MORENO ADDAD HASSEM

PROJETO DE CARGA ELETRÔNICA PARA
CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências

São Paulo
2015

MORENO ADDAD HASSEM

PROJETO DE CARGA ELETRÔNICA PARA
CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Roberto Koji Onmori

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Hassem, Moreno Addad

PROJETO DE CARGA ELETRÔNICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS / M. A. Hassem -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 144 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Paineis 2.Sistemas embutidos 3.Energia solar 4.Sistema fotovoltaico 5.Instrumentação elétrica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico este trabalho a todos que
buscam desvendar os segredos do
universo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Roberto Koji Onmori, pela orientação e pelo estímulo transmitido durante toda a realização do Mestrado.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional à minha carreira como engenheiro e à realização deste trabalho de mestrado.

Ao professor Guido Stolfi, por ser meu guru em eletrônica e também um bom amigo. A contribuição dele foi essencial para que eu me tornasse hoje o engenheiro que sou.

Ao professor Celso de Oliveira, por ter me oferecido a primeira oportunidade de trabalho como engenheiro e me ensinado sua abordagem pragmática aos problemas do exercício da profissão.

Agradeço ao amigo e colega engenheiro Eduardo Bernardi pela contribuição em discussões sobre eletrônica embarcada e sistemas de tempo real.

Agradeço ao amigo João Scalise pela ajuda com a estrutura mecânica de suporte para o sistema de tomada de dados deste trabalho.

Aos meus amigos, pela compreensão de minha ausência em diversas atividades sociais e a todos os demais que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

“Neste século, nós dominaremos o poder das estrelas, a fonte de energia dos deuses.”

(Michio Kaku)

RESUMO

A geração solar fotovoltaica em painéis de silício tem se destacado como uma maneira limpa e renovável de atender à demanda por energia elétrica. Este trabalho apresenta o projeto, construção e testes de um sistema autônomo para obtenção da curva IV e caracterização de painéis fotovoltaicos comerciais instalados em campo. Após um estudo do problema de medição de painéis solares, uma especificação da Solução foi concebida. Com base na especificação, foram realizados o projeto elétrico, a construção de protótipos, a escrita do software de medição e os testes de validação em laboratório. Para validação definitiva do hardware desenvolvido, foram realizados testes em campo utilizando um painel solar comercial. Após a tomada de dados e análise dos resultados, conclui-se que o dispositivo concebido atende aos requisitos especificados e cumpre sua proposta inicial. A metodologia empregada neste trabalho pode ser utilizada para geração de outros instrumentos com finalidade similar ou idêntica.

Palavras-chave: Módulos fotovoltaicos. Paineis solares. Sistemas embarcados. Energia solar. Instrumentos de medição. Caracterização.

ABSTRACT

Photovoltaic solar generators, using silicon panels, have grown popular as a clean and renewable way to supply electrical energy. This work presents the project, construction and testing of an autonomous system for IV curve tracing and characterization of commercial photovoltaic panels deployed in the field. After a study on how to properly measure solar panels, a Solution was put in a form of a specification. From specifications, the following phases took place: electrical project, prototype construction, software development and lab testing. To perform final validation of the developed hardware, a field test with a commercial solar panel was performed. After collecting and analyzing data from, it was concluded that the design fulfills the required specifications and intended goals. The methodology employed in this work and be utilized to generate other measuring instruments with similar or identical function.

Keywords: Photovoltaic modules. Solar panels. Embedded systems. Solar energy. Measuring instrument. Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de energia mundial, de 1987 a 2012, em milhões de	15
Figura 2: Simulador solar para espectro AM1.5.....	17
Figura 3: Traçador de curva IV SOLAR-600.	17
Figura 4: Espectro da radiação solar antes e após passagem pela atmosfera.	18
Figura 5: Raios solares em diferentes ângulos de zênite.	19
Figura 6: Arranjo termelétrico com concentradores solares a espelho.....	20
Figura 7: Célula solar de silício sob radiação.	21
Figura 8: Modelo ideal para a célula solar	22
Figura 9: Modelo prático para a célula solar	22
Figura 10: Curva IV de uma célula solar	23
Figura 11: Eficiência dos diferentes tipos de células solares.	25
Figura 12: Painel solar de silício monocristalino SHARP NUA188EY, com $P_{MAX} = 188 \text{ W}$	26
Figura 13: Painéis solares interligados para gerar energia elétrica.	27
Figura 14: Sistema de caracterização, em laboratório, de módulos solares	28
Figura 15: Carga eletrônica Keithley <i>Source Meter</i> 2400.	29
Figura 16: Etapas do projeto do medidor BattleLoad.....	30
Figura 17: Funcionamento de uma carga dinâmica na caracterização de um dispositivo	34
Figura 18: Características IV mais comuns em cargas eletrônicas.	35
Figura 19: Circuito simplificado da carga tensão constante proposta por Nilsson.	36
Figura 20: Carga tensão constante com microcontrolador 8-bits e conversores AD e DA externos.....	37
Figura 21: Diagrama de blocos da carga UTEL, com transistor bipolar como elemento de carga.	38
Figura 22: Característica IV e varredura da carga UTEL.....	38
Figura 23: Circuito de carga corrente constante controlado por microcontrolador.	39
Figura 24: Circuito para simulação da carga modo tensão constante.....	40
Figura 25: Circuito para simulação da carga modo corrente constante.	41
Figura 26: Modelo de simulação de painel solar.....	41
Figura 27: Curvas IV obtidas pelo circuito modo tensão constante.....	42
Figura 28: Curvas IV obtidas pelo circuito modo corrente constante.	43
Figura 29: Região entre 16 e 22V da simulação de cargas tensão constante e corrente constante ...	43
Figura 30: Diagrama de blocos da carga eletrônica BattleLoad.....	45
Figura 31: Circuito equivalente do filtro de entrada do painel solar	52
Figura 32: Evolução de V_{DS} e V_{GS} e faixas de operação de Q1 ao longo da varredura	54
Figura 33: FBSOA para o transistor IXTH30N50L2. Fonte: IXYS (2014)	56
Figura 34: Diagrama de blocos do microcontrolador STM32F207.	59
Figura 35: Diagrama de blocos de um ADC do STM32F207.	61
Figura 36: Conversão AD com superamostragem e decimação.	62
Figura 37: Diagrama de blocos do módulo de comunicações	64
Figura 38: Ligação ao conector mini USB tipo B	64

Figura 39: Foto do módulo Wi-Fi WF121, da Bluegiga.....	65
Figura 40: Conexão da USART3 do STM32F207 ao conector modular.....	66
Figura 41: Ligação do STM32F207 com o conector para cartão SD.....	68
Figura 42: Conector modular fêmea de 2 vias, à esquerda, com seu correspondente à direita.	69
Figura 43: Porta de expansão I2C para sensores externos.	69
Figura 44: Porta de expansão analógica para sensores externos.....	70
Figura 45: Diagrama de blocos do módulo de gerenciamento de energia.	71
Figura 46: Módulo de gerenciamento de energia, com correntes calculadas.	73
Figura 47: Empilhamento das camadas na BattleLoad.	74
Figura 48: Trilha VDUTIN de 4mm entre conector de entrada e o transistor Q1.	75
Figura 49: Placa nua da BattleLoad.	76
Figura 50: BattleLoad parcialmente montada.	76
Figura 51: Paradigma de codificação do firmware da BattleLoad.	77
Figura 52: Diagrama em camadas do <i>firmware</i> da BattleLoad.....	78
Figura 53: Máquina de estados tradicional, utilizando comando <i>switch/case</i>	79
Figura 54: Gerenciamento de FIFO como buffer circular.....	82
Figura 55: Interação entre BGLib, rodando o microcontrolador, e BGAPI, rodando no WF121.	90
Figura 56: Representação simplificada da máquina de estados do módulo IV.	91
Figura 57: Definição da estrutura IV_TRACER_T.	92
Figura 58: Fluxograma do estado OPER.	93
Figura 59: Garra de terra para medida de <i>ripple</i>	95
Figura 60: Influência da garra de terra na medida do <i>ripple</i>	96
Figura 61: Programador e depurador STLinkV2.	97
Figura 62: LEDs D19-21 acesos, indicando sucesso de gravação do firmware.	98
Figura 63: Rampas de tensão para teste do conversor DA.	99
Figura 64: Fonte de alimentação para Notebook, ZF120A-1802200.....	100
Figura 65: Curva IV da fonte ZF120A-1802200.	101
Figura 66: Operação da BattleLoad com USB no modo loopback.	101
Figura 67: Tela principal do WIFI-GUI durante conexão com WF121 da BattleLoad.....	102
Figura 68: Painel solar CHN20-36M Chinaland.	104
Figura 69: Painel solar montado na estrutura mecânica ajustável.	104
Figura 70: Imagem de satélite do local da tomada de dados.	105
Figura 71: Trajetória do Sol obtida pelo SunCalc.	106
Figura 72: Esquema de ligação para tomada de dados.	107
Figura 73: Sistema montado para tomada de dados.	108
Figura 74: Dados brutos obtidos pela BattleLoad.	109
Figura 75: Pontos da curva IV considerados para análise.	110
Figura 76: Curvas IV extraídas do painel no dia 19/10/2014.....	112
Figura 77: Evolução de V_{MAX} , I_{MAX} e P_{MAX} ao longo do dia 14/10/2014	113
Figura 78: Pontos da curva IV das 12:45 do dia 30/10/2014.....	114

Figura 79: Evolução de V_{MAX} , I_{MAX} e P_{MAX} ao longo do dia 30/10/2014	115
Figura 80: Diagrama esquemático do bloco de Processamento e Controle.	120
Figura 81: Diagrama esquemático da interface Ethernet.	121
Figura 82: Diagrama esquemático do bloco de carga.	122
Figura 83: Diagrama esquemático do bloco de Gerenciamento de Energia.	123
Figura 84: Diagrama esquemático da interface wireless WF121.	124
Figura 85: Diagrama esquemático de interligação dos blocos e conectores.	125
Figura 86: Máscara de layout da face superior.	126
Figura 87: Máscara de layout do plano terra.	127
Figura 88: Máscara de layout do plano interno.	128
Figura 89: Máscara de layout da face inferior.	129
Figura 90: Lista de materiais da BattleLoad - Parte 1.....	130
Figura 91: Lista de materiais da BattleLoad - Parte 2.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do painel SHARP NUA188EY	26
Tabela 2: Painéis solares disponíveis para compra e características nas STC.	32
Tabela 3: Intervalos de valores para painéis comerciais	33
Tabela 4: Análise estatística dos módulos comerciais	33
Tabela 5: Requisitos de consumo dos circuitos da BattleLoad	70
Tabela 6: Medidas de tensão ripple para módulo gerenciador de energia.	96
Tabela 7: Erro introduzido por U3 em V_{CTRL} , em tensões próximas a 0V	99
Tabela 8: Características do CHN20-36M nas STC.....	104
Tabela 9: Coordenadas do local de tomada de dados.	105
Tabela 10: Azimute e elevação para meio dia de 19/10/2014.....	106
Tabela 11: Dias e horários de tomada de dados com a BattleLoad.	108
Tabela 12: Parâmetros de saída do painel no dia 19/10/2014.	112
Tabela 13: Irradiância no dia 14/10/2014, medida do Mirante de Santana.	113
Tabela 14: Características da curva IV das 12:45 do dia 30/10/2014	114
Tabela 15: Irradiância no dia 30/10/2014, medida do Mirante de Santana.	115
Tabela 16: P_{MAX} esperado versus obtido no dia 30/10/2014	116

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{OC}	Tensão de circuito aberto de uma célula ou painel solar
I_{SC}	Corrente de curto circuito de uma célula ou painel solar
P_{MAX}	Potência máxima fornecida por uma célula ou painel solar
V_{MAX}	Tensão nos terminais de um painel ou célula solar no ponto P_{MAX}
I_{MAX}	Corrente fornecida por um painel ou célula solar no ponto P_{MAX}
θ_z	Ângulo zenital
AM	Coeficiente de massa de ar
q	Carga elétrica do elétron ($1,6 \times 10^{-19} C$)
k	Constante de Boltzmann ($1,3806488 \times 10^{-23} m^2 kg s^{-2} K^{-1}$)
T	Temperatura absoluta
I_0	Corrente de saturação do diodo
I_L	Corrente elétrica luminosa, ou fotocorrente
FF	<i>Fill Factor</i> , fator de preenchimento da célula ou painel solar
η	Rendimento da célula ou painel solar
λ	Comprimento de onda (m)
$G(\lambda)$	Composição espectral de luz incidente
$P(\lambda)$	Repsosta espectral da célula ou painel solar
V_{be}	Diferença de tensão entre base e emissor de um transistor bipolar
μ_n	Mobilidade dos elétrons em silício tipo n
C_{OX}	Capacitância do óxido de porta do transistor de efeito de campo

SUMÁRIO

1.	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	15
2.	INTRODUÇÃO	18
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1.	Estudo do problema	32
3.2.	Especificação	44
3.3.	Projeto Elétrico	49
3.3.1.	Bloco de Carga.....	49
3.3.2.	Processamento e controle	57
3.3.3.	Comunicações.....	63
3.3.4.	Armazenamento	66
3.3.5.	Interface com Pannel solar	68
3.3.6.	Interface com Sensores.....	69
3.3.7.	Gerenciamento de energia	70
3.3.8.	Captura de esquema elétrico e layout de circuito impresso	74
3.4.	Prototipagem	75
3.5.	Software de Medição	76
3.5.1.	Camada 1 – <i>Software</i> Básico	78
3.5.1.1.	<i>ST Peripheral Library</i>	78
3.5.1.2.	Processador de máquinas de estado FSM.....	79
3.5.1.3.	Gerenciador de <i>buffers First-In, First-Out (FIFO)</i>	80
3.5.2.	Camada 2 – Configuração e Operação do <i>Hardware</i>	83
3.5.2.1.	ADC.....	84
3.5.2.2.	DAC	85
3.5.2.3.	UART.....	85
3.5.2.4.	USB	86
3.5.2.5.	SDIO.....	87
3.5.2.6.	SYSTICK	87
3.5.3.	Camada 3 – Blocos funcionais do medidor	87
3.5.3.1.	FatFS.....	88
3.5.3.2.	DynLoad	89
3.5.3.3.	WF121	90
3.5.4.	Camada 4 – Extração curva IV	91

3.6.	Testes de Bancada.....	94
3.7.	Tomada de dados.....	103
3.7.1.	Escolha de um modelo de painel solar para testes	103
3.7.2.	Montagem de um arranjo mecânico para a tomada de dados.....	104
3.7.3.	Escolha de um local apropriado para testes.....	105
3.7.4.	Tomada de dados.....	107
3.8.	Análise dos dados	108
4.	RESULTADOS	111
5.	CONCLUSÕES	116
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
	APÊNDICE A - Diagrama esquemático da BattleLoad.....	120
	APÊNDICE B - Máscaras de circuito impresso da BattleLoad	126
	APÊNDICE C - Lista de materiais da BattleLoad	130
	APÊNDICE D - Código completo do módulo FSM	131
	APÊNDICE E - Código completo do módulo FIFO.....	134
	ANEXO A - Especificação da Bateria de 860mAh usada para testes ...	137
	ANEXO B - Especificação da proteção à bateria de 860mAh.....	141
	ANEXO C - Arquivo completo de tomada de dados da BattleLoad.....	142

1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A maior parte da energia consumida na Terra é obtida de combustíveis de fósseis - petróleo, carvão e gás natural - consideradas não-renováveis e poluentes. A perspectiva de um eventual esgotamento, bem como os danos ao meio ambiente, provocados pelo consumo destes combustíveis, levam ao crescimento no interesse por formas de energias mais limpas e sustentáveis. Na Figura 1 estão representados os consumos de diferentes tipos de energia pela humanidade, de 1987 a 2012, em milhões de toneladas equivalentes de petróleo.

Figura 1: Consumo de energia mundial, de 1987 a 2012, em milhões de Toneladas equivalentes de petróleo. Fonte: British Petroleum (2012)

Nota-se o aumento, na década de 2000, do uso de energias renováveis. Dentre essas fontes renováveis está a energia solar, tema deste trabalho.

A geração de energia por meio de combustíveis fósseis ocorre pela queima destes em usinas termelétricas. O calor liberado pela combustão é transferido a um fluido circulante, geralmente vapor d'água, que, por sua vez, excita as pás de turbinas geradoras elétricas. A geração elétrica em turbinas pode ser explicada por meio da lei de Faraday da indução eletromagnética, na qual um fluxo magnético variante no tempo produz força eletromotriz em um circuito fechado.

O uso amplo de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica produz impactos severos no meio ambiente, entre eles, chuva ácida, efeito estufa e poluição atmosférica, que contribuem para a deterioração das condições de vida sustentável no planeta. É relevante, portanto, a busca por formas de energia alternativas, renováveis e menos poluentes, que possam reduzir o consumo e, por consequência o impacto, dos combustíveis fósseis.

Entre estas formas de energia está a energia solar fotovoltaica, obtida por meio da conversão da energia luminosa irradiada pelo Sol em energia elétrica. O uso razoável e eficaz da energia solar é um importante caminho para lidar com a crise energética do presente (DAI e CHEN, 2009, tradução nossa)

Um problema a ser superado para a geração de energia fotovoltaica é o baixo rendimento das células solares comercialmente disponíveis, que implica no uso de um maior número de painéis solares para obtenção da quantidade de energia desejada. Isto aumenta a área útil necessária, bem como os custos associados com a implantação e manutenção da tecnologia. “Com o custo alto, promover a energia solar em larga escala torna-se muito difícil” (DAI e CHEN, 2009, tradução nossa)

Tem relevância, portanto, estudos que procurem aumentar a quantidade de energia solar convertida em energia elétrica por células solares. “Muitos trabalhos de pesquisa têm sido concluídos e continuados para melhorar a eficiência das células solares” (RIPON, SIDDIQUE, *et al.*, 2012, tradução nossa), reduzindo, por exemplo, perdas por reflexão de luz. Outras iniciativas, como acompanhamento e concentração solar podem ser utilizadas em células e painéis já desenvolvidos, para melhorar, respectivamente, o tempo de exposição e a intensidade da radiação incidente.

A caracterização do comportamento elétrico de células e módulos solares é realizada por meio da extração da curva IV desses dispositivos, sob diferentes condições e intensidades de iluminação. A maioria dos dispositivos para extração de curva IV são destinados ao uso em laboratório. É o caso dos simuladores solares, tal qual o mostrado na Figura 2, e das cargas eletrônicas de bancada. Os instrumentos existentes para caracterização com o painel instalado, são geralmente dispositivos de mão, destinados para medidas esporádicas durante instalação ou manutenção. Um exemplo é o medidor de curva IV SOLAR-600, da AMPROBE, mostrado na Figura 3.

Figura 2: Simulador solar para espectro AM1.5.
Fonte: ANFF (2014)

Figura 3: Traçador de curva IV SOLAR-600.
Fonte: AMPROBE (2014)

O pequeno número de dispositivos dedicados à medição contínua de módulos solares instalados motiva o desenvolvimento deste trabalho. Serão tratados projeto, desenvolvimento e testes, em bancada e no campo, de um dispositivo eletrônico autônomo para caracterização de módulos solares fotovoltaicos em seu ambiente de operação.

2. INTRODUÇÃO

Energia solar é aquela proveniente da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, por meio do processo de fusão nuclear. “O Sol é um reator termonuclear que emite energia de sua superfície, aproximadamente como um corpo negro a 6000K. [...] A maior parte da energia solar está nos comprimentos de onda visível e infravermelho curto.” (RAUSCHENBACH, 1980, p. 408, tradução nossa). Esta energia é irradiada de sua superfície e se propaga através do espaço até atingir outros corpos celestes, entre eles a Terra.

De toda radiação solar incidente no planeta, aproximadamente 174PW, cerca de 30% é refletida de volta para o espaço, enquanto o restante é absorvido pelo planeta, interagindo com a atmosfera e alcançando oceanos e superfície.

“As características da radiação solar que chegam ao Solo dependem da espessura da camada de ar e da composição da atmosfera, incluindo o ar e os elementos suspensos, como o vapor de água e a poeira” (VILLANOVA e GAZOLI, 2012, p. 42). A Figura 4 mostra o impacto da interação com a atmosfera na composição espectral da radiação solar incidente. A curva em preto representa o espectro da radiação solar extraterrestre, enquanto a curva em vermelho corresponde ao espectro da radiação solar após a interação com a atmosfera terrestre.

Figura 4: Espectro da radiação solar antes e após passagem pela atmosfera.
Fonte: NREL (2013)

“A espessura da camada atmosférica atravessada pelos raios solares depende do comprimento do trajeto até o Solo. Este trajeto depende do ângulo de inclinação do Sol com relação a linha de zênite” (VILLANOVA e GAZOLI, 2012, p. 42). A Figura 5 ilustra o ângulo de zênite, ou ângulo zenital, θ_z , definido como o ângulo formado pelo raio de luz incidente com uma linha imaginária perpendicular à superfície terrestre. O raio incidente segue a trajetória de comprimento L , enquanto um raio normal à superfície seguiria a trajetória de comprimento L_0 .

Figura 5: Raios solares em diferentes ângulos de zênite.
A atmosfera não está em escala.

Utilizando um modelo que ignora a curvatura terrestre, com $\theta_z < 75^\circ$, define-se o Coeficiente de Massa de Ar (em inglês *Air Mass Coefficient*), AM, pela expressão:

$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

O coeficiente AM é utilizado para determinar condições de teste e operação de dispositivos de energia solar em diferentes latitudes do globo terrestre. Casos importantes para o coeficiente AM estão contemplados no quadro 1, destacando-se o valor AM1.5 e sua distribuição espectral – a curva vermelha da Figura 4. Segundo Villanova e Gazoli (2012), a distribuição espectral AM1.5 corresponde ao comportamento médio da radiação solar em países de clima temperado do hemisfério norte, nos quais a tecnologia fotovoltaica surgiu e se desenvolveu, principalmente Europa e Estados Unidos.

Quadro 1: Casos típicos do coeficiente de massa de ar

Coef. AM	Descrição
AM0	Espectro solar no espaço, sem interação com atmosfera
AM1	Espectro solar após viajar pela atmosfera terrestre, com ângulo de incidência 0°
AM1.5	Espectro solar após viajar pela atmosfera terrestre, com um ângulo de incidência de aproximadamente 48.2° . Esta medida é útil para caracterizar a radiação solar nas localidades de clima temperado.
AM2~3	Espectro solar após viajar pela atmosfera terrestre, com ângulo de incidência entre 60° e 70° . Este coeficiente é útil para caracterizar a radiação em ambientes de altas latitudes.

Para a produção de energia elétrica partir da radiação solar, são utilizadas, principalmente, duas técnicas: a conversão de energia luminosa em térmica, para posterior conversão em energia elétrica (sistema termelétrico) e a conversão direta da radiação luminosa em eletricidade (sistema fotovoltaico).

Os sistemas termelétricos são tipicamente constituídos por anteparos resistentes a altas temperaturas que, ao serem atingidos pela luz solar, se aquecem e transferem o calor absorvido para um fluido, geralmente água. A transferência de calor provoca aumento na temperatura e vaporização do fluido, que circula por uma turbina, gerando energia elétrica. As altas temperaturas necessárias para provocar a movimentação do fluido são obtidas concentrando-se a energia solar em uma área pequena, na qual se localiza o anteparo. Este método de geração de energia não deve ser confundido com o uso da energia solar para o aquecimento direto da água, que não gera eletricidade.

Na Figura 6 é mostrado um arranjo termelétrico utilizando concentradores solares a espelho. O anteparo é o tubo localizado no foco do espelho que se estende por todo comprimento da instalação.

Figura 6: Arranjo termelétrico com concentradores solares a espelho.
Fonte: German Aerospace Center (2012)

Os sistemas fotovoltaicos, que são o foco deste trabalho, são constituídos por células solares, dispositivos capazes de converter diretamente radiação luminosa em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. Os materiais mais comumente utilizados para a fabricação de células solares são o silício (monocristalino ou policristalino) e o arseneto de gálio. “Existem também novos materiais, [...] como é o caso de células de material orgânico, translúcidas e de material plástico, e outros em escala reduzida [...] denominadas tecnologias de filme fino”. (ZILLES, MACÊDO, *et al.*, 2012, p. 17). Na Figura 7 está representada uma célula solar de silício, conectada a uma carga ou consumidor de energia.

