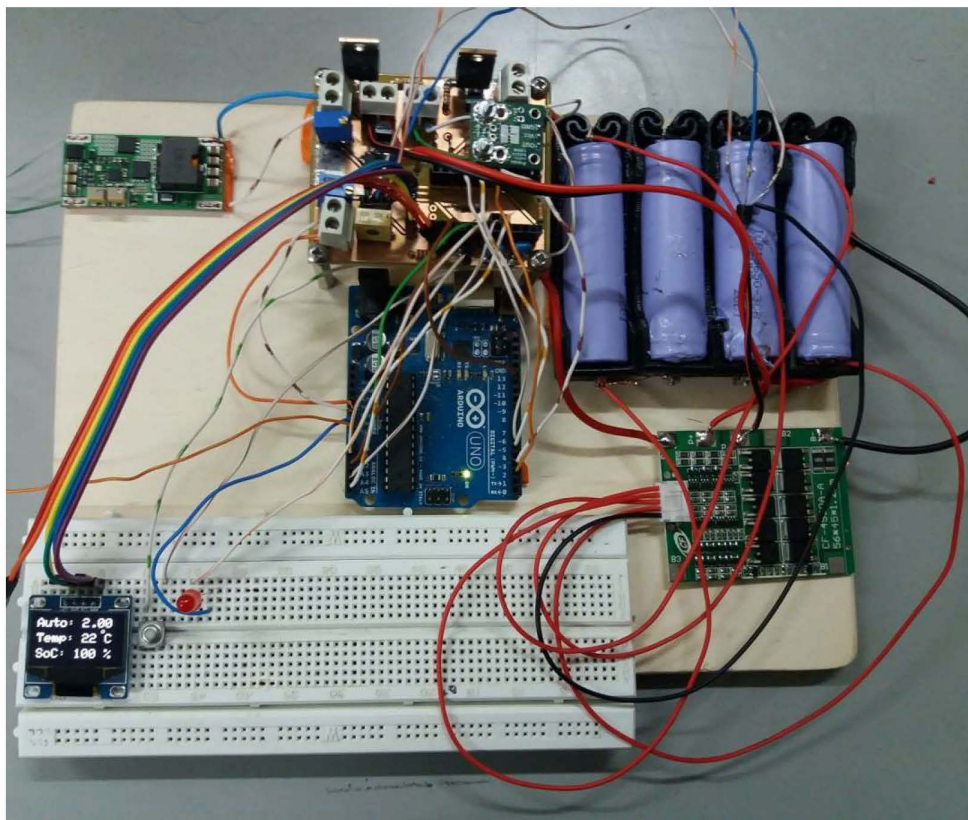


Figura 4.9: Segunda solução implementado, células de lítio em série

Com o uso da impressora 3D presente no laboratório do Instituto Politécnico de Bragança (IPB) foi possível fabricar um suporte para as células de lítio mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.10: Suporte fabricado para as células de lítio.

Com a realização deste circuito foram obtidas melhorias em comparação ao primeiro circuito apresentado na secção 4.1. Neste circuito houve diminuição de perdas na conversão de tensão das células de lítio em paralelo, pois não há a utilização do conversor CC-CC devido ao uso do BMS com as células de lítio na configuração série, possuindo uma tensão superior.

4.2.2 Programação

Houve algumas modificações quanto à programação apresentada na secção 4.1.2. No *hardware* foi retirado o RTC, o MAX17043. Foi adicionado um LED de aviso para informar quando a bateria está sobreaquecida ou quando houver uma sobrecarga, e foi adicionado também um BMS para o balanceamento das células em série de lítio.

Na primeira programação, quando a temperatura da bateria atingia um nível superior da temperatura inicialmente configurada, o sistema desligava a carga e descarga e o microcontrolador entrava no estado 3, *sleep* com interrupção externa, sendo reativado somente quando houvesse uma reinicialização no sistema ou quando o botão do *display* fosse

apertado. Nesta nova programação o sistema permanece em funcionamento apresentando o LED aceso, indicando ao utilizador para pressionar o botão para conferir a mensagem no *display*. A cada oito segundos é verificado se houve diminuição da temperatura, possibilitando a reativação automática do sistema quando a temperatura for menor do que a parametrizada inicialmente.

Com a substituição do RTC, os dados são gravados na memória EEPROM quando o programa completar um ciclo de acordo com a irradiação presente no painel fotovoltaico, isto é, enquanto houver irradiação solar vai existir uma queda de tensão em um divisor resistivo ligado a uma porta analógica, desta forma o programa verifica que é dia. Quando não houver irradiação solar, o programa identifica que é noite, não havendo tensão no divisor resistivo. Quando há novamente irradiação solar, os dados serão gravados na memória interna do microcontrolador, o dia será incrementado e recomeça uma nova contagem sob a quantidade de descarga/carga.

O estado de carga da bateria é realizada por meio da contabilização entre a corrente que entra e a que sai com o uso do sensor de corrente ACS712. Com esta modificação não foi necessário utilizar o módulo que verifica o estado de carga MAX17043, pois este módulo geria somente a tensão de uma célula de lítio.

Com a retirada do RTC foi necessário modificar o programa de inicialização, sendo adicionado o dia, mês e ano em que o sistema será instalado, mostrado na Figura 4.12. O outro separador, Leitura EEPROM, continua a ser o mesmo apresentado na Figura 4.6.

A Figura 4.11 representa a máquina de estados do novo programa.

Em verde, no estado 1, é requerido inicialmente a parametrização do sistema, feito pelo programa desenvolvido mostrado na Figura 4.12.

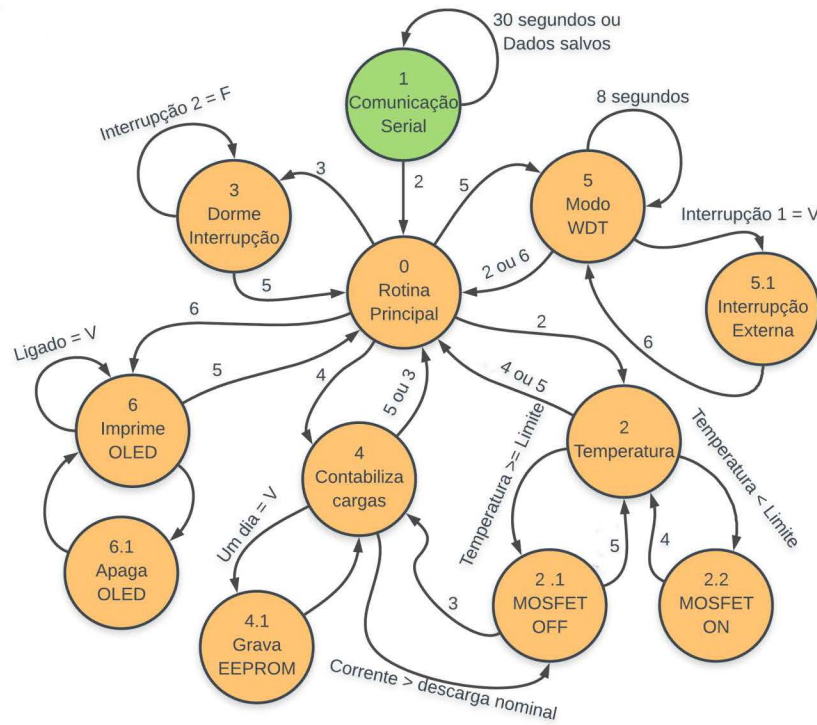


Figura 4.11: Máquina de estados utilizada no segundo circuito.

Configuração do sistema X

Comunicação

COM Porta: COM6

Baud Rate: 9600

Conectar Desconectar

Sair

Desconectar

Configuração do sistema **Leitura EEPROM**

Dados

Dia (dd)

Mês (mm)

Ano (aa)

Corrente de descarga A

Carga nominal Ah

Corte da descarga [%]

Corte da carga [%]

Corte da temperatura °C

Salvar dados

Figura 4.12: Configuração inicial do sistema.

Caso não haja a comunicação série para a inicialização do sistema, haverá uma espera de 30 segundos. Terminando este tempo o programa vai para o próximo estado, estado 2.

Em seguida, na Figura 4.13 é mostrado uma outra funcionalidade do algoritmo. Primeiro, os números que estão dentro do círculo vermelho e os estados da cor verde, representam o funcionamento do sistema quando há carga/descarga das células de lítio. Desta forma, é verificado em 2 a temperatura, e se está abaixo da configurada inicialmente, permitindo haver carga e descarga. Em seguida, no estado 4, é feita a contabilização da entrada e saída das correntes na bateria, se houver a passagem de um dia, os dados são gravados na memória EEPROM, caso contrário, o programa segue, colocando o microcontrolador em modo *sleep* por oito segundos no estado 5, e neste mesmo estado é verificado se o botão do *display* foi pressionado, caso tenha sido (círculo azul), o próximo estado será o 6, para apresentação das informações sobre a bateria, caso contrário, o programa segue o funcionamento anteriormente descrito.

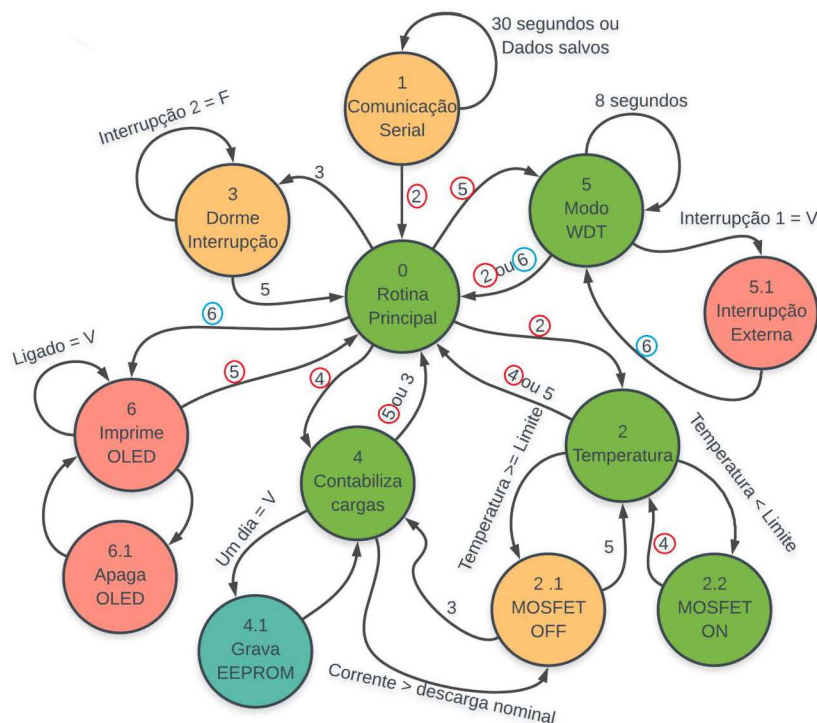


Figura 4.13: Máquina de estados, carga, descarga e *display*.

Seguindo a Figura 4.14, se a temperatura da bateria for maior do que a temperatura

inicializada, tanto a carga como a descarga são desligadas, um LED vermelho é aceso, e quando apertado o botão do *display* é mostrado um aviso sobre o sobreaquecimento. O programa percorre os números circulos a vermelho. Sendo assim, o programa monitoriza a cada oito segundos a temperatura da bateria, até a mesma reduzir, e quando isto ocorrer o programa irá percorrer o caminho apresentado na Figura 4.13 ou caso não haja carga ou descarga, o programa vai percorrer os números com círculos azuis da Figura 4.14, fazendo com que a carga e a descarga sejam reativados e o microcontrolador entre no modo *sleep*, sendo reativado quando houver uma interrupção externa, podendo ser uma carga, descarga ou pressionando o botão para ligar o *display*.

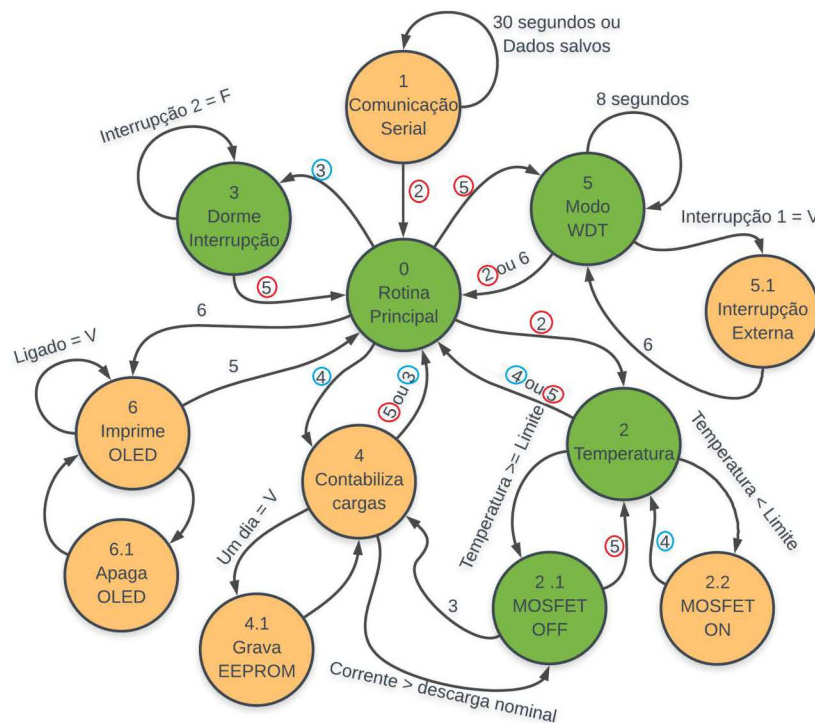


Figura 4.14: Máquina de estados, temperatura alta.

Na Figura 4.15 é apresentada mais uma fase do comportamento do programa, na qual é apresentado como o algoritmo se comporta caso houver uma sobrecarga. Os números com círculos vermelhos e os estados em verde representam o caminho que o programa percorre. Primeiramente é verificado a temperatura no estado 2, depois disto é contabilizada a corrente, caso a corrente esteja maior do que a configurada inicialmente, tanto a carga

como a descarga são desativados, um LED vermelho é aceso, e quando apertado o botão do *display* é mostrado um aviso de sobrecarga. Em seguida o microcontrolador entra no modo *sleep*, estado 3, sendo reativado somente quando o botão do *display* for pressionado. Caso não haja uma sobrecarga, o sistema funcionará de acordo com as situações anteriormente descritas, mostradas na Figura: 4.11, 4.13, 4.14.

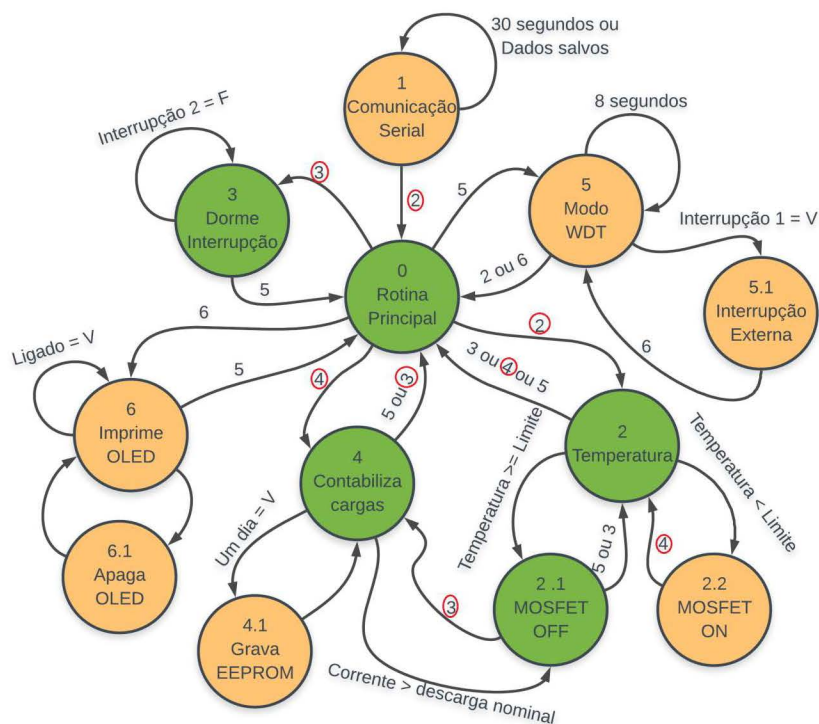


Figura 4.15: Máquina de estados, sobrecarga.

Para avaliação dos dados deste sistema, foi implementado uma função que disponibiliza as medidas no barramento TWI. Na Figura 4.16 é apresentado o diagrama de blocos característico do circuito.

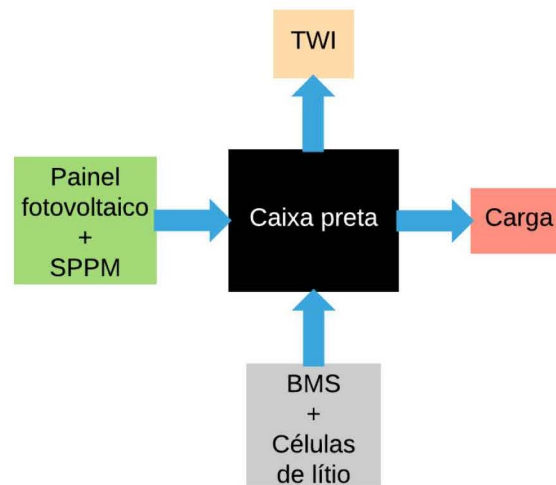


Figura 4.16: Representação do circuito final.

O circuito e a programação desenvolvida são representados por uma caixa preta. Dentro desta caixa existe a parte física desenvolvida e a parte da programação, onde é feita a contabilização e gestão da quantidade de carga existente na bateria, capacidade disponível, verificação da temperatura da bateria e contabilização da corrente consumida. No próximo capítulo será utilizada esta funcionalidade para avaliar o algoritmo desenvolvido e o comportamento do BMS utilizado.

Capítulo 5

Testes e resultados

Neste capítulo serão apresentados os testes, os dados recolhidos e as explicações referente às soluções apresentados no Capítulo 4.

5.1 Primeira solução - células de lítio em paralelo

No Capítulo 4 foi apresentada a primeira solução da proposta da presente dissertação. A justificativa para não adoção desta configuração foi a limitação da parte física. Primeiramente o dispositivo SPPM possui uma potência máxima de 80 W e a saída deste dispositivo encontra-se limitada a uma corrente de 5 A. Desta forma, a potência de carregamento encontra-se limitada pela multiplicação da máxima tensão das células de lítio em paralelo com a máxima corrente que o dispositivo fornece, mostrado na equação (5.1).

$$P_{\text{saída}} = 5 \text{ A} \cdot 4.2 \text{ V} = 21 \text{ W} \quad (5.1)$$

Além da limitação descrita anteriormente do dispositivo SPPM, existe a limitação do conversor CC-CC que se encontra na saída do sistema, apresentado no circuito na Figura 4.3. Este conversor foi utilizado para a elevar a tensão das células de lítio em paralelo para a tensão da carga do sistema. Isto causa uma redução na eficiência do sistema, pois a conversão a ser realizada eleva a tensão aproximadamente três vezes a tensão das células

de lítio em paralelo, ocasionando perdas de conversão.

Apresentado no Capítulo 4, o primeiro circuito foi submetido a diversos testes com a finalidade de verificar a fiabilidade do algoritmo desenvolvido. Na Figura 4.11 da seção 4.2.2 do Capítulo 4 foi apresentada a imagem da máquina de estados usada neste primeiro circuito. Para realização destes testes o sistema foi submetido a variadas situações, simulando uma aplicação real, com a finalidade de verificar a resposta do algoritmo desenvolvido por meio dos dados coletados pela porta série do Arduino. Com os dados obtidos, foi possível representar os diversos eventos em um gráfico, sendo eles retratados e fragmentados em onze partes apresentado na Figura 5.1, as quais serão descritas a seguir.

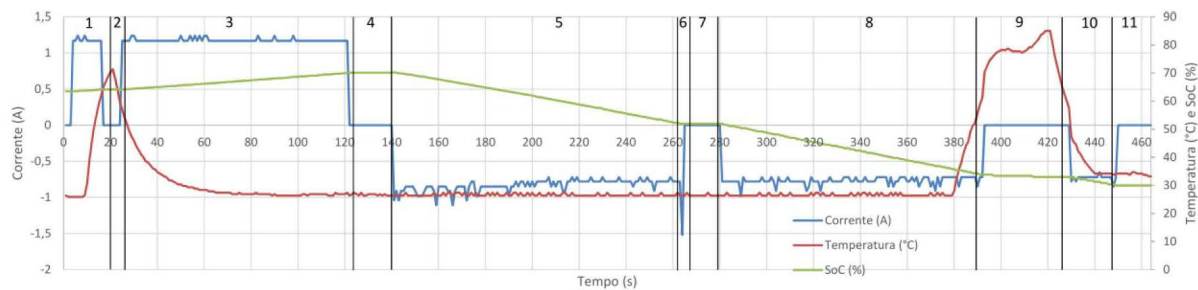


Figura 5.1: Funcionamento do sistema.