Figura 7: Célula solar de silício sob radiação.

Uma célula solar de silício, tal qual um diodo, é formada por uma junção de silício tipo *p* com silício tipo *n*. A radiação normal à superfície de uma célula é parcialmente absorvida pela junção *pn* exposta ao Sol. Esta energia absorvida é suficiente para gerar movimentação dos elétrons livres, por exemplo, do lado *n* para o lado *p*. Sem a presença da luz solar esta movimentação é suprimida pelo campo elétrico de equilíbrio da junção *pn*. Sob iluminação, se houver uma carga conectada fechando o circuito, corrente elétrica fluirá e o dispositivo será alimentado pela corrente dos elétrons livres. A tensão de saída é contínua e depende das características construtivas do dispositivo. A relação matemática entre corrente e tensão de uma célula solar pode ser expressa por:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{qV}{nkT}\right)} - 1 \right] \quad (2)$$

O modelo para uma célula solar ideal, tal como descrito pela equação anterior, pode ser representado pelo circuito elétrico da Figura 8.

Figura 8: Modelo ideal para a célula solar

O modelo ideal da célula solar é conveniente para compreensão do funcionamento do dispositivo, mas não é utilizado em aplicações práticas. Um modelo mais fiel de uma célula solar é descrito por (RAUSCHENBACH, 1980) e leva em conta a existência de perdas, que podem ser modeladas por resistências série e paralelo. O circuito para este modelo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Modelo prático para a célula solar

A equação característica deste modelo melhorado é expressa a seguir:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{V}{R_{SH}} \quad (3)$$

Na equação característica, há dois termos, um dependente da iluminação, denominado fotocorrente, e outro idêntico à equação do diodo. De posse das curvas de composição espectral da luz incidente $G(\lambda)$ e resposta espectral da célula solar $P(\lambda)$, ambas em função do comprimento de onda λ , a fotocorrente I_L pode ser calculada pela expressão:

$$I_L = \int P(\lambda) G(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Sem iluminação, o termo I_L é nulo e a equação se reduz a de um diodo convencional. Sob iluminação, a curva de diodo é deslocada, originando a curva característica observada na Figura 10.

Figura 10: Curva IV de uma célula solar

Os parâmetros de saída da célula solar, contemplados na Figura 10, são:

- V_{OC} : tensão de circuito aberto, medida na célula sem carga;
- I_{SC} : corrente de curto circuito, medida curto circuitando-se os terminais da célula;
- P_{MAX} : potência máxima entregue pela célula solar;
- V_{MAX} : tensão de saída da célula na situação de potência máxima;
- I_{MAX} : corrente de saída da célula na situação de potência máxima;

De posse dos valores mencionados anteriormente, é possível calcular o fator de preenchimento (*fill factor*, ou FF):

$$FF = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (5)$$

O fator de preenchimento representa, graficamente, a fração da área do retângulo formado por I_{SC} e V_{OC} que é preenchida pelo retângulo formado por I_{MAX} e V_{MAX} , na curva característica da célula solar. Pode ser encarado como uma medida de mérito da célula solar e, idealmente, deveria ser igual à unidade.

Outro parâmetro importante a se considerar é a eficiência de conversão de energia da célula solar, que é definida como a razão entre potências gerada e incidente na célula solar. Considerando a operação no ponto de máxima potência, o valor pode ser calculado pela expressão:

$$\eta = \frac{P_{gerada}}{P_{incidente}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{incidente}} \quad (6)$$

O rendimento da célula solar varia com o material utilizado e a tecnologia empregada para a construção. Na Figura 11 pode-se ver os rendimentos obtidos em laboratório, para células de diversos materiais e tecnologias, desde 1975 até 2014.

O gráfico da Figura 11 está separado em cinco grandes grupos de tecnologias construtivas para células solares:

- Multijunção, isto é, com mais do que uma junção de materiais;
- Uma junção, baseada em arseneto de gálio;
- Uma junção de silício cristalino;
- Filmes finos e silício amorfo;
- Tecnologias emergentes como células orgânicas;

Junto de cada ponto nas curvas estão também indicados os locais nos quais foram realizadas as medições dos valores. As maiores eficiências registradas estão próximas de 40%, para células multijunção. No entanto, a eficiência da célula de silício multicristalino, a mais facilmente encontrada no mercado, varia na faixa entre 10 e 20%. Isto significa que para cada 1W de radiação solar incidente numa área da célula solar, cerca de 0.2W de potência elétrica são gerados.

Figura 11: Eficiência dos diferentes tipos de células solares.
Fonte: NREL (2013)

A célula solar é a unidade básica de um gerador fotovoltaico. No entanto, uma única célula é, geralmente, incapaz de produzir energia elétrica em quantidade compatível com os sistemas elétricos consumidores. É necessário, portanto, a associação de células solares em série ou paralelo, de modo a produzir, respectivamente, valores de tensão e corrente compatíveis com a aplicação desejada. De acordo com Villanova e Gazoli (2012), estes conjuntos associados de células solares podem ser chamados, indistintamente, de placas, painéis ou módulos fotovoltaicos.

Um exemplo de aplicação é a carga de baterias, na qual é necessário operar com tensões de saída de 12V. De acordo com Zilles et al. (2012), painéis solares para esta aplicação tem entre 32 a 44 células de silício cristalino conectadas em série, para fornecer uma tensão V_{MAX} de 16 a 17V, de modo a compensar perdas de 2 a 3V nos cabos e fornecer uma carga máxima de 12V. Cada célula de silício tem aproximadamente 0,6V de tensão de circuito aberto e 0,47V de tensão no ponto de máxima potência, mas estes valores podem variar, por exemplo, com a temperatura do módulo. Um painel solar, do fabricante SHARP, com 48 células de silício monocristalino conectadas em série é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Painel solar de silício monocristalino SHARP NUA188EY, com $P_{MAX} = 188$ W.
Fonte: SHARP (2014)

Tabela 1: Características do painel SHARP NUA188EY

Modelo	NUA188EY
P_{max}	188 W
I_{max}	7.84 A
V_{max}	24 V
I_{sc}	8.60 A
V_{oc}	29.6 V

Uma instalação geradora baseada em painéis solares pode ter diversos módulos interligados para aumentar a potência gerada durante o período de insolação. Tal qual se faz com células solares, ligam-se painéis em série para se obter uma tensão de saída desejada. Depois esses arranjos série são replicados e ligados em paralelo para obter a corrente de saída desejada. O conjunto todo pode, por fim, ser conectado à rede elétrica, usando-se inversores de tensão. Em sistemas trifásicos é normal que se utilizem sistemas independentes de painéis para cada fase. Para aplicações de pequeno porte e não conectadas à rede, a tensão contínua é usada.

A caracterização de painéis solares ocorre em condições padronizadas, para facilitar a comparação entre modelos. Duas dessas condições, frequentemente encontradas nas folhas de dados dos módulos comerciais, são chamadas *Standard Test Conditions*, ou STC e *Normal Operation Cell Temperature*, ou NOCT.

As STC são condições de teste em laboratório, padronizadas por organismos internacionais de certificação. São utilizadas para comparação entre painéis solares de diferentes fabricantes. Nas STC considera-se uma densidade de potência de radiação, ou irradiação, de 1000 W/m^2 , com composição espectral AM1.5 e temperatura ambiente de 25°C . “Esta condição é produzida em laboratório, dentro de uma câmara climática, que possui um sistema preciso de controle e medição de iluminação e temperatura” (VILLANOVA e GAZOLI, 2012, p. 83).

Figura 13: Painéis solares interligados para gerar energia elétrica.
Fonte: Revista Brasil Construção (2014)

A condição NOCT procura se aproximar do ambiente de funcionamento do painel em aplicação. As características do painel são extraídas na temperatura de $48,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e irradiação de 800 W/m^2 . O valor de $48,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi escolhido, pois esta é a temperatura aproximada de uma célula solar caso a temperatura ambiente seja de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. De acordo com Villanova e Gazoli (2012), a NOCT produz resultados mais próximos do funcionamento real do módulo fotovoltaico e mostra quanta energia será de fato produzida.

A característica IV de um módulo fotovoltaico é medida utilizando um simulador solar em conjunto com uma carga eletrônica, num arranjo como o mostrado na Figura 14.

Figura 14: Sistema de caracterização, em laboratório, de módulos solares

Um simulador solar é um dispositivo emissor de luz capaz de reproduzir as condições de iluminação do Sol. Uma carga eletrônica, tema central deste trabalho, é um dispositivo eletrônico capaz de consumir uma quantidade programada de energia elétrica de uma fonte. Variando-se a quantidade de energia drenada, é possível estudar diferentes pontos de operação de um gerador de energia e, por exemplo, traçar a curva IV do dispositivo. Também é possível realizar testes de stress e de regulação de carga. A figura mostra uma carga eletrônica, modelo *Source Meter 2400*, do fabricante Keithley, utilizada em laboratório para medição de curvas IV de painéis solares.

Figura 15: Carga eletrônica Keithley Source Meter 2400.
Fonte: EEVBLOG (2014)

Uma boa parte das cargas eletrônicas disponíveis no mercado destinam-se apenas ao uso em ambiente de laboratório, não sendo apropriadas para realizar o levantamento da curva IV com o painel já instalado na aplicação. Faltam a estes aparelhos interfaces para comunicação sem fio e armazenamento de dados, que permitiriam embarca-los junto a uma instalação fotovoltaica, fornecendo dados em situações reais de uso.

O objetivo deste trabalho é projetar, construir e testar uma carga eletrônica para estudo de módulos fotovoltaicos em operação. Serão abordadas as etapas de estudo do problema, especificação de uma Solução, projeto, construção e testes, com tomada de dados utilizando um painel comercial. Ao final do texto, os resultados obtidos serão analisados e será possível tecer uma crítica sobre a metodologia empregada e sua eficácia em atender a proposta inicial.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento consistiu no projeto, construção, testes de laboratório e de campo de uma carga eletrônica autônoma, para medida de curva IV de módulos fotovoltaicos já instalados. O instrumento foi batizado com o nome de BattleLoad e é capaz de extrair, juntamente com a curva IV do módulo, seus parâmetros de saída, como tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, potência máxima – assim como tensão e corrente neste ponto – além do fator de preenchimento.

Podem ser medidos módulos fotovoltaicos com potência máxima de até 100 W, o que é considerado um bom valor para boa parte dos painéis solares comerciais. Os dados, coletados periodicamente em intervalos de tempo programáveis, são armazenados localmente pelo instrumento num cartão micro SD. Podem ser acessados diretamente do cartão por um computador, ou via conexão com um ponto de acesso Wi-Fi, criado pelo próprio medidor.

Grosso modo, o projeto seguiu as etapas mostradas na Figura 16. No entanto, o caminho realmente percorrido não foi estrito, mas com eventuais retornos a etapas anteriores, para correções ou mudanças. A seguir faz-se uma breve descrição das atividades de cada uma das etapas. A metodologia detalhada para cada etapa será vista nas seções subsequentes, com eventuais anexos para complemento da informação.

Figura 16: Etapas do projeto do medidor BattleLoad

Na etapa de estudo do problema foram estudadas características nominais de painéis solares comerciais, de modo a dimensionar adequadamente o medidor para

englobar uma faixa ampla de painéis. Também foram estudadas soluções para medição de curva IV encontradas na literatura e comercialmente, de modo a balizar a especificação do instrumento a ser projetado.

Na etapa de especificação foram definidas as principais funcionalidades do medidor, baseando-se no estudo do problema, realizado previamente. Dividiu-se o sistema em blocos funcionais, entre eles o bloco de carga, responsável pelo consumo programado de energia do painel solar. Em seguida listaram-se todos os requisitos para cada bloco, de modo a compor uma especificação completa do instrumento.

Em seguida foi realizado o projeto elétrico do medidor, seguindo os requisitos da especificação. Esta etapa consistiu na elaboração de circuitos elétricos, com escolha de topologias, dimensionamento de componentes, com posterior captura do esquema elétrico e desenho do layout. Ao final, foram geradas máscaras para produção de circuito impresso e lista de materiais para que um protótipo fosse construído.

De posse dos protótipos funcionais, foram realizados testes em laboratório, para verificar a funcionalidade dos diferentes blocos do medidor. Algumas rotinas de software, especialmente dedicada aos testes, foram escritas e, posteriormente, utilizadas no software de tomada de dados.

Após a validação elétrica dos protótipos, foi escrito um software para teste de campo, com tomada de dados de um painel solar comercial. O software, programado em linguagem C, é responsável por controlar o hardware de medição, extrair os dados relevantes e armazená-los para consulta. Também foram previstas rotinas de comunicação para acesso remoto das informações.

Com o sistema de medição pronto, seguiu-se a tomada dos dados experimentais de curva IV com painéis solares em ambientes externos. Foi selecionado um painel solar conveniente para a tomada de dados na cidade de São Paulo, SP. Após a escolha do local, montagem e orientação do sistema, foram tomadas curvas IV e parâmetros característicos, ao longo de um dia e por alguns dias de medição.

De posse dos dados coletados com o sistema de medição, foram analisadas as curvas IV e parâmetros extraídos, comparando-se os resultados obtidos com as informações fornecidas pelos fabricantes do painel solar. Como os dados foram tomados ao longo de um dia, é possível acompanhar a evolução dos dados com o tempo, como potência máxima e fator de preenchimento no decorrer de um dia de medições.

3.1. Estudo do problema

Durante a etapa de estudo do problema, foram analisados painéis solares disponíveis no mercado, de modo a estabelecer quais devem ser os valores limite para medição do bloco de carga eletrônica. Também foram analisadas cargas eletrônicas disponíveis na literatura e comercialmente, para balizar a especificação do instrumento BattleLoad.

A Tabela 2 traz alguns modelos de painéis fotovoltaicos comercialmente disponíveis, tipicamente os dispositivos a serem testados pela BattleLoad. Esta compilação foi construída no mês de Agosto de 2013, por meio de consulta a fornecedores na Internet. Os parâmetros característicos mostrados na tabela foram obtidos nas STC por cada fabricante e extraídos das folhas de dados dos módulos. Como nem todos os painéis possuíam características extraídas também nas NOTC, foram deixadas apenas as obtidas nas STC.

A tabela foi construída com o intuito de balizar a escolha de limites superior e inferior de potência máxima, tensão e corrente a serem medidos, de modo a cobrir a maior parte dos painéis disponíveis comercialmente. Não há pretensão de ser um retrato completo de todas as marcas e modelos disponíveis no mercado brasileiro ou internacional.

Tabela 2: Painéis solares disponíveis para compra e características nas STC.

Fabricante	Modelo	Eficiência	P _{MAX} (W)	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	V _{MAX} (V)	I _{MAX} (A)
Yngli	YL020P-17b-1/6	10,90%	20	21,3	1,32	17,3	1,16
Solaris	S55P	12,50%	55	21,85	3,24	18,2	3,04
Jetion	JT090SFb	13,90%	90	22,40	5,30	18,5	4,86
Suntech	STP135D-12/TEA	13,50%	135	22,3	8,20	17,5	7,71
Solaris	S140P	13,90%	140	21,96	8,17	18,36	7,65
Jetion	JT140PFe	14,00%	140	24,95	8,25	18,3	7,65
Jetion	JT235PCe	14,30%	235	37	8,4	30,5	7,71
Solaris	S30P	10,70%	30	21,56	1,84	17,6	1,71
Yngli	YL050P-17b	12,00%	50	21,5	3,24	17,4	2,87
Solaris	S85P	12,90%	85	21,65	5,08	17,90	4,75
Suntech	STP085D-12/BEA	13,10%	85	22,0	5,13	17,6	4,83
Atersa	A-100M	15,07%	100	22,21	5,79	18,95	5,28
Atersa	A-150P	15,42%	150	22,60	8,69	17,84	8,41
Kyocera	KD135GX-LPU	13,50%	135	22,1	8,37	17,7	7,63
Yngli	YL140P-17b	14,00%	140	22,5	8,4	18,0	7,77
BYD	140P6-18	13,97%	140	21,49	8,76	18,0	7,78
Chinaland	CHN20-36M	10,50%	20	21,6	1,24	17,6	1,15
Komaes	KM(P)10	9,10%	10	21,52	0,66	17,56	0,6
Komaes	KM(P)20	10,70%	20	21,56	1,23	17,56	1,14
Komaes	KM(P)30	11,50%	30	21,56	1,84	17,56	1,71
Yngli	YL065P-17b	10,90%	65	21,5	4,10	17,0	3,82
Kyocera	KD140SX-UFB	14,00%	140	22,1	8,68	17,7	7,91
Kyocera	KD240GX-LFB	14,60%	240	36,9	8,59	29,8	8,06
SolarWorld	SW85 poly/R5A	13,00%	85	22,0	5,20	17,9	4,77
SolarWorld	SW50 poly RMA	10,80%	50	22,1	2,95	18,2	2,75

Por meio da análise da Tabela 2, foram obtidos valores limite dos parâmetros característicos relevantes para a especificação, mostrados na Tabela 3. Estes valores determinaram escolhas importantes, como precisão do sinal de controle do bloco de carga do painel solar, fatores de escala dos circuitos de aquisição, dimensionamento do transistor e resistor de carga, entre outros fatores, durante a etapa de especificação.

Tabela 3: Intervalos de valores para painéis comerciais

Parâmetro	Intervalo
V_{OC} (V)	21,3 a 36,9
I_{SC} (A)	0,66 a 8,76
P_{MAX} (W)	10 a 240
V_{MAX} (V)	17,0 a 30,5
I_{MAX} (A)	0,60 a 8,41

Um exame da Tabela 2 mostra que, excetuando-se os dois painéis mais potentes do grupo, JT235PCe e KD240GX-LFB, os valores de tensão, V_{OC} e V_{MAX} , são bastante similares entre os painéis de diferentes potências, ao passo que os valores de corrente, I_{SC} e I_{MAX} , variam numa faixa mais ampla. Esta análise está sumarizada na Tabela 4, que foi construída sem considerar os dois painéis mais potentes. Concluiu-se, portanto que a capacidade de corrente é, geralmente, o que diferencia um painel mais potente de um menos potente. Os dois painéis com potência superior a 200W foram tratados como casos especiais de medição, e não foram priorizados na especificação.

Tabela 4: Análise estatística dos módulos comerciais

Parâmetro	Média	Desvio padrão
V_{OC} (V)	21,9	0,74
I_{SC} (A)	5,13	2,92
P_{MAX} (W)	85	49
V_{MAX} (V)	17,7	0,4
I_{MAX} (A)	4,77	2,71

Também foram analisados projetos e realizações de cargas eletrônicas na literatura, para compreender as diferentes abordagens do problema. Uma breve noção do comportamento de uma carga eletrônica é apresentada, para preparar o leitor para a discussão dos projetos que se faz em seguida. Não serão apresentados todos os casos observados durante o estudo, mas os considerados mais relevantes para o projeto da BattleLoad.

Cargas eletrônicas são dispositivos programáveis, capazes de consumir uma quantidade pré-determinada de energia de um dispositivo. São utilizadas, primariamente, para caracterizar circuitos provedores de energia elétrica, como fontes de alimentação, painéis fotovoltaicos, baterias e células combustíveis. Neste trabalho, a aplicação de interesse é o uso das cargas eletrônicas para caracterização de painéis fotovoltaicos.

O funcionamento de uma carga eletrônica para caracterizar um dispositivo pode ser observado na Figura 17. Ajusta-se uma curva de carga no plano IV, que intercepta a curva IV do dispositivo gerador, determinando o ponto de operação do sistema. Este ponto pode ser monitorado por um sistema de medição e aquisição de dados. Regulando-se o consumo de energia pela carga, desloca-se sua curva IV e altera-se o ponto de operação do sistema. Após a passagem por diversos pontos de operação devidamente adquiridos, a curva IV do dispositivo pode ser traçada, tal qual mostra o traço cheio sobre a curva IV do dispositivo na Figura 17.

Figura 17: Funcionamento de uma carga dinâmica na caracterização de um dispositivo

Há diversas formas possíveis para a característica IV de uma carga eletrônica, dependendo do circuito empregado. No entanto, o comportamento usualmente se encaixa em um dos quatro modos a seguir, mostrados na Figura 18: (a) tensão constante, (b) corrente constante, (c) resistência constante e (d) potência constante. Serão explicados brevemente os modos tensão, corrente e resistência constantes, frequentemente usados para a caracterização de dispositivos. O modo potência constante não é utilizado para caracterização de dispositivos, mas é utilizado por

exemplo, em reguladores chaveados, que devem manter a potência constante em seus terminais de entrada, fornecendo sempre a mesma potência ao seu circuito de saída, mesmo que a tensão de entrada mude de valor.

Figura 18: Características IV mais comuns em cargas eletrônicas.

No modo tensão constante, a carga é ajustada para manter sempre o mesmo valor de tensão entre seus terminais. A varredura para obtenção da curva ocorre variando-se o ajuste de tensão e medindo-se a corrente resultante, geralmente por meio de um resistor shunt ou sensor de efeito hall, em série com o dispositivo gerador e conectado a um conversor analógico digital.

Na carga corrente constante, o parâmetro ajustável é a corrente consumida do gerador. A varredura para extração da curva IV é feita variando-se a corrente consumida e medindo-se a tensão nos terminais da carga, geralmente por meio de um conversor analógico digital.

Uma carga no modo resistência constante exibe sempre a mesma resistência entre seus terminais. A varredura se dá mudando a inclinação da curva de carga, portanto, a resistência exibida entre os terminais. Neste modo tensão e corrente devem ser medidos para adquirir o ponto de operação.

A primeira implementação de carga dinâmica analisada foi a proposta Nilsson (2005), cujo circuito simplificado é mostrado na Figura 19. Esta carga opera no modo tensão constante, mas mede tensão e corrente para adquirir o ponto de operação do painel solar. O projeto será analisado com algum detalhe, pois trouxe importantes contribuições ao projeto da BattleLoad.

A carga é composta, essencialmente, de um transistor de efeito de campo, T1, acionado por um amplificador operacional, que tem como entradas um sinal de controle vindo de um *datalogger* e a tensão do painel solar, respectivamente

escalonados pelos potenciômetros P2 e P1. O operacional acionará a porta T1, consumindo corrente do módulo fotovoltaico até que a tensão nos terminais deste se iguale à tensão de controle programada no *datalogger*. A corrente consumida é medida por meio de um resistor *shunt*, R1, enquanto que a tensão do painel é medida por um divisor resistivo construído com resistores de precisão. Ambas as tensões, em R1 e no divisor, são conectadas ao conversor analógico digital (AD) do *datalogger*.

Figura 19: Circuito simplificado da carga tensão constante proposta por Nilsson.
Fonte: Nilsson (2005, p. 102)

A primeira característica marcante é o uso de um resistor shunt de 4 terminais, com valor de 0.01 ohms. De acordo com Nilsson (2005) esta resistência permite a medição de correntes tão grandes quanto 14A, sem que a queda de tensão nos fios conduzindo corrente afete a leitura.

Também é interessante o uso de um relê para medida da corrente de curto circuito, que oferece um caminho de menor resistência à passagem da corrente do que o transistor T1.

Por fim, é importante notar o uso de condutores dedicados para a medida da tensão do painel solar, evitando que a queda de tensão no circuito condutor da corrente afete a medida.

O circuito proposto por Jeevan; Kumaravel e Jagadeesh (2013), para caracterização de sistemas fotovoltaicos com mecanismo de acompanhamento solar, também se baseia no modo tensão constante, utilizando transistor MOS canal n acionado por um amplificador operacional, tal qual mostra a Figura 20. Trata-se de uma implementação notavelmente mais simples que o caso anterior, mas que é interessante pelo uso de um microcontrolador de 8 bits, AT89c51, associado a um conversor DA externo, para controle do circuito de carga, ao invés de um *datalogger* externo. Isto possibilitou a programação de um software especializado para o sistema de controle e permitiu o cálculo da potência consumida sem o uso do computador ou sistema de visualização dos dados. O computador pode, por meio de uma interface serial RS232, requisitar os dados armazenados no microcontrolador.

Figura 20: Carga tensão constante com microcontrolador 8-bits e conversores AD e DA externos.
Fonte: DOSS e KUMARAVEL (2013)

Um outro ponto importante de diferenciação com o circuito proposto por Nilsson (2005) é o uso do sensor de efeito Hall para medida da corrente consumida do painel solar. Este tipo de sensor é geralmente utilizado para medir correntes mais altas que os resistores shunt. Isto é apropriado para a aplicação do circuito, que é o estudo de módulos solares com potência de 400W. Para módulos menores, com correntes menores, o uso de um resistor shunt seria uma opção melhor.

O diagrama de blocos da carga UTEL, proposta por Mantingh; Zaaiman e Ossenbrink (1994), é mostrado na Figura 21. Esta carga utiliza um transistor bipolar de junção, ao invés do MOSFET, como elemento de carga, explorando sua

característica $i_e(V_{be})$. Esta característica é exponencial e pode ser deslocada controlando-se a tensão V_{shift} , entre base e coletor do transistor bipolar, de acordo com a equação:

$$V_{pv} = V_{be} - V_{shift} \quad (7)$$

Figura 21: Diagrama de blocos da carga UTEL, com transistor bipolar como elemento de carga. Fonte: Mantingh; Zaaiman e Ossenbrink (1994)

A característica $i_e(V_{be})$, bem como o método de varredura da UTEL podem ser vistos na Figura 22. Para garantir um cruzamento ótimo com a região de curto circuito da curva do painel solar, a carga deve exibir alta condutância para correntes mais altas da característica $i_e(V_{be})$, aproximando-se de uma carga a tensão constante. Segundo Mantingh; Zaaiman e Ossenbrink (1994), a UTEL exibe melhor distribuição de pontos e menos oscilação que cargas eletrônicas de laboratório.

Figura 22: Característica IV e varredura da carga UTEL. Fonte: Mantingh; Zaaiman e Ossenbrink (1994)

Um projeto interessante, similar em proposta ao da BattleLoad, foi apresentado por Hassaine; Mraoui e Khelif (2014). Trata-se de uma carga eletrônica de baixo custo para medição de painéis solares em ambientes externos. O circuito proposto, mostrado na Figura 23, opera no modo corrente constante e utiliza como elemento de carga um transistor bipolar de junção TIP142, acionado por um amplificador operacional LM324. Um microcontrolador de 8 bits, ATMEGA168, é utilizado como controlador do bloco de carga. Ao invés de utilizar um conversor DA para produzir o sinal de controle, o microcontrolador utiliza um sinal modulado em largura de pulso (*pulse-width modulation*, ou PWM) filtrado por um circuito RC.

Figura 23: Circuito de carga corrente constante controlado por microcontrolador.
Fonte: Hassaine; Mraoui e Khelif (2014) – Reconstruída para melhor visualização

Diferentemente dos circuitos analisados até então, o mecanismo de controle, que compara o sinal de referência com o consumo efetivo, não é realizado pelo amplificador operacional, mas sim pelo microcontrolador. A corrente drenada do painel pela carga é adquirida pelo conversor analógico digital do microcontrolador e comparada com a tensão produzida pelo sinal PWM de controle do transistor até que se atinja o equilíbrio. A varredura ocorre alterando-se o ciclo de trabalho do sinal PWM e, por consequência, a corrente consumida. Medem-se ambos corrente e tensão para aquisição dos pontos de operação e construção da curva IV.

Tal qual o sistema proposto por Jeevan; Kumaravel e Jagadeesh (2013), esta carga depende da conexão com um computador PC, por meio de uma porta serial RS232, para recuperar, analisar e visualizar os dados extraídos dos módulos fotovoltaicos estudados.

Duas topologias para carga foram consideradas para uso no instrumento BattleLoad, tensão constante e corrente constante, comumente encontrada nos projetos de carga eletrônica vistos durante esta etapa. Para comparar ambas as topologias, foram realizadas simulações de circuito, utilizando o software LTSpice IV, da Linear Technology.

O circuito utilizado para simulação da carga a tensão constante pode ser visto na Figura 24. O sinal de controle, V_{CTRL} , é produzido por uma fonte de tensão DC, V3, e conectado à entrada inversora do amplificador operacional LT1001, U1. A tensão de saída do painel solar é escalonada pelo potenciômetro modelado pelo par de resistores R5 e R6 e ligada à entrada não inversora de U1. Ambos os sinais de tensão são comparados pelo amplificador operacional, que aciona o transistor de efeito de campo M1, utilizado como elemento de carga. Corrente é consumida do painel solar, conectado ao dreno de M1, o que causa a tensão nos seus terminais a cair. O sistema entra em regime quando as tensões em ambas as entradas de U1 forem iguais. Deve-se então medir a tensão de saída e a corrente consumida.

Figura 24: Circuito para simulação da carga modo tensão constante.

A corrente consumida no ponto de operação pode ser obtida medindo-se a tensão nos terminais de R2 e dividindo-se pelo valor da resistência utilizada, no caso 0.1Ω. A tensão de saída pode ser medida diretamente dos terminais do painel, utilizando-se preferencialmente um circuito de condicionamento para conexão com um ADC.

O circuito para simulação da carga a corrente constante pode ser visto na Figura 25. O sinal V_{CTRL} também é modelado pela mesma fonte DC, V3, mas desta vez é conectado à entrada não inversora. A entrada inversora é conectada à fonte do transistor de efeito de campo e monitora a corrente circulante em M1 e R2. O operacional aciona o transistor M1 para que os sinais V_{CTRL} e $V_S(M1)$ sejam numericamente iguais. Com R2 igual 1Ω , cada volt de V_{CTRL} equivale a 1 ampère de corrente consumida do painel fotovoltaico. Tensão e corrente do ponto de operação podem ser medidos da mesma maneira que no modo tensão constante.

Figura 25: Circuito para simulação da carga modo corrente constante.

O painel solar foi modelado pelo circuito da Figura 26. Ao invés de conectar diversos circuitos modelo para cada célula solar, um único circuito foi escalonado para representar a totalidade de um painel. Foram introduzidos os elementos de resistências série e paralelo da associação de células solares, de modo a representar um painel mais próximo do mundo real.

Figura 26: Modelo de simulação de painel solar.

Diversos valores para a fotocorrente I_L , de 250mA a 2A foram utilizados, de modo a obter curvas sob diferentes iluminações. Com $I_L = 2A$, o circuito se assemelha a um painel de 30W nas STC.

A simulação foi configurada para uma varredura DC do sinal V_{CTRL} , variando-o de 0V a 3.3V em passos de 5mV, valores razoáveis para um conversor digital analógico de 10 bits, tipicamente encontrado em sistemas com microcontrolador.

A Figura 27 mostra o resultado da simulação para a carga a tensão constante. Nota-se uma boa distribuição de pontos em todas as condições de fotocorrente. No entanto, a distribuição não é totalmente uniforme, exibindo ligeiramente maior concentração de pontos na porção mais horizontal da curva IV, isto é, com a corrente constante. Esta região é bastante constante em todas as condições de iluminação, não sendo necessários tantos pontos para traçar a curva IV.

Figura 27: Curvas IV obtidas pelo circuito modo tensão constante.

A Figura 28 mostra o resultado da simulação para a carga no modo corrente constante. É imediatamente notável a não uniformidade da distribuição de pontos, com uma grande concentração na porção entre P_{MAX} e V_{OC} . Isto decorre da própria natureza horizontal da curva da carga modo corrente constante no plano IV. No entanto, esta deficiência não impede que se trace a curva IV do módulo fotovoltaico, pois a deficiência de pontos está numa região praticamente constante da curva IV. O uso de interpolação pode ser uma possível Solução de pós processamento para obter os pontos faltantes.

Figura 28: Curvas IV obtidas pelo circuito modo corrente constante.

A Figura 29 (a) e (b) mostram um zoom da região entre 16V e 22V para as duas simulações. Em algumas partes desta região, o modo corrente constante possui maior densidade de pontos, o que pode ser visualizado conforme a fotocorrente aumenta. Mesmo nesta região o modo tensão constante exibe pontos mais uniformemente distribuídos.

Figura 29: Região entre 16 e 22V da simulação de cargas tensão constante e corrente constante

3.2. Especificação

Passada a fase de estudo do problema, deu-se início à fase de especificação da carga eletrônica BattleLoad. A primeira tarefa realizada nesta fase foi a listagem das funcionalidades necessárias no medidor, para atender a proposta de instrumento autônomo para a medição de painéis solares instalados em aplicação. Em seguida, o sistema foi dividido em blocos que atendem às funcionalidades listadas, o que auxilia na visualização e testes de validação. Por fim, requisitos de operação dos blocos foram levantados, definindo parâmetros para balizar o projeto elétrico que se seguiu.

As funcionalidades necessárias ao instrumento foram levantadas com base nos painéis e projetos analisados durante a etapa de estudo do problema. A listagem, com breve comentário de cada uma se encontra a seguir:

- Medição de painéis solares comerciais em aplicação, isto é, operando em ambientes externos, como telhados, lajes e postes;
- Deve ser medido o maior número de painéis da Tabela 2, o que implica em considerar as seguintes características nominais mínimas:
 - $V_{OCmax} = 26V$;
 - $I_{SCmax} = 10A$;
 - $P_{MAXmax} = 140W$;
- O menor painel que deve ser medido com sucesso deve ter as características nominais do painel KM(P)10, da Tabela 2;
- O instrumento deve realizar as medidas autonomamente, isto é, sem contar com o auxílio de um computador PC, armazenando as medidas localmente;
- A conexão com o PC deve ser realizada, preferencialmente por uma interface de rede Wi-Fi, para recuperar dados arquivados na memória da BattleLoad;
- O instrumento deve ser alimentado por uma fonte de energia diferente do painel solar em estudo, como uma fonte de alimentação DC, ou mesmo um segundo painel solar. Deve ser dotado de bateria interna para continuar operando por um dia de medições quando a fonte de energia estiver inoperante;

- O instrumento deve permitir conectar sensores externos, como de irradiância e temperatura, por meio de interfaces analógicas e digitais disponíveis para este fim;
- O instrumento deve permitir a conexão com outros sistemas computacionais, por meio de uma ou mais interfaces de comunicação;

A partir deste conjunto de funcionalidades, foi elaborado o diagrama de blocos mostrado na figura. Este diagrama representa uma divisão do sistema em unidades especializadas para conseguir atender ao conjunto de funções que a BattleLoad deve realizar. Com base neste diagrama, o projeto pode ser desenvolvido de forma modular, permitindo o reuso de blocos em estudos e aplicações futuras.

Figura 30: Diagrama de blocos da carga eletrônica BattleLoad

O bloco de gerenciamento de energia consiste nas fontes de alimentação necessárias para energizar todos os blocos da BattleLoad. Os principais requisitos levantados para este bloco são:

- Entrada de energia DC, entre 9V e 21V, acomodando fontes de alimentação e painéis solares disponíveis no mercado;
- Entrada para bateria externa recarregável, para alimentação do circuito se a fonte DC estiver inoperante;

- A autonomia da bateria deve ser de, no mínimo, 8 horas de duração, compreendendo um dia de medições sem conexão da fonte DC;
- A bateria interna deve ser carregada com a fonte de alimentação plugada;
- As tensões DC para alimentação dos demais blocos devem ser fabricadas com reguladores chaveados, para aumentar a eficiência da conversão de energia e minimizar o calor gerado dentro da BattleLoad.
 - Devem ser tolerados valores CC de saída com até 10% de erro em relação aos nominais;
 - O *ripple* de saída dos sinais CC deve ser de 1% do valor nominal da tensão CC;

O módulo de Processamento e Controle é responsável pelo controle de todos os demais blocos do instrumento. Este bloco é responsável por enviar os sinais de controle para o bloco de carga, indicando a energia que deve ser consumida dos módulos fotovoltaicos, realizando a varredura para extração da curva IV. Também deve partir deste bloco todos os sinais de controle para o dispositivo de armazenamento e para as interfaces de comunicação e aquisição externas. Os requisitos para o módulo de Processamento e Controle são:

- Este bloco deve ser projetado visando reduzir o número de componentes externos para controle dos demais dispositivos;
- Deve utilizar como processador principal um microcontrolador com velocidade suficiente para realizar todas as tarefas de controle, aquisição e comunicação;
 - As curvas e parâmetros devem ser extraídas em intervalos de tempo ajustáveis, com intervalo mínimo de 1 minuto;
 - O tempo de varredura deve ser suficientemente curto para reduzir a interferência de obstáculos nas curvas levantadas;
 - Uma varredura completa em até 5 segundos é considerada aceitável;
- Deve conter, no mínimo, 4 canais de conversor analógico digital, distribuídos da seguinte maneira:
 - 1 para medida de tensão do painel solar;
 - 1 para medida da corrente consumida do painel solar;

- 2 para conexão de sensores externos;
- Deve possuir conversor digital analógico ou sinal modulado em largura de pulso (PWM), com ao menos um canal, para geração do sinal de controle do bloco elementar de carga;
- Deve possuir uma interface de controle do módulo Wi-Fi presente no módulo de comunicações;
- Deve contar com uma interface de controle do dispositivo de comunicação com um PC, por meio de fios, a ser utilizada no módulo de comunicações quando a interface Wi-Fi estiver inoperante;
- Deve possuir uma interface para gravação de depuração do código programado, utilizando um computador PC.

O bloco de carga e a interface com o painel são a parcela de maior interesse deste trabalho. Estes módulos efetivamente consumirão uma quantidade programável de energia do painel solar. A topologia escolhida para este painel determinará as características de desempenho exibidas pela BattleLoad. O bloco de carga deve conter o elemento de carga escolhido, seja um transistor de efeito de campo ou bipolar de junção, bem como o condicionamento necessário para medição do ponto de operação. A interface com o painel contém apenas a interface elétrica para conexão do painel solar. Os requisitos de ambos os blocos são:

- A potência máxima a ser dissipada pelo bloco de carga deve ser 20% superior à do maior painel que se deseja medir, para permitir uma margem segura de operação. Com isto a maior P_{MAX} dissipada deve igual ou superior a 170W;
- Deve-se permitir, sem perda do detalhe da curva IV, medida de painéis de P_{MAX} tão pequena quanto 10W e I_{SC} tão pequena quanto 0,66A;
 - Se a carga escolhida for do modo corrente constante, uma varredura de 50 em 50mA é considerada suficiente;
 - Como os painéis possuem características de tensão parecidas, mesmo com redução da potência, este não é um problema se for escolhida a topologia tensão constante;

- Para medida de tensão do ponto de operação, devem ser toleradas tensões ao menos 20% maiores que V_{OCmax} , isto é 32V ou superior, garantindo uma margem segura de operação.

O bloco de interface com sensores permite a conexão de sensores externos, como de irradiância ou temperatura, que podem ser utilizados para aprimorar o estudo realizado. Os requisitos deste bloco são:

- Deve-se prover uma interface digital, que pode ser serial, I2C ou UART, ou por portas de propósito geral (*General Purpose Input-Output*, ou GPIO) para conexão de um sensor externo com saída digital;
- Devem ser oferecidas duas interfaces analógicas de tensão para conexão de sensores externos com saída analógica.

O bloco de comunicações é responsável por prover interfaces de comunicação externa para que a BattleLoad possa ser conectada a computadores PC, para recuperação dos dados. Os requisitos deste bloco são:

- Deve conter um dispositivo de comunicação Wi-Fi, capaz de operar um ponto de acesso, para que computadores se conectem à rede;
 - Pode-se utilizar 802.11 b, g ou n, desde que o computador PC consiga acessar o ponto de acesso;
 - Deve ser possível acessar o dispositivo a, ao menos, 10 metros da BattleLoad, de modo a permitir recuperação dos dados sem acesso físico ao local de medição;
- Deve-se prover ao menos uma interface serial de comunicação, seja USB, UART ou RS232, para comunicação com o computador PC, caso a interface Wi-Fi esteja inoperante.

O módulo de armazenamento consiste em uma memória não-volátil, responsável pela guarda local dos dados obtidos pela BattleLoad para recuperação futura. Os requisitos para este bloco são:

- Deve armazenar, ao menos, um dia completo de dados, extraídos no menor tempo configurável de intervalo, isto é de 1 em 1 minuto, para recuperação futura;
- Deve ser removível, para que os dados possam ser recuperados diretamente da mídia utilizada, em caso de inoperância de todas as interfaces de comunicação da BattleLoad;
- Deve ser facilmente lida por um computador PC diretamente, sem o projeto de sistemas auxiliares de recuperação de dados;

3.3. Projeto Elétrico

O projeto elétrico da BattleLoad foi desenvolvido respeitando-se os blocos da Figura 30 e os requisitos da especificação. Não é o objetivo esmiuçar o projeto de todos os circuitos e subsistemas nesta seção, mas sim destacar os itens mais relevantes do projeto de cada bloco, que contou com pesquisas de componentes, simulações e análises para a escolha da topologia e definição de valores de componentes.

Durante a definição em cada bloco, foi feita a captura do esquema elétrico daquele módulo, utilizando um software para projetos eletrônicos, chamado Altium Designer. O mesmo software foi utilizado para o desenho do layout da placa de circuito impresso. A biblioteca de componentes do programa foi inteiramente desenvolvida pelo autor deste trabalho, para uso neste projeto.

Por fim, foram exportados os arquivos necessários para construção do protótipo da BattleLoad, máscaras das camadas de circuito impresso, sob a forma de arquivos GERBER e lista de materiais em formato Excel.

O esquema elétrico completo da BattleLoad pode ser visto no APÊNDICE A. As máscaras de circuito impresso estão contempladas no APÊNDICE B. Finalmente, a lista de componentes se encontra no APÊNDICE C. Partes dos circuitos projetados serão repetidas nas seções a seguir por conveniência, para facilitar leitura.

3.3.1. Bloco de Carga

Foi escolhida a topologia corrente constante para o projeto da BattleLoad. Ainda que este modo exiba uma densidade não uniforme de pontos, em comparação com o modo tensão constante, acreditou-se que seria interessante o estudo de como esta

topologia desempenha a tarefa de medição dos painéis solares. O uso desta topologia também impõe desafios à análise de dados, especialmente na obtenção dos parâmetros característicos considerando a não uniformidade de pontos da curva IV.

Marcas e modelos de componentes, bem como valores de resistores e capacitores, variam do circuito visto na simulação para o circuito definitivo. Além dos componentes do circuito básico, já vistos na simulação realizada anteriormente, existem componentes adicionais para condicionamento de sinais e prevenção de oscilações do transistor de efeito de campo.

Para entender como foram determinados valores, marcas e modelos de componentes, será realizada a análise de uma varredura da carga, do tipo que ocorrerá em todas as tomadas de curva IV. Partiu-se da medida da tensão de circuito aberto, com corrente consumida nula, até a medida da corrente de curto circuito, I_{SC} . Em cada ponto de interesse da varredura foram analisados, quando oportuno, os seguintes componentes:

- Amplificador operacional, U3A-D;
- MOSFET de passagem, Q1;
- Resistor de ajuste de corrente, R37;
- Circuitos de apoio (divisores de tensão, filtros, etc.), quando aplicável;

A curva IV começa medindo-se a tensão de circuito aberto, V_{OC} . Para medir esta tensão de forma acurada, é necessário cortar totalmente o consumo de corrente do painel solar pelo circuito. Isto implica em colocar o transistor de efeito de campo, Q1, na região de corte com $V_{GS} < V_{TH}$. Apesar de o transistor estar na região de corte, há uma pequena corrente conduzida entre fonte e dreno, denominada corrente sub-limiar. Para transistores de potência, que é o caso dos empregados em cargas eletrônicas, esta corrente está entre dezenas a centenas de microampères e, na prática, é desprezível para a medida de V_{OC} .

Ainda durante a medida de V_{OC} , deve-se analisar o amplificador operacional, U3A, que está configurado como seguidor de entrada e atua como *buffer* da tensão de controle, V_{CTRL} . Como o amplificador U3 é alimentado positivamente por 12V e negativamente por 0V, a medida de V_{OC} impõe que o operacional escolhido seja *rail-to-rail*. Caso contrário, quando a tensão de controle V_{CTRL} for zero, a tensão de saída

do operacional estará na faixa entre algumas unidades até centenas de milivolts. Caso não se optasse pela utilização de um amplificador *rail-to-rail*, seria necessário suprir uma fonte de alimentação negativa de alguns volts para o operacional.

A tensão do painel solar será medida por um conversor analógico-digital, localizado no bloco de Processamento e Controle. Para compatibilizar a tensão do painel com a faixa de operação de tensão do conversor AD, usa-se um divisor resistivo, realizado pelos resistores R31 e R32. Os valores foram ajustados para que o ganho do divisor seja igual $G_{div} = (33,4)^{-1}$. Imaginando que se utilize 3.3V como tensão de referência para o conversor AD, um cenário comum para dispositivos integrados a microcontroladores, este ganho permite a medida de tensão V_{OC} até:

$$V_{OCmax} = \frac{V_{ref}}{G_{div}} * = \frac{V_{ref}}{G_{div}} = 3,3 * 33,4 \cong 110V \quad (8)$$

O valor de V_{OCMAX} está bastante acima dos 32V especificados, o que garante seguramente a medida de V_{OC} para os painéis da Tabela 2. Considerando um conversor AD de 12 bits, que é o tipo comumente integrado a microcontroladores, podem ser medidas diferenças na tensão dos painéis de até:

$$\Delta V_{painel} = \frac{\Delta V_{ADC}}{G_{div}} * = \frac{V_{ref}}{2^{12} * G_{div}} = \frac{3,3 * 33,4}{4096} \cong 0,03V \quad (9)$$

Foram escolhidos valores altos para os resistores para minimizar a corrente drenada do painel, calculada por:

$$I_{div} = \frac{V_{painel}}{R_{31} + R_{32}} \quad (10)$$

O pior caso desta corrente ocorre na medida de VOC quando este é o maior valor projetado, 110V. Neste caso, a corrente drenada do painel será calculada pela expressão:

$$I_{divmax} = \frac{V_{OCmax}}{R_{31} + R_{32}} = \frac{110}{334k} \cong 0,33mA \quad (11)$$

O valor da corrente, no pior caso, é considerado desprezível, frente à capacidade de corrente dos painéis estudados.

Ainda no circuito de condicionamento para medida de tensão do painel, tem-se o capacitor C21, que forma um filtro passa-baixas com os resistores R31 e R32, para evitar que ruídos induzidos no cabo do painel solar provoquem rebatimento na entrada do conversor AD. O circuito equivalente pode ser visto na Figura 31.

Figura 31: Circuito equivalente do filtro de entrada do painel solar

A frequência de corte do filtro é limitada pela velocidade da varredura que se deseja realizar. Escolheu-se um valor inicial de 470nF, para C21, o que resulta numa frequência de corte de:

$$f_c = \frac{R31 + R32}{2 * \pi * R31 * R32 * C21} = \frac{324k + 10k}{2 * \pi * 324k * 10k * 470n} \cong 35Hz \quad (12)$$

Pode-se, de acordo com a necessidade de desempenho na varredura, diminuir o valor de C21 ou remove-lo completamente do circuito.

Prosseguindo-se a análise de varredura, avança-se a corrente consumida, aumentando-se V_{CTRL} , até que se atinja o valor I_{SC} . O passo de avanço mínimo da corrente consumida está especificado em 50mA. Isto impõe limites à precisão do sinal V_{CTRL} e ao valor do resistor de passagem R37. O menor passo de corrente consumida que se pode obter é calculado pela expressão:

$$\Delta I_{consumida} = \frac{\Delta V_{CTRL}}{R37} \quad (13)$$

Utilizando-se valores menores de R37, obtém-se maiores valores de corrente consumida, ao custo de perda de resolução do sinal de controle. Isto pode prejudicar a extração de curvas IV de painéis de pequeno porte. Maiores valores de R37 diminuem a corrente máxima que pode ser consumida, mas aproveitam melhor a resolução do sinal V_{CTRL} . Isto pode limitar a medida de módulos fotovoltaicos com maior capacidade de corrente.