O sistema foi configurado inicialmente para possuir um limite de descarga de 30%, limite de carga de 70%, limite de corrente de descarga de 1.5 amperes e limite de temperatura de 60°C.

1. Primeiramente o sistema encontra-se desligado com estado de carga próximo aos 65%, logo em seguida a corrente, representada pela linha azul, mostra que a bateria está sendo carregada, o estado da carga incrementado e o sensor de temperatura sofre um aquecimento;
2. Quando a temperatura se eleva até ao limite da configuração inicial, neste caso 60 °C, a corrente de carga é cortada, desligando tanto o carregamento quanto o descarregamento;

3. A temperatura com o tempo vai-se reduzindo fazendo com que o sistema volte a ser carregado e o estado de carga incrementado;
4. O estado de carga alcança o seu limite de configuração inicial, 70%, desligando o carregamento da bateria;
5. Uma carga é ligada ao circuito fazendo com que haja o descarregamento da bateria, reduzindo o estado de carga;
6. Se houver uma corrente maior do que a corrente configurada de descarga, o sistema de descarga é desligado e permanece neste estado enquanto não houver uma reinicialização do sistema;
7. Nesta parte foi feita uma reinicialização do sistema;
8. Novamente é colocada uma carga, fazendo com que a corrente seja drenada havendo redução no estado de carga;
9. A temperatura eleva-se, a carga e o carregamento são desligados do sistema enquanto a temperatura estiver alta;
10. A temperatura decresce, o sistema volta a fornecer corrente de descarga;
11. O estado de carga a que a bateria se encontra chega ao limite configurado inicialmente, a descarga desliga-se, completando assim o ciclo de testes.

Com a realização deste teste foi possível verificar a fiabilidade tanto do *software* desenvolvido, cumprindo os requisitos para o pleno funcionamento do sistema, quanto do *hardware*, respondendo aos eventos controlados pelo *software*.

Com a mesma abordagem realizada na programação do primeiro circuito, foram realizadas algumas modificações descritas no Capítulo 4, as quais foram aplicadas no segundo circuito, sendo descritas na próxima secção.

5.2 Segunda solução - células de lítio em série

Mostrado no Capítulo 4, o segundo circuito desenvolvido possui as células de lítio em série. O processo de balanceamento durante o carregamento das células de lítio foi realizado por meio do *Battery Management System* (BMS), tornando o carregamento e descarregamento controlado, reduzindo os riscos de desgastes das células de lítio. Com esta modificação não foi preciso o uso do conversor CC-CC na saída do circuito, devido à tensão das células de lítio em série ser aproximadamente igual a tensão da carga utilizada.

Além desta modificação, foi retirado o sistema que fazia a contabilização do estado de carga das células de lítio, o MAX17043, pois o mesmo realiza a medição somente com a tensão de uma célula de lítio. O relógio de tempo real, denominado RTC, foi retirado, sendo substituído por uma função na programação do microcontrolador e foi adicionado um divisor resistivo no circuito, avaliando a tensão produzida pelo painel fotovoltaico.

5.2.1 Testes realizados no sistema desenvolvido

Como referido na secção 4.2.2 do Capítulo 4, o sistema desenvolvido é comparado com uma caixa preta. Dentro da mesma é realizado o tratamento dos valores dos sensores para a tomada de decisão quanto ao corte de carga e descarga, além de realizar operações matemáticas para a contabilização da quantidade de energia gasta numa base diária do sistema. Além destas funcionalidades, o sistema, ou a caixa preta, disponibiliza no barramento TWI os dados referentes a temperatura, corrente de carga/descarga, corrente consumida e o estado da carga da bateria.

Com estas funcionalidades o sistema desenvolvido foi submetido ao teste de carga e descarga com diferentes eventos, a fim de verificar a confiabilidade do mesmo.

Para avaliar o dispositivo BMS quanto ao balanceamento no carregamento da bateria, foi preciso verificar as medidas das tensões individuais de cada célula de lítio. Uma maneira de se obter a tensão individual das células de lítio é a utilização do amplificador operacional na configuração diferenciador, mostrado na Figura 5.2 [27].

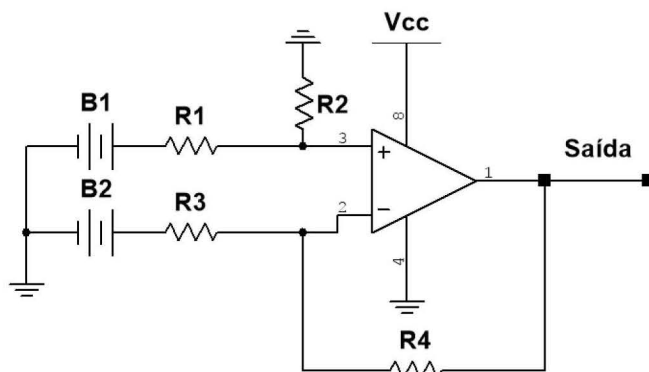


Figura 5.2: Configuração diferenciador.

A equação que caracteriza a tensão de saída do circuito diferenciador foi obtida por meio da utilização do teorema da sobreposição, fazendo com que seja analisado cada fonte de tensão separadamente, logo em seguida os resultados são somados. A Figura 5.3 mostra os dois circuitos a serem analisados [27].

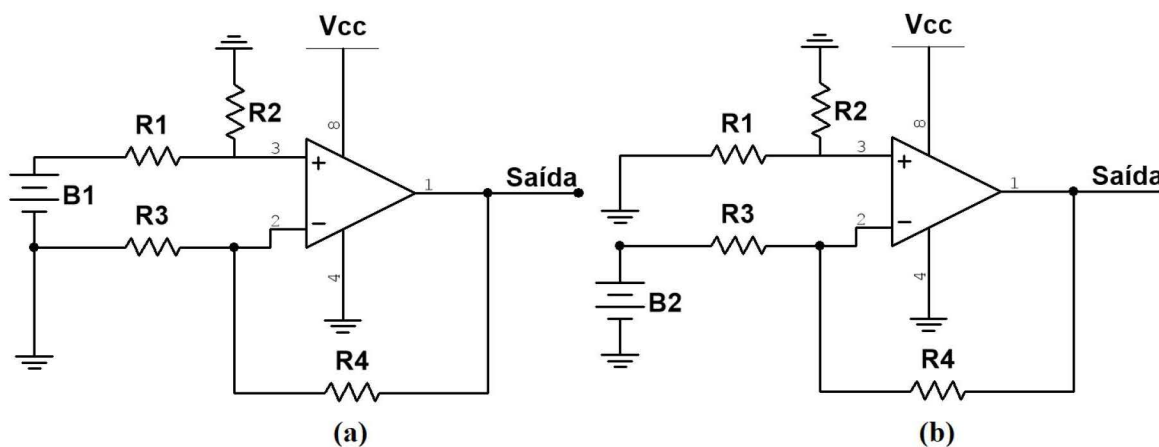


Figura 5.3: Configuração diferenciador.

Primeiramente foi feita a análise do circuito (a) da Figura 5.3, contendo um divisor de tensão em **R1** e **R2**, obtendo a tensão na entrada não inversora (3), mostrado na fórmula (5.2).

$$V_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot B1 \quad (5.2)$$

Em seguida, para obtenção da tensão de **Saída**, foi realizado a análise da corrente existente nos resistores **R4** e **R3**. A impedância de entrada em um amplificador operacional é muito alta, desta forma a tensão do divisor resistivo no terminal não inversor (3) é considerada a mesma do terminal inversor (2). A corrente no terminal inversor é ignorada, devido a alta impedância de entrada do amplificador operacional. Assim, a queda de tensão entre **R4** e **R3** representa a tensão de **Saída**, sendo que a corrente entre estes dois resistores são iguais. Desta maneira, foi calculada a corrente I_x para obtenção da tensão de **Saída** $V_{\text{Saída}+}$ mostrada respectivamente nas fórmulas (5.3), (5.4) e (5.5).

$$I_x = \frac{V_3}{R3} \quad (5.3)$$

$$V_{\text{Saída}+} = I_x \cdot (R3 + R4) \quad (5.4)$$

$$V_{\text{Saída}+} = (R3 + R4) \cdot \frac{R2}{R3 \cdot (R1 + R2)} \cdot B1 \quad (5.5)$$

Analisando a Figura 5.3 (b) a fonte de tensão **B1** foi retirada do circuito, desta forma a tensão no terminal não inversor é nula. Sendo feita a análise dos nós foi obtido a fórmula (5.6) caracterizando a corrente no resistor **R3**.

$$I_y = \frac{B2}{R3} \quad (5.6)$$

Para encontrar a tensão de saída basta multiplicar a corrente I_y com a resistência **R4**, havendo uma queda de tensão com polaridade oposta, assim obtém-se:

$$V_{\text{Saída}-} = -B2 \cdot \left(\frac{R4}{R3} \right) \quad (5.7)$$

Sendo feita as somas das duas fórmulas (5.5) e (5.7) é obtido a fórmula (5.8), justificando a saída total do circuito diferenciador.

$$V_{\text{Saída}} = (R3 + R4) \cdot \frac{R2}{R3 \cdot (R1 + R2)} \cdot B1 - B2 \cdot \left(\frac{R4}{R3}\right) \quad (5.8)$$

Considerando $R1 = R3$ e $R2 = R4$ a fórmula (5.8) pode ser simplificada obtendo a equação final (5.9).

$$V_{\text{Saída}} = (B1 - B2) \cdot \left(\frac{R4}{R3}\right) \quad (5.9)$$

Portanto, para verificar a tensão entre as células de lítio é preciso adotar resistências iguais para $R3$ e $R4$, justificado na fórmula (5.9), proporcionando um ganho unitário no circuito. Na prática, foi feita a utilização de resistências de precisão de $10 \text{ k}\Omega$ e dois amplificadores operacionais TL082 da Texas Instruments.

O circuito final para avaliar as tensões individuais das células de lítio se encontra na Figura 5.4, com as saídas para as portas analógicas do Arduino.

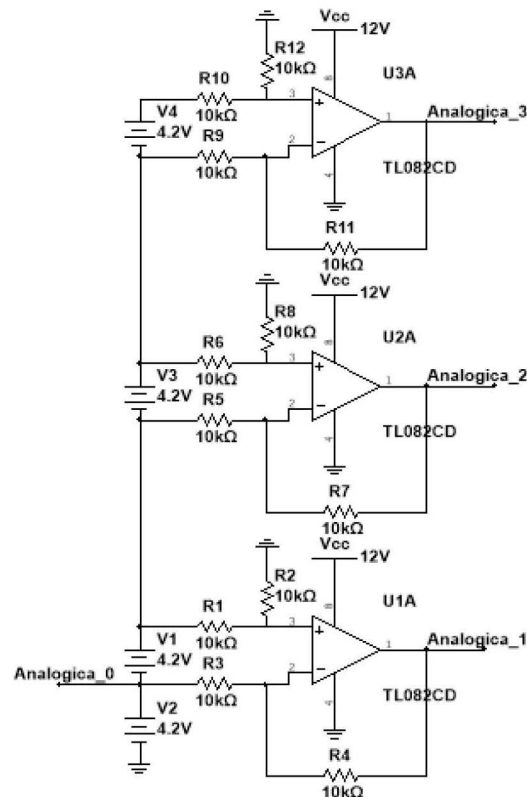


Figura 5.4: Circuito para medição das tensões individuais das células de lítio.

O circuito apresentado na Figura 5.5 foi utilizado para os testes, sendo o mesmo legendado nos retângulos na própria figura, os quais foram descritos ao longo da dissertação.

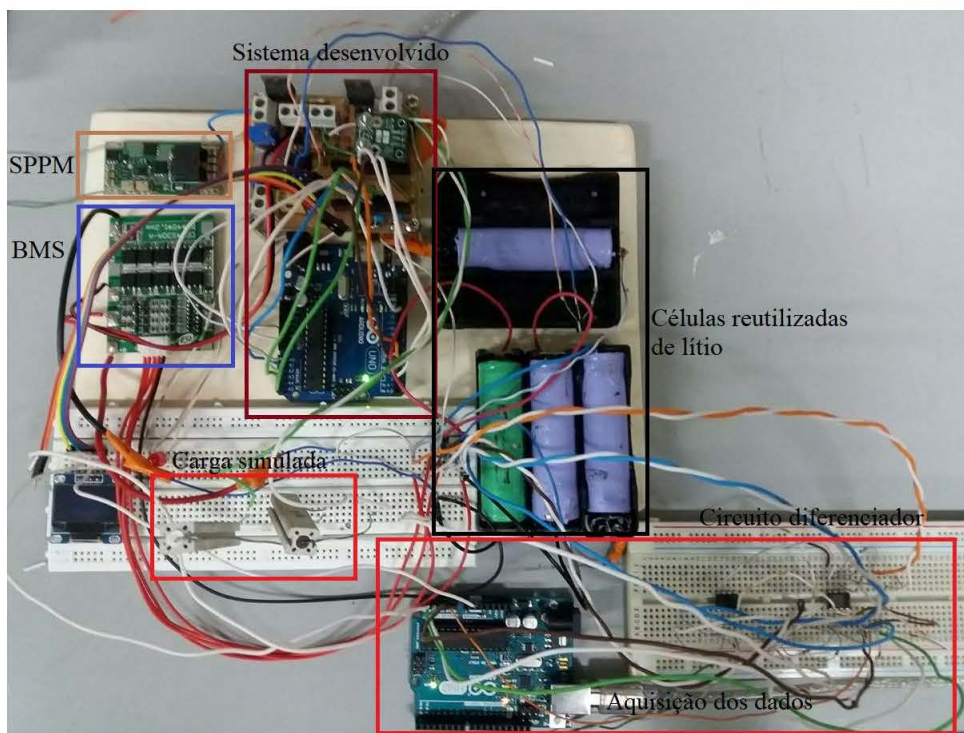


Figura 5.5: Circuito para os testes.

Para realização dos testes foi feita a parametrização inicial do sistema, por meio do aplicativo desenvolvido, apresentado na Figura 5.6.

Depois desta parte, as células utilizadas foram anteriormente carregadas para assim começar os testes. Como visto na Figura 5.5, o sistema para realização dos testes contém três células de lítio do modelo SAMSUNG ICR18650-30B e mais uma da mesma marca mas do modelo ICR18650-22F. As características dos modelos das células de lítio são apresentados na Tabela 5.1.

The image shows a software window titled "Configuração do sistema" (System Configuration). It is divided into two main sections. The left section, titled "Comunicação" (Communication), contains a dropdown menu for "COM Porta" set to "COM9", another dropdown for "Baud Rate" set to "9600", and buttons for "Conectar" (Connect), "Desconectar" (Disconnect), and "Sair" (Exit). A large green button labeled "Desconectar" is also visible. The right section, titled "Configuração do sistema" (System Configuration), has a sub-tab "Leitura EEPROM" (EEPROM Read) and a "Dados" (Data) section. This section includes input fields for "Dia" (15), "Mês" (12), and "Ano" (17), each with a "Carregar" (Load) button. Below these are fields for "Corrente de descarga" (1 A), "Carga nominal" (2 Ah), "Corte da descarga" (80%), "Corte da carga" (100%), and "Corte da temperatura" (60 °C), each with a "Carregar" button. A "Salvar dados" (Save data) button is at the bottom of the right section.

Figura 5.6: Inicialização do sistema.

Cada modelo possui uma determinada capacidade e as demais medidas específicas. Como foram utilizadas células reutilizadas de lítio, as mesmas não possuem os parâmetros mencionados na Tabela 5.1 e pretende-se mostrar que existem diferenças das capacidades nominais entre os modelos das células. Desta forma, será avaliado o comportamento do BMS e se o mesmo proporciona o balanceamento das células de lítio, independente das diferenças entre as suas capacidades.

Tabela 5.1: Parâmetros das células de lítio utilizadas.

Característica	ICR18650-30B	ICR18650-22F
Capacidade nominal	2950 mAh	2200 mAh
Tensão nominal	3.78 V	3.6 V
Tensão de corte descarga	2.75 V	2.75 V
Tensão de corte carga	4.35 ±0.05 V	4.2 V ± 0.05 V
Máxima corrente de carga	2950 mA	2200 mA
Máxima corrente de descarga	5900 mA	4400 mA

A Figura 5.7 mostra a corrente de carregamento e as tensões individuais de cada célula de lítio. A linha vermelha, célula 1, representa a célula com a diferente capacidade das

demais células. No gráfico pode ser verificado que com o passar do tempo esta célula tende alcançar a tensão das demais, as quais se encontram no final do processo de carregamento. Houve variações na corrente, devido ao erro de 1.5% que o sensor possui e por ser uma corrente muito abaixo da faixa nominal de valores que o mesmo foi projetado, sendo o mesmo contendo a faixa de valores entre os -30 e 30 amperes. Mesmo com todos estes problemas o resultado do gráfico apresenta uma variação máxima de 50 mA.

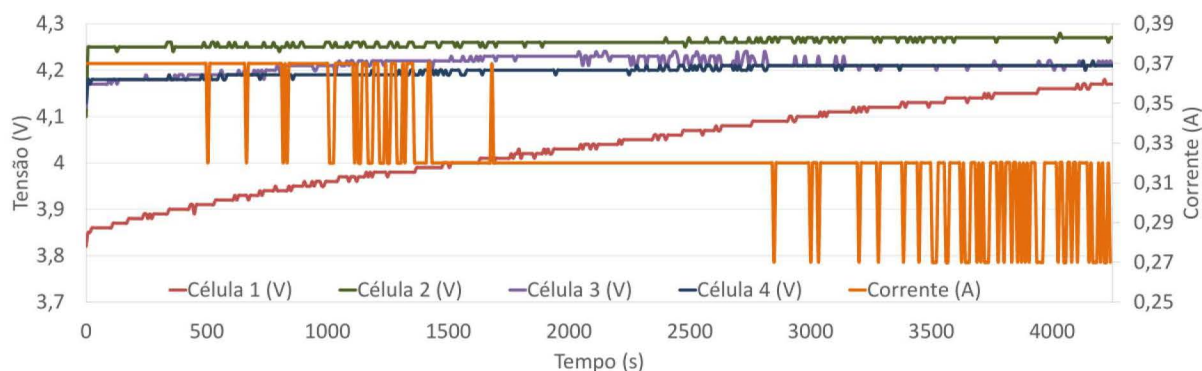


Figura 5.7: Dados coletados da tensão e corrente aplicada em cada célula de lítio.

Durante a carga, como visto na figura anterior, o BMS cumpre o propósito da sua funcionalidade, permitindo o carregamento das células de lítio até que as mesmas tendem para a mesma tensão.

Com a finalidade de avaliar o algoritmo e o sistema desenvolvido, o mesmo foi submetido a uma descarga por meio de resistores conectados em série, simulando o refletor a LED, apresentado na Figura 5.5.

Por meio da saída implementada TWI foi obtido os dados para análise do sistema por meio de outro Arduino, imprimindo estas medidas na serial da IDE do Arduino, Figura 5.8.

Primeiramente foi avaliado se o algoritmo e o sensor de corrente do sistema permitia uma contabilização da descarga corretamente. Desta forma, o sistema foi submetido a uma descarga de 0.5 A (leitura do sensor) durante 50 minutos e 16 segundos. Para que isto aconteça foi avaliada a tensão de carga completa das células em série de lítio, representando aproximadamente 16.52 V, possuindo a carga a ser simulada uma resistência


```

COM10 (Arduino/Genuino Uno)
SOC, Corrente, Corrente consumida, Temperatura, V1, V2, V3, V4
100, 0.00, 0.00, 0, 3.80, 4.03, 3.98, 3.98
100, 0.00, 0.00, 18, 3.52, 3.53, 3.55, 3.30
99, 0.50, 0.00, 17, 3.52, 3.52, 3.54, 3.29
99, 0.50, 0.00, 18, 3.51, 3.52, 3.53, 3.28
99, 0.50, 0.00, 17, 3.51, 3.52, 3.52, 3.27
99, 0.50, 0.00, 17, 3.51, 3.52, 3.52, 3.26
99, 0.50, 0.00, 17, 3.50, 3.51, 3.52, 3.26
99, 0.50, 0.00, 17, 3.50, 3.52, 3.51, 3.25

```

Figura 5.8: Dados coletados na porta serial do Arduino receptor dos dados transmitidos pelo protocolo de comunicação TWI.

de 25.28Ω . O MOSFET utilizado para esta experiência era o único modelo disponível, possuindo uma resistência interna quando se encontra na região ativa ($R_{DS(on)}$) de 3Ω . Desta forma, a carga possui um total de aproximadamente 27.28Ω . Sendo considerada a tensão nominal das células de lítio apresentada nas folhas de dados, a tensão total das quatro células de 3.78 V é 15.12 V . Foi realizada a divisão entre tensão e resistência, obtendo-se a corrente teórica de 0.55 A . Para avaliar se a resposta do algoritmo representa medidas confiáveis, foi preciso realizar o cálculo da quantidade de descarga nesta faixa de tempo. Assim em (5.10) representa-se a quantidade de carga elétrica descarga por este teste, utilizando as medidas coletadas do sistema.

$$A = \left(\frac{50 \cdot 60 + 16}{3600} \right) \cdot 0,55 = 0,46 \text{ A} \quad (5.10)$$

A contabilização realizada pelo sistema da carga acumulada durante o período de 50 minutos e 16 segundos resultou em $0,4 \text{ A}$. Comparando os dois resultados, a corrente consumida teórica e a corrente consumida prática, pelo sistema, representa um erro de aproximadamente 13.04% , isto ocorre devido à precisão do sensor de corrente, fazendo com que correntes com baixas amplitudes tendem a assumir valores de diferentes amplitudes, tendendo a um erro. Os dados utilizados para este teste está disponível no Apêndice A

Na Figura 5.9 é mostrado o estado de carga, a corrente drenada em ampere para o descarregamento das células e a corrente consumida em ampere. O comportamento

apresentado na linha vermelha será explicado a seguir.