Considerando que o sinal de controle será produzido por um conversor DA de 12 bits, com tensão de referência de 3,3V, situação bastante comum num periférico de microcontrolador, pode-se calcular, idealmente, o passo da tensão de controle por:

$$\Delta V_{CTRL} = \frac{V_{ref}}{2^{12}} = \frac{3,3}{4096} \cong 0,8mV \cong 1mV \quad (14)$$

Os valores comumente escolhidos para R37 estão na faixa entre $0,01\Omega$ e 1Ω . Como deseja-se medir painéis com até 10A, considerando o uso do conversor DA citado anteriormente, o valor de R37 deve ser limitado por:

$$R37 \leq \frac{V_{CTRLmax}}{I_{SCmax}} = \frac{3.3V}{10A} \cong 0.3R \quad (15)$$

O menor valor para R37 é limitado pela especificação do intervalo da varredura de 50mA em 50mA:

$$R37 \geq \frac{\Delta V_{CTRL}}{\Delta I_{consumida}} = \frac{1mV}{50mA} \cong 0.02R \quad (16)$$

Foi escolhido um valor inicial de $0,1\Omega$ para R37, o que permite até 33A de fundo de escala e uma resolução teórica de 10mA.

Definido o valor de R37 e a ordem de grandeza do passo no sinal V_{CTRL} , é importante uma ressalva sobre o offset de entrada do amplificador operacional U3. Levando-se em conta que o sinal de controle V_{CTRL} e o sinal de medida de corrente I_{SENSE} passam pelos amplificadores operacionais U3A e U3D, respectivamente, deve-se escolher um dispositivo com offset de entrada baixo. Desvios da ordem de

milivolts serão multiplicados por 10 pelo resistor R37, podendo-se tornar desvios de corrente de dezenas de miliampères.

Considerando-se os requisitos no amplificador operacional U3, escolheu-se o dispositivo LMC6484I, da Texas Instruments. Trata-se de um amplificador operacional quadruplo, *rail-to-rail*, com baixo offset de entrada, tipicamente 110uV. O operacional será alimentado com 12V de tensão positiva, permitindo-o acionar transistores com tensão de limitar mais altas, caso dos dispositivos de potência.

Para escolha do transistor de efeito de campo utilizado na BattleLoad, é importante entender qual a região de operação predominante do transistor durante a varredura de V_{OC} a I_{SC} . O gráfico da Figura 32 exibe uma simulação, feita no LTSpice IV, da evolução das tensões V_{DS} e V_{GS} no transistor de efeito de campo Q1, durante uma varredura em um painel de 30W. O circuito simulado já possui os componentes selecionados até o momento na BattleLoad, mas utiliza um transistor de efeito de campo genérico, com tensão de limiar $V_{TH} = 6,4V$. O gráfico mostra a varredura de V_{CTRL} até 0,5V, o que significa ultrapassar bastante a corrente de curto circuito do painel, próxima de 1,8A.

Figura 32: Evolução de V_{DS} e V_{GS} e faixas de operação de Q1 ao longo da varredura

Próximo da região de I_{SC} e acima, o transistor opera na região de triodo, ou ôhmica, na qual a resistência à passagem da corrente, definida como R_{DSon} , é muito baixa, da ordem de dezenas a centenas de miliohms. Nesta região, a corrente circulante é determinada pelo resistor equivalente formado pela associação série de R37 e

R_{DSon} . A potência dissipada no transistor é muito baixa e não há aquecimento significativo do dispositivo.

No entanto, nota-se que durante a maior parte da varredura o transistor opera em sua região de saturação. Na saturação a corrente I_D depende de V_{GS} segundo a equação:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = K (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (17)$$

Segundo Sedra e Smith (2004), o MOSFET saturado se comporta como uma fonte de corrente, cujo valor é controlado, de maneira não linear, pela tensão V_{GS} . A resistência entre dreno e fonte é consideravelmente mais alta do que na região de triodo. Como as correntes consumidas do painel são relativamente altas, há grande dissipação de potência no MOSFET, que aumenta consideravelmente sua temperatura.

Segundo Sattar e Tsunakov (2007), o aumento da temperatura de operação na região de saturação, pode levar a um cenário de instabilidade eletrotérmica, concentrando toda a corrente conduzida pelo MOSFET em um filamento do corpo do dispositivo, desenvolvendo pontos de concentração de calor (em inglês *hot spots*). Isto pode levar ao acionamento de transistores bipolares parasitas no MOSFET e causar a destruição do dispositivo.

Ainda de acordo com Sattar e Tsunakov (2007), deve-se levar em conta a área de operação segura na região de polarização direta (em inglês, *Forward Biasing Safe Operating Area*, FBSOA) como figura de mérito para escolha do transistor de potência. Deve-se escolher um transistor que tenha esta área estendida para operação na região de saturação.

O transistor escolhido foi o modelo IXTH30N50L2, da série Linear L2, do fabricante IXYS. Esta série de transistores ganha seu nome pois é projetada para trabalhar na região de saturação, denominada confusamente por região linear por diversos fabricantes do mercado. O gráfico da FBSOA deste transistor, extraído de seu *datasheet*, é mostrado na Figura 33.

Figura 33: FBSOA para o transistor IXTH30N50L2. Fonte: IXYS (2014)

Deve-se observar a curva DC da FBSOA para se realizar a estimativa do pior caso de ponto de operação. Considerando que a maioria dos painéis exibem V_{MAX} próximos a 20V, podem ser medidas correntes I_{MAX} de até 10A, o que equivale a P_{MAX} de 200W, acima dos 170W especificados. Logicamente, deve-se utilizar um dissipador de calor parafusado ao corpo do transistor, para evitar que o excesso de temperatura destrua o dispositivo.

Um circuito de condicionamento de entrada formado por R33, R35, C22 e JP1 foi colocado, caso se deseje optar por um sinal V_{CTRL} produzido por conversor DA ou por sinal modulado em largura de pulso. Inicialmente, apenas R35 e JP1 serão populados, pois deseja-se utilizar V_{CTRL} produzido por um conversor DA. JP1 permite contornar o circuito de condicionamento, enquanto R35 atua como um resistor de *pull-down*, para evitar o acionamento do circuito de carga caso a linha V_{CTRL} fique em modo de alta impedância. Isto é comum em sistemas microcontrolados enquanto o dispositivo é reiniciado ou tem sua memória reprogramada.

Os demais componentes empregados são utilizados para evitar a oscilação do circuito de carga. R34 é utilizado para limitar a corrente de carga da capacitância de porta do transistor Q1. O capacitor C25 é utilizado apenas se o resistor R37 tiver características indutivas, o que pode provocar oscilações no circuito de carga.

3.3.2. Processamento e controle

O módulo de processamento e controle deve embarcar inteligência suficiente para realizar o controle do circuito de carga, adquirir os pontos da curva IV, realizar análise das características do painel e gerenciar os dispositivos de armazenamento e comunicação para disponibilizar os dados extraídos para consulta futura.

A escolha do microcontrolador, componente central deste módulo, visou a redução da quantidade de componentes para realizar as tarefas necessárias. Em outras palavras, buscou-se um processador cuja disponibilidade de periféricos minimizasse o uso de componentes dedicados para cada função. Esta prática reduz erros de captura de esquemático e layout, bem como facilita o processo de compra da lista de materiais. Também são minimizadas as dificuldades na escrita do software, na medida em que muitos fabricantes de microcontroladores incluem rotinas para controle dos periféricos de seus dispositivos.

O processo de obtenção da curva IV e análise dos parâmetros são tarefas simples de controle e localização de pontos numa curva e, portanto, o poder de processamento não foi considerado fator determinante para balizar a escolha do microcontrolador.

Foi escolhido um microcontrolador de arquitetura ARMv7m, a mais recente da ARM para microcontroladores. A família escolhida foi a Cortex-M3, que usualmente conta com dispositivos mais complexos e dotados de mais dispositivos que a linha M0. O modelo escolhido foi o STM32F207, do fabricante STMicroelectronics, recomendado para aplicações médica, industrial e de consumo. O desempenho do processador, 150DMIPS em 120MHz é muito acima do necessário para executar as tarefas que a BattleLoad pretende desempenhar. No entanto, os periféricos disponíveis, como conversor AD, conversor DA, interface SDIO e múltiplas portas seriais, determinaram a escolha deste dispositivo. O diagrama de blocos do STM32F207 pode ser visto na Figura 34.

O dispositivo possui diversos formatos de encapsulamento disponíveis. A variante mais simples, com 100 pinos, STM32F207V, foi escolhida, pois a oferta de periféricos e interfaces de comunicação já é considerada suficiente para uso na BattleLoad. Nas descrições a seguir, quando o número de um pino for mencionado, deve-se considerar a numeração na variante escolhida.

Algumas características do STM32F207 são particularmente interessantes para o desempenho das funções da BattleLoad, a saber:

- Memória RAM de 128 Kbytes, o que permite a alocação de grandes *buffers* para comunicação e tomada dos dados de curva IV;
- 2 conversores DA de 12 bits que, com tensão de referência de 3.3V, garante precisão de unidades de mV;
- 3 conversores AD de 12 bits, multiplexados em 24 canais, capazes de atingir taxas de amostragem tão grandes quanto 6 milhões de amostras por segundo;
- Interfaces USB *High Speed* e *Full Speed* para conexão com computadores e outros sistemas embarcados;
- Interface SDIO, para gravação em cartões SD, com largura de barramento configurável para 1 bit, 4 bits ou 8 bits de dados;
- 4 portas seriais USART e 2 UART, para conexão com outros dispositivos embarcados e computadores;

Discute-se a seguir, de forma breve, alguns pontos importantes do projeto do bloco de processamento e controle, analisando-se os periféricos do STM32F207 e suas características.

O sinal V_{CTRL} , que controlará o módulo de carga, deve ser gerado pelo conversor DA do STM32F207. Trata-se de um periférico com dois canais de saída, configurável para operar com resolução entre 8 e 12 bits. A tensão de referência V_{REF} é obtida por meio do pino 21 do processador e é compartilhada com o conversor AD. Seus valores podem estar entre 1,8V e a tensão de alimentação analógica, de 3,3V.

Apenas um canal do conversor DA será utilizado para este projeto, pois apenas um bloco de carga será utilizado. Caso fosse utilizado outro bloco de carga para dobrar a potência consumida do painel, este segundo módulo poderia ser controlado independentemente pelo remanescente canal do conversor DA.

A saída do conversor pode ser conectada a um buffer de saída interno do microcontrolador para permitir correntes de saída maiores, com cargas de no mínimo 5k Ω . No entanto, neste modo de operação a saída de tensão parte de 200mV, o que

não é tolerável, especialmente considerando o valor do resistor R37, de ajuste de corrente com valor de 0.1Ω .

Figura 34: Diagrama de blocos do microcontrolador STM32F207.

Fonte: STMicroelectronics (2014)

Desligando-se o *buffer* de saída interno, podem ser acionadas impedâncias de no mínimo 15k Ω , desde 0V até a tensão V_{REF} . Deve-se garantir portanto que o valor do resistor R35 seja de, no mínimo, 15k Ω . A impedância de entrada do operacional U3 é da ordem de teraohms e não interfere na operação do conversor DA.

Para medir o ponto de operação do painel solar, bem como prover interfaces analógicas de expansão, serão utilizados conversores analógico-digitais (AD). O STM32F207 possui três conversores AD de 12 bits, que funcionam pelo método de aproximações sucessivas (SAR). Estes três conversores independentes podem realizar aquisição de até 16 canais analógicos, bem como de duas tensões de referência produzidas internamente pelo chip e o valor da temperatura microcontrolador, obtido por um sensor dedicado. O diagrama de blocos de cada conversor, mostrado na Figura 35, auxilia na compreensão de como este periférico está organizado internamente.

Os conversores podem ser configurados para operação em 6, 8, 10 ou 12 bits. Também podem ser programados para converter uma única vez ou continuamente, fazendo o uso de acesso direto à memória (*Direct Memory Access*, ou DMA) para atualizar os valores.

Dependendo do valor do sinal ADCCLK, o tempo de conversão das amostras pode ser configurado para números tão baixos quanto 0.5 μ s o que, em teoria, permite uma taxa máxima de 2 milhões de amostras por segundo. Os três conversores AD podem ser combinados para operar de maneira intercalada na amostragem de um único canal, proporcionando uma taxa máxima de 6 milhões de amostras por segundo.

Para a tomada da curva IV, os sinais de interesse são todos em corrente contínua (CC), portanto considera-se a resolução vertical do sinal medido mais importante do que taxa de amostragem. Portanto, o desempenho temporal dos conversores AD disponíveis no STM32F207 é muito superior à necessidade para a extração da curva IV de um painel solar. No entanto, este excesso de desempenho do periférico torna possível melhorar a resolução do sinal adquirido, reduzindo o ruído de quantização na conversão por meio do uso da técnica de sobreamostragem.

Figura 35: Diagrama de blocos de um ADC do STM32F207.
Fonte: STMicroelectronics (2014)

A técnica de sobreamostragem, ilustrada na Figura 36, consiste em amostrar o sinal de interesse a uma taxa superior à taxa de Nyquist, e depois realizar filtragem e decimação do sinal digital. O fator M é um número inteiro, chamado de razão de sobreamostragem. Após a amostragem, o sinal $\hat{x}[n]$ deve sofrer decimação de $1/M$.

Figura 36: Conversão AD com superamostragem e decimação.
Fonte: Oppenheim e Schaffer (2014)

De acordo com Oppenheim e Schafer (2014), o aumento do fator M diminui a sobreposição entre os espectros do ruído de quantização e do sinal de interesse, o que permite melhorar a relação sinal ruído de quantização. Segundo Silicon Labs (2013), esta estratégia melhora o número efetivo de bits do conversor AD, inclusive em aplicações nas quais se desejam medir tensões estáticas, próximas de CC, como é o caso da tomada de curva IV. A equação que relaciona o número M com a taxa de bits que se pode conseguir é dada pela equação:

$$M = \frac{f_{os}}{f_s} = 4^b \quad (18)$$

O valor f_s é a frequência de amostragem originalmente necessária, f_{os} é a frequência de sobreamostragem necessária e b é a quantidade de bits adicionais que se desejam obter. Considerando que não será usado o modo intercalado do conversor AD do STM32F207, isto é, que as amostras terão taxa de amostragem de 2 milhões de amostras por segundo, é possível obter até 10 bits adicionais de resolução por meio desta técnica.

O STM32F207 possui uma referência interna de 1.21V, conectada ao ADC, que pode ser medida para determinar o valor correto da tensão de referência V_{REF} , teoricamente igual à tensão V_{DDA} e igual a 3,3V. O software de aquisição de dados pode tirar proveito desta funcionalidade para corrigir o valor das amostras adquiridas, o que elimina a necessidade de calibração externa.

O processador é alimentado com tensão de 3,3V, que deve ser fornecida pelo circuito de gerenciamento de energia. Os capacitores de desacoplamento para as linhas de alimentação seguiram a estratégia recomendada pelo fabricante, no *datasheet* do dispositivo.

Foram incluídos dois botões, S2 e S3 e quatro LEDs, D19-22 para prover um mecanismo básico de interação com o processador, auxiliando na depuração do sistema. Uma porta de expansão, não especificada, foi implementada por meio do conector P7 e utilizada ocasionalmente, para depuração do sistema.

3.3.3. Comunicações

A seção de comunicações, representada pelo diagrama de blocos da Figura 37, compreende os circuitos utilizados pela BattleLoad para interface com sistemas externos, como computadores PC ou outros dispositivos embarcados. Três vias previstas na especificação foram utilizadas para esta finalidade: uma porta USB (Universal Serial Bus), a comunicação Wi-Fi, utilizando um módulo dedicado que se conecta a uma porta serial do STM32F207, e uma interface serial de expansão, ligada diretamente a um conector modular de saída. Uma interface para rede Ethernet também foi contemplada no projeto, embora não fosse requerida na especificação, como alternativa caso as outras formas estejam inoperantes.

O STM32F207 conta com duas portas USB 2.0, uma *Full Speed* (FS) e outra *High Speed* (HS). Foi utilizada a porta FS, para minimizar o uso de componentes externos, pois o modo HS requer o uso de um chip transceptor externo para a camada física. No modo FS, os pinos do processador podem ser ligados quase que diretamente ao conector USB, passando apenas por resistores de casamento e componentes de proteção. A velocidade nominal da porta é de até 12 megabits por segundo, considerado mais que suficiente para transmitir os dados das curvas IV, a cada minuto.

Figura 37: Diagrama de blocos do módulo de comunicações

O esquema de ligação ao conector mini USB tipo B, pode ser visto na Figura 38. São necessários diodos supressores de transiente (*transient voltage supressor*, ou TVS) para evitar que descargas estáticas danifiquem a porta. Também são necessários resistores série para limitar corrente de carga de capacitância do barramento. Para detecção do dispositivo por um computador, é requerido um resistor de *pull-up* de $1,5k\Omega$ para 3,3V é requerido na linha D+.

Figura 38: Ligação ao conector mini USB tipo B

A interface Ethernet é opcional e só deve ser ativada, na prática, se a operação das demais interfaces for problemática. O STM32F207 requer o uso de um transceptor para a camada física, que pode ser conectado utilizando os modos MII (*Medium Independent Interface*) ou RMII (*Reduced MII*). Por utilizar menos pinos do processador, o que inviabilizaria outras interfaces de comunicações necessárias, o modo RMII foi escolhido.

O chip transceptor escolhido foi o LAN8710 do fabricante Microchip. Para minimizar a contagem de componentes optou-se por utilizar um conector de rede com transformador integrado, modelo J0011D01BNL, do fabricante PULSE. O LAN8710 deve ser alimentado com tensão de 3,3V.

A principal forma de comunicação prevista para o medidor é a rede sem fio Wi-Fi, o que permitirá que o medidor funcione com apenas um cabo, conectado ao painel solar. Esta funcionalidade é provida pelo módulo WF121, do fabricante Bluegiga, mostrado na figura. O módulo é compatível com os padrões Wi-Fi 802.11b/g/n e capaz de velocidades de comunicação até 3.5Mbps. Possui internamente todo o software necessário para comunicação com computadores, incluindo o protocolo de rede TCP/IP. Este software vem programado em um microcontrolador PIC24F, da Microchip, interno ao módulo. O WF121 deve ser alimentado com tensão de 3,3V.

Figura 39: Foto do módulo Wi-Fi WF121, da Bluegiga.
Fonte: Bluegiga (2014)

A conexão entre o WF121 e outros sistemas computacionais pode ser feita de várias formas, a saber:

- Porta serial UART, com controle de fluxo RTS/CTS;
- Barramento SPI;
- Barramento I2C;
- Porta USB;

A opção de qual barramento será utilizado para comunicação deve ser feita por meio de configuração do software interno do WF121, sendo a porta UART a padrão configurada de fábrica. Como o microcontrolador STM32F207 tem várias portas

UART disponíveis, definiu-se este barramento como o mais conveniente para comunicação, pois minimiza o número de etapas de configuração do sistema. Caso se escolhesse outro formato de comunicação, seria preciso acessar a porta UART com outro dispositivo e trocar a configuração. A porta USART2 do STM32F207 foi conectada à porta UART1 do WF121. Foram utilizados os sinais RTS e CTS para controle de fluxo.

A interface serial de expansão foi realizada disponibilizando-se diretamente os sinais da USART3 do STM32F207 em um conector modular, tal como mostra a figura. Isto permite a conexão direta com outros sistemas computacionais dotados desta interface, como modems GSM, computadores embarcados ou outros microcontroladores. Também é possível o uso de transceptores RS232 ou RS485 para conexão com sistemas e barramentos usados em automação. Foram utilizados indutores série de casamento para os sinais, bem como diodos TVS, para proteger contra transientes de tensão.

Figura 40: Conexão da USART3 do STM32F207 ao conector modular.

3.3.4. Armazenamento

O armazenamento local das medidas requer o uso de memória não volátil, para que os dados estejam disponíveis mesmo após o desligamento da BattleLoad. No entanto, a memória flash disponível no STM32F207 é muito pequena para guardar registros detalhados de tensão e corrente do painel, bem como as análises dos pontos notáveis da curva IV, por longos períodos. A capacidade de memória necessária para cada curva, S , em bytes, é dada por:

$$S = \frac{B * (2 * N + 5)}{8} \quad (19)$$

Na equação anterior, B é a quantidade de memória necessária, em bits, para guardar cada valor de tensão, corrente ou ponto notável da curva IV, e N é o número de pontos da curva IV. Multiplica-se N por dois pois, para cada ponto, guardam-se tensão e corrente. Soma-se 5 ao fator 2*N, pois cada curva vem acompanhada de suas características notáveis - V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} .

Uma rápida estimativa da mínima capacidade necessária pode ser feita atribuindo-se $B = 16$, pois as amostras adquiridas pelo conversor AD têm 12 bits de tamanho. Considerando uma varredura de 0 a 10A, de 50 em 50mA, tem-se $N = 200$, e com isto S é calculado por:

$$S = \frac{16 * (2 * 200 + 5)}{8} = 810 \text{ bytes} \quad (20)$$

Caso se deseje guardar um dia inteiro de medições, de um em um minuto, a quantidade de memória necessária é multiplicada por 1440. Isto eleva a quantidade de memória necessária para valores acima de 1 megabyte, excedendo a quantidade de memória Flash disponível no STM32F207.

Como o microcontrolador possui uma interface SDIO, optou-se pelo uso de cartão micro SD para realizar o armazenamento das curvas. Nesta forma de armazenamento há possibilidade de se utilizar cartões com quantidade de memória bastante superior à disponível no processador principal. Com o uso de cartões SD, também é possível valer-se de sistemas de arquivos, como o FAT, e organizar as informações em pastas e arquivos texto devidamente nomeados. Isto facilita importação dos dados adquiridos, já que os arquivos com dados no modo texto podem ser abertos em qualquer editor de texto convencional, programa de planilhas, como Excel, ou programas de análise matemática, como Matlab ou Mathematica.

A conexão SDIO com o STM32F207 pode ser feita com diferentes larguras de bits no barramento de dados. Os modos suportados são com 1 bit (que é o habilitado por padrão), 4 bits e 8 bits, com desempenho proporcional à largura do barramento. A velocidade obtida no modo 1 bit é suficiente para o armazenamento dos dados no cartão. No entanto, para evitar problemas com a camada de software, decidiu-se

usar o esquema recomendado pelo fabricante do processador e utilizado nos kits de desenvolvimento, com 4 bits de largura do barramento. Dessa maneira é possível utilizar diretamente a biblioteca de software desenvolvida pela STMicroelectronics. O esquema de ligação do processador STM32F207 com o conector para cartões micro SD pode ser visto na Figura 41.

Figura 41: Ligação do STM32F207 com o conector para cartão SD.

3.3.5. Interface com Painel solar

A interface com o painel solar a ser medido é feita por um conector modular fêmea de 2 vias, modelo EDSTLZ950/2, do fabricante On Shore Technology, mostrado na Figura 42, juntamente com seu macho correspondente. Este conector, designado como P10 na BattleLoad, é utilizado frequentemente em aplicações de automação e permite a passagem de 15A por seus terminais, com 300V de tensão entre os terminais, atendendo as especificações.

A compatibilização com outros conectores, como por exemplo os usados em painéis solares, pode ser feita usando pequenos cabos, denominados *jumpers*, adaptadores. Faz-se um cabo, com o modular macho numa ponta e o conector que se deseja utilizar na outra ponta. Conecta-se o painel solar no terminal apropriado e o modular macho no conector fêmea, localizado na placa.