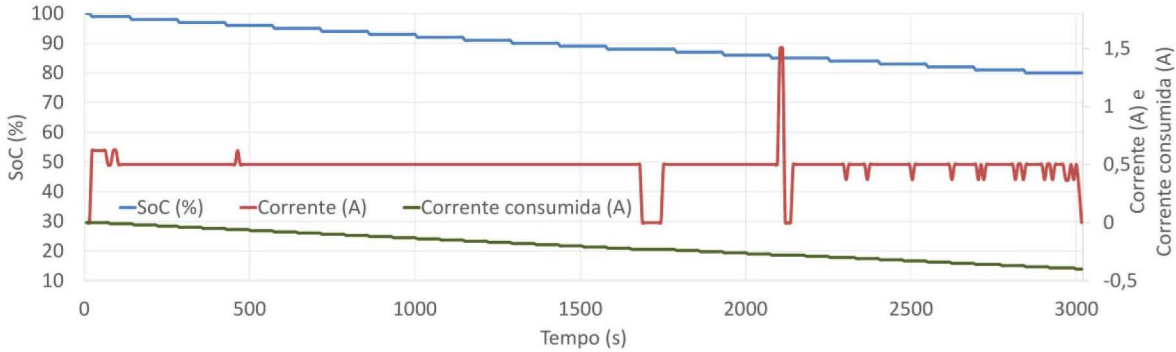


Figura 5.9: Gráfico representando o estado da carga (linha azul), corrente drenada (linha verde) e corrente consumida (linha vermelha).

A imagem passada representa o descarregamento das células de lítio. Desta forma, a Figura 5.10 mostra a divisão realizada nos testes aplicados no sistema.

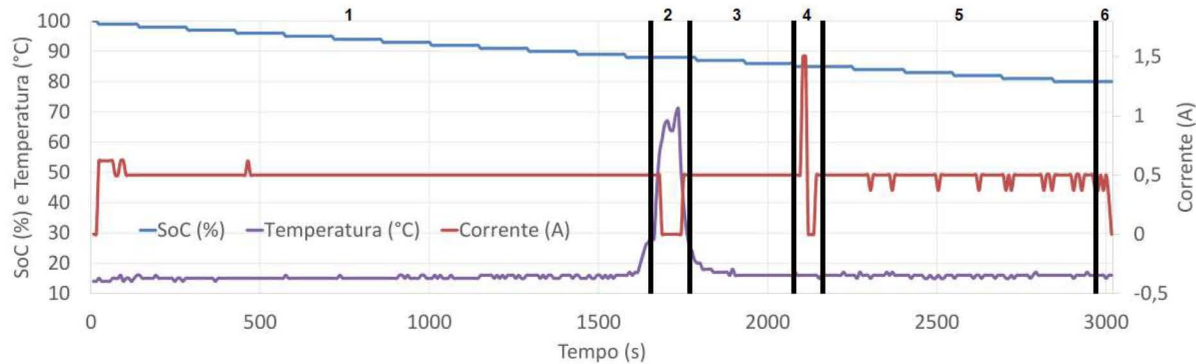


Figura 5.10: Gráfico representando a descarga das células de lítio, dividido em seis situações de testes.

O gráfico da Figura 5.10 está dividido em seis partes, caracterizadas nas seguintes divisões:

1. Inicialmente o sistema não apresenta descarga, logo em seguida é submetido a uma descarga, fazendo com que o estado de carga da bateria diminua. Como a descarga é realizada com uma carga resistiva, a descarga apresenta uma taxa constante, havendo oscilações devido aos fatores, explicados anteriormente, presentes no sensor de corrente ACS712;

2. Logo em seguida, o sensor LM35 é submetido a um aumento de temperatura, simulando uma possível elevação na temperatura da bateria. Se houver um aumento excessivo, a mais do que o limite inicialmente configurado, o sistema é desligado, retornando ao descarregamento quando a temperatura for menor do que o limite configurado;
3. O sistema volta a funcionar normalmente como na primeira parte do teste;
4. Foi feita uma descarga com uma carga que consome uma corrente elevada, com a finalidade de verificar se o sistema está a responder à configuração inicial de descarga. Desta maneira, o sistema foi desligado devido à corrente ser maior do que a corrente configurada inicialmente, desligando a carga e descarga, emitindo um alerta em um LED vermelho, sendo reativado quando pressionado o botão para verificação da mensagem no *display*;
5. Depois disto, o sistema é descarregado até o limite da configuração inicial do estado de carga, havendo uma variação na corrente, explicado anteriormente no primeiro tópico;
6. A descarga é desligada devido o limite do estado de carga configurado do sistema.

Uma solução adotada para haver a diminuição do erro acumulado durante o processo de carregamento e descarregamento da bateria é a contabilização da corrente de carregamento subtraída da corrente de descarregamento acumulada, até se anular. Quando nula, o carregamento prossegue enquanto a corrente de carga não atingir 1/10 da corrente configurada de carregamento.

Durante a carga foi realizado o teste sobre o comportamento do sistema quando é elevada a temperatura. Para isso, foi preciso simular um aumento da mesma no sensor de temperatura. A Figura 5.12 mostra o comportamento do sistema e a seguir são explicadas as divisões da imagem. Os dados deste teste estão disponíveis no Apêndice B.

1. Inicialmente o sistema está a ser carregado, a linha azul representado o estado de

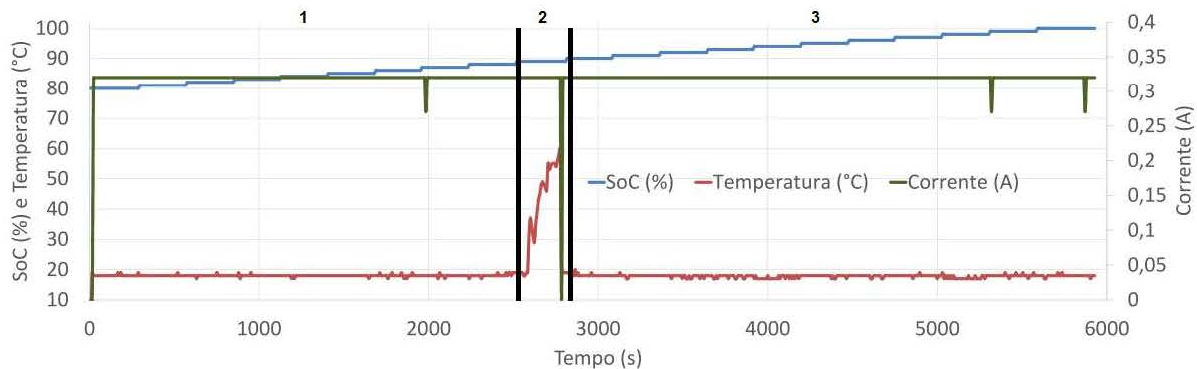


Figura 5.11: Gráfico representando a carga das células de lítio, dividido em três situações de testes.

- carga, que está a aumentar. A corrente, representada pela linha vermelha, sofre algumas variações devido ao erro que é encontrado nas medidas do sensor de corrente;
2. Logo em seguida o sensor de temperatura é submetido a um aumento da sua temperatura afim de simular o aquecimento das células de lítio. Quando a temperatura alcança o limite da temperatura configurada, o processo de carregamento é desligado e a corrente é cortada;
 3. A temperatura diminui e o processo de carga volta à atividade, finalizando o ciclo de teste.

Com a finalidade de avaliar a função desenvolvida que substitui o componente utilizado no primeiro circuito, o *Real Time Clock* (RTC), o sistema foi submetido a uma tensão, sendo a mesma simulada por uma fonte de tensão de bancada presente no laboratório. Desta forma, o sistema recebe uma corrente, simulando a geração de energia elétrica quando o painel fotovoltaico é submetido a uma irradiação solar, fazendo com que seja carregada a bateria e contabilizada a carga acumulada. Em seguida, a fonte de tensão é desligada, simulando o passar do dia, neste caso à noite, fazendo com que a descarga seja acionada. Com este teste, sendo o mesmo repetido a cada cinco minutos aproximadamente, os dados referentes à carga e descarga acumuladas numa base diária são gravados na memória EEPROM do Arduino. A Figura 5.12 mostra os dados gravados

e os dias incrementados, confirmando a funcionalidade do algoritmo desenvolvido.

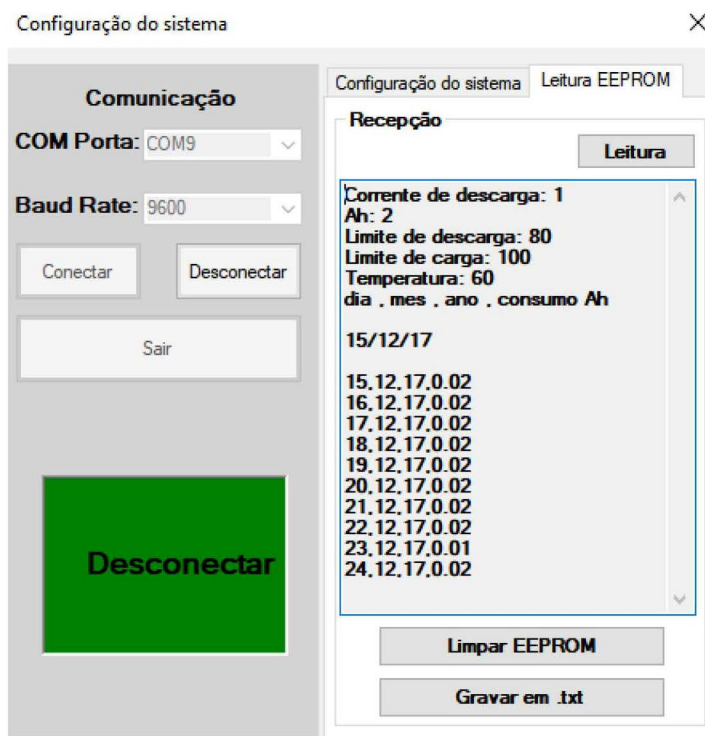


Figura 5.12: Leitura dos dados simulados na plataforma desenvolvida.

O circuito projetado contou com o uso do Arduino UNO durante o processo de testes devido a facilidade em obter acesso a porta série e avaliação das medidas coletadas no mesmo. Foi verificado que o consumo de energia de um Arduino UNO prejudicaria o desempenho do sistema, pois o mesmo tem um consumo elevado de energia durante o processo de leitura.

A avaliação do consumo do Arduino consiste em verificar a corrente drenada da fonte durante o funcionamento do algoritmo desenvolvido para o sistema. Desta forma, a Tabela 5.2 mostra o consumo do Arduino UNO em operação.

Com os dados apresentados na Tabela 5.2 é verificado uma diferença nos valores das correntes quando se tem o microcontrolador no seu pleno funcionamento e quando se tem o mesmo no modo *sleep* ou quando é feita a alimentação do *display* OLED, sendo mostrado um menor consumo quando se tem o microcontrolador nos modos *sleep* interrupção externa e modo *sleep* WDT. O Arduino possui muitos periféricos em seu *hardware* fazendo

Tabela 5.2: Medidas realizadas no funcionamento do Arduino UNO.

Estado do programa	Corrente (mA)
Modo normal	51.3
Modo <i>sleep</i> interrupção externa	45.3
Modo <i>sleep</i> WDT	46.7
Alimentando o OLED	60

com que o seu consumo aumente. Uma forma de diminuir este consumo é a utilização de um microcontrolador com os periféricos necessários somente para aplicação desejada.

Capítulo 6

Conclusões

O principal objetivo do trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema capaz de monitorizar a carga e descarga das células reutilizadas de lítio em um sistema composto por componentes de baixo custo, assim como gerir a quantidade de carga disponível, temperatura do conjunto de células e alimentar um projetor a LED para ser utilizado em corriças e estábulos, lugares onde não há acesso à rede pública de distribuição de energia elétrica. Inicialmente foi planeado e realizada a montagem do circuito da primeira solução. Feito isto, este circuito foi submetido a testes, verificando que este sistema possuía diversas deficiências, além da sua constituição conter periféricos que poderiam ser substituídos por funções na programação do microcontrolador, garantindo uma economia no custo final do projeto. Observado estas deficiências, foi feito um segundo circuito, no qual houve algumas substituições tanto na parte física como na programação do microcontrolador, o que possibilitou a realização dos testes mostrados no Capítulo 5.

Os testes aplicados e apresentados na secção 5.2 do Capítulo 5 tem como finalidade verificar a funcionalidade do sistema desenvolvido. Primeiramente foi realizado a inicialização do sistema, com a finalidade de verificar se o algoritmo estava correto quanto à recepção dos dados a serem gravados na memória interna do microcontrolador, representando os dados da configuração inicial do sistema. Com o teste de carga e descarga realizado pelo sistema, foi possível detectar problemas nas medições de corrente, devido à precisão do sensor de corrente utilizado. Os dados referente a carga foram mostrados

no capítulo anterior além de estar presente no Apêndice B, verificando o correto balanceamento das células reutilizadas de lítio. Os dados relativos a descarga foram também apresentados na forma de gráficos, os mesmos presentes no Apêndice A, mostrando as respostas do sistema em relação a eventos provocados propositadamente, a fim de verificar a resposta do sistema. Com os resultados apresentados na seção 5.2 do Capítulo 5 é conclusivo que ambos, carga/descarga, possuem o comportamento necessário para o correto funcionamento do sistema.

A estratégia utilizada no algoritmo para economia de energia provou ser eficiente, visto que a Tabela 5.2 apresenta os resultados do Arduino em uma atividade normal comparando com os demais estados de funcionamento do mesmo. Na programação utilizada, o Arduino encontra-se no modo *sleep* na maior parte do tempo, sendo feitas as devidas leituras a cada oito segundos, ou quando há eventos que necessitem ser monitorizados como a carga/descarga da bateria, ou quando o usuário pressiona o botão para verificação de informações do sistema no *display*. Caso contrário o microcontrolador entra em modo *sleep*, reduzindo o consumo energético. Com estas ações do algoritmo é verificado uma economia significativa de energia no sistema.

Os testes foram conduzidos para baixas correntes, o que tornou os resultados imprecisos, devido ao sensor que foi utilizado, com uma faixa de corrente de menos trinta a trinta amperes. Além disto, há a limitação do conversor analógico para digital do Arduino, possuindo 10 bits de resolução, reduzindo a confiabilidade das medidas, tanto da corrente, quanto das tensões das células de lítio.

Com o sistema desenvolvido foi verificado a possibilidade de aplicação em diversas outras cargas, pois o mesmo é comparado a uma caixa preta, a qual possui saída para alimentar uma carga, entrada para carregar a bateria e uma saída para obtenção dos dados relativos a corrente de descarga/carga, capacidade e temperatura da bateria. Para outras aplicações torna-se necessário verificar se é preciso ser feito ajustes na configuração inicial, além de avaliar se a parte física atende a aplicação desejada.

Diante aos resultados, é conclusivo que o sistema possui a funcionalidade desejada, permitindo o uso das células de lítio reutilizadas para aplicação da proposta da dissertação.

Com os dados apresentados nesta dissertação foi produzido um artigo científico apresentado no Apendice C e que será oportunamente submetido a um congresso relacionado a área tratada nesta dissertação.

6.1 Trabalhos futuros

Para os trabalhos futuros correlacionados ao trabalho desenvolvido nesta dissertação é sugestionado desenvolver os seguintes tópicos:

- Unir todos os componentes utilizados no circuito proposto afim de fazer uma placa comercial e de fácil instalação, avaliando como é o comportamento do circuito total;
- Projetar ou pesquisar um recipiente adequado com proteção adequada para instalação do sistema;
- Utilizar a placa desenvolvida na etapa anterior e o recipiente para ser implantados na prática em alguma corriça ou estábulo;
- Avaliar os dados recolhidos no item anterior e verificar as leis existentes para implantação deste produto no mercado comercial.

Bibliografia

- [1] B. Diouf, “A second life for mobile phone batteries in light emitting diode solar home systems”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, n° 2, p. 024 106, 2016.
- [2] K. Richa, C. W. Babbitt, G. Gaustad e X. Wang, “A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 83, pp. 63–76, 2014.
- [3] W.-C. Lih, J.-H. Yen, F.-H. Shieh e Y.-M. Liao, “Second use of retired lithium-ion battery packs from electric vehicles: Technological challenges, cost analysis and optimal business model”, em *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on*, IEEE, 2012, pp. 381–384.
- [4] E. Martinez-Laserna, E. Sarasketa-Zabala, D.-I. Stroe, M. Swierczynski, A. Warnecke, J.-M. Timmermans, S. Goutam e P. Rodriguez, “Evaluation of lithium-ion battery second life performance and degradation”, em *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, 2016, pp. 1–7.
- [5] C. R. Standridge e L. Corneal, “Remanufacturing, repurposing, and recycling of post-vehicle-application lithium-ion batteries”, rel. téc., 2014.
- [6] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. Regtien e P. H. Notten, *Battery management systems: Accurate state-of-charge indication for battery-powered applications*. Springer Science & Business Media, 2008.

- [7] J. T. Pinho e M. A. Galdino, “Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos”, *Rio de Janeiro: CEPEL*, 2014.
- [8] M. J. A. Costa, “A minigeração fotovoltaica em edifícios escolares: Um caso de estudo”, *Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro*, tese de mestrado de 2014.
- [9] F. J. P. Borges, “Sustentabilidade energética num edifício público”, *Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro*, tese de mestrado de 2016.
- [10] “Associação de energias renováveis – energias renováveis solar”, Agosto de 2017. endereço: <http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/solar/>.
- [11] J. Morais, *Sistemas fotovoltaicos: Da teoria à prática*. Publindústria, 2009, ISBN: 9789899610101.
- [12] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: Processes and systems*. Academic Press, 2013.
- [13] L. David e B. R. Thomas, *Handbook of batteries*, 4th. McGraw-Hill Professional, 2010.
- [14] J. I. L. Seguel, “Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica mppt e controle digital”, *Master Degree Dissertation-Research Focus: Power Electronics, PPGEE-UFMG*, 2009.
- [15] A. Ahmed, *Power electronics for technology*. Prentice Hall, 1998.
- [16] “Battery university”, Setembro de 2017. endereço: <http://batteryuniversity.com/>.
- [17] “A123”, Setembro de 2017. endereço: <http://www.a123systems.com/>.
- [18] C. J. Humphreys, “Solid-state lighting”, *MRS bulletin*, vol. 33, nº 4, pp. 459–470, 2008.
- [19] M. S. I. PVGIS, “Disponível em: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/mrcalc.php>>”, *Acesso realizado em: Out*, 2017.

- [20] A. Guimarães, C. Ribeiro, L. Bastos, L. Valente, P. Silva e R. Oliveira, “Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos”, *Ediouro Gráfica e Editora SA Edição Especial, Rio de Janeiro, Brasil*, 2004.
- [21] C. B. Climate-data, “Disponível em:<<https://pt.climate-data.org/location/141/>>”, *Acesso realizado em: Out*, 2017.
- [22] K. Wang, “Study on low temperature performance of li ion battery”, *Open Access Library Journal*, vol. 4, nº 11, p. 1, 2017.
- [23] A. P. C. Greenpro, “Energia fotovoltaica-manual sobre tecnologias, projecto e instalação”, *Europa: Comissão Europeia*, p. 43, 2004.
- [24] E. LiPro iMax, *B6 manual*,© skyrc technology co, 2009.
- [25] M. McRoberts, B. Levy e C. Wootton, *Beginning arduino*. Springer, 2010.
- [26] H. Arduino, “Disponível em:<<http://www.arduino.cc/>>”, *Acesso realizado em: Setembro*, 2017.
- [27] R. Mancini, “Op amps for everyone”, *Texas Instruments*, 2002.