Figura 42: Conector modular fêmea de 2 vias, à esquerda, com seu correspondente à direita.
Fonte: Digikey (2015)

3.3.6. Interface com Sensores

Há duas interfaces disponíveis para conexão de sensores externos à BattleLoad, uma digital e outra analógica. A interface digital permite a ligação de sensores com interface de barramento I²C ao processador STM32F207. Este é o caso de diversos sensores de temperatura e acelerômetros, entre outros dispositivos. O esquema de ligação desta porta pode ser visto na Figura 43. São oferecidas tensões de alimentação de 5V e uma de 3,3V para os sensores externos. São utilizados diodos TVS para proteção e indutores de filtro em série, para condicionamento do sinal digital. Um conector modular de 6 pinos é utilizado como interface externa.

Figura 43: Porta de expansão I2C para sensores externos.

A interface analógica conecta sensores diretamente a canais do conversor AD disponível no STM32F207. Estão disponíveis dois canais, que medem tensões de 0 a 3,3V, podendo ser conectados sensores como medidores de irradiância. São oferecidas tensões de alimentação de 5V e uma de 3,3V para os sensores externos. Deve-se atentar que os canais do conversor AD não aceitam tensões acima de 3,3V

e a conexão de sinais acima de 3,6V pode danificar o microcontrolador. O esquema de ligação desta porta pode ser visto na figura. Um conector modular de 6 pinos é utilizado como interface externa.

Figura 44: Porta de expansão analógica para sensores externos.

3.3.7. Gerenciamento de energia

Para a compreensão do projeto do módulo de Gerenciamento de energia, é importante, primeiramente, listar as tensões necessárias ao funcionamento dos demais blocos da BattleLoad e estudar seu consumo de corrente, no caso de máxima atividade. A tabela lista os principais consumos em cada tensão de alimentação, com informações obtidas dos manuais dos dispositivos. Foram considerados sempre os maiores consumos possíveis com cada dispositivo em operação normal, isto é, sem condições de curto circuito ou *latch-up*.

Tabela 5: Requisitos de consumo dos circuitos da BattleLoad

Tensão	Dispositivo	Consumo Máximo	Corrente Total
3,3V	STM32F207	120mA	925mA
	WF121	450mA	
	LAN8710	55mA	
	Cartão SD	200mA	
	Sensores Externos	100mA	
5V	Sensores Externos	100mA	100mA
12V	LMC6484I	4mA	4mA

Um diagrama de blocos das fontes de alimentação é mostrado na Figura 45. O sistema pode ser alimentado tanto com uma fonte de tensão externa quanto por uma bateria. Conforme especificado, deve-se armazenar energia suficiente na bateria para manter o instrumento funcional por 8 horas, em caso de ausência prolongada da fonte de tensão externa.

Figura 45: Diagrama de blocos do módulo de gerenciamento de energia.

Optou-se pelo uso de reguladores chaveados, para obter eficiência mais alta e permitir tanto aumentar quanto diminuir tensão. Reguladores lineares tem eficiência mais baixa, da ordem de 40 a 50%, contra 80 a 90% dos chaveados, além de apenas poderem produzir tensões de saída menores que a de entrada. Reguladores lineares também dissipam muita potência sob forma de calor, o que é indesejável para um dispositivo que pode ficar sob forte radiação solar. Dentre os reguladores chaveados disponíveis, optou-se por dispositivos de alta frequência de chaveamento, superiores a 1MHz, para reduzir o tamanho ocupado pelos circuitos. A entrada de tensão CC vinda da fonte externa entra em dois reguladores, um responsável pela carga da bateria e outro que fornece a energia necessária para os demais circuitos. Quando a alimentação externa está presente, ambos os reguladores funcionam, um alimentando o circuito de medição e outro carregando a bateria. Removida a fonte externa, ambos os reguladores se desligam e a bateria assume a alimentação do medidor.

O circuito para carga da bateria é um regulador chaveado, U4, com topologia Buck, modelo LT3652, da Linear Technology. Este conversor é especificamente projetado para carga de baterias a partir de painéis solares ou outras fontes CC externas.

É possível utilizar o LT3652 para a carga de baterias de diferentes químicas, por meio do ajuste da tensão de flutuação da bateria, na qual a corrente de carga é drasticamente reduzida. Por conta da densidade de energia e facilidade de compra e substituição, foram utilizadas baterias de íons de lítio (Lilon), com tensão média de

3.7V, do mesmo tipo utilizada em *tablets* e telefones celulares. É importante notar que, enquanto a tensão média é de 3,7V, a tensão de flutuação deve ser ajustada para 4,2V para atingir a carga máxima disponível. O LED D16 foi disponibilizado na placa para identificar quando a bateria está completamente carregada. Este LED está conectado ao pino 4 do LT3652 e deve estar aceso enquanto a bateria carrega, apagando-se quando a carga está completa.

A tensão de entrada também é fornecida a um regulador chaveado, U6, de topologia Buck, modelo RT8293B, do fabricante Richtek, capaz de fornecer até 3A de corrente. A tensão de saída do regulador foi ajustada em 5V, maiores que os 4,2V da bateria, para que, na presença alimentação CC externa, U6 forneça a energia para os demais módulos da BattleLoad. Portanto, mesmo que a bateria esteja completamente carregada, a alimentação será integralmente fornecida pelo RT8293B. Na ausência de alimentação CC externa, ambos os dispositivos, U4 e U6 se desligam e a bateria fornece energia aos demais circuitos da BattleLoad.

A tensão vinda de U4 ou da bateria entra em um regulador chaveado de topologia *Boost*, U5, modelo TPS61040, do fabricante Texas Instruments. Este conversor, responsável pela geração da tensão 12V, aceita de 1.8V a 6V na entrada e gera até 28V na saída, com correntes de 400mA. É recomendado para o uso com baterias, o que o torna apropriado para esta aplicação.

As outras duas tensões, 5V e 3,3V são produzidas pelos dispositivos U7 e U8, também reguladores chaveados Buck, modelo RT8293B, utilizando como entrada a tensão de 12V produzida pelo TPS61040. Apesar de o RT8293 conseguir produzir até 3A em sua saída, o consumo de corrente dessas linhas, conforme já visto, é bem menor.

Todo o projeto das fontes, com escolha de capacitores de desacoplamento, indutores e filtros de compensação, foi realizado respeitando-se as recomendações dos fabricantes.

A estimativa inicial de consumo de corrente considera as 3 fontes, 3,3V, 5V e 12V, como sendo entidades totalmente independentes. No entanto, no projeto realizado, a fonte de 12V é responsável por suprir a de 3,3V e 5V. É necessário portanto rever o consumo em cada regulador para garantir que o projeto está corretamente dimensionado. Para realizar esta estimativa, a corrente de entrada necessária em cada regulador foi calculada a partir da corrente de saída, por meio da seguinte expressão:

$$I_{entrada} = \frac{I_{saida} * V_{saida}}{V_{entrada} * \eta_{regulador}} \quad (21)$$

Na expressão anterior, o termo $\eta_{regulador}$ representa a eficiência do regulador chaveado e foi considerada 80% em todos os casos. Este valor é compatível com as informações encontradas nos manuais dos dispositivos. As contas foram realizadas para todos os reguladores, até a entrada, para estimar a corrente necessária. A Figura 46 repete o diagrama de blocos mostrado inicialmente, mas com as estimativas de corrente em cada ramo. A corrente de 1,6A expressa no ramo da bateria é exigida caso esta seja responsável por alimentar o medidor. Neste caso foi considerada a tensão média de 3,7V. A corrente no ramo do primeiro regulador RT8293B, alimentado pela entrada CC, representa a corrente de alimentação exigida em funcionamento com uma fonte externa conectada. A corrente de 2A do LT3652 representa a corrente ajustada para carga de bateria e é próxima de zero com a bateria completamente carregada. Uma perda de 0,2V foi considerada em cada diodo Schottky utilizado no nó de entrada do TPS61040, o que é razoável observando-se os valores dos manuais dos dispositivos empregados.

A fonte externa CC pode ter 12V a 23V, sendo este último valor a maior tensão suportada pelo RT8293B. Alimentando-se a BattleLoad com 12V, a corrente fornecida deve ser de, ao menos, 1,5A, enquanto que com 23V a corrente necessária cai para 0,8A.

Figura 46: Módulo de gerenciamento de energia, com correntes calculadas.

Para estimativa da capacidade de bateria de Lilon, pode-se utilizar o número de 1,6A calculado para a composição da Figura 46. No entanto, este número quase sempre não representa o consumo médio efetivo do sistema que, geralmente, é bem menor do que o máximo, especialmente se forem usadas técnicas de economia de energia. Isto é possível colocando os dispositivos em modo de baixo consumo enquanto não houver medição de curva IV, o que ocorre em grande parte do minuto de intervalo. Portanto, para estimar a capacidade da bateria, foi utilizada uma corrente de um quarto do valor máximo, ou seja 400mA. Com isso, para obter 8 horas de autonomia, foi empregada uma bateria de 3200mAh, do mesmo tipo que se usa em *tablets* e outros computadores portáteis.

3.3.8. Captura de esquema elétrico e layout de circuito impresso

O esquema elétrico e layout da BattleLoad foram desenvolvidos utilizando o software Altium Designer, versão 13, ou AD13. Uma biblioteca de componentes eletrônicos foi desenvolvida especialmente para este trabalho, incluindo resistores, capacitores, indutores, conectores, circuitos integrados, entre outros dispositivos.

A BattleLoad possui uma placa com 4 camadas, com empilhamento mostrado na Figura 47. Este tipo de empilhamento permite que se tenha duas camadas para sinal, isto é, as duas faces externas, uma camada interna exclusiva para a distribuição de energia e um plano de terra, para minimizar a impedância oferecida à corrente de retorno dos dispositivos.

Figura 47: Empilhamento das camadas na BattleLoad.

As trilhas para o circuito de carga são bastante grossas, com 4 milímetros de largura, mostradas em azul na Figura 48. Isto foi feito para minimizar a queda de tensão com a corrente circulante do painel solar. Também foi feito um corte no plano terra, mostrado em verde para evitar que a corrente de retorno do painel se espalhe pelo restante do plano.

Figura 48: Trilha VDUTIN de 4mm entre conector de entrada e o transistor Q1.

Após a captura de esquema elétrico e layout de circuito impresso, foram exportadas as máscaras de circuito impresso. Estas máscaras foram utilizadas para realizar o pedido de construção da placa de circuito impresso da BattleLoad.

O Altium Designer 13 também permite a associação de dispositivos utilizados em um projeto ao estoque de fornecedores de componentes eletrônicos, como DigiKey ou Mouser. Foram utilizadas associações de componentes com o catálogo da DigiKey, o que permitiu a importação direta da lista de materiais pelo site do fornecedor.

3.4. Prototipagem

De posse das máscaras de circuito impresso e da lista de materiais, foram encomendados os materiais para construção de três protótipos da BattleLoad. As placas foram pedidas ao fabricante Griffus, localizado em Cotia, no estado de São Paulo. O fabricante foi orientado a utilizar cobre de espessura 2 Oz. nas camadas externas, para minimizar a resistência das trilhas, sobretudo as que conduzem alta corrente, como as do bloco de carga. A placa nua pode ser vista na Figura 49.

Figura 49: Placa nua da BattleLoad.

A montagem da placa foi feita manualmente, utilizando estações de Solda e retrabalho. Uma das placas, parcialmente montada, pode ser vista na Figura 50.

Figura 50: BattleLoad parcialmente montada.

3.5. Software de Medição

O *software* embarcado, ou *firmware*, de medição da BattleLoad, roda no processador STM32F207 e é responsável pela execução das tarefas de medição da BattleLoad, que envolvem controle de dispositivos, medição de parâmetros, análise de dados e comunicações. As principais tarefas são:

- Controle do bloco de carga;
- Medição do ponto de operação;
- Varredura e extração da curva IV;
- Análise dos pontos característicos: V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} , I_{MAX} ;
- Armazenamento dos dados no cartão micro SD;
- Controle das comunicações Wi-Fi e USB para recuperação das curvas remotamente;

O *firmware* foi escrito em linguagem C, no software IAR *Embedded Workbench* e segue um paradigma comum ao software embarcado em microcontroladores: a utilização de um bloco de inicialização, contendo todas as rotinas de configuração do sistema, seguido por um loop infinito de operação, contendo as funções de operação dos módulos. Este modelo de programação está mostrado, de forma esquemática e resumida, no código da figura, escrito em pseudocódigo baseado em C.

```

1  ///////////////////////////////////////////////////////////////////
2  //
3  //  Paradigma do firmware BattleLoad
4  //  Moreno Addad Hassem - 2014
5  //
6  ///////////////////////////////////////////////////////////////////
7
8  // Definição de símbolos pertinentes
9  #define SIMBOLO_1 20
10 #define SIMBOLO_2 ABCD
11
12 // Inclusão de bibliotecas necessárias ao funcionamento
13 // do firmware
14 #include <....>
15
16 // Função principal
17 void main ()
18 {
19     // Inicialização de módulos. Estas funções podem conter
20     // parâmetros de entrada
21     Init_Módulo_1();
22     Init_Módulo_2();
23     ...
24
25     // Loop infinito de operação. O programa jamais deve
26     // sair desta condição
27     while(1)
28     {
29         // Funções de operação ou processos. Nem todos os
30         // módulos precisam ter um processo rodando no loop
31         Process_Módulo_2();
32         Process_Módulo_3();
33         ...
34     }
35 }

```

Figura 51: Paradigma de codificação do firmware da BattleLoad.

Cada processo rodando dentro do loop infinito deve realizar suas funções e retornar sem bloquear a execução do processador. Evitando a execução de código bloqueante, é possível garantir requisitos de temporização dos módulos dentro do loop. Se uma tarefa bloqueasse a execução, por exemplo esperando um sinal

externo para prosseguir, outras tarefas dentro do loop teriam de esperar a liberação do processador para prosseguir, ficando condicionadas a um sinal que não lhes diz respeito. Esta limitação poderia facilmente prejudicar uma tarefa crítica com temporização estrita, por exemplo, verificar a presença de dados em um dispositivo a cada 10 milissegundos.

A Figura 52 mostra um diagrama em camadas do *firmware* utilizado para tomada de dados. As camadas coloridas em azul escuro representam *softwares* obtidos de terceiros, devendo ser brevemente comentados. Os demais blocos são contribuições deste trabalho e devem ser explicados com maiores detalhes.

Figura 52: Diagrama em camadas do *firmware* da BattleLoad.

3.5.1. Camada 1 – *Software* Básico

A camada de software básico é composta das rotinas de acesso ao hardware e de funções essenciais de sistema. O controle do hardware é provido pela *ST Peripheral Library*, desenvolvida pela STMicroelectronics, fabricante do microcontrolador STM32F207. As demais funções essenciais de sistema foram desenvolvidas para este trabalho e compreendem um gerenciador de máquinas de estado e uma biblioteca para manipulação de buffers FIFO alocados estaticamente em memória.

3.5.1.1. *ST Peripheral Library*

Para utilizar os recursos de *hardware* do microcontrolador, é necessária a manipulação de inúmeros registradores para configuração de cada periférico. Geralmente uma biblioteca contendo as rotinas para configuração dos registradores, é feita para cada microcontrolador, implementada do zero pelo desenvolvedor do

firmware. Este desenvolvimento consome muito tempo de depuração em bancada, até que se alinhe a documentação do dispositivo com o software escrito.

No caso do STM32F207, a STMicroelectronics disponibiliza esta biblioteca de software básico gratuitamente, sob o nome de *ST Peripheral Library*. Uma interface de programação (*application programming interface*, ou API), contendo estruturas de dados e funções de inicialização e acesso aos dispositivos, é disponibilizada em ANSI-C. Todos os periféricos do STM32F207 utilizados no projeto da carga eletrônica foram configurados e operados fazendo-se uso da *ST Peripheral Library*.

A biblioteca implementa detecção de falhas em tempo de execução, realizando a verificação dos valores de entrada das funções com os limites esperados. Este recurso pode ser removido do software final caso se deseje reduzir o *overhead* e aumentar a velocidade da aplicação. Para o *firmware* de medição de curvas IV, deixou-se esta checagem ligada, pois deseja-se robustez em detrimento de desempenho.

3.5.1.2. Processador de máquinas de estado FSM

Diversos módulos do *software* de medição podem ser desenvolvidos mais facilmente por meio do uso de máquinas de estado. A maneira usual para realização de máquinas de estado, em sistemas embarcados programados em C, é pelo uso de comandos de decisão *switch/case*, aninhados, tal qual exemplificado pelo pseudocódigo mostrado na Figura 53.

```

1  //////////////////////////////////////////////////
2  //
3  //  Máquina de Estados com Switch / Case
4  //  Moreno Addad Hassem - 2014
5  //
6  //////////////////////////////////////////////////
7
8  enum nEstados
9  {
10     ESTADO_A = 0,
11     ESTADO_B,
12     ...
13 };
14
15 enum nEventos
16 {
17     EVENTO_0 = 0,
18     EVENTO_1,
19     EVENTO_2,
20     ...
21 };
22
23 enum nEstados estado_atual;
24 enum nEventos evento_recebido;
25
26 // Função com máquina de estados
27 void foo ()
28 {
29     ...
30     switch(estado_atual)
31     {
32         case (ESTADO_A):
33             switch(evento_recebido)
34             {
35                 case(EVENTO_0):
36                     // Ações a realizar
37                 case(EVENTO_1):
38                     // Ações a realizar
39             }
40         case (ESTADO_B):
41             switch(evento_recebido)
42             {
43                 case(EVENTO_2):
44                     // Ações a realizar
45             }
46             ...
47     }
48     ...
49 }
50

```

Figura 53: Máquina de estados tradicional, utilizando comando *switch/case*.

Utilizando o método *switch/case*, estados e eventos da máquina de estado são mapeados em memória utilizando variáveis enumeradas. O bloco *switch/case* mais externo mapeia cada estado da máquina. Dentro de cada caso do bloco *switch/case* externo, os eventos aos quais o estado é sensível são mapeados por um novo comando *switch/case*. No caso da Figura 53, o estado A é sensível aos eventos 0 e 1, enquanto o estado B é sensível apenas ao evento 2.

Conforme apontado por Samek (2009) a abordagem tradicional, com comandos *switch/case*, possui falhas, apesar da simplicidade e do baixo consumo de memória:

- Não promove o reuso de código, pois cada máquina é completamente codificada para o problema em questão. Ou seja, é inviável reaproveitar porções grandes de código para realizar uma nova máquina de estados para outro propósito;
- Dificulta a manutenção, pois a máquina de estados completa é codificada como uma função monolítica, que facilmente pode se tornar muito grande e de difícil leitura;
- O tempo para tratamento dos eventos não é constante e depende de dois níveis aninhados de comandos *switch/case*;

Para superar estas dificuldades, Samek (2009) propõe um processador genérico de máquina de estados, denominado QEP (*Quantum Event Processor*), no qual diversos paradigmas de máquinas de estado, incluindo o método *switch/case*, são combinados para resolver as limitações citadas.

O módulo básico FSM, utilizado para implementar máquinas de estado nos blocos superiores, foi desenvolvido baseado no QEP, mas com simplificações para a tarefa em questão. Tal qual o QEP, o FSM é modular e reutilizável, mas não é hierárquico, pois as máquinas de estado da BattleLoad são facilmente codificadas com apenas um nível. O código completo do módulo FSM pode ser visto no APÊNDICE D.

3.5.1.3. Gerenciador de *buffers First-In, First-Out* (FIFO)

Um buffer FIFO (*First In, First Out*) é uma estrutura de dados utilizada majoritariamente para implementar filas de espera e controle de fluxo. Nesta estrutura, os dados são armazenados na memória e processados por ordem de

chegada: o primeiro dado a chegar é o primeiro a ser disponibilizado para tratamento pela aplicação consumidora. Numa analogia com o movimento de uma minhoca, dados devem entrar pela cabeça da estrutura (em inglês *head*) e sair pela cauda (em inglês *tail*). A estrutura também pode ser abstraída como uma fila de atendimento, revertendo-se a ordem dos termos: dados entram pelo fim da fila (*tail*) e saem pelo começo da fila (*head*). No gerenciador FIFO a estrutura foi feita considerando-se o movimento da minhoca.

Diversos módulos dentro do *firmware* de medição se beneficiam do uso de buffers FIFO para enfileirar dados para tratamento futuro. É, por exemplo, o caso de rotinas de comunicação UART por meio de interrupção: quando há o recebimento de um dado novo, uma interrupção é acionada para que o dado recebido seja tratado. No entanto, nem sempre é conveniente o tratamento de dados diretamente na rotina de atendimento da interrupção (*Interrupt Service Routine*, ou ISR), especialmente se há demora. A execução da ISR bloqueia o contexto de execução, tomando 100% do processamento disponível, evitando que outras rotinas de tratamento possam ocorrer. Numa aplicação usual, o dado é colocado, pela ISR, em um buffer FIFO, para ser tratado futuramente dentro do contexto padrão de execução do *firmware*.

O módulo FSM citado anteriormente também se beneficia de estruturas FIFO, pois múltiplos eventos a serem processados pela máquina de estados podem ser enfileirados e tratados conforme os requisitos de desempenho do *firmware*. Nem sempre é conveniente o tratamento de todos os eventos pendentes de uma vez, pois isto pode ferir restrições de tempo de outros módulos.

Para permitir o reuso de código é interessante que exista um processador de estruturas FIFO centralizado, capaz de manipular adequadamente as posições de *head* e *tail* da estrutura para evitar sobreposições – que podem ocasionar estouros positivos (*overflow*) ou negativos (*underflow*) – e reportar erros para os módulos superiores.

No entanto, cada módulo que deseja utilizar o manipulador de filas pode ter estruturas de dados de diferentes tamanhos, que vão desde um único *byte* até estruturas com diversos membros (que são o caso de eventos da máquina de estados). Se os *buffers* forem alocados pelo gerenciador FIFO, este deve poder permitir que sejam alocadas estruturas com diferentes tamanhos de unidade.

Usualmente isto é feito utilizando-se alocação dinâmica de memória, o que em linguagem C é resolvido com o uso dos comandos *malloc* e *free*. Esta abordagem

não só oferece riscos à estabilidade do sistema, pois cria brechas para vazamentos de memória, como também coloca a qualidade de todo código baseado nesta biblioteca na dependência das implementações de alocação dinâmica oferecidas pelo fabricante do semicondutor. Dependendo do fabricante do microcontrolador, este código pode ser demasiadamente lento ou conter bugs que levam ao travamento do sistema.

Para contornar o risco imposto pela alocação dinâmica de memória, sem descartar a possibilidade de seu uso, o gerenciador FIFO desenvolvido compreende apenas estruturas e rotinas para a manipulação dos buffers já alocados, estática ou dinamicamente, por módulos externos.

O módulo FIFO aceita, portanto, um buffer de memória externo, já alocado, administrando as posições de memória como um buffer circular: ao atingir a posição final, o gerenciador regressa para a posição inicial e reinicia o uso. Este uso da estrutura de memória é visualizado na Figura 54.

Figura 54: Gerenciamento de FIFO como buffer circular.

A estrutura do tipo `FIFO_T` é responsável por guardar todas as informações pertinentes à administração do *buffer*, a saber:

- *base*: endereço base do *buffer*, usado para retornar os ponteiros de cabeça ou cauda da fila para o início;
- *head*: cabeça da estrutura, marca a próxima posição livre para um novo dado;

- *tail*: cauda da estrutura, marca o próximo dado a ser tratado ou atendido;
- *elements*: número de elementos do *buffer* alocado;
- *element_size*: tamanho de cada elemento do *buffer* em *bytes*;

São implementadas as seguintes funções para uso da estrutura:

- *FIFO_Post*: coloca um elemento do *buffer* e avança uma posição da cabeça;
- *FIFO_Get*: retira um elemento do *buffer* e avança uma posição da cauda;
- *FIFO_AvailableElements*: retorna o número de elementos livres no *buffer*;

É importante notar que a manipulação do *buffer* fila deve ser feita de forma atômica, isto é, imune à ocorrência de interrupções. Existem diversas maneiras de se fazer isto, por exemplo, fazendo-se uso de semáforos. A maneira utilizada no *firmware* da BattleLoad é desabilitando globalmente as interrupções durante a manipulação da estrutura. O código completo do módulo FIFO está contemplado no APÊNDICE E.