Apêndice A

Descarregamento das células de lítio

SOC (%)	Corrente (A)	Corrente consumida (A)	Temperatura (°C)	Cell_1 (V)	Cell_2 (V)	Cell_3 (V)	Cell_4 (V)	Tempo (s)
100	0	0	14	4,11	4,22	4,16	4,15	8
100	0	0	14	3,77	3,71	3,38	3,55	16
99	0,62	0	15	3,76	3,69	3,4	3,51	24
99	0,62	0	14	3,76	3,69	3,27	3,52	32
99	0,62	0	14	3,75	3,69	3,21	3,52	40
99	0,62	0	14	3,75	3,67	3,21	3,5	48
99	0,62	0	14	3,75	3,67	3,2	3,48	56
99	0,62	0	15	3,74	3,67	3,2	3,46	64
99	0,5	0	15	3,74	3,66	3,41	3,45	72
99	0,5	-0,01	15	3,72	3,66	3,22	3,46	80
99	0,62	-0,01	16	3,72	3,65	3,22	3,45	88
99	0,62	-0,01	14	3,72	3,65	3,24	3,45	96
99	0,5	-0,01	15	3,72	3,65	3,2	3,44	104
99	0,5	-0,01	15	3,72	3,65	3,22	3,44	112
99	0,5	-0,01	14	3,71	3,64	3,36	3,43	120
99	0,5	-0,01	15	3,7	3,64	3,38	3,42	128
99	0,5	-0,01	16	3,7	3,64	3,38	3,43	136
98	0,5	-0,01	16	3,7	3,64	3,36	3,42	144
98	0,5	-0,02	15	3,7	3,63	3,21	3,43	152
98	0,5	-0,02	15	3,69	3,64	3,18	3,42	160
98	0,5	-0,02	15	3,69	3,64	3,15	3,43	168
98	0,5	-0,02	15	3,68	3,63	3,35	3,42	176
98	0,5	-0,02	15	3,68	3,64	3,29	3,42	184
98	0,5	-0,02	16	3,68	3,64	3,15	3,43	192
98	0,5	-0,02	15	3,67	3,64	3,39	3,42	200
98	0,5	-0,02	15	3,67	3,64	3,11	3,43	208
98	0,5	-0,02	15	3,67	3,63	3,15	3,43	216
98	0,5	-0,03	15	3,66	3,63	3,13	3,42	224
98	0,5	-0,03	15	3,66	3,63	3,13	3,42	232
98	0,5	-0,03	15	3,65	3,63	3,29	3,41	240
98	0,5	-0,03	14	3,65	3,63	3,29	3,41	248
98	0,5	-0,03	15	3,65	3,63	3,28	3,41	256
98	0,5	-0,03	15	3,65	3,63	3,25	3,4	264
98	0,5	-0,03	14	3,64	3,62	3,22	3,4	272
98	0,5	-0,03	15	3,64	3,63	3,21	3,4	280
97	0,5	-0,04	15	3,64	3,63	3,2	3,4	288
97	0,5	-0,04	15	3,63	3,63	3,17	3,4	296
97	0,5	-0,04	15	3,63	3,62	3,17	3,4	304
97	0,5	-0,04	15	3,62	3,62	3,19	3,4	312
97	0,5	-0,04	15	3,62	3,63	3,18	3,4	320
97	0,5	-0,04	15	3,62	3,63	3,19	3,4	328
97	0,5	-0,04	15	3,61	3,63	3,17	3,4	336
97	0,5	-0,04	15	3,6	3,63	3,17	3,4	344
97	0,5	-0,04	15	3,61	3,62	3,14	3,4	352
97	0,5	-0,05	15	3,61	3,63	3,18	3,4	360
97	0,5	-0,05	14	3,6	3,63	3,16	3,4	368
97	0,5	-0,05	15	3,59	3,62	3,14	3,4	376

97	0,5	-0,05	15	3,59	3,62	3,1	3,4	384
97	0,5	-0,05	15	3,59	3,63	3,1	3,4	392
97	0,5	-0,05	15	3,58	3,62	3,11	3,4	400
97	0,5	-0,05	15	3,58	3,63	3,11	3,39	408
97	0,5	-0,05	15	3,57	3,62	3,13	3,39	416
97	0,5	-0,05	15	3,57	3,63	3,1	3,4	424
96	0,5	-0,06	15	3,57	3,62	3,13	3,39	432
96	0,5	-0,06	15	3,56	3,62	3,12	3,4	440
96	0,5	-0,06	15	3,56	3,62	3,11	3,39	448
96	0,5	-0,06	15	3,56	3,62	3,11	3,39	456
96	0,62	-0,06	15	3,55	3,62	3,12	3,39	464
96	0,5	-0,06	15	3,54	3,61	3,15	3,39	472
96	0,5	-0,06	15	3,54	3,61	3,16	3,39	480
96	0,5	-0,06	15	3,54	3,61	3,14	3,39	488
96	0,5	-0,06	15	3,53	3,61	3,12	3,39	496
96	0,5	-0,07	15	3,53	3,61	3,12	3,39	504
96	0,5	-0,07	15	3,53	3,61	3,11	3,39	512
96	0,5	-0,07	15	3,52	3,61	3,12	3,39	520
96	0,5	-0,07	15	3,52	3,61	3,1	3,39	528
96	0,5	-0,07	15	3,52	3,61	3,09	3,39	536
96	0,5	-0,07	15	3,51	3,61	3,11	3,39	544
96	0,5	-0,07	15	3,52	3,61	3,13	3,39	552
96	0,5	-0,07	15	3,51	3,61	3,07	3,39	560
96	0,5	-0,07	15	3,5	3,61	3,12	3,38	568
95	0,5	-0,08	16	3,5	3,61	3,11	3,39	576
95	0,5	-0,08	15	3,49	3,61	3,09	3,39	584
95	0,5	-0,08	15	3,49	3,61	3,07	3,38	592
95	0,5	-0,08	15	3,48	3,61	3,08	3,38	600
95	0,5	-0,08	15	3,48	3,61	3,05	3,38	608
95	0,5	-0,08	15	3,48	3,61	3,06	3,38	616
95	0,5	-0,08	15	3,47	3,61	3,14	3,38	624
95	0,5	-0,08	15	3,47	3,61	3,13	3,38	632
95	0,5	-0,08	15	3,46	3,6	3,12	3,38	640
95	0,5	-0,09	15	3,46	3,61	3,11	3,38	648
95	0,5	-0,09	15	3,46	3,6	3,12	3,37	656
95	0,5	-0,09	15	3,45	3,6	3,12	3,38	664
95	0,5	-0,09	15	3,45	3,6	3,1	3,38	672
95	0,5	-0,09	15	3,44	3,61	3,04	3,38	680
95	0,5	-0,09	15	3,44	3,61	3,11	3,38	688
95	0,5	-0,09	15	3,44	3,6	3,12	3,38	696
95	0,5	-0,09	15	3,43	3,6	3,19	3,37	704
95	0,5	-0,09	15	3,43	3,6	3,13	3,37	712
94	0,5	-0,1	15	3,43	3,6	3,11	3,37	720
94	0,5	-0,1	15	3,42	3,6	3,11	3,37	728
94	0,5	-0,1	16	3,42	3,6	3,06	3,38	736
94	0,5	-0,1	15	3,42	3,6	3,12	3,37	744
94	0,5	-0,1	15	3,41	3,6	3,1	3,37	752
94	0,5	-0,1	15	3,41	3,6	3,08	3,37	760
94	0,5	-0,1	15	3,41	3,6	3,06	3,37	768
94	0,5	-0,1	15	3,41	3,6	3,07	3,37	776

94	0,5	-0,1	15	3,4	3,6	3,17	3,37	784
94	0,5	-0,11	15	3,4	3,6	3,16	3,37	792
94	0,5	-0,11	15	3,39	3,6	3,08	3,38	800
94	0,5	-0,11	15	3,39	3,6	3,08	3,37	808
94	0,5	-0,11	15	3,38	3,6	3,12	3,37	816
94	0,5	-0,11	15	3,39	3,6	3,09	3,37	824
94	0,5	-0,11	15	3,38	3,6	3,09	3,37	832
94	0,5	-0,11	15	3,38	3,59	3,16	3,37	840
94	0,5	-0,11	15	3,37	3,6	3,12	3,37	848
94	0,5	-0,11	15	3,37	3,6	3,1	3,37	856
93	0,5	-0,12	15	3,37	3,6	3,12	3,37	864
93	0,5	-0,12	15	3,37	3,59	3,08	3,37	872
93	0,5	-0,12	15	3,36	3,6	3,15	3,36	880
93	0,5	-0,12	15	3,36	3,6	3,11	3,36	888
93	0,5	-0,12	15	3,36	3,59	3,22	3,36	896
93	0,5	-0,12	15	3,35	3,59	3,2	3,36	904
93	0,5	-0,12	16	3,35	3,59	3,21	3,36	912
93	0,5	-0,12	16	3,35	3,59	3,26	3,36	920
93	0,5	-0,12	15	3,34	3,59	3,28	3,35	928
93	0,5	-0,13	16	3,34	3,59	3,24	3,36	936
93	0,5	-0,13	15	3,33	3,59	3,23	3,36	944
93	0,5	-0,13	15	3,34	3,59	3,22	3,36	952
93	0,5	-0,13	15	3,33	3,59	3,24	3,35	960
93	0,5	-0,13	15	3,33	3,58	3,2	3,36	968
93	0,5	-0,13	16	3,33	3,59	3,25	3,35	976
93	0,5	-0,13	16	3,33	3,59	3,22	3,35	984
93	0,5	-0,13	15	3,32	3,59	3,24	3,35	992
93	0,5	-0,13	15	3,32	3,59	3,25	3,35	1000
92	0,5	-0,14	15	3,32	3,59	3,25	3,35	1008
92	0,5	-0,14	16	3,32	3,59	3,24	3,35	1016
92	0,5	-0,14	15	3,32	3,59	3,25	3,35	1024
92	0,5	-0,14	16	3,31	3,59	3,27	3,35	1032
92	0,5	-0,14	15	3,31	3,59	3,23	3,35	1040
92	0,5	-0,14	15	3,31	3,59	3,22	3,35	1048
92	0,5	-0,14	15	3,31	3,59	3,21	3,35	1056
92	0,5	-0,14	16	3,31	3,58	3,22	3,35	1064
92	0,5	-0,14	15	3,31	3,59	3,21	3,35	1072
92	0,5	-0,15	15	3,31	3,59	3,2	3,35	1080
92	0,5	-0,15	15	3,3	3,58	3,22	3,35	1088
92	0,5	-0,15	15	3,3	3,59	3,25	3,35	1096
92	0,5	-0,15	15	3,3	3,58	3,21	3,35	1104
92	0,5	-0,15	15	3,3	3,59	3,21	3,35	1112
92	0,5	-0,15	15	3,29	3,58	3,23	3,34	1120
92	0,5	-0,15	15	3,29	3,59	3,26	3,34	1128
92	0,5	-0,15	15	3,29	3,58	3,22	3,34	1136
92	0,5	-0,15	15	3,29	3,59	3,23	3,34	1144
91	0,5	-0,16	16	3,29	3,58	3,25	3,34	1152
91	0,5	-0,16	16	3,28	3,58	3,25	3,34	1160
91	0,5	-0,16	16	3,29	3,58	3,25	3,34	1168
91	0,5	-0,16	16	3,28	3,58	3,24	3,34	1176

91	0,5	-0,16	16	3,28	3,57	3,24	3,34	1184
91	0,5	-0,16	15	3,28	3,58	3,24	3,34	1192
91	0,5	-0,16	16	3,27	3,57	3,24	3,34	1200
91	0,5	-0,16	15	3,27	3,58	3,26	3,34	1208
91	0,5	-0,16	16	3,27	3,58	3,26	3,34	1216
91	0,5	-0,17	15	3,27	3,57	3,26	3,33	1224
91	0,5	-0,17	16	3,27	3,58	3,24	3,33	1232
91	0,5	-0,17	16	3,27	3,58	3,23	3,33	1240
91	0,5	-0,17	16	3,26	3,58	3,23	3,33	1248
91	0,5	-0,17	15	3,26	3,58	3,25	3,33	1256
91	0,5	-0,17	16	3,26	3,58	3,25	3,33	1264
91	0,5	-0,17	15	3,26	3,58	3,26	3,33	1272
91	0,5	-0,17	15	3,26	3,57	3,28	3,33	1280
91	0,5	-0,17	16	3,25	3,58	3,29	3,33	1288
90	0,5	-0,18	16	3,25	3,57	3,29	3,33	1296
90	0,5	-0,18	16	3,25	3,57	3,29	3,32	1304
90	0,5	-0,18	16	3,25	3,57	3,28	3,33	1312
90	0,5	-0,18	16	3,25	3,58	3,28	3,32	1320
90	0,5	-0,18	15	3,24	3,57	3,27	3,33	1328
90	0,5	-0,18	16	3,24	3,57	3,26	3,32	1336
90	0,5	-0,18	15	3,24	3,57	3,25	3,32	1344
90	0,5	-0,18	16	3,24	3,57	3,23	3,32	1352
90	0,5	-0,18	16	3,24	3,58	3,23	3,32	1360
90	0,5	-0,19	15	3,24	3,57	3,23	3,32	1368
90	0,5	-0,19	15	3,24	3,57	3,24	3,32	1376
90	0,5	-0,19	15	3,24	3,57	3,22	3,32	1384
90	0,5	-0,19	16	3,24	3,57	3,23	3,32	1392
90	0,5	-0,19	16	3,23	3,57	3,23	3,32	1400
90	0,5	-0,19	16	3,23	3,57	3,24	3,32	1408
90	0,5	-0,19	16	3,22	3,57	3,24	3,32	1416
90	0,5	-0,19	15	3,23	3,57	3,24	3,32	1424
90	0,5	-0,19	16	3,22	3,57	3,24	3,32	1432
89	0,5	-0,2	16	3,22	3,57	3,24	3,32	1440
89	0,5	-0,2	15	3,22	3,57	3,24	3,32	1448
89	0,5	-0,2	15	3,22	3,56	3,24	3,32	1456
89	0,5	-0,2	15	3,22	3,57	3,23	3,32	1464
89	0,5	-0,2	16	3,22	3,57	3,23	3,32	1472
89	0,5	-0,2	15	3,22	3,56	3,22	3,32	1480
89	0,5	-0,2	15	3,22	3,56	3,22	3,31	1488
89	0,5	-0,2	16	3,22	3,56	3,23	3,32	1496
89	0,5	-0,2	16	3,21	3,56	3,24	3,31	1504
89	0,5	-0,21	15	3,21	3,56	3,23	3,32	1512
89	0,5	-0,21	16	3,21	3,56	3,22	3,32	1520
89	0,5	-0,21	15	3,21	3,56	3,23	3,31	1528
89	0,5	-0,21	16	3,21	3,56	3,22	3,31	1536
89	0,5	-0,21	15	3,21	3,56	3,2	3,31	1544
89	0,5	-0,21	16	3,2	3,56	3,2	3,31	1552
89	0,5	-0,21	16	3,2	3,56	3,2	3,31	1560
89	0,5	-0,21	16	3,2	3,56	3,17	3,31	1568
89	0,5	-0,21	16	3,19	3,56	3,2	3,3	1576

88	0,5	-0,22	16	3,2	3,55	3,2	3,3	1584
88	0,5	-0,22	17	3,2	3,56	3,17	3,3	1592
88	0,5	-0,22	16	3,2	3,56	3,17	3,3	1600
88	0,5	-0,22	17	3,19	3,55	3,17	3,3	1608
88	0,5	-0,22	17	3,19	3,55	3,18	3,3	1616
88	0,5	-0,22	20	3,19	3,54	3,13	3,3	1624
88	0,5	-0,22	23	3,19	3,55	3,1	3,3	1632
88	0,5	-0,22	26	3,19	3,55	3,12	3,3	1640
88	0,5	-0,22	27	3,19	3,55	3,14	3,3	1648
88	0,5	-0,23	29	3,19	3,55	3,13	3,3	1656
88	0,5	-0,23	28	3,17	3,55	3,11	3,3	1664
88	0,5	-0,23	44	3,17	3,55	3,13	3,29	1672
88	0,5	-0,23	56	3,17	3,55	3,13	3,3	1680
88	0	-0,23	61	3,57	3,93	3,87	3,86	1688
88	0	-0,23	66	3,6	3,93	3,87	3,87	1696
88	0	-0,23	67	3,61	3,94	3,88	3,87	1704
88	0	-0,23	64	3,62	3,94	3,88	3,87	1712
88	0	-0,23	64	3,63	3,95	3,89	3,88	1720
88	0	-0,23	69	3,64	3,95	3,89	3,88	1728
88	0	-0,23	71	3,64	3,95	3,89	3,88	1736
88	0	-0,23	51	3,3	3,58	3,19	3,32	1744
88	0,5	-0,23	39	3,28	3,57	3,16	3,31	1752
88	0,5	-0,23	31	3,26	3,56	3,17	3,31	1760
88	0,5	-0,23	26	3,25	3,56	3,19	3,3	1768
88	0,5	-0,23	24	3,24	3,55	3,2	3,29	1776
88	0,5	-0,23	21	3,23	3,54	3,2	3,29	1784
87	0,5	-0,24	20	3,22	3,55	3,21	3,29	1792
87	0,5	-0,24	20	3,21	3,54	3,2	3,29	1800
87	0,5	-0,24	18	3,21	3,54	3,21	3,28	1808
87	0,5	-0,24	18	3,2	3,55	3,22	3,28	1816
87	0,5	-0,24	18	3,19	3,54	3,22	3,28	1824
87	0,5	-0,24	18	3,19	3,54	3,2	3,28	1832
87	0,5	-0,24	17	3,18	3,54	3,2	3,27	1840
87	0,5	-0,24	17	3,18	3,54	3,2	3,28	1848
87	0,5	-0,24	17	3,18	3,54	3,19	3,28	1856
87	0,5	-0,25	17	3,18	3,54	3,17	3,28	1864
87	0,5	-0,25	17	3,17	3,54	3,18	3,28	1872
87	0,5	-0,25	17	3,17	3,54	3,18	3,28	1880
87	0,5	-0,25	16	3,16	3,54	3,17	3,28	1888
87	0,5	-0,25	18	3,16	3,54	3,18	3,27	1896
87	0,5	-0,25	16	3,16	3,54	3,18	3,27	1904
87	0,5	-0,25	16	3,15	3,53	3,16	3,28	1912
87	0,5	-0,25	16	3,16	3,53	3,15	3,27	1920
87	0,5	-0,25	16	3,15	3,53	3,14	3,27	1928
86	0,5	-0,26	16	3,15	3,53	3,15	3,27	1936
86	0,5	-0,26	16	3,15	3,53	3,15	3,27	1944
86	0,5	-0,26	16	3,14	3,53	3,15	3,27	1952
86	0,5	-0,26	16	3,14	3,53	3,14	3,27	1960
86	0,5	-0,26	16	3,14	3,53	3,13	3,27	1968
86	0,5	-0,26	16	3,14	3,52	3,12	3,27	1976

86	0,5	-0,26	16	3,14	3,53	3,13	3,27	1984
86	0,5	-0,26	16	3,13	3,53	3,13	3,27	1992
86	0,5	-0,26	16	3,13	3,53	3,11	3,27	2000
86	0,5	-0,27	16	3,13	3,53	3,12	3,26	2008
86	0,5	-0,27	16	3,13	3,53	3,13	3,27	2016
86	0,5	-0,27	16	3,13	3,53	3,13	3,27	2024
86	0,5	-0,27	16	3,13	3,53	3,1	3,26	2032
86	0,5	-0,27	16	3,12	3,52	3,14	3,27	2040
86	0,5	-0,27	16	3,12	3,53	3,12	3,26	2048
86	0,5	-0,27	16	3,12	3,53	3,09	3,26	2056
86	0,5	-0,27	16	3,12	3,53	3,08	3,26	2064
86	0,5	-0,27	16	3,11	3,52	3,09	3,26	2072
85	0,5	-0,28	17	3,12	3,52	3,03	3,26	2080
85	0,5	-0,28	16	3,11	3,52	3,06	3,27	2088
85	0,5	-0,28	16	3,11	3,52	3,09	3,26	2096
85	1,5	-0,28	16	2,55	2,9	2,62	2,89	2104
85	1,5	-0,28	16	2,55	2,9	2,62	2,89	2112
85	0	-0,28	16	3,32	3,61	3,21	3,37	2120
85	0	-0,28	16	3,41	3,67	3,29	3,44	2128
85	0	-0,28	16	3,47	3,72	3,33	3,53	2136
85	0,5	-0,28	16	3,11	3,52	3,04	3,26	2144
85	0,5	-0,28	15	3,1	3,52	3,07	3,26	2152
85	0,5	-0,28	16	3,1	3,52	3,09	3,26	2160
85	0,5	-0,28	16	3,1	3,52	3,03	3,26	2168
85	0,5	-0,28	16	3,1	3,52	3,06	3,25	2176
85	0,5	-0,29	16	3,1	3,51	3,08	3,26	2184
85	0,5	-0,29	16	3,09	3,52	3,02	3,26	2192
85	0,5	-0,29	16	3,09	3,52	3,09	3,25	2200
85	0,5	-0,29	16	3,08	3,51	3,18	3,25	2208
85	0,5	-0,29	16	3,08	3,51	3,13	3,25	2216
85	0,5	-0,29	17	3,08	3,52	2,96	3,26	2224
85	0,5	-0,29	16	3,08	3,51	3,09	3,25	2232
85	0,5	-0,29	16	3,07	3,52	3,02	3,25	2240
85	0,5	-0,29	16	3,08	3,51	3,02	3,25	2248
84	0,5	-0,3	16	3,08	3,52	2,97	3,26	2256
84	0,5	-0,3	15	3,07	3,52	2,94	3,26	2264
84	0,5	-0,3	17	3,08	3,51	3,01	3,26	2272
84	0,5	-0,3	16	3,07	3,51	3	3,25	2280
84	0,5	-0,3	16	3,07	3,51	2,98	3,26	2288
84	0,5	-0,3	16	3,07	3,51	2,99	3,25	2296
84	0,37	-0,3	15	3,07	3,51	2,97	3,25	2304
84	0,5	-0,3	16	3,06	3,52	2,94	3,24	2312
84	0,5	-0,3	16	3,06	3,51	2,97	3,24	2320
84	0,5	-0,3	16	3,06	3,51	2,98	3,24	2328
84	0,5	-0,31	16	3,06	3,51	2,98	3,24	2336
84	0,5	-0,31	16	3,05	3,51	2,97	3,24	2344
84	0,5	-0,31	17	3,05	3,51	2,97	3,24	2352
84	0,5	-0,31	16	3,05	3,51	2,97	3,24	2360
84	0,37	-0,31	17	3,05	3,51	2,98	3,24	2368
84	0,5	-0,31	16	3,04	3,51	2,97	3,24	2376

84	0,5	-0,31	16	3,04	3,51	2,98	3,24	2384
84	0,5	-0,31	16	3,04	3,51	2,97	3,24	2392
84	0,5	-0,31	16	3,04	3,5	2,96	3,24	2400
83	0,5	-0,32	16	3,04	3,51	2,96	3,24	2408
83	0,5	-0,32	16	3,03	3,51	2,97	3,24	2416
83	0,5	-0,32	15	3,03	3,51	2,98	3,24	2424
83	0,5	-0,32	16	3,03	3,51	2,98	3,23	2432
83	0,5	-0,32	16	3,02	3,51	2,96	3,23	2440
83	0,5	-0,32	16	3,02	3,51	2,97	3,23	2448
83	0,5	-0,32	16	3,01	3,5	2,97	3,24	2456
83	0,5	-0,32	15	3,01	3,5	2,97	3,24	2464
83	0,5	-0,32	15	3,01	3,5	2,96	3,23	2472
83	0,5	-0,33	16	3,01	3,51	2,95	3,23	2480
83	0,5	-0,33	15	3,01	3,5	2,96	3,23	2488
83	0,5	-0,33	15	3	3,49	2,95	3,23	2496
83	0,37	-0,33	16	3	3,5	2,96	3,23	2504
83	0,5	-0,33	15	3	3,5	2,96	3,23	2512
83	0,5	-0,33	15	3	3,5	2,96	3,23	2520
83	0,5	-0,33	16	2,99	3,5	2,95	3,23	2528
83	0,5	-0,33	16	2,99	3,5	2,95	3,23	2536
83	0,5	-0,33	16	2,99	3,5	2,96	3,23	2544
82	0,5	-0,34	15	2,99	3,5	2,97	3,23	2552
82	0,5	-0,34	16	2,98	3,5	2,98	3,23	2560
82	0,5	-0,34	16	2,98	3,5	2,96	3,23	2568
82	0,5	-0,34	16	2,98	3,5	2,99	3,23	2576
82	0,5	-0,34	16	2,98	3,5	2,94	3,23	2584
82	0,5	-0,34	16	2,97	3,5	2,95	3,23	2592
82	0,5	-0,34	16	2,97	3,5	2,98	3,23	2600
82	0,5	-0,34	15	2,97	3,5	2,98	3,23	2608
82	0,5	-0,34	16	2,97	3,49	2,96	3,22	2616
82	0,37	-0,35	16	2,96	3,5	2,95	3,23	2624
82	0,5	-0,35	15	2,96	3,5	2,95	3,23	2632
82	0,5	-0,35	16	2,96	3,5	2,95	3,22	2640
82	0,5	-0,35	16	2,95	3,5	2,95	3,23	2648
82	0,5	-0,35	16	2,95	3,5	2,95	3,22	2656
82	0,5	-0,35	16	2,95	3,5	2,93	3,22	2664
82	0,5	-0,35	15	2,94	3,49	2,95	3,21	2672
82	0,5	-0,35	16	2,94	3,5	2,96	3,22	2680
82	0,5	-0,35	16	2,93	3,49	2,95	3,22	2688
81	0,5	-0,36	16	2,93	3,5	2,96	3,22	2696
81	0,37	-0,36	15	2,93	3,5	2,97	3,22	2704
81	0,5	-0,36	15	2,92	3,49	2,99	3,22	2712
81	0,37	-0,36	16	2,92	3,49	2,98	3,21	2720
81	0,5	-0,36	15	2,92	3,49	2,98	3,22	2728
81	0,5	-0,36	16	2,91	3,49	2,97	3,21	2736
81	0,5	-0,36	16	2,91	3,49	2,97	3,22	2744
81	0,5	-0,36	16	2,91	3,49	2,97	3,22	2752
81	0,5	-0,36	16	2,9	3,49	2,97	3,21	2760
81	0,5	-0,36	16	2,9	3,49	2,99	3,22	2768
81	0,5	-0,37	15	2,9	3,49	2,96	3,21	2776

81	0,5	-0,37	16	2,89	3,49	2,97	3,22	2784
81	0,5	-0,37	17	2,89	3,49	2,96	3,22	2792
81	0,5	-0,37	16	2,88	3,49	2,96	3,21	2800
81	0,5	-0,37	16	2,88	3,49	2,96	3,21	2808
81	0,37	-0,37	16	2,88	3,49	2,96	3,21	2816
81	0,5	-0,37	16	2,87	3,49	2,95	3,21	2824
81	0,5	-0,37	16	2,87	3,49	2,95	3,21	2832
81	0,37	-0,37	16	2,87	3,49	2,97	3,21	2840
80	0,5	-0,38	16	2,85	3,49	2,95	3,21	2848
80	0,5	-0,38	16	2,86	3,49	2,95	3,21	2856
80	0,5	-0,38	16	2,85	3,49	2,94	3,21	2864
80	0,5	-0,38	16	2,85	3,49	2,95	3,21	2872
80	0,5	-0,38	16	2,84	3,49	2,94	3,21	2880
80	0,5	-0,38	16	2,84	3,49	2,95	3,21	2888
80	0,5	-0,38	16	2,83	3,48	2,94	3,21	2896
80	0,37	-0,38	15	2,83	3,48	2,93	3,21	2904
80	0,5	-0,38	16	2,83	3,49	2,94	3,21	2912
80	0,5	-0,39	16	2,82	3,48	2,94	3,21	2920
80	0,37	-0,39	16	2,82	3,48	2,96	3,2	2928
80	0,5	-0,39	16	2,81	3,49	2,95	3,21	2936
80	0,5	-0,39	17	2,81	3,48	2,96	3,21	2944
80	0,5	-0,39	16	2,8	3,49	2,94	3,21	2952
80	0,5	-0,39	16	2,79	3,48	2,95	3,21	2960
80	0,37	-0,39	16	2,79	3,49	2,97	3,2	2968
80	0,37	-0,39	16	2,78	3,48	2,97	3,2	2976
80	0,5	-0,39	16	2,78	3,48	2,96	3,2	2984
80	0,37	-0,39	16	2,77	3,48	2,95	3,2	2992
80	0,5	-0,4	15	2,77	3,48	2,95	3,2	3000
80	0,3	-0,4	16	3,3	3,84	3,75	3,79	3008
80	0	-0,4	16	3,74	4,1	4,31	4,19	3016

Apêndice B

Carregamento das células de lítio

SOC (%)	Corrente (A)	Corrente consumida (A)	Temperatura (°C)	Cell_1 (V)	Cell_2 (V)	Cell_3 (V)	Cell_4 (V)	Tempo (s)
80	0	0,4	0	3,69	3,75	3,67	3,78	8
80	0	0,4	19	3,9	3,96	3,88	4	16
80	0,32	0,39	18	3,91	3,96	3,88	4	24
80	0,32	0,39	18	3,9	3,96	3,88	3,99	32
80	0,32	0,39	18	3,9	3,95	3,89	3,98	40
80	0,32	0,39	18	3,92	3,95	3,88	3,99	48
80	0,32	0,39	18	3,91	3,95	3,87	4	56
80	0,32	0,39	18	3,91	3,96	3,87	4	64
80	0,32	0,39	18	3,91	3,96	3,88	3,99	72
80	0,32	0,39	18	3,91	3,95	3,88	4	80
80	0,32	0,39	18	3,9	3,96	3,88	4	88
80	0,32	0,39	18	3,91	3,95	3,88	3,99	96
80	0,32	0,39	18	3,91	3,96	3,88	4	104
80	0,32	0,39	18	3,9	3,96	3,88	4	112
80	0,32	0,39	18	3,91	3,96	3,88	4	120
80	0,32	0,38	18	3,91	3,96	3,88	4	128
80	0,32	0,38	18	3,91	3,96	3,88	3,99	136
80	0,32	0,38	18	3,91	3,95	3,88	4	144
80	0,32	0,38	18	3,91	3,95	3,88	3,99	152
80	0,32	0,38	18	3,91	3,96	3,88	4	160
80	0,32	0,38	19	3,9	3,96	3,88	3,99	168
80	0,32	0,38	18	3,91	3,97	3,88	4	176
80	0,32	0,38	19	3,91	3,95	3,88	4	184
80	0,32	0,38	18	3,91	3,96	3,88	4	192
80	0,32	0,38	18	3,91	3,96	3,89	4	200
80	0,32	0,38	18	3,91	3,95	3,88	4	208
80	0,32	0,38	18	3,91	3,95	3,88	4	216
80	0,32	0,38	18	3,9	3,96	3,88	4	224
80	0,32	0,38	18	3,9	3,96	3,88	4	232
80	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,88	3,99	240
80	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,89	4,01	248
80	0,32	0,37	18	3,92	3,96	3,89	4	256
80	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,88	3,99	264
80	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,89	3,99	272
80	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,88	3,99	280
80	0,32	0,37	19	3,91	3,96	3,88	4	288
81	0,32	0,37	18	3,91	3,95	3,89	4	296
81	0,32	0,37	18	3,91	3,97	3,88	4	304
81	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,88	3,99	312
81	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,88	4	320
81	0,32	0,37	18	3,91	3,97	3,88	3,99	328
81	0,32	0,37	18	3,9	3,96	3,88	3,99	336
81	0,32	0,37	18	3,91	3,96	3,88	4	344
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,88	3,99	352
81	0,32	0,36	18	3,9	3,97	3,88	3,99	360
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,88	4	368
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,88	3,99	376

81	0,32	0,36	18	3,91	3,97	3,88	4	384
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,89	3,99	392
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,89	4	400
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,88	3,99	408
81	0,32	0,36	18	3,91	3,97	3,88	3,99	416
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,89	3,99	424
81	0,32	0,36	18	3,91	3,97	3,89	3,99	432
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,88	4	440
81	0,32	0,36	18	3,91	3,97	3,89	3,99	448
81	0,32	0,36	18	3,91	3,96	3,89	3,99	456
81	0,32	0,35	18	3,91	3,96	3,88	3,99	464
81	0,32	0,35	18	3,92	3,96	3,88	3,99	472
81	0,32	0,35	18	3,9	3,96	3,89	4	480
81	0,32	0,35	18	3,91	3,95	3,88	4	488
81	0,32	0,35	18	3,91	3,96	3,88	4	496
81	0,32	0,35	18	3,91	3,97	3,88	3,99	504
81	0,32	0,35	18	3,91	3,97	3,88	3,99	512
81	0,32	0,35	19	3,91	3,97	3,89	4	520
81	0,32	0,35	18	3,91	3,96	3,89	3,99	528
81	0,32	0,35	18	3,91	3,96	3,88	4	536
81	0,32	0,35	18	3,91	3,97	3,89	3,99	544
81	0,32	0,35	18	3,91	3,96	3,88	3,99	552
81	0,32	0,35	18	3,91	3,95	3,89	4	560
81	0,32	0,35	18	3,91	3,96	3,88	3,99	568
82	0,32	0,34	18	3,92	3,96	3,89	4,01	576
82	0,32	0,34	18	3,9	3,96	3,9	3,99	584
82	0,32	0,34	18	3,92	3,96	3,89	4	592
82	0,32	0,34	18	3,92	3,97	3,9	3,99	600
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,89	3,99	608
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,89	3,99	616
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,88	4	624
82	0,32	0,34	17	3,92	3,97	3,88	3,99	632
82	0,32	0,34	18	3,92	3,97	3,89	4	640
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,88	3,99	648
82	0,32	0,34	18	3,91	3,96	3,89	4	656
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,89	3,99	664
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,89	3,99	672
82	0,32	0,34	18	3,91	3,97	3,89	4	680
82	0,32	0,33	18	3,91	3,97	3,88	4	688
82	0,32	0,33	18	3,92	3,96	3,89	4	696
82	0,32	0,33	18	3,91	3,97	3,89	4	704
82	0,32	0,33	18	3,92	3,96	3,89	4	712
82	0,32	0,33	18	3,92	3,97	3,89	3,99	720
82	0,32	0,33	18	3,92	3,97	3,89	3,99	728
82	0,32	0,33	18	3,92	3,97	3,9	4	736
82	0,32	0,33	18	3,91	3,96	3,89	3,99	744
82	0,32	0,33	19	3,91	3,97	3,89	4	752
82	0,32	0,33	18	3,92	3,96	3,89	3,99	760
82	0,32	0,33	18	3,92	3,97	3,89	4	768
82	0,32	0,33	18	3,92	3,97	3,89	3,99	776

82	0,32	0,33	18	3,91	3,96	3,89	4	784
82	0,32	0,33	18	3,92	3,97	3,89	4	792
82	0,32	0,32	18	3,91	3,96	3,88	3,99	800
82	0,32	0,32	18	3,91	3,97	3,89	4	808
82	0,32	0,32	18	3,92	3,97	3,89	3,99	816
82	0,32	0,32	18	3,92	3,96	3,89	3,99	824
82	0,32	0,32	18	3,91	3,97	3,89	3,99	832
82	0,32	0,32	18	3,91	3,97	3,9	3,99	840
82	0,32	0,32	18	3,92	3,97	3,88	4	848
83	0,32	0,32	18	3,91	3,97	3,89	4	856
83	0,32	0,32	18	3,92	3,97	3,9	3,99	864
83	0,32	0,32	18	3,91	3,97	3,89	3,99	872
83	0,32	0,32	19	3,91	3,97	3,89	4	880
83	0,32	0,32	17	3,92	3,97	3,89	4	888
83	0,32	0,32	18	3,92	3,97	3,89	3,99	896
83	0,32	0,32	18	3,91	3,96	3,89	3,99	904
83	0,32	0,31	18	3,92	3,96	3,89	4	912
83	0,32	0,31	18	3,92	3,97	3,9	4	920
83	0,32	0,31	18	3,92	3,97	3,89	3,99	928
83	0,32	0,31	18	3,92	3,97	3,89	3,99	936
83	0,32	0,31	18	3,92	3,97	3,89	4	944
83	0,32	0,31	19	3,92	3,97	3,89	4	952
83	0,32	0,31	18	3,92	3,96	3,89	3,99	960
83	0,32	0,31	18	3,92	3,97	3,89	3,99	968
83	0,32	0,31	18	3,92	3,98	3,89	4	976
83	0,32	0,31	18	3,93	3,97	3,9	3,99	984
83	0,32	0,31	18	3,92	3,98	3,9	4	992
83	0,32	0,31	18	3,92	3,96	3,9	4	1000
83	0,32	0,31	18	3,91	3,97	3,89	4	1008
83	0,32	0,3	18	3,91	3,97	3,89	3,99	1016
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,89	4	1024
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,9	4	1032
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,89	4	1040
83	0,32	0,3	18	3,92	3,96	3,9	4	1048
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,9	4	1056
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,89	3,99	1064
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,89	4	1072
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,89	4	1080
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,9	4	1088
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,9	4	1096
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,9	4	1104
83	0,32	0,3	18	3,92	3,97	3,9	3,99	1112
83	0,32	0,3	18	3,91	3,97	3,9	4	1120
84	0,32	0,29	18	3,91	3,97	3,9	4	1128
84	0,32	0,29	18	3,92	3,97	3,9	4	1136
84	0,32	0,29	18	3,92	3,97	3,9	3,99	1144
84	0,32	0,29	18	3,92	3,97	3,9	4	1152
84	0,32	0,29	18	3,92	3,96	3,89	4	1160
84	0,32	0,29	18	3,92	3,96	3,89	4	1168
84	0,32	0,29	18	3,92	3,97	3,9	4	1176

84	0,32	0,29	18	3,92	3,96	3,9	3,99	1184
84	0,32	0,29	17	3,92	3,97	3,9	4	1192
84	0,32	0,29	18	3,92	3,96	3,9	4	1200
84	0,32	0,29	17	3,91	3,97	3,9	4	1208
84	0,32	0,29	18	3,92	3,97	3,9	4	1216
84	0,32	0,29	18	3,92	3,97	3,9	4	1224
84	0,32	0,29	18	3,92	3,96	3,9	3,99	1232
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,9	4	1240
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,91	3,99	1248
84	0,32	0,28	18	3,91	3,96	3,89	3,99	1256
84	0,32	0,28	18	3,92	3,96	3,9	4	1264
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,9	3,99	1272
84	0,32	0,28	18	3,93	3,97	3,9	4	1280
84	0,32	0,28	18	3,93	3,96	3,9	4	1288
84	0,32	0,28	18	3,93	3,97	3,91	4	1296
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,9	4	1304
84	0,32	0,28	18	3,91	3,97	3,9	3,99	1312
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,89	4	1320
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,9	4	1328
84	0,32	0,28	18	3,92	3,97	3,9	3,99	1336
84	0,32	0,28	18	3,91	3,97	3,9	4	1344
84	0,32	0,27	18	3,93	3,96	3,9	4	1352
84	0,32	0,27	18	3,93	3,96	3,9	3,99	1360
84	0,32	0,27	18	3,92	3,97	3,89	3,99	1368
84	0,32	0,27	18	3,93	3,97	3,9	4	1376
84	0,32	0,27	18	3,93	3,97	3,91	4	1384
84	0,32	0,27	18	3,92	3,97	3,91	4	1392
84	0,32	0,27	18	3,92	3,98	3,89	4	1400
85	0,32	0,27	18	3,93	3,97	3,9	4	1408
85	0,32	0,27	18	3,94	3,96	3,9	4	1416
85	0,32	0,27	18	3,92	3,98	3,9	4	1424
85	0,32	0,27	18	3,92	3,96	3,91	4	1432
85	0,32	0,27	18	3,93	3,96	3,9	4	1440
85	0,32	0,27	18	3,92	3,97	3,89	4	1448
85	0,32	0,27	18	3,93	3,97	3,91	4	1456
85	0,32	0,26	18	3,93	3,97	3,9	4	1464
85	0,32	0,26	18	3,93	3,97	3,9	4	1472
85	0,32	0,26	18	3,92	3,97	3,91	3,99	1480
85	0,32	0,26	18	3,93	3,97	3,9	4	1488
85	0,32	0,26	18	3,92	3,96	3,91	4	1496
85	0,32	0,26	18	3,92	3,97	3,9	4	1504
85	0,32	0,26	18	3,92	3,97	3,9	4	1512
85	0,32	0,26	18	3,93	3,96	3,9	4	1520
85	0,32	0,26	18	3,93	3,96	3,91	4	1528
85	0,32	0,26	18	3,92	3,97	3,9	4	1536
85	0,32	0,26	18	3,92	3,96	3,91	4,01	1544
85	0,32	0,26	18	3,93	3,96	3,91	4,01	1552
85	0,32	0,26	18	3,92	3,97	3,9	4	1560
85	0,32	0,26	18	3,92	3,97	3,91	4,01	1568
85	0,32	0,25	18	3,93	3,98	3,91	4	1576