3.5.2. Camada 2 – Configuração e Operação do *Hardware*

Esta camada compreende as rotinas de configuração dos recursos de *hardware* do microcontrolador STM32F207, fazendo uso dos recursos proporcionados pela camada 1. Os módulos componentes desta camada são:

- *ADC*: configuração do conversor AD para aquisição de parâmetros;
- *DAC*: configuração do conversor DA para controle da corrente consumida;
- *UART*: configuração da porta serial de comunicação para comunicação com o módulo WF121;
- *USB*: configuração do periférico USB como uma porta de comunicação virtual (*virtual COM port – VCP*) para conexão com computador;
- *SDIO*: configuração da porta SDIO no modo 4 bits para gravação de dados no cartão SD;
- *SYSTICK*: configuração do timer de sistema para prover temporização a todos os outros módulos da mesma camada e das superiores;

3.5.2.1. ADC

O módulo ADC12 faz a inicialização do conversor AD do STM32F207 para realizar a aquisição de 6 canais, com resolução de 12 bits. As amostras são copiadas diretamente para a memória, fazendo uso do modo de conversão contínua e acesso direto à memória (*Direct Memory Access*, ou DMA). Os canais medidos, de acordo com suas posições no buffer de destino são:

- Posição 1 - ADC Channel 10 – V_{DUT} ;
- Posição 2 – ADC Channel 11 – I_{SENSE1} ;
- Posição 3 – ADC Channel 12 – I_{SENSE2} – Não utilizado;
- Posição 4 – V_{BAT} – Não utilizado
- Posição 5 – $V_{REF(int)}$;
- Posição 6 – Sensor de temperatura – Não utilizado;

Alguns parâmetros como a temperatura do processador, V_{BAT} e a corrente I_{SENSE2} , consumida por um segundo bloco de carga, que está inoperante, são adquiridos, mas não são utilizados na primeira versão do *firmware* de medição.

Cada canal é configurado para amostragem ocorrer em 15 ciclos do sinal ADCCLK, que está configurado para 30MHz. Isto resulta numa taxa de amostragem de 2 milhões de amostras por segundo. Quando o grupo completo de amostras está pronto e foi copiado para a memória via DMA, ocorre uma interrupção para tratamento dos sinais. A rotina para tratamento da interrupção aplica um filtro passa-baixa IIR para tratamento das amostras, tirando proveito da técnica de sobreamostragem, citada na etapa de projeto.

De acordo com o *datasheet* do STM32F207, o sinal $V_{REF(int)}$ é uma referência de tensão com valor, tipicamente, em 1,21V. Este valor foi utilizado para estimar a tensão de referência do pino V_{REF+} , teoricamente 3,3V. De posse desta referência, todos os valores de tensão medidos pelo ADC são corrigidos para serem entregues aos módulos externos.

3.5.2.2. DAC

Este módulo configura o conversor DA do STM32F207 para produzir o sinal V_{CTRL} , para o bloco de carga. Conforme mostrado anteriormente, o bloco conversor DA tem dois canais independentes, podendo alimentar dois blocos de carga. Portanto, o módulo DAC inicializa ambos os canais existentes mas, na prática, trabalha com apenas o canal 1. O conversor DA é inicializado sem uso do buffer interno do microcontrolador, o que permite produzir tensões desde 0V até V_{REF+} .

Como se trata de um conversor DA de 10 bits, com tensão de referência de 3,3V, a resolução teórica possível é próxima de 1mV, conforme mostrado anteriormente. Portanto, julgou-se adequado realizar o ajuste do sinal V_{CTRL} em múltiplos de milivolts, por meio da função `DAC_SetDACValInMilivolts`. O valor de V_{REF+} utilizado para fazer as conversões é o estimado, por meio referência interna de 1,21V, pelo módulo ADC12.

3.5.2.3. UART

O bloco UART (*Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*) trata a inicialização e controle da porta serial USART2, conectada ao módulo WIFI WF121, da Bluegiga. No entanto, o código aplicado é geral o suficiente para ser utilizado em qualquer comunicação serial empregando as demais portas seriais USART do STM32F207, por exemplo a USART3, utilizada para expansão.

A operação do módulo se dá por interrupção, ou seja, o processador é notificado e deve atuar apenas quando algum evento relevante interrompe o fluxo normal de execução do firmware. Isto evita que se gaste processamento do microcontrolador verificando, muitas vezes desnecessariamente, registradores de estado, liberando recursos para outras tarefas mais centrais.

Dois buffers FIFO independentes são utilizados para envio e recepção de dados. A porta USART2 do microcontrolador STM32F207 é configurada com as seguintes características:

- Taxa de transmissão de 115200bps;
- Palavras de 8 bits de tamanho;
- 1 bit de parada;

- Sem bits de paridade;
- Controle de fluxo pelos sinais RTS e CTS;
- Transmissão e recepção habilitados;

Estes parâmetros de configuração podem ser alterados por meio de macros do tipo *#define*, mas isto exige que o *firmware* seja recompilado e gravado no STM32F207.

Se não há fluxo de dados pela porta serial, nenhuma interrupção é gerada. Quando se deseja transmitir um dado, utilizam-se as funções de envio *Send_Byte*, que envia apenas um byte, ou *Send_Packet*, que envia um pacote de *bytes*. Estas funções colocam dados na estrutura FIFO de TX, e ativam a interrupção para envio, usando o bit *USART_IT_TXE* do registrador *USART_IT*. Isto aciona a interrupção da UART e sua rotina de tratamento, resultando em todos os *bytes* pendentes sendo enviados. Quando não há mais *bytes* para serem enviados, a interrupção de envio é desligada. O recebimento de dados é feito na rotina de tratamento da interrupção de recebimento, que está sempre ligada por meio da opção *USART_IT_RXNE* do registrador *USART_IT*. Os dados recebidos são colocados no *buffer* FIFO de recebimento e disponibilizados para a aplicação por meio das funções *Receive_Byte*, para o acesso a um único *byte*, e *Receive_Packet*, para o acesso de múltiplos *bytes*.

3.5.2.4. USB

O módulo USB configura a porta USB Full Speed do STM32F207 como uma porta COM virtual (*virtual COM port*, VCP) e é distribuída como parte adicional da *ST Peripheral Library*.

No modo VCP, a interface USB *Full Speed* do STM32F207 é vista como uma porta COM por um computador conectado. Pelo lado do microcontrolador, o envio e recebimento de informações pela porta virtual é feita, respectivamente, pelas funções *VCP_DataTX* e *VCP_DataRX*, que se comportam de forma parecida a funções de envio e recebimento de uma porta USART.

Para envio de maior volume de informações, foram desenvolvidas adicionalmente as funções *USB_SendString* e *USB_SendPacket*, que enviam múltiplos caracteres de texto e pacotes de dados, respectivamente. A porta de comunicação virtual é

configurada tal qual como uma porta serial, com os mesmos valores usados na porta USART2.

3.5.2.5. SDIO

O módulo SDIO (*Secure Digital Input Output*) é composto pela biblioteca de acesso ao periférico para leitura e escrita de cartões de memória do STM32F207. Esta biblioteca é oferecida como adicional à *ST Peripheral Library* e possui funções de inicialização, leitura e escrita de cartões SD.

Cartões do tipo *Standard Capacity* – até 2GB – e *High Capacity* – 2GB até 32GB podem ser utilizados. Como não houve mudanças do *hardware* da BattleLoad em relação ao modelo de referência utilizado pela própria ST, esta biblioteca foi usada com as configurações padrão.

3.5.2.6. SYSTICK

O módulo SYSTICK é responsável pela configuração do temporizador de sistema, usado como base de tempo para todos os outros módulos que necessitam de alguma contagem de tempo.

O timer de sistema é configurado para gerar uma interrupção a cada 1 milissegundo. Todos os módulos que precisam de temporização devem conter uma função chamada *Timertick*, dentro da qual a atualização das variáveis de tempo será feita. A rotina de tratamento da interrupção do SYSTICK faz uma chamada a cada uma das funções *Timertick*.

A resolução mínima de 1ms implica que não é possível utilizar o *timer* de sistema para implementar atrasos de microssegundos. Para este fim, devem ser utilizados outros *timers* do STM32F207.

3.5.3. Camada 3 – Blocos funcionais do medidor

A camada 3 implementa os blocos funcionais de alto nível para medida da curva IV, que fazem uso do hardware configurado na camada 2. São componentes desta camada os seguintes módulos:

- FatFS – Sistema de arquivos FAT para microcontroladores;
- DynLoad – Módulo de controle do bloco da carga eletrônica;
- WF121 – Módulo de comunicação com o dispositivo WIFI WF121.

3.5.3.1. FatFS

O módulo FatFS é uma implementação de código aberto, do sistema de arquivos FAT para microcontroladores e é, por projeto, separado das funções da camada física do disco. Isto o torna particularmente apropriado para o uso na BattleLoad, pois o acesso à mídia física é controlado por outro módulo de *software*, SDIO, desenvolvido separadamente.

Os principais recursos da FatFS são:

- Sistema de arquivos FAT compatível com Windows e MAC;
- Independente da camada física, o que torna fácil portar para diferentes plataformas;
- Baixo consumo de memória não volátil e RAM;
- Várias opções de configuração:
 - Múltiplos volumes (dispositivos físicos e partições);
 - Suporte para nomes de arquivos longos;
 - Suporte a sistemas operacionais de tempo real (RTOS)
 - Suporte a múltiplos tamanhos de setor até 4KB

Utilizando a FatFS é possível gravar no cartão micro SD conectado em P9, os dados da curva IV em arquivos de texto, que podem ser lidos por qualquer computador. A alternativa a este tratamento seria gravar os dados sem sistema de arquivos, diretamente nos setores do cartão, o que implica em usar um processo mais complexo para recuperação dos dados pelo computador PC. Esta estratégia certamente exigiria o desenvolvimento de uma aplicação somente para a importação dos dados pelo computador e foi descartada.

3.5.3.2. DynLoad

O módulo DynLoad é responsável por controlar o consumo de corrente do bloco de carga. É um módulo sem grande complexidade, destinado abstrair o controle da carga eletrônica para o módulo de extração de curva IV, que fica na camada acima. Apenas 3 funções estão disponíveis para outros módulos:

- SetCurrent – ajusta a corrente que deve ser consumida pela carga, em mA;
- GetCurrent – obtém, por meio de uma leitura do conversor AD, o valor real da corrente consumida pela carga, em mA;
- GetVoltage – obtém, por meio de uma leitura do conversor AD, o valor da tensão do painel solar conectado à carga.

É possível optar por dois modos de operação: com e sem controle da corrente consumida pelo painel. Sem controle, a função SetCurrent simplesmente ajusta o valor da corrente e mais nenhuma ação é tomada. Com o controle, utiliza-se um controlador PID, fazendo o valor retornado por GetCurrent ficar próximo, dentro de uma tolerância especificada, ao valor ajustado em SetCurrent.

Quando o controlador PID é usado, o valor da corrente é corrigido periodicamente por meio de um processo no loop principal do *firmware*. No entanto, esta abordagem aumenta o tempo de varredura do painel solar, pois, dependendo do valor de Kp, Ki e Kd, são necessárias algumas iterações do loop principal para que se chegue ao ponto de equilíbrio do filtro. Para valores altos de correntes isto implica um aumento na temperatura do bloco de carga, que pode danificá-lo.

O ajuste do bloco PID deve ser feito manualmente, alterando-se dos valores dos macros *#define* de Kp, Ki e Kd. Estas alterações devem ser realizadas pelo programador do dispositivo, o que exige a recompilação do *firmware* e gravação no STM32F207. Durante a tomada de dados, o controlador PID foi desligado para evitar danos ao bloco de carga por conta da alta temperatura.

3.5.3.3. WF121

O módulo de controle do dispositivo Wi-Fi WF121 utiliza a biblioteca BGLib, fornecida pela Bluegiga, fabricante do dispositivo. Esta biblioteca permite enviar comandos, escrever e ler registradores do dispositivo, comunicando-se com o módulo de software BGAPI, que roda dentro do módulo WF121. A interação entre BGLib e BGAPI pode ser vista na figura.

Figura 55: Interação entre BGLib, rodando o microcontrolador, e BGAPI, rodando no WF121.
Fonte: Bluegiga (2013)

Fazendo uso da BGLIB é possível alternar entre os diversos modos de operação do WF121, abrir conexões, enviar e receber dados. No entanto, tal qual a FatFS, a BGLIB é independente da camada física, ficando a cargo do desenvolvedor implementar esta camada. Neste projeto, a camada física da BGLib é implementada pela porta serial USART2, descrita anteriormente.

O acesso remoto dos arquivos por meio do Wi-Fi não foi implementado a tempo da tomada de dados, por conta do grande esforço de desenvolvimento necessário para validar a biblioteca BGLib no STM32F207. Apesar de a BGLib ter sido portada, a documentação disponibilizada pela Bluegiga é pobre em casos de uso e foi considerada insuficiente à época do desenvolvimento da BattleLoad, para que se pudesse finalizar este módulo. O funcionamento do módulo WF121 será validado em laboratório, por meio de uma ferramenta proprietária fornecida pelo fabricante do

dispositivo. Os dados obtidos neste trabalho foram diretamente lidos do cartão SD pelo computador PC.

3.5.4. Camada 4 – Extração curva IV

A camada 4 compreende apenas o módulo de extração da curva IV e faz uso dos serviços das camadas abaixo dela. É responsável por realizar uma varredura completa do painel solar, ajustando progressivamente o consumo de corrente e medindo o ponto de operação, até que se chegue ao fundo de escala permitido pelo bloco DynLoad.

Ao final da varredura, são gravados no cartão SD os pontos de corrente e tensão, bem como os valores notáveis do painel solar, V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} . Os valores de potência associados a cada ponto também são armazenados, caso se deseje traçar a curva de potência do painel. O módulo de extração de curva IV é modelado como uma máquina de estados, tal qual mostrada de forma simplificada na Figura 56.

Figura 56: Representação simplificada da máquina de estados do módulo IV.

Esta máquina de estados possui algumas estruturas de dados importantes para compreender seu funcionamento, a saber:

- **IV_EVENT_T**: eventos da máquina de estados. Só utilizam sinais, sem parâmetros adicionais;
- **IV_EVENT_LIST**: *buffer* FIFO de eventos para lidar com requisições da máquina de estados;

- IV_FATFS_T: sistema de arquivos FAT para gravação dos dados no cartão SD;
- IV_POINT_T: estrutura de dados para o ponto da curva IV, compreendendo tensão, corrente e potência do painel solar;
- IV_INFO_T: estrutura que armazena os pontos notáveis do painel solar, V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} ;
- IV_TRACER_T: estrutura principal da máquina de estados que extrai curva IV;

A estrutura IV_TRACER_T é extensa, mas particularmente importante para entendimento da implementação do módulo, por isto sua definição é mostrada na Figura 57.

```

64
65 // Estrutura principal do trapador
66 typedef struct IV_TRACER_TAG
67 {
68     FSM super; // Máquina de estados
69     IV_EVENT_LIST_T events; // FIFO de eventos
70     IV_POINT_T curve[IV_CURVE_SIZE]; // Curva IV
71     IV_INFO_T parameters; // Parâmetros característicos
72     char curve_name[IV_CURVE_NAME_MAX_CHARS]; // Nome do arquivo da curva
73     uint16_t index; // Numeração sequencial do ponto (V,I)
74     uint16_t curve_index; // Numeração sequencial da curva
75     uint16_t set_i; // Corrente ajustada
76     IV_FATFS_T filesystem; // Sistema de arquivos para gravação
77     uint32_t point_delay_ms; // Tempo entre dois pontos
78     uint32_t point_delay_counter; // Contador de tempo entre dois pontos
79     uint32_t curve_delay_ms; // Tempo entre duas curvas
80     uint32_t curve_delay_counter; // Contador de tempo entre duas curvas
81 } IV_TRACER_T;

```

Figura 57: Definição da estrutura IV_TRACER_T.

A máquina possui apenas dois estados, IDLE, no qual a máquina está parada, aguardando um sinal para início de uma nova curva, e OPER, no qual a máquina está em operação e extraindo a curva IV do painel solar. O estado inicial é obrigatório por conta da implementação do módulo FSM e só responde a um estímulo de inicialização para acessar o estado IDLE.

Ao entrar no estado IDLE há uma ação de entrada, que coloca o bloco de carga em consumo mínimo, definido em tempo de compilação pela constante DL_MIN_CURRENT, do bloco DynLoad. Idealmente este valor é zero, mas pode ser alterado, dependendo do sistema em questão, por exemplo, caso se utilize o DAC com *buffer* interno.

O estado IDLE é sensível a apenas um sinal, IV_START_NEW_CURVE, que inicia a medida de uma nova curva. Há uma ação de saída que inicializa o ponteiro de gravação do *buffer* da curva IV.

O estado OPER é responsável pelo controle do circuito de carga, com subsequente medida dos parâmetros do painel via conversor AD. A compreensão das ações realizadas neste estado é facilitada por um exame do fluxograma da Figura 58.

A cada intervalo de tempo IV_DEFAULT_POINT_DELAY, mede-se a tensão do painel solar e em seguida ajusta-se um novo valor para a corrente consumida pelo circuito de carga, incrementando-se IV_CURRENT_CURVE_STEP no valor atual. O temporizador para cada ponto é reiniciado e a máquina de estados entra em espera, embora os mecanismos de aquisição continuem funcionando. Decorrido o tempo, um evento do tipo IV_POINT_DELAY_TIMEOUT é postado e o processo é repetido.

Figura 58: Fluxograma do estado OPER.

A varredura prossegue até que se chegue ao fundo de escala do bloco DynLoad, dado por DL_MAX_CURRENT. Ao chegar neste valor, um evento com sinal IV_SWEEP_END é postado. Todos os dados levantados são exportados para um arquivo texto no cartão micro SD, por meio da função IV_ExportCurve. A máquina de estados retorna ao estado IDLE e liga um temporizador, que espera por IV_DEFAULT_CURVE_DELAY milissegundos, após os quais uma nova curva será

extraída. Os parâmetros de saída da curva IV são atualizados durante a medição de cada ponto de operação e estão prontos ao final da varredura.

As curvas extraídas periodicamente do painel são armazenadas sequencialmente no cartão micro SD, ficando disponíveis para consulta via Wi-Fi ou extraído-se o cartão para leitura em um computador PC. Caso se decida pela segunda alternativa, o medidor não grava curvas enquanto o cartão se encontra desconectado, voltando a gravar normalmente após a reinserção.

3.6. Testes de Bancada

Após a montagem dos protótipos da BattleLoad, foram realizados testes em bancada, utilizando instrumentos de medição, para testar o funcionamento dos diversos blocos componentes do aparelho. Os materiais e instrumentos utilizados nos testes foram:

- Multímetro de mão Fluke 87V;
- Osciloscópio digital Tektronix MSO2014B;
- Fonte de alimentação Nodaji 12V / 1A;
- Fonte de alimentação para *Notebook*, modelo ZF120A-1802200, 18V / 2,2A;

A fonte de alimentação Nodaji foi utilizada para alimentar a BattleLoad e foi sempre ligada ao conector modular P3. A fonte de *Notebook* foi utilizada para simular um painel solar conectado ao bloco de carga para medição. Nominalmente esta fonte equivale a um painel de 40W, mas durante os testes ela foi capaz de fornecer até 3,3A, ou seja, próxima de um painel de 60W.

Foram desenvolvidos programas de testes que rodam no STM32F207, baseados nos módulos do *firmware* de medição. Por serem baseados em *software* já descrito anteriormente, estes programas terão apenas sua função no teste explicada, mas não serão vistos em detalhes.

O primeiro teste realizado foi a verificação das tensões de alimentação produzidas pelo módulo gerenciador de energia, tanto para uso interno, carregando a bateria, como para alimentação dos demais blocos da BattleLoad.

Para realização desta medida, a fonte Nodaji foi conectada à alimentação principal de uma BattleLoad totalmente montada e com o *firmware* de tomada de dados

carregado e operando. Uma bateria descarregada foi conectada a P12, para que haja consumo de corrente do circuito integrado U4. Foram medidos os valores médio (corrente contínua) e de *ripple* de todas as saídas dos reguladores chaveados empregados na BattleLoad.

O valor médio das tensões foi medido utilizando o multímetro Fluke 87V. Nenhuma alteração especial é necessária nas pontas de prova padrão do instrumento para medida da tensão CC. A medida do *ripple* de cada fonte foi feita utilizando-se o osciloscópio digital MSO2014B, no modo de acoplamento corrente alternada, CA, com banda de aquisição limitada em 20MHz. Deve-se utilizar uma garra de terra especial, mostrada na figura, com comprimento menor do que a padrão do osciloscópio. Este arranjo reduz a área da antena formada pela ponta de prova e garra de terra, minimizando a interferência eletromagnética externa na medida de *ripple*.

Figura 59: Garra de terra para medida de *ripple*.

A interferência ao usar a garra convencional pode ser vista na medida do *ripple* da tensão de 5V, mostrada na Figura 60. A curva superior, com a garra padrão, mostra que há interferência suficiente para prejudicar a medida do *ripple* observado. A curva inferior, usando a garra de terra curta, mostra um sinal mais claro, no qual é possível realizar uma medida mais fiel do valor do *ripple*.

A Tabela 6 apresenta os resultados das medidas do bloco de gerenciamento de energia. De acordo com a especificação, são toleráveis valores de tensão numa faixa de $\pm 10\%$ em torno do valor nominal e *ripple* de no máximo 1% da tensão nominal.

Tabela 6: Medidas de tensão ripple para módulo gerenciador de energia.

Regulador Medido	Tensão Nominal	Tensão Medida	Erro % na Tensão	Ripple Esperado	Ripple Medido
U4	4,2V	4,211V	0,26%	42mV	32mV
U6	5V	5,026V	0,52%	50mV	50mV
U5	12V	12,27V	2,25%	120mV	104mV
U7	5V	5,026V	0,52%	50mV	20mV
U8	3,3V	3,288V	0,36%	33mV	22.4mV

Figura 60: Influência da garra de terra na medida do *ripple*.

Todas as fontes apresentam desempenho satisfatório com relação aos valores especificados. A diferença dos resultados de *ripple* nas fontes U6 e U7 pode ser explicada pela corrente consumida em ambas. U7 praticamente não tem carga, portanto tem resposta mais estável, enquanto U6 fornece energia para U5, U7 e U8. Este aumento na corrente de saída aumenta o ciclo de trabalho do regulador Buck e causa um aumento no *ripple* de saída observado.

O próximo teste realizado foi a validação do circuito carregador de bateria, baseado no integrado LT3652, por meio da medida do tempo de carga para uma bateria, de características conhecidas, completamente descarregada.

Conectou-se uma bateria de 860mAh, cujas especificações técnicas estão no ANEXO A, ao conector P12. A corrente de carga da BattleLoad é bastante superior à permitida pelo fabricante, equivalente à capacidade de carga da bateria, ou seja 0,86A. No entanto, a bateria conta com um circuito de proteção contra excesso de

corrente, que permite correntes de carga até 2,5A. A especificação do circuito de proteção, disponível somente em chinês, está contemplada no ANEXO B.

A bateria foi descarregada alimentando-se a BattleLoad até que a tensão entre seus terminais caiu ao valor de corte especificado pelo fabricante, cerca de 2,9V. Após a ação do circuito de proteção, a tensão medida nos terminais foi de 0V. Conectou-se então a fonte Nodaji à entrada de energia P3, o que iniciou a carga da bateria.

O tempo para carga foi medido monitorando-se visualmente o LED indicador D16, até que este se apagasse, o que indica carga completa, isto é, que a corrente de carga caiu a menos de 10% do valor máximo, 2A. Considerando a corrente de carga de 2A, o tempo mínimo de carga para uma bateria de capacidade $C = 860\text{mAh}$ deve ser de:

$$T_{carga} = \frac{C_{bateria}(\text{mAh})}{I_{carga}(\text{mA})} = \frac{860}{2000} = 0,43 \text{ horas ou } 26 \text{ minutos}$$

No entanto, por conta da ação do circuito de proteção, esperam-se tempos superiores a esta previsão, pois a corrente entregue à bateria deve ser inferior a 2A. Se o circuito de proteção carregar na capacidade recomendada de 0,86A, esperam-se tempos de uma hora ou ligeiramente superiores. O tempo médio obtido foi de 35 minutos, o que é superior ao tempo previsto, mas bem menor do que o tempo máximo. Foi considerado um valor satisfatório.

O próximo teste consistiu na gravação de um *firmware* no microcontrolador STM32F207, para verificar seu funcionamento básico. Para tal, utiliza-se o gravador e depurador STLinkV2, mostrado na Figura 61.

Figura 61: Programador e depurador STLinkV2.

Para efetuar a programação, o STLinkV2 é ligado ao conector P1 da BattleLoad à porta USB do computador. Utilizando o IAR *Embedded Workbench*, deve-se gravar um *firmware* de teste na memória do STM32F207, cuja tarefa é acender os LEDs D19-22 ligados a portas GPIO do STM32F207. O sucesso da gravação foi verificado, primeiramente, observando-se as mensagens da própria ferramenta de gravação. Na Figura 61 pode-se verificar o resultado da gravação e execução do *firmware*, com os LEDs acesos.

Figura 62: LEDs D19-21 acesos, indicando sucesso de gravação do firmware.

O teste seguinte visa identificar se o conversor DA do STM32F207 está funcionando de acordo com o esperado. A BattleLoad foi energizada pela fonte Nodaji, 12V / 1A. Foi gravado um *firmware* de testes, que varre tensões do conversor DA de 0V a V_{REF+} , produzindo uma rampa de tensão do sinal de controle, V_{CTRL} . Não foi conectado nenhum dispositivo para testes em P10, portanto não há corrente circulante no bloco de carga.

Foi medida a rampa de tensão no ponto de teste DRV1, utilizando o canal 1 do osciloscópio digital MSO2014B. No canal 2 do osciloscópio foi observada a forma de onda no pino 1, saída do amplificador operacional U3A, para identificar se este introduz algum erro no sinal de controle da carga. Utilizando a função de operações matemáticas do osciloscópio, foi analisado o sinal de diferença entre as duas rampas de tensão. A Figura 63 mostra os três sinais analisados. Não há nenhuma diferença significativa entre as rampas, conforme evidenciado pelo sinal M.

Figura 63: Rampas de tensão para teste do conversor DA.

Para complementar o teste da influência de U3 no sinal V_{CTRL} , mediu-se, com o multímetro Fluke 87V a tensão de saída no pino 1 do operacional, comparando-se com o sinal medido no ponto de teste DRV1, para os valores mais baixos do sinal de controle, conforme listados na Tabela 7.

Tabela 7: Erro introduzido por U3 em V_{CTRL} , em tensões próximas a 0V.

Valor ajustado (mV)	Saída em DRV1(mV)	Saída em U3-1 (mV)
0	0,58	8,07
1	1,22	8,07
2	2,01	8,14
3	2,98	8,15
4	3,99	8,15
5	5,02	8,15
6	6,01	8,15
7	7,01	8,15
8	8,07	8,16
9	9,05	9,05
10	10,02	10,02
11	11,03	11,03
12	12,03	12,03
13	13,00	13,00
14	14,01	14,01
15	15,01	15,01

Nota-se que o operacional possui problemas para copiar a tensão de entrada até 8mV, atuando normalmente a partir dessa tensão. A provável explicação para este comportamento é a ausência de uma tensão negativa de alimentação, mesmo considerando o fato de que o amplificador é *rail-to-rail*. Isto é evidenciado pelo fato de que o valor de saída se mantém constante para diversas entradas, até que estas cheguem ao valor de 8mV. Esse comportamento condiz com a saturação na tensão de alimentação de um operacional.

As implicações deste resultado são:

- A varredura para tomada de dados precisa começar de $V_{CTRL} = 8\text{mV}$, ou seja, consumindo no mínimo 80mA do painel. Portanto, a medida verdadeira de V_{OC} está comprometida até que este problema esteja consertado;
- Não é possível medir tensões de saída nulas, o que não compromete muito a medida do ponto I_{SC} ;
- A medida de correntes abaixo de 80mA está comprometida, pois o sinal de corrente também passa por um operacional.

Para verificar que a fonte do problema era mesmo a ausência tensão negativa em U3, foi conectada uma bateria de 3.3V do terminal 11 do operacional para terra. Fazendo-se isto obteve-se o comportamento correto, com a tensão sendo corretamente copiada da entrada pra saída de U3. No entanto, este arranjo foi considerado frágil demais para a tomada de dados. Decidiu-se, portanto, manter o sistema com o defeito, mas mantendo a robustez necessária para a tomada de dados.

O teste do bloco de carga foi feito extraíndo-se a curva IV da fonte de alimentação para *Notebook*, com características nominais 18V / 2.2A, mostrada na figura.

Figura 64: Fonte de alimentação para Notebook, ZF120A-1802200.

Para este teste foi utilizado o mesmo *firmware* a ser empregado na tomada de dados. Como nos demais testes, a fonte Nodaji energizou o circuito, conectada em P3. A fonte ZF120A-1802200 foi plugada no conector modular P10 para extração da curva IV, mostrada na Figura 65.

Figura 65: Curva IV da fonte ZF120A-1802200.

Nota-se que, apesar da fonte estar descrita como 18V / 2,2A, a corrente máxima fornecida é superior a 3A. Na prática, a potência máxima obtida para esta fonte foi de 58,1W.

Para testar o módulo USB-VCP, um *firmware* de testes do tipo *loopback* foi gravado na memória do STM32F207. Em *loopback*, todos os dados provenientes do computador PC, recebidos pela porta USB da BattleLoad, são enviados de volta à origem, como mostra a Figura 66.

Figura 66: Operação da BattleLoad com USB no modo loopback.

A BattleLoad foi energizada pela fonte Nodaji e conectada a um computador PC Windows, com o driver de porta serial da STMicroelectronics instalado. Este driver é feito para operar em conjunto com o módulo USB-VCP, que roda no *firmware loopback*. Utilizando a aplicação terminal PuTTY foram enviados caracteres na porta serial criada pelo driver da ST. Os caracteres foram integralmente recebidos de volta e mostrados no console, indicando que o teste em *loopback* teve sucesso.

O teste seguinte verificou o funcionamento do módulo WF121, para comunicação Wi-Fi. O teste foi realizado utilizando uma ferramenta gráfica para configuração do

dispositivo, chamada WIFI-GUI disponibilizada pelo fabricante do módulo. Esta ferramenta gráfica permite enviar comandos ao WF121 e testar completamente seu funcionamento. Para o teste, foi criado de um ponto de acesso Wi-Fi, com posterior acesso de um computador notebook, tal qual seria feito na coleta remota de dados. Este teste requer que se use o WIFI-GUI de maneira transparente, como se o WF121 estivesse diretamente conectado ao computador. Para isto, utilizou-se um firmware no qual as rotinas de transferência de dados do módulo de software USB-VCP são ligadas às do módulo UART. Os comandos enviados pelo WIFI-GUI são diretamente repassados ao módulo WF-121, e as respostas são devolvidas imediatamente para o computador, o que permite uma rápida validação do funcionamento do módulo. A figura mostra a tela principal do WIFI-GUI, durante uma conexão com o WF121 da BattleLoad, por meio da porta COM virtual da ST (COM3). Notar que no rodapé estão respostas a comandos enviados ao WF121, mostrando que a conexão com o dispositivo está correta.

Figura 67: Tela principal do WIFI-GUI durante conexão com WF121 da BattleLoad.

Foi feito um ponto de acesso, colocando o dispositivo no modo AP. Utilizando um notebook, foi possível acessar o WF121 a até 10 metros de distância, tal qual especificado.

O teste do cartão SD consistiu na criação de um arquivo texto e escrita de uma linha com o texto “Teste”. Para o teste foi utilizado um cartão de 8GB, previamente

formatado em um computador com o sistema de arquivos FAT, conectado ao conector P9 da placa de circuito impresso. O arquivo gravado pelo medidor foi lido com sucesso em um computador Windows PC diretamente, utilizando o programa Bloco de Notas.

3.7. Tomada de dados

Para realização dos testes de campo foi montado um sistema constituído por um painel solar, montado sobre uma estrutura mecânica ajustável, conectado ao medidor de curva IV BattleLoad. Este arranjo foi posicionado em um local com boa incidência de radiação solar ao longo do dia, na cidade de São Paulo, SP.

Foram extraídas, de minuto a minuto, a curva IV do painel solar e suas principais características – V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} – por diversas horas do dia, no decorrer dos dias 19 e 30 de Outubro de 2014. Com isto foi possível observar a evolução destes parâmetros ao longo do dia e sua influência na capacidade de energia que pode ser fornecida pelo painel solar.

Faz-se, nas seções subseqüentes, uma descrição da metodologia empregada na montagem do experimento e na tomada dos dados.

3.7.1. Escolha de um modelo de painel solar para testes

O painel solar utilizado no experimento foi selecionado entre os modelos comercialmente disponíveis, citados na Tabela 2. Originalmente desejava-se caracterizar um painel de alta potência, para validar a especificação nominal do bloco de carga. No entanto, o custo do experimento teve de ser mantido baixo, pois o projeto foi financiado integralmente pelo autor do trabalho. Também pensou-se em facilitar a confecção da estrutura mecânica de suporte, bem como seu manuseio e transporte. Por isto, foi escolhido um painel de pequenas dimensões e, conseqüentemente, de baixa potência.

O modelo selecionado foi o CHN20-36N, de 20W, do fabricante Chinaland, mostrado na Figura 68. As características do painel, extraídas na STC, podem ser visualizadas na Tabela 8.

Figura 68: Paine solar CHN20-36M Chinaland.

Tabela 8: Características do CHN20-36M nas STC.
Fonte: Chinaland (2013)

Modelo	CHN20-36M
P_{MAX}	20W
I_{MAX}	1,16A
V_{MAX}	17,2V
I_{SC}	1,76A
V_{OC}	21,6V

3.7.2. Montagem de um arranjo mecânico para a tomada de dados

Para que fosse possível fixar e orientar o painel solar no local de tomada de dados, foi construída uma estrutura que permite o ajuste da inclinação do painel. A estrutura consiste em duas peças de alumínio, que devem ser fixadas nas laterais do painel solar. Após a fixação das laterais, o arranjo permite a regulagem da inclinação do painel em relação à horizontal, de 5 até 90 graus. A estrutura foi concebida para ser colocada diretamente sobre uma superfície horizontal lisa, como um piso ou uma laje, diferentemente de algumas instalações que utilizam mastros ou outros apoios. O arranjo completamente montado, ajustado para a tomada de dados, pode ser visto na Figura 69.

Figura 69: Paine solar montado na estrutura mecânica ajustável.

3.7.3. Escolha de um local apropriado para testes

Por proximidade com o local de desenvolvimento do sistema de medição, os testes foram conduzidos na cidade de São Paulo, SP, durante o mês de Outubro de 2014. O local escolhido para testes fica na zona Norte da cidade, numa região na qual a insolação é desprovida de edificações altas no caminho da radiação solar incidente. A Figura 70, obtida por imagens de satélite, mostra a região escolhida para o teste. O marcador mostra a exata posição na qual o painel foi colocado. A latitude e a longitude foram obtidas por meio de um aplicativo de GPS para smartphone e estão anotadas na Tabela 9.

Figura 70: Imagem de satélite do local da tomada de dados.
Fonte: Google Earth (2015)

Tabela 9: Coordenadas do local de tomada de dados.

Latitude	23°30'03.8"S
Longitude	46°37'36.0"W

Para determinar corretamente a angulação e a orientação do painel solar, é necessário saber a trajetória do Sol ao longo dos dias de medição. Para obter a trajetória do Sol, foi utilizada uma ferramenta disponível na Internet, denominada SunCalc. Esta ferramenta mostra, para uma dada coordenada e data, o caminho do Sol ao longo do dia. A trajetória obtida pelo SunCalc para um dos dias de medição pode ser vista na Figura 71.

Figura 71: Trajetória do Sol obtida pelo SunCalc.
Fonte SunCalc (2014)

A trajetória exibida pelo SunCalc sugere um ângulo de inclinação pequeno do painel solar em relação ao plano horizontal no qual ele será instalado. No entanto, apesar de mostrar que deve-se orientar o conjunto para o Norte, o SunCalc não fornece o ângulo de elevação, ou altitude, do Sol, necessário para saber a inclinação do painel fotovoltaico.

A obtenção da elevação foi feita por meio da biblioteca Pysolar, desenvolvida em Python. As rotinas incluídas permitem, fornecendo-se as coordenadas, data e hora, obter os ângulos de azimute e elevação do Sol. Os ângulos de azimute e elevação obtidos por meio do Pysolar, ao meio dia, em 19 de Outubro de 2014, estão mostrados na Tabela 10. A elevação é dada em graus a partir do plano horizontal, enquanto o azimute é dado em graus no sentido horário a partir do Norte.

Tabela 10: Azimute e elevação para meio dia de 19/10/2014.

Azimute	351,01°
Elevação	76,44°

A inclinação do painel com o plano horizontal deve ser igual ao ângulo complementar à elevação, ou seja, o ângulo zenital, θ_z , mencionado no capítulo de introdução deste trabalho. A inclinação deve ser portanto, de 13,56°.

Deve-se rever a inclinação do painel sempre que houver uma mudança na data do experimento, pois a elevação do Sol e, por consequência, o ângulo zenital, mudam com as estações do ano, conforme apontado por Vilanova e Gazoli (2012).

O ajuste da inclinação do painel foi feito utilizando um *smartphone* dotado de aplicação medidora de nível. O ajuste foi verificado utilizando outro *smartphone*, com aplicação medidora diferente. Ambas as medidas mostraram concordância no valor ajustado.

3.7.4. Tomada de dados

Os dados foram tomados fazendo-se a conexão do medidor de curva IV tal qual mostra a Figura 72. A BattleLoad, rodando o firmware de tomada de dados, foi energizada utilizando-se uma bateria de 2000mAh, previamente carregada pelo bloco gerenciador de energia, conectada aos terminais do conector P12. O painel solar foi conectado ao terminal P10, DUT_INPUT. Um cartão SD com capacidade 2GB, previamente formatado com o sistema de arquivos FAT, foi inserido no conector P9. A conexão Wi-Fi não foi utilizada para recuperar arquivos do cartão, que foi lido diretamente por um computador PC munido de leitor para cartões.

Figura 72: Esquema de ligação para tomada de dados.

O conjunto foi posicionado, com a bateria desconectada da BattleLoad, no local e orientação apropriados, tal qual descritos na etapa anterior. A Figura 73 mostra o sistema montado em um dos dias de medição.

Figura 73: Sistema montado para tomada de dados.

Após a montagem no ambiente, o horário de início dos testes foi anotado e, simultaneamente, a bateria foi conectada ao sistema, iniciando o *firmware* de tomada de dados. O passo de corrente para a varredura foi ajustado em 30mA. A cada minuto, o *firmware* de tomada de dados obteve uma curva IV do painel solar, bem como os parâmetros de saída, V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} . As curvas foram salvas como arquivos de texto, com nomes do tipo Cxxxx.txt, no qual xxxx é um número sequencial, iniciando-se em 0000. O número indica o minuto da tomada de dados em que a curva foi extraída.

Após algumas horas ligado, realizando a tomada de dados, o sistema foi desligado e recolhido, para examinar a situação de carga da bateria e estado dos componentes. Durante os dois dias de medição, não foram encontradas falhas ou danos em quaisquer componentes. A Tabela 11 mostra os dias e horários de medição com a BattleLoad.

Tabela 11: Dias e horários de tomada de dados com a BattleLoad.

Dia	Horários de Medição
19/10/2014	13:00 às 15:00
30/10/2014	12:45 às 16:05

3.8. Análise dos dados

A etapa de análise começou com a importação das curvas extraídas pela BattleLoad durante os dois dias de tomada de dados. Como não foi utilizada a conexão Wi-Fi, o cartão foi diretamente lido por um computador PC com leitor para cartões micro SD. Todas as curvas tomadas foram copiadas para uma pasta no computador e depois excluídas do cartão para uma nova tomada de dados.

Um arquivo completo de curva IV extraído do cartão está contemplado no ANEXO C. As primeiras 8 linhas do arquivo de curva são dedicadas aos parâmetros de saída do painel, obtidos pela BattleLoad durante a tomada de dados. Os demais dados equivalem aos pontos da curva IV, separados por ponto e vírgula, no formato: “corrente; tensão; potência”.

Os pontos de cada curva IV, sem a análise feita pela BattleLoad, foram importados no editor de planilhas Excel 2013. Cada curva obtida gera um arquivo de planilha correspondente. Tão logo o arquivo seja importado, gera-se um gráfico de dispersão XY de todos os dados obtidos, para conferência. No eixo X são designados os pontos de tensão, enquanto no eixo Y colocam-se os pontos de corrente obtidos.

Um exemplo deste gráfico sem qualquer tratamento adicional, pode ser visto na Figura 74, produzida com dados tomados às 13:00 do dia 19 de Outubro de 2014. Nota-se um acúmulo de pontos próximos a I_{SC} , o que é esperado, pois a corrente de curto circuito especificada do painel, de 1,76A é bastante inferior ao fundo de escala programado, de 10A. Isto ocorre porque, quando o transistor Q1 passa a operar na região de triodo, sua resistência à passagem de corrente R_{DSon} , torna-se muito baixa, e a corrente consumida passa a não depender mais da tensão de controle V_{CTRL} fornecida ao bloco de carga pelo circuito de processamento e controle.

Figura 74: Dados brutos obtidos pela BattleLoad.

Para possibilitar a análise da curva, estes pontos extras foram eliminados, observando-se o comportamento da queda de tensão medida, que diminui com o avanço da varredura rumo a I_{SC} . Quando a tensão atinge seu menor valor, demarca-se aquele ponto de operação como sendo o último da varredura. Todos os pares obtidos após este ponto são removidos da planilha, resultando no gráfico mostrado

na Figura 75. As demais análises serão baseadas no conjunto de pontos pertencentes a este gráfico.

Figura 75: Pontos da curva IV considerados para análise.

Como mencionado anteriormente, a tensão de circuito aberto verdadeira não pode ser medida, devido a um problema no projeto da carga. Para obter um valor estimado de V_{OC} , foi realizada uma extrapolação linear, utilizando uma linha de tendência calculada com pontos próximos ao valor de V_{OC} . Considerando dois pares de pontos da linha de tendência, (i_1, v_1) e (i_2, v_2) , pode-se realizar o cálculo de V_{OC} analiticamente, por meio da expressão:

$$V_{OC} = \frac{-i_2}{\left(\frac{i_2 - i_1}{v_2 - v_1}\right)} + v_1 \quad (22)$$

Para o gráfico da Figura 75, o valor de V_{OC} foi calculado em 20,56V, o que se aproxima muito do valor esperado para este painel sob iluminação. É importante notar que a tensão de circuito aberto varia menos com a radiação incidente do que outros parâmetros do painel. Isto quer dizer que este mesmo valor de V_{OC} pode ser obtido com condições mais fracas de iluminação. No entanto, na curva escolhida, o painel estava sob forte iluminação, o que é evidenciado pelos valores de corrente drenados do painel.

O valor real para a corrente de curto circuito pode ser obtido pelo mesmo método citado anteriormente, considerando a reta de tendência com respeito aos pontos próximos a I_{SC} . A expressão de I_{SC} neste caso, considerando dois pontos da reta de tendência, (i_1, v_1) e (i_2, v_2) , é dada por:

$$I_{SC} = i_2 - \left(\frac{i_2 - i_1}{v_2 - v_1} \right) * v_1 \quad (23)$$

No entanto, como esta região do gráfico é muito próxima de uma reta horizontal, o valor de I_{SC} obtido será muito próximo ao último ponto medido pela BattleLoad. Para o gráfico fornecido, o valor de I_{SC} calculado foi de 1,158A, enquanto o valor medido pela BattleLoad foi de 1,150A. Foi considerado, portanto, o último ponto da série como sendo o valor de I_{SC} .

Os valores de P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} foram extraídos observando-se os dados de potência dos pontos considerados para a análise, localizando-se o valor máximo e anotando-se todos os valores correspondentes.

Os valores obtidos pela análise gráfica foram validados por meio da caracterização automática feita pela BattleLoad. Quando houve discordâncias entre os valores das duas análises, a análise gráfica foi considerada superior aos parâmetros automaticamente obtidos pela BattleLoad.

De posse de todos os dados foram traçadas curvas IV em diversos momentos de ambos os dias de medição, acompanhadas de tabelas com os parâmetros característicos obtidos. Também foram plotados gráficos dos parâmetros máximos, P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} , ao longo dos dois dias de medição. Isto permitiu avaliar a evolução da capacidade de produção de energia do painel em ambiente de aplicação, com diferentes condições de iluminação.

4. RESULTADOS

A Figura 76 mostra algumas curvas IV obtidas do painel no dia 19 de Outubro de 2014, em diferentes horários do dia. Conforme esperado, por causa do emprego do modo corrente constante, há maior densidade de pontos na região próxima a V_{OC} . No entanto, a densidade de pontos na região próxima a I_{SC} foi considerada suficiente para que se identifique o formato correto da curva IV do painel solar.

Figura 76: Curvas IV extraídas do painel no dia 19/10/2014.

A Tabela 12 tem os valores das características V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} , para as curvas da figura. Nota-se que os valores de tensão V_{OC} e V_{MAX} sofrem pouca alteração, ao passo que os valores de corrente I_{SC} e I_{MAX} se alteram radicalmente com a mudança de horário e, por consequência, da radiação solar incidente.

Tabela 12: Parâmetros de saída do painel no dia 19/10/2014.

Horário	V_{OC}	I_{SC}	P_{MAX}	V_{MAX}	I_{MAX}
13:00	20,56V	1,15A	15,54W	14,80V	1,05A
13:48	19,10V	0,92A	12,12W	14,96V	0,81A
14:30	19,20V	0,72A	9,73W	15,46V	0,6A
14:38	18,40V	0,55A	6,94W	15,43V	0,45A

A influência da corrente na potência produzida pelo painel pode ser compreendida observando-se os gráficos de P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} em função do tempo, no dia 14 de Outubro, mostrados na figura. Nota-se uma grande correlação entre o comportamento da corrente máxima e o da potência máxima. Isto valida a noção de que a potência produzida pelo painel solar é mais dependente da capacidade de corrente do que da tensão de saída. Deve-se atentar para a passagem de uma nuvem no caminho da radiação solar incidente, no ponto próximo às 14:45, o que reduziu sobremaneira a potência entregue pelo painel.

Figura 77: Evolução de V_{MAX} , I_{MAX} e P_{MAX} ao longo do dia 14/10/2014

Na Tabela 13 tem-se os valores de irradiância, medidos na estação meteorológica do Mirante de Santana, próximo ao local de tomada de dados. Os dados foram obtidos por meio do site do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET.

Tabela 13: Irradiância no dia 14/10/2014, medida do Mirante de Santana.

Fonte: INMET (2014)

Horário	Irradiância (W/m^2)
5:00	9
6:00	135
7:00	355
8:00	579
9:00	731
10:00	699
11:00	446
12:00	918
13:00	754
14:00	589
15:00	454
16:00	123
17:00	79

De posse destes dados é possível validar a acurácia de P_{MAX} às 13:00 e 14:00. Considerando-se que o painel deve produzir 20W nas STC, isto é, com irradiância solar $E_{STC} = 1000W/m^2$, a potência de saída do painel pode ser calculada por:

$$P_{painel} = \frac{E_{medida}}{E_{STC}} * P_{MAX}(STC) = \frac{E_{medida}}{50} \quad (24)$$

Para o horário das 13:00 e 14:00, os valores de potência, calculados pela equação anterior, são de 15,08W e 11,78W, respectivamente. Os valores obtidos pela BattleLoad para estes horários são de 15,53W e 11,05W, bastante próximos do valor esperado.