85	0,32	0,25	18	3,92	3,97	3,91	4	1584
85	0,32	0,25	18	3,92	3,97	3,9	3,99	1592
85	0,32	0,25	18	3,93	3,98	3,9	4	1600
85	0,32	0,25	18	3,92	3,98	3,9	4	1608
85	0,32	0,25	18	3,93	3,97	3,91	4	1616
85	0,32	0,25	18	3,93	3,97	3,91	4	1624
85	0,32	0,25	18	3,92	3,97	3,91	4,01	1632
85	0,32	0,25	18	3,92	3,97	3,9	4	1640
85	0,32	0,25	17	3,92	3,96	3,9	4	1648
85	0,32	0,25	18	3,93	3,96	3,9	4	1656
85	0,32	0,25	18	3,92	3,97	3,9	4	1664
85	0,32	0,25	18	3,93	3,97	3,9	4	1672
85	0,32	0,25	18	3,92	3,97	3,91	4	1680
86	0,32	0,24	18	3,92	3,97	3,9	4	1688
86	0,32	0,24	18	3,92	3,97	3,91	4	1696
86	0,32	0,24	18	3,92	3,97	3,9	3,99	1704
86	0,32	0,24	19	3,92	3,96	3,91	4,01	1712
86	0,32	0,24	18	3,92	3,97	3,9	4	1720
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,9	4	1728
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,91	4,01	1736
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,9	4	1744
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,9	4,01	1752
86	0,32	0,24	17	3,94	3,97	3,9	4	1760
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,9	4	1768
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,91	4	1776
86	0,32	0,24	19	3,93	3,97	3,9	4	1784
86	0,32	0,24	18	3,93	3,97	3,9	4	1792
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,91	4	1800
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,9	4,01	1808
86	0,32	0,23	18	3,93	3,98	3,9	4,01	1816
86	0,32	0,23	18	3,92	3,96	3,91	4	1824
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,91	4	1832
86	0,32	0,23	19	3,93	3,97	3,91	4	1840
86	0,32	0,23	18	3,93	3,96	3,91	4,01	1848
86	0,32	0,23	17	3,93	3,97	3,91	4,01	1856
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,91	4,01	1864
86	0,32	0,23	17	3,93	3,97	3,91	4	1872
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,9	4,01	1880
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,9	4	1888
86	0,32	0,23	18	3,93	3,97	3,9	4	1896
86	0,32	0,22	19	3,93	3,97	3,91	4,02	1904
86	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,9	4,01	1912
86	0,32	0,22	18	3,92	3,97	3,91	4	1920
86	0,32	0,22	18	3,92	3,97	3,91	4,01	1928
86	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,91	4	1936
86	0,32	0,22	18	3,94	3,97	3,92	4	1944
86	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,91	4	1952
87	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,91	4	1960
87	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,91	4,01	1968
87	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,9	4,01	1976

87	0,27	0,22	18	3,93	3,97	3,91	4	1984
87	0,32	0,22	18	3,93	3,97	3,91	4,01	1992
87	0,32	0,22	18	3,92	3,97	3,91	4,01	2000
87	0,32	0,22	18	3,97	4	3,94	4,04	2008
87	0,32	0,21	18	3,97	4	3,95	4,05	2016
87	0,32	0,21	18	3,96	4,01	3,95	4,05	2024
87	0,32	0,21	18	3,97	4	3,95	4,05	2032
87	0,32	0,21	18	3,96	4	3,95	4,03	2040
87	0,32	0,21	18	3,96	4	3,95	4,05	2048
87	0,32	0,21	17	3,96	4	3,94	4,04	2056
87	0,32	0,21	19	3,97	4	3,94	4,04	2064
87	0,32	0,21	18	3,96	4,01	3,95	4,04	2072
87	0,32	0,21	18	3,97	4	3,96	4,05	2080
87	0,32	0,21	18	3,97	3,99	3,95	4,05	2088
87	0,32	0,21	17	3,97	4	3,95	4,05	2096
87	0,32	0,21	18	3,97	4	3,95	4,05	2104
87	0,32	0,21	18	3,97	4	3,95	4,04	2112
87	0,32	0,21	18	3,97	4	3,95	4,05	2120
87	0,32	0,2	18	3,96	4	3,96	4,05	2128
87	0,32	0,2	18	3,96	4	3,95	4,06	2136
87	0,32	0,2	18	3,97	4	3,95	4,04	2144
87	0,32	0,2	18	3,96	4	3,95	4,04	2152
87	0,32	0,2	18	3,97	4	3,94	4,05	2160
87	0,32	0,2	18	3,97	4	3,95	4,05	2168
87	0,32	0,2	18	3,97	3,99	3,96	4,05	2176
87	0,32	0,2	18	3,97	4	3,95	4,04	2184
87	0,32	0,2	18	3,97	4,01	3,94	4,04	2192
87	0,32	0,2	18	3,97	4	3,95	4,04	2200
87	0,32	0,2	18	3,98	4	3,95	4,05	2208
87	0,32	0,2	18	3,97	3,99	3,96	4,05	2216
87	0,32	0,2	18	3,97	3,99	3,95	4,04	2224
87	0,32	0,2	18	3,97	4	3,95	4,05	2232
88	0,32	0,19	17	3,98	4	3,95	4,05	2240
88	0,32	0,19	18	3,96	4	3,96	4,04	2248
88	0,32	0,19	18	3,97	3,99	3,95	4,05	2256
88	0,32	0,19	18	3,97	4	3,95	4,05	2264
88	0,32	0,19	18	3,97	4	3,95	4,05	2272
88	0,32	0,19	18	3,97	3,99	3,95	4,04	2280
88	0,32	0,19	18	3,97	4	3,95	4,05	2288
88	0,32	0,19	18	3,97	4	3,95	4,05	2296
88	0,32	0,19	18	3,97	4	3,95	4,05	2304
88	0,32	0,19	17	3,97	4	3,94	4,04	2312
88	0,32	0,19	18	3,97	3,99	3,95	4,04	2320
88	0,32	0,19	18	3,96	3,99	3,94	4,1	2328
88	0,32	0,19	18	3,96	3,99	3,94	4,1	2336
88	0,32	0,19	18	3,96	3,99	3,94	4,11	2344
88	0,32	0,18	18	3,96	4	3,95	4,11	2352
88	0,32	0,18	18	3,96	3,99	3,95	4,1	2360
88	0,32	0,18	18	3,96	4	3,94	4,1	2368
88	0,32	0,18	18	3,96	4	3,94	4,1	2376

88	0,32	0,18	18	3,96	4	3,95	4,1	2384
88	0,32	0,18	18	3,96	3,99	3,94	4,1	2392
88	0,32	0,18	18	3,97	3,99	3,95	4,09	2400
88	0,32	0,18	19	3,97	4	3,94	4,1	2408
88	0,32	0,18	18	3,96	3,99	3,94	4,1	2416
88	0,32	0,18	18	3,96	3,99	3,95	4,1	2424
88	0,32	0,18	18	3,97	4	3,95	4,1	2432
88	0,32	0,18	18	3,97	3,99	3,94	4,11	2440
88	0,32	0,18	18	3,96	4	3,94	4,1	2448
88	0,32	0,18	19	3,96	4,04	3,98	4,14	2456
88	0,32	0,17	18	3,96	4,04	3,98	4,15	2464
88	0,32	0,17	19	3,96	4,01	3,96	4,12	2472
88	0,32	0,17	19	3,96	4,02	3,97	4,12	2480
88	0,32	0,17	18	3,96	4,02	3,97	4,13	2488
88	0,32	0,17	19	3,96	3,99	3,94	4,11	2496
88	0,32	0,17	19	3,96	4,01	3,95	4,11	2504
88	0,32	0,17	19	3,97	3,99	3,96	4,11	2512
89	0,32	0,17	19	3,96	4	3,96	4,1	2520
89	0,32	0,17	20	3,97	4	3,96	4,1	2528
89	0,32	0,17	19	3,96	3,99	3,96	4,1	2536
89	0,32	0,17	19	3,97	4	3,96	4,11	2544
89	0,32	0,17	19	3,97	4	3,95	4,11	2552
89	0,32	0,17	18	3,97	4	3,95	4,11	2560
89	0,32	0,17	18	3,97	4	3,96	4,11	2568
89	0,32	0,16	19	3,98	4,01	3,96	4,08	2576
89	0,32	0,16	19	3,97	4,01	3,96	4,07	2584
89	0,32	0,16	31	3,97	3,99	3,95	4,09	2592
89	0,32	0,16	37	3,97	3,99	3,95	4,06	2600
89	0,32	0,16	34	3,96	3,99	3,95	4,07	2608
89	0,32	0,16	31	3,97	3,98	3,94	4,06	2616
89	0,32	0,16	29	3,98	3,98	3,96	4,05	2624
89	0,32	0,16	35	3,96	3,99	3,95	4,06	2632
89	0,32	0,16	39	3,96	3,99	3,94	4,06	2640
89	0,32	0,16	43	3,97	3,99	3,94	4,06	2648
89	0,32	0,16	45	3,97	3,99	3,94	4,06	2656
89	0,32	0,16	48	3,98	3,99	3,96	4,06	2664
89	0,32	0,16	49	3,96	3,99	3,95	4,06	2672
89	0,32	0,16	48	3,98	3,99	3,96	4,06	2680
89	0,32	0,15	47	3,96	3,99	3,95	4,06	2688
89	0,32	0,15	46	3,97	3,99	3,95	4,06	2696
89	0,32	0,15	55	3,97	3,99	3,95	4,06	2704
89	0,32	0,15	53	3,97	3,99	3,96	4,06	2712
89	0,32	0,15	54	3,97	3,99	3,95	4,06	2720
89	0,32	0,15	55	3,97	3,98	3,95	4,06	2728
89	0,32	0,15	55	3,97	3,99	3,95	4,06	2736
89	0,32	0,15	55	3,97	3,99	3,95	4,06	2744
89	0,32	0,15	54	3,97	3,99	3,96	4,06	2752
89	0,32	0,15	56	3,97	3,99	3,95	4,06	2760
89	0,32	0,15	58	3,97	3,99	3,95	4,06	2768
89	0,32	0,15	60	3,81	3,82	3,77	3,86	2776

89	0	0,15	21	3,96	3,98	3,95	4,07	2784
89	0,32	0,15	19	3,96	3,98	3,95	4,08	2792
89	0,32	0,15	19	3,98	3,98	3,95	4,08	2800
89	0,32	0,15	19	3,96	3,99	3,94	4,07	2808
90	0,32	0,14	19	3,97	3,98	3,95	4,07	2816
90	0,32	0,14	19	3,97	3,98	3,95	4,08	2824
90	0,32	0,14	18	3,96	3,98	3,94	4,08	2832
90	0,32	0,14	18	3,97	3,99	3,94	4,08	2840
90	0,32	0,14	18	3,96	3,98	3,95	4,07	2848
90	0,32	0,14	18	3,97	3,99	3,95	4,08	2856
90	0,32	0,14	20	3,96	3,99	3,95	4,07	2864
90	0,32	0,14	18	3,97	3,98	3,95	4,07	2872
90	0,32	0,14	19	3,97	3,98	3,94	4,07	2880
90	0,32	0,14	18	3,98	3,98	3,94	4,07	2888
90	0,32	0,14	18	3,97	3,99	3,96	4,08	2896
90	0,32	0,14	18	3,97	3,98	3,94	4,08	2904
90	0,32	0,14	18	3,97	3,99	3,94	4,08	2912
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,94	4,08	2920
90	0,32	0,13	18	3,97	3,98	3,94	4,07	2928
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,95	4,07	2936
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,95	4,08	2944
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,95	4,08	2952
90	0,32	0,13	19	3,97	3,99	3,95	4,08	2960
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,96	4,08	2968
90	0,32	0,13	18	3,97	3,98	3,95	4,08	2976
90	0,32	0,13	18	3,98	3,98	3,96	4,07	2984
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,95	4,08	2992
90	0,32	0,13	18	3,97	3,98	3,95	4,08	3000
90	0,32	0,13	18	3,97	3,98	3,95	4,08	3008
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,95	4,07	3016
90	0,32	0,13	18	3,97	3,99	3,95	4,07	3024
90	0,32	0,12	18	3,97	3,98	3,95	4,08	3032
90	0,32	0,12	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3040
90	0,32	0,12	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3048
90	0,32	0,12	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3056
90	0,32	0,12	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3064
90	0,32	0,12	18	3,96	3,99	3,95	4,07	3072
90	0,32	0,12	18	3,97	3,99	3,94	4,08	3080
91	0,32	0,12	18	3,97	3,99	3,95	4,07	3088
91	0,32	0,12	18	3,97	3,99	3,95	4,07	3096
91	0,32	0,12	18	3,97	3,99	3,96	4,07	3104
91	0,32	0,12	18	3,96	3,99	3,95	4,08	3112
91	0,32	0,12	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3120
91	0,32	0,12	19	3,98	3,99	3,96	4,08	3128
91	0,32	0,12	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3136
91	0,32	0,11	18	3,97	3,98	3,95	4,08	3144
91	0,32	0,11	18	3,97	3,98	3,94	4,07	3152
91	0,32	0,11	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3160
91	0,32	0,11	17	3,97	3,99	3,95	4,07	3168
91	0,32	0,11	17	3,98	3,99	3,95	4,08	3176

91	0,32	0,11	18	3,97	3,98	3,95	4,07	3184
91	0,32	0,11	18	3,97	3,99	3,95	4,07	3192
91	0,32	0,11	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3200
91	0,32	0,11	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3208
91	0,32	0,11	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3216
91	0,32	0,11	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3224
91	0,32	0,11	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3232
91	0,32	0,11	18	3,97	3,99	3,96	4,08	3240
91	0,32	0,11	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3248
91	0,32	0,1	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3256
91	0,32	0,1	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3264
91	0,32	0,1	18	3,97	3,99	3,96	4,08	3272
91	0,32	0,1	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3280
91	0,32	0,1	18	3,97	3,99	3,96	4,08	3288
91	0,32	0,1	18	3,97	4	3,95	4,07	3296
91	0,32	0,1	18	3,98	3,98	3,96	4,08	3304
91	0,32	0,1	18	3,97	4	3,96	4,07	3312
91	0,32	0,1	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3320
91	0,32	0,1	18	3,97	3,99	3,95	4,09	3328
91	0,32	0,1	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3336
91	0,32	0,1	18	3,98	3,99	3,95	4,09	3344
91	0,32	0,1	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3352
91	0,32	0,1	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3360
92	0,32	0,09	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3368
92	0,32	0,09	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3376
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3384
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,96	4,07	3392
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,97	4,09	3400
92	0,32	0,09	18	3,97	3,99	3,96	4,08	3408
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3416
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3424
92	0,32	0,09	17	3,97	4	3,95	4,08	3432
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3440
92	0,32	0,09	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3448
92	0,32	0,09	18	3,98	4	3,96	4,08	3456
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3464
92	0,32	0,09	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3472
92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3480
92	0,32	0,08	18	3,98	4	3,95	4,09	3488
92	0,32	0,08	17	3,98	3,99	3,96	4,09	3496
92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,96	4,09	3504
92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3512
92	0,32	0,08	17	3,98	3,99	3,95	4,08	3520
92	0,32	0,08	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3528
92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3536
92	0,32	0,08	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3544
92	0,32	0,08	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3552
92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,96	4,09	3560
92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3568
92	0,32	0,08	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3576

92	0,32	0,08	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3584
92	0,32	0,07	18	3,98	4	3,96	4,08	3592
92	0,32	0,07	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3600
92	0,32	0,07	18	3,97	4	3,96	4,08	3608
92	0,32	0,07	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3616
92	0,32	0,07	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3624
92	0,32	0,07	18	3,98	4	3,95	4,08	3632
92	0,32	0,07	18	3,98	3,99	3,95	4,09	3640
93	0,32	0,07	18	3,98	4	3,96	4,07	3648
93	0,32	0,07	18	3,98	3,99	3,96	4,09	3656
93	0,32	0,07	18	3,98	4	3,96	4,07	3664
93	0,32	0,07	18	3,98	4	3,96	4,08	3672
93	0,32	0,07	17	3,98	3,99	3,95	4,09	3680
93	0,32	0,07	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3688
93	0,32	0,07	18	3,97	3,99	3,96	4,08	3696
93	0,32	0,06	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3704
93	0,32	0,06	18	3,98	3,99	3,96	4,07	3712
93	0,32	0,06	18	3,98	4	3,96	4,09	3720
93	0,32	0,06	18	3,98	3,99	3,96	4,07	3728
93	0,32	0,06	18	3,98	4	3,97	4,09	3736
93	0,32	0,06	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3744
93	0,32	0,06	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3752
93	0,32	0,06	18	3,98	3,99	3,95	4,08	3760
93	0,32	0,06	17	3,98	3,99	3,95	4,09	3768
93	0,32	0,06	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3776
93	0,32	0,06	18	3,98	3,98	3,96	4,08	3784
93	0,32	0,06	18	3,97	3,99	3,95	4,08	3792
93	0,32	0,06	18	3,98	4	3,96	4,08	3800
93	0,32	0,05	17	3,98	3,99	3,95	4,08	3808
93	0,32	0,05	17	3,98	4	3,97	4,08	3816
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,09	3824
93	0,32	0,05	18	3,98	4	3,95	4,08	3832
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3840
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3848
93	0,32	0,05	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3856
93	0,32	0,05	17	3,99	3,99	3,96	4,09	3864
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3872
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,97	4,09	3880
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,07	3888
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,08	3896
93	0,32	0,05	18	3,98	3,98	3,95	4,08	3904
93	0,32	0,05	18	3,98	3,99	3,96	4,09	3912
94	0,32	0,04	17	3,98	3,99	3,96	4,09	3920
94	0,32	0,04	18	3,98	4	3,96	4,08	3928
94	0,32	0,04	17	3,98	3,99	3,96	4,09	3936
94	0,32	0,04	17	3,98	4	3,97	4,09	3944
94	0,32	0,04	17	3,98	4	3,96	4,08	3952
94	0,32	0,04	17	3,98	4	3,96	4,08	3960
94	0,32	0,04	17	3,98	3,99	3,96	4,09	3968
94	0,32	0,04	17	3,98	3,98	3,96	4,09	3976

94	0,32	0,04	17	3,98	3,99	3,95	4,08	3984
94	0,32	0,04	17	3,98	3,99	3,96	4,08	3992
94	0,32	0,04	18	3,98	4	3,96	4,08	4000
94	0,32	0,04	17	3,98	3,99	3,95	4,09	4008
94	0,32	0,04	17	3,98	4	3,97	4,08	4016
94	0,32	0,04	17	3,98	4	3,97	4,09	4024
94	0,32	0,03	17	3,98	3,99	3,96	4,09	4032
94	0,32	0,03	17	3,98	4	3,96	4,09	4040
94	0,32	0,03	17	3,98	3,99	3,96	4,08	4048
94	0,32	0,03	17	3,98	4	3,96	4,09	4056
94	0,32	0,03	18	3,98	3,99	3,95	4,09	4064
94	0,32	0,03	17	3,98	3,99	3,96	4,08	4072
94	0,32	0,03	18	3,98	4	3,97	4,09	4080
94	0,32	0,03	18	3,99	3,99	3,96	4,09	4088
94	0,32	0,03	18	3,98	3,99	3,97	4,07	4096
94	0,32	0,03	17	3,98	3,99	3,96	4,09	4104
94	0,32	0,03	18	3,99	3,99	3,97	4,09	4112
94	0,32	0,03	18	3,98	3,99	3,97	4,09	4120
94	0,32	0,03	17	3,98	3,99	3,96	4,1	4128
94	0,32	0,03	18	3,98	4	3,97	4,08	4136
94	0,32	0,02	17	3,98	3,99	3,96	4,09	4144
94	0,32	0,02	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4152
94	0,32	0,02	17	3,98	4	3,96	4,09	4160
94	0,32	0,02	18	3,99	4	3,96	4,09	4168
94	0,32	0,02	18	3,99	3,99	3,96	4,08	4176
94	0,32	0,02	17	3,98	4	3,96	4,09	4184
94	0,32	0,02	18	3,98	3,99	3,97	4,09	4192
95	0,32	0,02	18	3,98	4	3,96	4,09	4200
95	0,32	0,02	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4208
95	0,32	0,02	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4216
95	0,32	0,02	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4224
95	0,32	0,02	18	3,98	4	3,96	4,09	4232
95	0,32	0,02	18	3,99	4	3,97	4,08	4240
95	0,32	0,02	18	3,98	4	3,96	4,09	4248
95	0,32	0,01	18	3,98	4	3,95	4,09	4256
95	0,32	0,01	18	3,99	3,99	3,96	4,09	4264
95	0,32	0,01	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4272
95	0,32	0,01	18	3,99	4	3,96	4,09	4280
95	0,32	0,01	18	3,99	3,99	3,96	4,09	4288
95	0,32	0,01	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4296
95	0,32	0,01	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4304
95	0,32	0,01	18	3,98	4	3,95	4,09	4312
95	0,32	0,01	18	3,98	4	3,96	4,09	4320
95	0,32	0,01	18	3,99	3,99	3,97	4,09	4328
95	0,32	0,01	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4336
95	0,32	0,01	18	3,99	4	3,95	4,09	4344
95	0,32	0,01	18	3,98	4	3,96	4,09	4352
95	0,32	0,01	18	3,99	4	3,97	4,09	4360
95	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,09	4368
95	0,32	0	17	3,98	4	3,96	4,09	4376

95	0,32	0	18	3,98	3,99	3,96	4,09	4384
95	0,32	0	17	3,98	3,99	3,96	4,09	4392
95	0,32	0	17	3,99	4	3,97	4,08	4400
95	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4408
95	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4416
95	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4424
95	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,08	4432
95	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,09	4440
95	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,09	4448
95	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,09	4456
95	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,09	4464
95	0,32	0	18	3,99	3,99	3,96	4,09	4472
96	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,09	4480
96	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,09	4488
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4496
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4504
96	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,1	4512
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4520
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4528
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4536
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4544
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4552
96	0,32	0	18	3,99	3,99	3,97	4,09	4560
96	0,32	0	18	3,99	3,99	3,96	4,1	4568
96	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,09	4576
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4584
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4592
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,08	4600
96	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,09	4608
96	0,32	0	17	3,98	4	3,96	4,1	4616
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4624
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4632
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4640
96	0,32	0	18	3,99	3,99	3,96	4,09	4648
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4656
96	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,09	4664
96	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,1	4672
96	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,09	4680
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4688
96	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4696
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4704
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4712
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4720
96	0,32	0	18	3,98	3,99	3,97	4,09	4728
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4736
96	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4744
97	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4752
97	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4760
97	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	4768
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4776

97	0,32	0	18	3,98	3,99	3,96	4,1	4784
97	0,32	0	18	3,99	3,99	3,96	4,11	4792
97	0,32	0	18	3,99	3,99	3,97	4,1	4800
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	4808
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4816
97	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,1	4824
97	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	4832
97	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,1	4840
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,11	4848
97	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,09	4856
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4864
97	0,32	0	18	4	3,99	3,96	4,09	4872
97	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,09	4880
97	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,1	4888
97	0,32	0	19	3,99	4	3,96	4,1	4896
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4904
97	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	4912
97	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4920
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4928
97	0,32	0	18	3,98	4,01	3,97	4,1	4936
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4944
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4952
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	4960
97	0,32	0	18	3,98	4,01	3,97	4,09	4968
97	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	4976
97	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,1	4984
97	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,09	4992
97	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,1	5000
97	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,09	5008
97	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5016
97	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5024
98	0,32	0	19	3,99	3,99	3,96	4,1	5032
98	0,32	0	17	3,98	4	3,97	4,1	5040
98	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,11	5048
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,1	5056
98	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	5064
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,1	5072
98	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	5080
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,09	5088
98	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,1	5096
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,11	5104
98	0,32	0	17	3,98	4	3,97	4,1	5112
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,11	5120
98	0,32	0	17	3,99	4,01	3,96	4,1	5128
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,1	5136
98	0,32	0	17	3,99	4	3,96	4,11	5144
98	0,32	0	17	3,98	4	3,97	4,1	5152
98	0,32	0	17	3,99	4	3,97	4,11	5160
98	0,32	0	17	3,98	4	3,96	4,1	5168
98	0,32	0	17	3,98	4	3,96	4,1	5176

98	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5184
98	0,32	0	17	3,99	4	3,97	4,1	5192
98	0,32	0	17	3,99	4,01	3,96	4,11	5200
98	0,32	0	17	3,98	4,01	3,97	4,1	5208
98	0,32	0	17	3,99	4,01	3,96	4,1	5216
98	0,32	0	18	3,98	4,01	3,97	4,1	5224
98	0,32	0	17	3,99	4	3,97	4,1	5232
98	0,32	0	17	3,98	4,01	3,96	4,11	5240
98	0,32	0	17	3,99	4,01	3,96	4,11	5248
98	0,32	0	17	3,99	4,01	3,97	4,1	5256
98	0,32	0	18	3,98	4,01	3,97	4,1	5264
98	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	5272
98	0,32	0	17	3,99	4,01	3,97	4,11	5280
98	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5288
98	0,32	0	18	3,98	4	3,97	4,1	5296
98	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5304
99	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,11	5312
99	0,27	0	18	3,99	4	3,96	4,1	5320
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5328
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5336
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5344
99	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,1	5352
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5360
99	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,1	5368
99	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,11	5376
99	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,11	5384
99	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,1	5392
99	0,32	0	19	3,99	4	3,97	4,11	5400
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5408
99	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,1	5416
99	0,32	0	17	3,99	4,01	3,96	4,1	5424
99	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,1	5432
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5440
99	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,11	5448
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5456
99	0,32	0	19	3,99	4,01	3,97	4,11	5464
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,1	5472
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5480
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5488
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5496
99	0,32	0	19	3,99	4	3,97	4,11	5504
99	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,1	5512
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5520
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5528
99	0,32	0	17	3,98	4,01	3,95	4,12	5536
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5544
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5552
99	0,32	0	18	3,99	4	3,97	4,11	5560
99	0,32	0	19	3,99	4,01	3,96	4,1	5568
99	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5576

99	0,32	0	18	3,98	4,01	3,97	4,11	5584
100	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,11	5592
100	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,11	5600
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5608
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5616
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5624
100	0,32	0	17	4	4,01	3,96	4,11	5632
100	0,32	0	17	3,99	4,01	3,97	4,11	5640
100	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,12	5648
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5656
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5664
100	0,32	0	18	3,98	4	3,96	4,11	5672
100	0,32	0	18	4	4,01	3,96	4,11	5680
100	0,32	0	18	3,98	4,01	3,97	4,12	5688
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,95	4,11	5696
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5704
100	0,32	0	19	3,99	4,01	3,96	4,11	5712
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5720
100	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,11	5728
100	0,32	0	19	3,99	4,01	3,97	4,12	5736
100	0,32	0	18	3,99	4	3,96	4,11	5744
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5752
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5760
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5768
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5776
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,1	5784
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5792
100	0,32	0	18	4	4,01	3,96	4,11	5800
100	0,32	0	18	3,99	4,02	3,97	4,11	5808
100	0,32	0	18	4	4,01	3,97	4,11	5816
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5824
100	0,32	0	18	3,98	4,01	3,96	4,11	5832
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5840
100	0,32	0	18	4	4,01	3,96	4,11	5848
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5856
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5864
100	0,27	0	18	3,99	4,02	3,96	4,12	5872
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5880
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,96	4,11	5888
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5896
100	0,32	0	17	3,99	4,01	3,96	4,12	5904
100	0,32	0	18	4	4,01	3,97	4,11	5912
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,12	5920
100	0,32	0	18	3,99	4,01	3,97	4,11	5928

Apêndice C

Artigo científico

Sistema fotovoltaico autonomo para sistema de iluminação utilizando células reutilizadas de lítio

Ulysses Souza¹, Jorge Alves², Jose Lima³ e Orlando Soares⁴

Resumo—A energia elétrica é um bem essencial nas vidas das pessoas. No entanto, ainda existem lugares afastados das cidades que não possuem disponibilidade da rede pública de distribuição de energia elétrica. Desta forma, este artigo apresenta uma solução para este problema, sendo feito um sistema capaz de disponibilizar duas horas de iluminação para estes lugares. O sistema é composto por componentes encontrados no mercado de baixo custo e de fácil obtenção. Este artigo apresenta testes no sistema desenvolvido e avaliar as respostas deste sistema submetido a diversas possibilidades de eventos, com a finalidade de simular um caso real. Com estes testes, foram obtidos resultados satisfatórios, comprovando a fiabilidade do sistema e a possibilidade do uso de células de lítio de segunda vida.

Palavras chave—células de lítio; reutilizadas; autônomo; microcontrolador; iluminação.

I. INTRODUÇÃO

Ainda hoje existem diversas pessoas que vivem ou desenvolvem suas atividades cotidianas em locais afastados dos centros urbanos, lugares como corriças e estábulos, onde dificilmente há acesso a rede de distribuição pública de eletricidade, ocasionando a falta de iluminação em horários de indisponibilidade solar. Em alguns casos é adotado o uso de velas ou lâmpadas de querosene, gerando riscos de segurança, produzindo dióxido de carbono, além de produzir uma iluminação de baixa qualidade [2].

Boucar Diouf, [2] descreveu uma comparação, caracterizando uma vela de parafina que quando acesa produz em média 13 *lumens* (unidade de medida de fluxo luminoso) e 80 W de calor, gerando a eficácia de 0.16 lm/W, enquanto que uma lâmpada a LED de 5 W com 90 lm/W produz uma quantidade de luminosidade comparada a 35 destas velas.

Diante a isto, este artigo apresenta um meio

de utilizar dispositivos de baixo custo encontrados no mercado para o desenvolvimento de um sistema de iluminação autônomo, isto é, um sistema que não depende da rede pública de distribuição de energia elétrica, de forma que o mesmo seja acessível, inteligente e ecologicamente correto.

Considerando o elevado custo no armazenamento de energia utilizando as baterias, pesquisas realizadas apresentam como alternativa a reutilização de baterias retiradas de carros elétricos e dispositivos eletrônicos, as quais possuem uma capacidade existente útil, permitindo seu uso uma segunda vez em sistemas de baixo consumo energético, reduzindo assim o custo final do sistema [11], [7], [8], [3], [12].

Desta forma, este artigo foi dividido em três partes. A primeira parte explica o sistema desenvolvido, caracterizando as justificativas do dimensionamento dos componentes usados; a segunda parte expõe as explicações dos testes realizados, mostrando os resultados do sistema; por fim, é apresentada a conclusão.

II. SISTEMA DESENVOLVIDO

O sistema desenvolvido possui a finalidade de alimentar um projetor a LED de 10 W durante duas horas por dia para todos os dias do ano, com o uso de dispositivos de baixo custo encontrados no mercado, um painel fotovoltaico e células de lítio retiradas de aparelhos eletrônicos. Para que o objetivo fosse cumprido, foi preciso desenvolver um algoritmo capaz de avaliar o estado de carga das células de lítio, verificar a temperatura de funcionamento da bateria, desenvolver a melhor estratégia na programação e na parte física para redução do consumo energético do sistema.

A Fig. 1 mostra uma representação em diagrama de blocos do sistema projetado com os componentes que serão descritos nas secções seguintes.

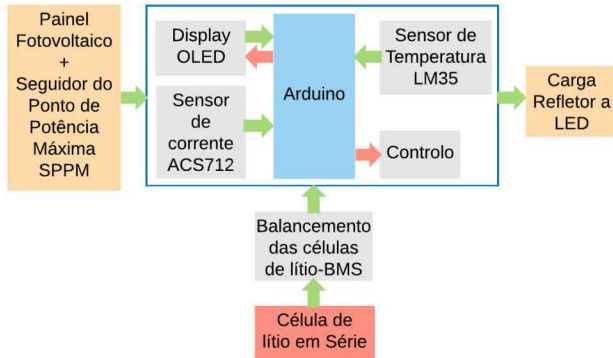


Fig. 1. Diagrama de blocos do circuito projetado.

As setas que estão dentro do quadrado azul representam um tipo de comunicação. Os blocos com duas setas representam a comunicação *Two Wire Interface* TWI, os blocos com uma seta verde representam a comunicação por meio de portas analógicas e uma seta vermelha representa as ações de controlo por meio do uso de portas digitais.

A. Carga a alimentar

Inicialmente, foi determinado o consumo diário da carga a ser utilizada. O sistema deve consumir o mínimo de energia possível, satisfazer a luminosidade e autonomia requerida. Desta forma, devido ao baixo consumo, longevidade, facilidade em sua alimentação em corrente contínua, além de ser ecologicamente correta, foi escolhido uma luminária a LED de 10 W [6]. A energia consumida em base diária está representado na equação (1).

$$E_{\text{dia}} = 10 \text{ W} \cdot 2 \text{ h/dia} = 20 \text{ Wh/dia} \quad (1)$$

Para dimensionar o painel fotovoltaico é preciso avaliar a quantidade de irradiação. Isto é realizado por meio do software online PVGIS. Este *software* utiliza um extenso banco de dados, que permite obter o total de irradiação diária média durante todos os meses do ano e o ângulo ótimo para instalação do painel fotovoltaico [10].

É mostrado na Tabela I os níveis de irradiação média para cada mês do ano ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia}$) na região de Trás-os-Montes, com um ângulo ótimo de 34° direcionado para o Sul geográfico.

Tabela I
DADOS DE IRRADIAÇÃO, PVGIS [10].

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Irradiação	2770	4420	5500	5560	6300	6900
Mês	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Irradiação	7320	7280	6450	4760	3330	2730
Média						5280

Com estes dados é conclusivo que a média anual para uma inclinação ótima na região de Trás-os-Montes é de $5280 \text{ Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$ e que a menor irradiação nesta região corresponde a $2730 \text{ Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$ no mês de dezembro. É preciso garantir que o painel fotovoltaico produza uma quantidade suficiente de energia elétrica durante todos os dias do ano. Para isto, é considerado o pior caso, sendo utilizado a menor taxa de irradiação solar durante o ano [9].

B. Dimensionamento do painel fotovoltaico

O dimensionamento do painel fotovoltaico juntamente com os componentes do sistema foi realizado por meio da quantidade de irradiação incidente na localidade de instalação do mesmo e o consumo de energia da carga a ser alimentada. Além disto, os componentes que atuam no sistema apresentam perdas, as quais devem ser levadas em consideração.

Para estimar as perdas nas canalizações, nas células de lítio, no conversor CC-CC, é utilizado os valores encontrados na Tabela II, que são valores padronizados encontrados na referência [5].

Tabela II

*VALORES TÍPICOS DE PERDAS ENCONTRADOS EM [5].

Dados de dimensionamento	Valores
Carga instalada	10 W
Consumo diário	20 Wh/dia
Média mensal de irradiação	2730 Wh/dia/ m^2
Eficiência das canalização*	98%
Eficiência da bateria*	95%
Eficiência do Conversor CC-CC*	90%

Com o valor da quantidade média de irradiação solar durante os dias de cada mês do ano, será conveniente obter o valor acumulado da energia gerada em número de Horas de Sol Pleno (HSP), isto é, o número de horas em que a irradiação solar permanece igual a 1000 W/m²/dia.

Assim será utilizado 2730 Wh/m²/dia para obter o número de HSP [9], [5]:

$$HSP = \frac{2730 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}}{1000 \text{ W/m}^2} = 2.73 \text{ h/dia} \quad (2)$$

Com os valores da Tabela II e a quantidade de HSP é obtido a potência mínima do painel fotovoltaico:

$$P_{\min} = \frac{20 \text{ Wh/dia}}{2.73 \text{ h/dia}} = 7.33 \text{ W} \quad (3)$$

E a potência corrigida, devido às perdas no sistema:

$$P_{\min\text{Corr}} = \frac{7.33 \text{ W}}{0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.9} = 8,75 \text{ W} \quad (4)$$

O painel fotovoltaico possui as especificações técnicas apresentada na Tabela III.

Tabela III
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO.

Caracterização	Valores
Marca Yingli	YL010P-17b
Máxima Potência	10 W
Tensão da Máxima Potência	17.1 V
Corrente de Máxima Potência	0.59 A
Tensão de Circuito Aberto	21.8 V
Corrente de Curto-Circuito	0.65 A
Eficiência do Painel	15%

O sistema desenvolvido possui a necessidade da utilização de bateria para o armazenamento de energia elétrica produzida pelo painel fotovoltaico, para alimentar um projetor a LED nos horários em que não se tem radiação solar.

Os sistemas fotovoltaicos autônomos possuem como principal característica o preço elevado quando são utilizadas as baterias. Assim, é preciso aplicar o controle de carga e descarga, fazendo com que haja um aumento significativo no tempo de vida útil da mesma.

O dimensionamento da bateria utilizada é realizada considerando a autonomia do sistema, o comportamento da profundidade de descarga em relação ao número de ciclos e a temperatura em que a mesma está sujeita.

Pelas folhas de dados das células de lítio modelo 18650, quando há variação na temperatura de 20 °C para 0 °C há uma diminuição de aproximadamente 10% na sua capacidade de descarga, permitindo obter um valor aproximado de correção para o dimensionamento da mesma [1].

Um dos fatores que aceleram o processo de envelhecimento das células de lítio são as altas taxas de descarga e de carga, reduzindo os ciclos de vida. A solução apresentada neste artigo utiliza células de lítio reutilizadas, portanto será considerado um desgaste e com isto deverá haver a redução da taxa de descarga para que as mesmas possam atuar por maior tempo e ciclos de vida possíveis.

Primeiramente é realizado o cálculo do consumo de potência hora diário pela tensão nominal da bateria, obtendo assim a capacidade da bateria:

$$C_{\text{dia}} = \frac{20 \text{ Wh}}{4 \cdot 3.7 \text{ V}} = \frac{20 \text{ Wh}}{14.8 \text{ V}} = 1.35 \text{ Ah} \quad (5)$$

Consumo da descarga levando em consideração as perdas:

$$C_{\text{diaCorr}} = \frac{1.35 \text{ Ah}}{0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.9} = 1,61 \text{ Ah} \quad (6)$$

Um dado descrito no Manual e Guia Técnico de Energia caracterizado como empírico é a quantidade de dias em que a bateria deve alimentar a carga sem haver "dias de Sol", possuindo uma autonomia de 2 a 3 dias no verão e 3 a 4 dias no inverno [4]. O sistema foi dimensionado para dois dias de autonomia. Além deste fator, para o dimensionamento, foi escolhido a profundidade de descarga de 70% devido a utilização de células reutilizadas de lítio e um coeficiente para correção relativo as variações de temperatura ao longo do ano. Assim, é obtido:

$$C_{\text{total}} = \frac{2 \cdot 1.61 \text{ Ah}}{0.7 \cdot 0.9} = 5.11 \text{ Ah} \quad (7)$$

C. Demais dispositivos utilizados

O sistema é composto por um dispositivo Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM) para regular a tensão e obter a maior eficiência na produção de energia fotovoltaica; dois Arduinos, um para a gestão e funcionamento do sistema o outro para recepção dos dados para análise das medidas, por meio da conexão *Two Wire Interface* (TWI); um sensor de corrente ACS712 da empresa Allegro; um sensor de temperatura LM35 da empresa Texas Instruments; um *Battery Management System* (BMS) para o balanceamento das células de lítio e por fim, os demais componentes que permitem a conexão e montagem total do sistema.

A Fig. 2 apresenta o sistema projetado e montado para os testes com os respectivos periféricos nomeados na imagem.

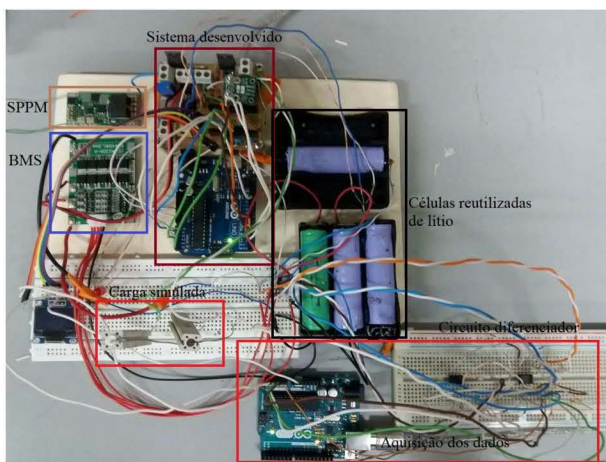


Fig. 2. Sistema montado para realização dos testes.

Para obter o funcionamento do sistema de acordo com o pretendido, foi realizada a programação do microcontrolador através do ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino. A programação, baseada em C, segue a lógica mostrada na máquinas de estados da Fig. 3.

O primeiro estado consiste em realizar a configuração inicial do sistema, por meio da aplicação desenvolvida no programa Microsoft® Visual Studio, mostrado na Fig. 4, o qual é colocado a data de instalação do sistema, o limite de carga e descarga, a corrente de descarga e o limite de temperatura.

Prosseguindo com a explicação do funciona-

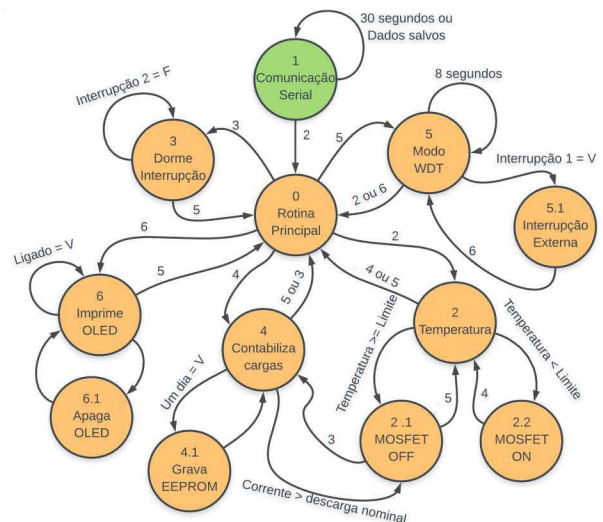


Fig. 3. Máquina de estados, algoritmo desenvolvido.

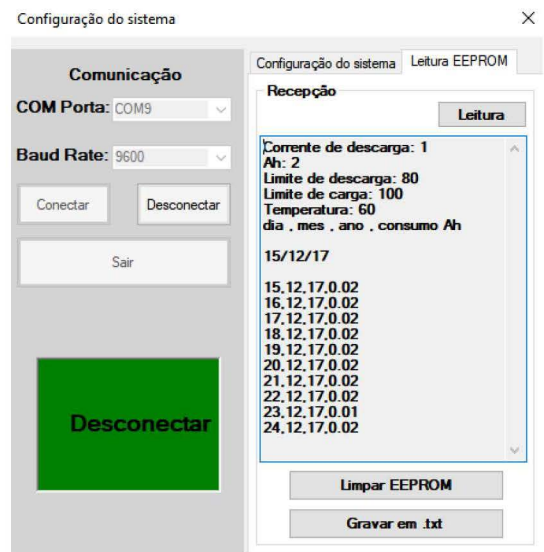


Fig. 4. Plataforma desenvolvida para configuração inicial do sistema.

mento da máquina de estados, se for estabelecido conexão serial, o microcontrolador aguarda os dados a serem salvos, caso não haja comunicação serial o microcontrolador aguarda 30 segundos, depois destes dois processos o estado presente será o 2, não sendo mais utilizado o estado 1. No estado 2 será verificada a temperatura no banco das células de lítio, caso a temperatura estiver acima do limite configurado anteriormente, o sistema será desligado por meio dos MOSFETs da carga e da descarga e o microcontrolador indo para o estado 5. Se a temperatura estiver

abaixo do que foi configurada, o sistema volta a permitir carga e descarga. Caso não houver carga/descarga ou o evento de pressionar o botão do *display* o próximo estado será o 3, o modo *sleep*, caso contrário, será o 5, o qual será feito o teste verificando se o botão do *display* fora pressionado, depois disto é realizada a contabilização da corrente de descarga/carga. Se a corrente for maior do que a corrente nominal configurada, o próximo estado será o 4, função que desliga tanto a carga como a descarga, colocando o estado 3 como próximo estado, fazendo com que o microcontrolador entre em modo *sleep*, caso contrário, será verificado se passou um dia, se sim, será gravado a corrente total contabilizada de descarga e carga na memória EEPROM do microcontrolador, se não, o próximo estado será o 5, o qual será verificado se o botão do *display* foi pressionado, se não foi pressionado o microcontrolador entra no modo *sleep* durante oito segundos e volta a atividade com o *overflow* do *Watchdog Timer* (WDT) e o ciclo é repetido anteriormente explicado, começando novamente pelo estado 2. Caso o botão do *display* for pressionado em qualquer lugar em que o programa estiver na linha de código, será gerado uma interrupção nos dois pinos de interrupção externa, a interrupção com maior prioridade será tratada fazendo com que o microcontrolador, independente do estado que estiver, passa para o estado 5 verificando se houve uma interrupção externa do pino digital 2, mudando seu estado para o 6 e imprimindo os dados no *display*, aguardando um tempo na apresentação das medidas, depois disto o estado direcionado será o 5, repetindo o processo, verificando todas as possibilidades mencionadas anteriormente.

Para avaliação dos dados deste sistema, foi implementado uma função que disponibiliza as medidas no barramento TWI. Na Fig. 5 é apresentado o diagrama de blocos que caracteriza o circuito montado.

O circuito e a programação desenvolvida é representada por uma caixa preta. Dentro desta caixa existe a parte física desenvolvida e a parte da programação, onde é feita a contabilização e gerenciamento da quantidade de carga existente

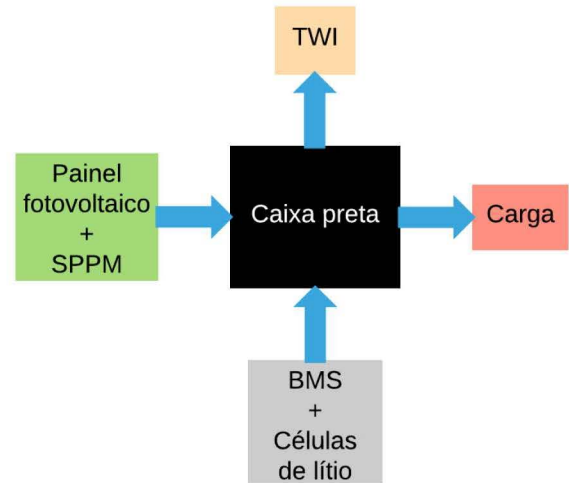


Fig. 5. Representação do circuito genérico utilizado.

na bateria, capacidade disponível, verificação da temperatura da bateria e contabilização da corrente consumida.

III. TESTES REALIZADOS NO SISTEMA

A. Carregamento

Primeiramente foi verificado se o dispositivo responsável pelo balanceamento das células de lítio cumpria o que era desejado. Para isto, foi preciso utilizar amplificadores operacionais na configuração diferenciador para extrair as tensões individuais de cada célula de lítio. Desta forma, as medidas coletadas das tensões das células de lítio e os dados relativos ao estado de carga, corrente drenada do sistema, temperatura e corrente consumida, todos estes dados foram disponibilizados no barramento TWI, sendo impressos por meio da comunicação serial do segundo Arduino utilizado, Fig. 6.

```

COM10 (Arduino/Genuino Uno)
SOC,Corrente,Corrente consumida, Temperatura, V1,V2,V3,V4
100,0.00,0.00,0,3.80,4.03,3.98,3.98
100,0.00,0.00,18,3.52,3.53,3.55,3.30
99,0.50,0.00,17,3.52,3.52,3.54,3.29
99,0.50,0.00,18,3.51,3.52,3.53,3.28
99,0.50,0.00,17,3.51,3.52,3.52,3.27
99,0.50,0.00,17,3.51,3.52,3.52,3.26
99,0.50,0.00,17,3.50,3.51,3.52,3.26
99,0.50,0.00,17,3.50,3.52,3.51,3.25
  
```

Fig. 6. Dados coletados na porta serial do Arduino receptor dos dados transmitidos pelo protocolo de comunicação TWI.

Com este teste mostrado na Fig. 7, foi verificado que mesmo utilizando células de lítio com diferentes capacidades, a tensão das mesmas tende para o mesmo ponto, sendo verificado o carregamento pelo processo de Corrente Constante - Tensão Constante (CC-CV). Durante este processo, foi verificado que o sensor de corrente possui uma oscilação máxima de 50 mA mostrado na imagem, linha alaranjada.

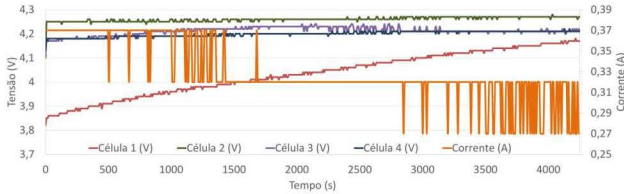


Fig. 7. Teste de carga, verificação do dispositivo BMS.

B. Descarregamento

Com a finalidade de avaliar o algoritmo e o sistema desenvolvido, o mesmo foi submetido a uma descarga por meio de resistores conectados em série, simulando o refletor a LED, apresentado na Fig. 2.

Depois disto, foi avaliado se o algoritmo e o sensor de corrente do sistema permitia uma contabilização da descarga corretamente. Desta forma, o sistema foi submetido a uma descarga de 0.5 A durante 50 minutos e 16 segundos. Para que isto aconteça foi avaliado a tensão de carga completa das células em série de lítio, representando aproximadamente 16.52 V, a carga a ser simulada possuindo a resistência de 25.28 Ω , o MOSFET utilizado para este experimento possui uma resistência interna quando se encontra na região ativa de 3 Ω . Desta forma, a carga possui um total de aproximadamente 27.28 Ω . Sendo considerada a tensão nominal das células de lítio apresentada nas folhas de dados para realização das contas, um total da multiplicação entre quatro células de 3.78 V cada, obtem-se 15.12 V. Assim foi feita a divisão entre tensão e resistência, obtendo a corrente calculada teórica de 0.554 A. Para avaliar se a resposta do algoritmo representa medidas confiáveis, foi preciso realizar o cálculo da quantidade de descarga nesta faixa de tempo. Assim em (8) representa a quantidade da corrente calculada descarregada

por este teste, utilizando as medidas coletadas do sistema.

$$I_{\text{hora}} = \frac{50 \cdot 60 + 16}{3600} \cdot 0.5 = 0.418 \text{ A} \quad (8)$$

A contabilização realizada pelo sistema da corrente acumulada durante o período de 50 minutos e 16 segundos resultou em 0,4 A. Comparando os dois resultados, a corrente consumida teórica para a corrente consumida pelo sistema, na prática representa um erro de aproximadamente 4.31%, isto ocorre devido a precisão do sensor de corrente, fazendo com que correntes com baixas amplitudes tendem assumir valores de diferentes amplitudes, tendendo a um erro.

C. Teste do algoritmo na descarga

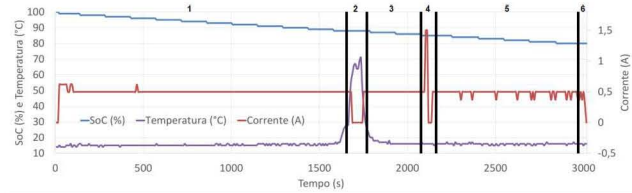


Fig. 8. Gráfico representando a descarga das células de lítio, dividido em seis situações de testes.

O gráfico da Fig. 8 está dividido em seis partes, caracterizados nas seguintes divisões:

- 1) Inicialmente o sistema não apresenta descarga, logo em seguida é submetido a uma descarga, fazendo com que o estado de carga da bateria decresça. Como a descarga é realizado com uma carga resistiva, a descarga é compreendida como linear, havendo oscilações devido aos fatores presentes no sensor de corrente ACS712, explicados anteriormente;
- 2) Logo em seguida, o sensor LM35 é submetido a um aumento de temperatura, simulando uma possível elevação na temperatura da bateria. Se houver um aumento excessivo, a mais do que o limite inicialmente configurado, o sistema é desligado, retornando ao descarregamento quando a temperatura for menor do que o limite configurado;
- 3) O sistema volta a funcionar normalmente como na primeira parte do teste;

- 4) Foi feita uma descarga com uma carga que consome uma corrente elevada, com a finalidade de verificar se o sistema está obtendo resposta sobre a configuração inicial de descarga. Desta maneira, o sistema foi desligado, devido a corrente ser maior do que a corrente configurada inicialmente, desligando a carga e descarga, emitindo um alerta em um LED vermelho, sendo reacionado quando pressionado o botão para verificação da mensagem no *display*;
- 5) Depois disto, o sistema é descarregado até o limite da configuração inicial do estado de carga, havendo uma variação na corrente, anteriormente explicado no primeiro tópico;
- 6) A descarga é desligada, pois foi alcançado o limite do estado de carga configurado do sistema.

D. Teste do algoritmo na carga

Uma solução adotada para haver a diminuição do erro acumulado durante o processo de carregamento e descarregamento da bateria é a contabilização da corrente de carregamento subtraído da corrente de descarregamento acumulada, até se anular. Quando nula, o carregamento prossegue enquanto a corrente de carga não atingir 1/10 da corrente configurada de carregamento.

Durante a carga foi realizado o teste sobre o comportamento do sistema quando é elevada a temperatura, para isto, foi preciso simular um aumento da mesma no sensor de temperatura. A Fig. 10 mostra o comportamento do sistema, a seguir é explicado as divisões da imagem.

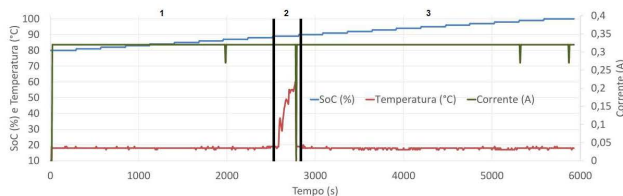


Fig. 9. Gráfico representando a carga das células de lítio, dividido em três situações de testes.

- 1) Inicialmente o sistema esta sendo carregado, a linha azul representado o estado

de carga, que esta se elevando. A corrente, representada pela linha vermelha, sofre algumas variações devido ao erro que é encontrado nas medidas do sensor de corrente;

- 2) Logo em seguida o sensor de temperatura é submetido a um aumento em sua temperatura, afim de simular o aquecimento das células de lítio. Quando a temperatura alcança o limite da temperatura configurada, o processo de carregamento é desligado, a corrente é cortada;
- 3) A temperatura diminui, o processo de carga volta a atividade, finalizando o ciclo de teste.

E. Teste de gravação de dados

Com a finalidade de avaliar a função desenvolvida para gravar os dados na memória interna do microcontrolador, o sistema recebe uma tensão, simulando a geração de energia elétrica quando o painel fotovoltaico é submetido a uma irradiação solar, fazendo com que seja carregada a bateria e contabilizada a carga acumulada. Em seguida, a fonte de tensão é desligada, simulando o passar do dia, neste caso à noite, fazendo com que a descarga seja acionada. Com este teste, sendo o mesmo repetido a cada cinco minutos aproximadamente, os dados referentes a carga e descarga acumuladas em base diária são gravados na memória EEPROM do Arduino. A Fig. 10 mostra os dados gravados e os dias incrementados, confirmando a funcionalidade do algoritmo desenvolvido.

F. Avaliação do consumo do microcontrolador

O circuito projetado contou com o uso do Arduino UNO durante o processo de testes devido a facilidade em obter acesso a porta serial e avaliação das medidas coletadas no mesmo. Foi verificado que o consumo de energia de um Arduino UNO prejudicaria o desempenho do sistema, pois o mesmo tem um consumo elevado de energia durante o processo de leitura.

A avaliação do consumo do Arduino consiste em verificar a corrente drenada da fonte durante o funcionamento do algoritmo desenvolvido para o sistema. Desta forma, a Tabela IV mostra o consumo do Arduino UNO em operação.

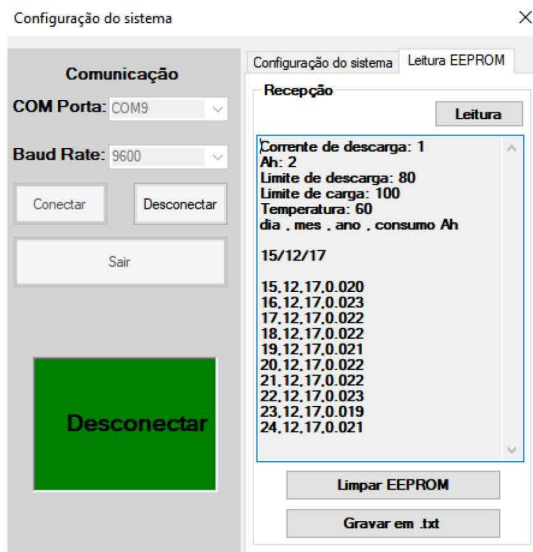


Fig. 10. Leitura dos dados simulados na plataforma desenvolvida.

Tabela IV
CONSUMO DE CORRENTE DO ARDUINO.

Estado do programa	Corrente (mA)
Modo normal	51.3
Modo <i>sleep</i> interrupção externa	45.3
Modo <i>sleep</i> WDT	46.7
Alimentando o OLED	60

Com os dados apresentados na Tabela IV é verificado uma diferença nos valores das correntes quando se tem o microcontrolador em seu pleno funcionamento e quando se tem o mesmo no modo *sleep* ou quando é feita a alimentação do *display* OLED, sendo mostrado um menor consumo quando se tem o microcontrolador no modo *sleep* interrupção externa e modo *sleep* WDT. Desta forma, a estratégia adotada proporciona uma redução no consumo do sistema.

IV. CONCLUSÃO

O principal objetivo do trabalho consistiu no desenvolvimento de um sistema capaz de monitorizar a carga e descarga das células reutilizadas de lítio em um sistema composto por componentes de baixo custo, assim como gerenciar a quantidade de carga disponível, temperatura do conjunto de células e alimentar um projetor a LED para ser utilizado em corriças e estábulos, lugares onde não há acesso a rede pública de distribuição de energia elétrica.

Os testes aplicados e apresentados tem como finalidade verificar a funcionalidade do sistema desenvolvido. Primeiramente foi realizado a inicialização do sistema, com a finalidade de verificar se o algoritmo estava correto quanto a recepção dos dados a serem gravados na memória interna do microcontrolador, representando os dados da configuração inicial do sistema. Com o teste de carga e descarga realizado pelo sistema, foi possível detectar problemas nas medições de corrente, devido a precisão do sensor de corrente utilizado. Foi verificado o correto balanceamento das células reutilizadas de lítio. Os dados relativos a descarga foram também apresentados na forma de gráficos, os mesmos presentes, mostrando as respostas do sistema em relação a eventos provocados propositalmente, afim de verificar a resposta do sistema. É conclusivo que ambos, carga/descarga, possuem o comportamento necessário para o correto funcionamento do sistema.

A estratégia utilizada no algoritmo para economia de energia provou ser eficiente, visto que a Tabela IV apresenta os resultados do Arduino em uma atividade normal comparando com as demais ações do mesmo. Na programação utilizada o Arduino se encontra no modo *sleep* na maior parte do tempo, sendo feita as medições a cada oito segundos, quando há eventos que necessite ser monitorizados como a carga/descarga da bateria ou quando o usuário pressiona o botão para verificação de informações do sistema no *display*, caso contrário o microcontrolador entra em modo *sleep*, reduzindo o consumo energético. Com estas ações do algoritmo é verificado uma economia significativa de energia no sistema.

Os testes foram conduzidos para baixas correntes, o que tornou os resultados imprecisos, devido o sensor que foi utilizado, com uma faixa de corrente de menos trinta amperes a trinta amperes. Além disto, há a limitação do conversor analógico para digital do Arduino, possuindo 10 bits de resolução, reduzindo a confiabilidade das medidas tanto da corrente, quanto das tensões das células de lítio.

Com o sistema desenvolvido foi verificado a possibilidade de aplicação em diversas outras

cargas, pois o mesmo é comparado a uma caixa preta, a qual possui saída para alimentar uma carga, entrada para carregar a bateria e uma saída para obtenção dos dados relativos a carga, descarga e temperatura da bateria. Para outras aplicações torna-se necessário verificar se é preciso ser feito ajustes na configuração inicial, além de avaliar se a parte física atende a aplicação desejada.

Diante aos resultados, é conclusivo que o sistema possui a funcionalidade desejada, permitindo o uso das células de lítio reutilizadas para aplicação do problema proposto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Linden David and B Reddy Thomas. *Handbook of batteries*. McGraw-Hill Professional, 4th edition, 2010.
- [2] Boucar Diouf. A second life for mobile phone batteries in light emitting diode solar home systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(2):024106, 2016.
- [3] Boucar Diouf. A second life for mobile phone batteries in light emitting diode solar home systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(2):024106, 2016.
- [4] Altener Programa Comunitário Greenpro. Energia fotovoltaica-manual sobre tecnologias, projecto e instalação. *Europa: Comissão Europeia*, page 43, 2004.
- [5] APC Guimarães, CM Ribeiro, LEG Bastos, LCG Valente, PCD Silva, and RXD Oliveira. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Ediouro Gráfica e Editora SA Edição Especial, Rio de Janeiro, Brasil*, 2004.
- [6] Colin J Humphreys. Solid-state lighting. *MRS bulletin*, 33(4):459–470, 2008.
- [7] Wen-Chen Lih, Jieh-Hwang Yen, Fa-Hwa Shieh, and Yu-Min Liao. Second use of retired lithium-ion battery packs from electric vehicles: technological challenges, cost analysis and optimal business model. In *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on*, pages 381–384. IEEE, 2012.
- [8] Egoitz Martinez-Laserna, Elixabet Sarasketa-Zabala, D-I Stroe, M Swierczynski, Alexander Warnecke, Jean-Marc Timmermans, Shovon Goutam, and Pedro Rodriguez. Evaluation of lithium-ion battery second life performance and degradation. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [9] João Tavares Pinho and Marco Antonio Galdino. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro: CEPEL*, 2014.
- [10] Monthly Solar Irradiation PVGIS. Disponível em: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/mrcalc.php>>. Acesso realizado em: Out, 2017.
- [11] Kirti Richa, Callie W Babbitt, Gabrielle Gaustad, and Xue Wang. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 83:63–76, 2014.
- [12] Charles R Standridge and Lindsay Corneal. Remanufacturing, repurposing, and recycling of post-vehicle-application lithium-ion batteries. Technical report, 2014.