A curva IV com maior potência foi obtida às 12:45 do dia 30 de Outubro e está mostrada na Figura 78. As características extraídas do painel nessas condições podem ser visualizadas na Tabela 14. Nota-se que os valores obtidos são bastante próximos às especificações do painel nas STC, o que sugere que a radiação incidente é próxima de $1000W/m^2$.

Tabela 14: Características da curva IV das 12:45 do dia 30/10/2014

Horário	V_{OC}	I_{SC}	P_{MAX}	V_{MAX}	I_{MAX}
12:45	21,49V	1,5A	21,38W	16,20V	1,32A

Figura 78: Pontos da curva IV das 12:45 do dia 30/10/2014

Dos dois dias de tomada de dados, o dia 30 foi o mais quente, mas mais nublado, no local de tomada de dados. A cobertura de nuvens gerou diversas interrupções na

radiação solar incidente no painel, como mostra a evolução dos parâmetros máximos da Figura 79.

Figura 79: Evolução de V_{MAX} , I_{MAX} e P_{MAX} ao longo do dia 30/10/2014

A Tabela 15 tem os dados de insolação obtidos no Mirante de Santana, obtidos pelo site do INMET, tal qual feito no dia 14. Um rápido exame mostra-se que a radiação solar incidente no dia 30 foi de fato maior que no dia 14.

Tabela 15: Irradiância no dia 30/10/2014, medida do Mirante de Santana.
Fonte: INMET (2014)

Horário	Irradiância (W/m^2)
6:00	25
7:00	205
8:00	472
9:00	651
10:00	896
11:00	1025
12:00	1081
13:00	1063
14:00	969
15:00	784
16:00	555
17:00	323
18:00	79
19:00	1

Pode-se, novamente, validar os valores medidos de P_{MAX} com os esperados dada a radiação incidente no Mirante de Santana. Esta análise está contemplada na Tabela 16. Podem-se explicar as diferenças observadas pelo clima parcialmente nublado no local de tomada de dados.

Tabela 16: P_{MAX} esperado versus obtido no dia 30/10/2014

Horário	P_{MAX} (esperado)	P_{MAX} (obtido)
13:00	21,26W	19,65W
14:00	19,38W	15,02W
15:00	15,68W	8,33W

5. CONCLUSÕES

Após a realização do projeto da carga eletrônica e sua validação experimental, com testes de laboratório e de campo, conclui-se que o sistema projetado cumpre satisfatoriamente a proposta inicial de medição de painéis solares em ambiente de aplicação. As porções do sistema pertinentes à tomada e armazenamento de dados cumprem totalmente o escopo especificado, ao passo que o acesso remoto aos dados, via conexão Wi-Fi não pode ser implementado, devido ao alto esforço de desenvolvimento necessário.

A carga eletrônica no modo corrente constante foi capaz de extrair a curva IV de um painel fotovoltaico comercial em aplicação. Conforme esperado, apesar de a densidade de pontos não ser uniforme, a curva resultante é suficientemente detalhada para se obter os parâmetros de saída, V_{OC} , I_{SC} , P_{MAX} , V_{MAX} e I_{MAX} . No entanto, deve-se utilizar alimentação negativa no amplificador operacional de acionamento do transistor MOS de carga, para que este não contamine as medidas realizadas, sobretudo a de V_{OC} . Também poderia ser utilizado um resistor de ajuste de corrente ligeiramente maior, tendendo ao máximo valor possível, como forma melhorar o aproveitamento da resolução do conversor DA.

A escolha de um método de armazenamento como o cartão SD, pareado a um sistema de arquivos FAT foi considerada acertada, apesar de o esforço de desenvolvimento ter sido superior a outros sistemas de memória mais simples. Os dados coletados foram facilmente importados por um computador, o que facilitou a etapa de análise.

O sistema de gerenciamento de energia funcionou conforme esperado, produzindo as tensões necessárias para operação da carga eletrônica, com valores CC e de *ripple* dentro das especificações. O circuito baseado no LT3652 carregou a bateria em um tempo satisfatório e com carga suficiente para a realização das tomadas de dados.

O grande esforço de desenvolvimento necessário impossibilitou a validação do Wi-Fi como forma de acesso remoto aos dados coletados. No entanto, os testes preliminares em laboratório são encorajadores, pois o módulo empregado, WF121, funcionou corretamente e permitiu a conexão com dispositivos como computadores e celulares. Resta implementar a camada de transferência dos dados extraídos do módulo fotovoltaico aos sistemas conectados ao módulo Wi-Fi.

A metodologia empregada para gerar a BattleLoad, considerando as lições aprendidas durante o desenvolvimento deste trabalho, pode ser utilizada como base para o desenvolvimento de outros sistemas com a mesma finalidade, mesmo que outras topologias de carga sejam escolhidas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAI, Q.; CHEN, J. **Improving the efficiency of solar photovoltaic power generation in several important ways**. International Technology and Innovation Conference 2009. Xian: IET. 2009. p. 1-3.

DAUT, I. et al. **Potential of solar Radiation and Wind Speed for Photovoltaic and Wind Power Hybrid Generation in Perlis, Northern Malaysia**. The 5th International Power Engineering and Optimization Conference. Selangor: IEEE. 2011. p. 148-153.

HASSAINE, ; MRAOUI, ; KHELIF,. **Low cost electronic load for out-door testing of photovoltaic panels**. 5th International Renewable Energy Congress. Hammamet: IEEE. 2014. p. 1-6.

JEEVAN, D. C. R.; KUMARAVEL, M.; JAGADEESH, K. V. **Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International**. 2013

IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Minneapolis: IEEE. 2013. p. 1156-1160.

MANTINGH, E. G.; ZAAIMAN, W.; OSSENBRINK, H. A. **Ultimate transistor electronic load for electrical performance measurement of photovoltaic devices using pulsed solar simulators**. IEEE First World Conference on Photovoltaic Specialists Conference. Waikoloa: IEEE. 1994. p. 871-873.

NILSSON, J. **Optical Design and Characterization of solar Concentrators for Photovoltaics**. Lund, Suécia: Lund University, 2005.

OPPENHEIM, A. ; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3ª. ed. Essex: Pearson, 2014.

RAUSCHENBACH, H.. **solar Cell Array Design Handbook: The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion**. 1ª. ed. Nova Iorque: Springer, 1980.

RIPON, A. H. et al. **Efficiency enhancement of solar cell: Fusion of texturisation and back contact Emitter-Wrap-Through modeling**. 2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS). Coimbatore: IEEE. 2012. p. 264-267.

SAMEK, M. **Practical UML Statecharts in C/C++**. 2ª. ed. Burlington: Elsevier, 2009.

SATTAR, A.; TSUNAKOV, V. MOSFETs Withstand Stress of Linear-Mode Operation. **Power Electronics Technology**, Santa Clara, p. 34-39, Abril 2007.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4ª. ed. São Paulo: Pearson, 2004.

SILICON LABS. **Improving ADC ReSolution by Oversampling and Averaging**. Austin, p. 21. 2013.

STEVENS, W. R.; RAGO, S. A. **Advanced programming in the UNIX environment**. 3ª. ed. Ann Arbor: Addison-Wesley, 2013.

TAYLOR, A. E. F. **Illumination Fundamentals**. Troy, N.Y.: Optical Research Associates, 2000.

TREBLE, F. C. solar cells. **IEE Proceedings Vol. 127, Pt. A, No. 8**, Novembro 1980. 505-527.

VILLANOVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2012.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Bloco de Comunicações - Ethernet

Figura 81: Diagrama esquemático da interface Ethernet.

Bloco de Carga

Figura 82: Diagrama esquemático do bloco de carga.

Bloco de Gerenciamento de Energia

Figura 83: Diagrama esquemático do bloco de Gerenciamento de Energia.

Bloco de Comunicações - WF121

Figura 84: Diagrama esquemático da interface wireless WF121.

APÊNDICE B - Máscaras de circuito impresso da BattleLoad

Figura 86: Máscara de layout da face superior.

Figura 87: Máscara de layout do plano terra.

Figura 88: Máscara de layout do plano interno.

Figura 89: Máscara de layout da face inferior.

APÊNDICE C - Lista de materiais da BattleLoad

Designator	Description	Value	Qt	Digikey PN
X2	Cristal Oscilador	32.768kHz	1	XC1658CT-ND
P9	microSD Card Connector		1	WM9750CT-ND
S1, S2, S3	Chave tátil, SPST-NO		3	SW262CT-ND
D1, D12, D18	Schottky barrier diode, Vr = 60V, Ir = 3A		3	RB050L-60TE25CT-ND
C25_LB1, C25_LB2	Capacitor polarizado	1000uF	2	PCE3462CT-ND
R48	Resistor fixo	536k	1	P536KCCT-ND
R31_LB1, R31_LB2	Resistor fixo	324k/1%	2	P324KDACT-ND
R52	Resistor fixo	280k	1	P280KCCT-ND
R18, R19, R72, R74, R81, R82	Resistor fixo	270R	6	P270ACT-ND
R55	Resistor fixo	205k	1	P205KCCT-ND
R53	Resistor fixo	100k	1	P100KACT-ND
R8, R51, R54, R58, R62, R66, R71, R73	Resistor fixo	100k	8	P100KACT-ND
R34_LB1, R34_LB2	Resistor fixo	100R	2	P100ACT-ND
R59	Resistor fixo	82k	1	P82.0KCCT-ND
R67	Resistor fixo	75k	1	P75.0KCCT-ND
R63	Resistor fixo	62k	1	P62.0KCCT-ND
R70	Resistor fixo	51R/5%	1	P51.0CCT-ND
R50	Resistor fixo	0.05R	1	P50NLCT-ND
R11, R12, R13, R14	Resistor fixo	49.9R	4	P49.9CCT-ND
R41, R42, R43, R44, R45, R46	Resistor fixo	47k	6	P47KACT-ND
R15, R16, R17, R20, R21, R22, R23, R24, R39, R40, R47, R75, R76, R77, R78, R79, R80	Resistor fixo	33R	17	P33ACT-ND
R65	Resistor fixo	33k	1	P33.0KCCT-ND
R61	Resistor fixo	27k	1	P27.0KCCT-ND
R68	Resistor fixo	24k	1	P24.0KCCT-ND
R69	Resistor fixo	22k	1	P22.0KCCT-ND
R60	Resistor fixo	20.5k	1	P20.5KCCT-ND
R25	Resistor fixo	12.1k	1	P12.1KCCT-ND
R64	Resistor fixo	11.8k	1	P11.8KCCT-ND
R32_LB1, R32_LB2	Resistor fixo	10k/1%	2	P10KDACT-ND
R1, R2, R3, R7, R26, R27, R28, R29, R30	Resistor fixo	10k	9	P10KACT-ND
R9, R10	Resistor fixo	2.7k	2	P2.7KACT-ND
R49	Resistor fixo	1.8M	1	P1.8MACT-ND
R38	Resistor fixo	1.5k	1	P1.5KACT-ND
R37_LB1, R37_LB2	Power Resistor	0.1R	2	MP930-0.10F-ND
D13, D15	Schottky Rectifier Diode		2	M8RM120LT1GOSCT-ND
U4	Power Tracking 2A Battery Charger for Solar Power LCMOS Quad rail-to-rail input and output Operational Amplifier		1	LT3652EMSE#PBF-ND
U3_LB1, U3_LB2			2	LMC6484IMX/NOPBCT-ND
U2	10/100 Ethernet Transceiver		1	LAN8710A-EZK-CT-ND
Q1_LB1, Q1_LB2	N-Channel MOSFET		2	IXTH30N50L2-ND
P8	USB Type B Mini Female OTG		1	ED2992CT-ND
P4, P5, P6	Terminal Block Header 6Pin		3	ED2832-ND
P3, P10	Terminal Block Header 2Pin		2	ED1817-ND
L12	Indutor fixo	3.6uH	1	ASPI-6045S-3R6N-TCT-ND
L9	Indutor fixo	22uH	1	ASPI-0630LR-220M-T15CT-ND
U9	Bluegiga wi-fi module		1	1446-1033-1-ND
C28	Capacitor fixo	10uF	1	1276-3103-1-ND
C30, C31, C32, C33, C34, C41, C42, C49, C50	Capacitor fixo	10uF	9	1276-3103-1-ND
C1, C2	Capacitor fixo	2.2uF	2	1276-2953-1-ND
C5	Capacitor fixo	4.7uF	1	1276-2873-1-ND
C35, C36, C43, C44, C51, C52	Capacitor fixo	22uF	6	1276-2769-1-ND
C15	Capacitor fixo	470pF	1	1276-2516-1-ND
C21_LB1, C21_LB2	Capacitor fixo	470nF	2	1276-1199-1-ND
C39, C47, C55	Capacitor fixo	2.2nF	3	1276-1171-1-ND
C12, C13, C17	Capacitor fixo	10nF	3	1276-1132-1-ND
C29	Capacitor fixo	10pF	1	1276-1109-1-ND
CD1, CD2, CD3, CD4, CD5, CD6, CD7, CD9, CD10_LB1, CD10_LB2, CD11, CD12, CD13, CD14, CD15, CD16, CD17, CD21, CD22	Capacitor de desacoplamento, 100nF/25V	100n/25V	19	1276-1099-1-ND
C16	Capacitor fixo	22nF	1	1276-1081-1-ND

Figura 90: Lista de materiais da BattleLoad - Parte 1.

Designator	Description	Value	Qt	Digilkey PN
C3, C4, C10, C11, C14, C19, C26_LB1, C26_LB2, C27	Capacitor fixo	1uF	9	1276-1066-1-ND
C6, C7, C8, C9, C59, C60	Capacitor fixo	22pF	6	1276-1047-1-ND
P1	Conector IDC 2x10		1	1175-1623-ND
U6, U7, U8	3A, 23V, 1.2MHz Synchronous Step-Down Converter		3	1028-1051-1-ND
L11	Indutor fixo	6.8uH	1	811-1165-1-ND
P7	Conector IDC 2x8		1	609-3486-1-ND
JP3	Jumper 2 Pinos, 2.54mm		1	609-3461-ND
L8	Indutor fixo	47uH	1	587-2104-1-ND
L10	Indutor fixo	4.7uH	1	587-2100-1-ND
D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11	Transient Voltage Suppressor	5.5V	10	568-7349-1-ND
P2	PulseJack® Ethernet Connector		1	553-1483-ND
X1, X3	Cristal Oscilador	8MHz	2	535-9831-1-ND
U1	ARM-based 32-bit MCU		1	497-11171-ND
L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7	Indutor fixo	BEAD	7	490-1038-1-ND
D16, D19, D20, D21, D22	Diodo emissor de luz		5	475-1407-1-ND
D17	Diodo emissor de luz		1	475-1407-1-ND
P12	2 pin JST connector		1	455-1734-1-ND
C57	Capacitor fixo	100uF	1	399-4697-1-ND
R56	Resistor fixo	2.3M	1	311-2.32MCRCT-ND
U5	LOW-POWER DC/DC BOOST CONVERTER		1	296-12685-1-ND
JP1_LB1, JP1_LB2, JP2_LB1, JP2_LB2, P11	Jumper 2 Pinos, 2.54mm		5	3M9447-ND
JP4	Jumper 2 Pinos, 2.54mm		1	3M9447-ND
D14	Diodo de sinal, Vr = 75V / If = 0.2mA		1	1N4148W-E3-18CT-ND

Figura 91: Lista de materiais da BattleLoad - Parte 2.

APÊNDICE D - Código completo do módulo FSM

```
// FSM.h
// Header file for my implementation of the UML FSM
// 07/2014

#include <stdint.h>

// Event Signal Typedef
typedef uint8_t FSM_EventSignal;

// Event structure. Extend parameters by inheriting from this structure.
typedef struct FSM_Event_Tag
{
    FSM_EventSignal signal;    // Event signal
} FSM_Event;

// Reserved Event Signals Enumeration
enum FSM_ReservedEventSignals
{
    FSM_NULL_SIGNAL = 0,      // Reserved signal for init purposes
    FSM_ENTRY_SIGNAL = 1,     // Reserved signal for entry actions
    FSM_EXIT_SIGNAL,          // Reserved signal for exit actions
    FSM_INIT_SIGNAL,          // Reserved signal for the initial transition
    FSM_USER_SIGNAL           // First Signal available to user applications
};

// State Variable Type
typedef uint8_t FSM_State;

// State Handler Type, returns State
typedef FSM_State (*FSM_StateHandler)(void *me, FSM_Event const *e);

// State Machine Type
typedef struct FSM_Tag
{
    FSM_StateHandler state;
} FSM;
```

```

// Constructor definition. This is usually unnecessary, because it obfuscates
// the FSM structure initialization. For now I'm leaving it here, but I'm not
// sure if this will stay.
#define FSM_Ctor(me_, initial_) (((FSM*)me_)->state=(FSM_StateHandler)(initial_))

// Init and dispatch functions
void FSM_Init (FSM* me);
void FSM_Dispatch (FSM* me, FSM_Event const *e);

// Return values for FSM event handling
#define FSM_RET_HANDLED ((FSM_State)0)
#define FSM_RET_IGNORED ((FSM_State)1)
#define FSM_RET_TRAN    ((FSM_State)2)

// Return macros for FSM event handling
#define FSM_HANDLED()    (FSM_RET_HANDLED)
#define FSM_IGNORED()    (FSM_RET_IGNORED)

// State transition macro is defined by a comma expression.
// The operation is: ((FSM*)me_)-> (FSM_StateHandler)(target_)
// The type and value are defined by the last member of the expression, in this
// particular case is type FSM_State, with a value of 2.

#define FSM_TRAN(me_,target_) (((FSM*)me_)->state=(FSM_StateHandler)(target_), FSM_RET_TRAN)

// FSM.c
// Source file for my implementation of the UML FSM
// 07/2014

#include "fsm.h"

// Reserved Events array. This is strictly internal of this class and should
// never be used globally. If you think you need it, you're probably doing
// something unorthodox.
static FSM_Event FSM_ReservedEvts[] = {{FSM_NULL_SIGNAL },
                                         {FSM_ENTRY_SIGNAL},
                                         {FSM_EXIT_SIGNAL },
                                         {FSM_INIT_SIGNAL }};

// FSM Init function. The original QEP implementation passes an event to this
// which I find unnecessary and confusing. I eliminated this to ensure clarity
void FSM_Init(FSM* me)
{
    // Take the initial transition, which MUST end with a Transition
    (*me->state)(me, &FSM_ReservedEvts[FSM_NULL_SIGNAL]);

    // Enters the target first state, performing any entry actions specified
    (void) (*me->state)(me,&FSM_ReservedEvts[FSM_ENTRY_SIGNAL]);
}

// FSM Event Dispatcher
void FSM_Dispatch (FSM* me, FSM_Event const *e)
{
    // Saves the current state
    FSM_StateHandler current_state = me->state;

    // Executes the current state with the incoming event
    FSM_State handler_return = (*current_state)(me,e);

    // If execution resulted in transition beeing taken, takes care of
    // exiting the current state and transitioning to the next.
    if(handler_return == FSM_RET_TRAN)
    {
        // Executes the exit action of the current state
        (void)(*current_state)(me,&FSM_ReservedEvts[FSM_EXIT_SIGNAL]);

        // Executes the entry action of the next state
        (void)(me->state)(me,&FSM_ReservedEvts[FSM_ENTRY_SIGNAL]);
    }
}

```

}

APÊNDICE E - Código completo do módulo FIFO

```
// FIFO.H
// Header file for GENERIC FIFO routines
// MAH - 06/2014 - Initial Version

#ifndef __FIFO_H_
#define __FIFO_H_

#include <string.h>
#include <stdint.h>

// FIFO type
typedef struct FIFO_TAG
{
    uint8_t    *base;
    uint8_t    *head;
    uint8_t    *tail;
    uint32_t    elements;
    size_t      element_size;
} FIFO_T;

// Return values
enum FIFO_RETURN_VAL
{
    FIFO_NOERROR      = 0,
    FIFO_OVERFLOW     = -1,
    FIFO_UNDERFLOW    = -2
};

// Prototypes
void    FIFO_Init(FIFO_T *me, void *buffer, uint32_t elements, size_t element_size);
int     FIFO_Post(FIFO_T *me, void *element);
int     FIFO_Get(FIFO_T *me, void *element);
uint32_t FIFO_AvailableElements(FIFO_T *me);

#endif // __FIFO_H_

// FIFO.C
// Source file for GENERIC FIFO routines
// MAH - 06/2014 - Initial Version

#include <stdint.h>
#include <string.h>
#include <intrinsics.h>
#include "fifo.h"

// FIFO constructor
void FIFO_Init(FIFO_T *me, void *buffer, uint32_t elements, size_t element_size)
{
    me->elements = elements;
    me->element_size = element_size;
    me->base = (uint8_t *) buffer;
    me->head = (uint8_t *) buffer;
    me->tail = (uint8_t *) buffer;
}

// Puts new element on FIFO
int FIFO_Post(FIFO_T *me, void *element)
{
    // Critical region, interrupts disabled
    __disable_interrupt();

    // New head
```

```

uint8_t *new_head = me->head + me->element_size;

// Head wrapping around
if (new_head > me->base + ((me->elements-1)*me->element_size))
    new_head = me->base;

// Overflow, return error code
if (new_head == me->tail)
{
    // End of critical region, interrupts enabled again
    __enable_interrupt();
    return FIFO_OVERFLOW;
}
// Adds a member to the FIFO and advance head
else
{
    memcpy(new_head,element,(size_t) me->element_size);
    me->head = new_head;

    // End of critical region, interrupts enabled again
    __enable_interrupt();
    return FIFO_NOERROR;
}
}

// Gets an element from the FIFO
int FIFO_Get(FIFO_T *me, void *element)
{
    // Tail caught up with head, return underflow
    if (me->tail == me->head)
        return FIFO_UNDERFLOW;
    // Gets the member from the FIFO and advance tail
    else
    {
        // Critical region, interrupts disabled
        __disable_interrupt();
        // New tail
        uint8_t *new_tail = me->tail + me->element_size;

        // Tail wrapping around
        if (new_tail > me->base + ((me->elements-1)*me->element_size))
            new_tail = me->base;

        memcpy(element,new_tail,(size_t) me->element_size);
        me->tail = new_tail;
        // End of critical region, interrupts enabled again
        __enable_interrupt();
        return FIFO_NOERROR;
    }
}

// Gets the available space on the FIFO
// The minus one comes from the fact that Head == Tail is only acceptable as
// a FIFO empty condition. So, for all practical purposes, you got one less
// space available to fill the Queue.
uint32_t FIFO_AvailableElements(FIFO_T *me)
{
    // Head == Tail -> Queue is free!
    if(me->head == me->tail)
        return (me->elements - 1);
    // Head is geometrically ahead of tail
    else if(me->head > me->tail)
        return (me->elements - 1 - (me->head - me->tail)/me->element_size);
    // Head is geometrically behind of tail
    else
        return ((me->tail - me->head)/me->element_size - 1);
}

```


ANEXO A - Especificação da Bateria de 860mAh usada para testes

063048

LI-POLYMER BATTERY PACKS

Specification

Type: [063048 860mAh](#)

Prepared/Date	Auditing/Date	Approved/Date
WANG MAR 16, 2006	LI MAR 16, 2006	XIONG MAR 16, 2006

UNIONFORTUNE PRODUCT SPECIFICATION	Doc. No.	2006.3.16
	Edition No.	2.0
	Sheet	1/5

1 ☐ Scope

This product specification describes UNIONFORTUNE polymer lithium-ion battery. Please using the test methods that recommend in this specification. If you have any opinions or advices about the test items and methods, please contact us. Please read the cautions recommended in the specifications first, take the credibility measure of the cell's using.

2 ☐ Product Type, Model and Dimension

2.1 Type ☐ Polymer lithium-ion battery

2.2 Model ☐ 063048

2.3 Cell Dimension(Max, Thickness×Width×Length(mm³)) ☐ 6×30×48

Pack Dimension(Max, Thickness×Width×Length(mm³)) ☐ None

3 ☐ Specification

Item	Specifications	Remark
Nominal Capacity	860 mAh	0.2C ₅ A discharge
Nominal Voltage	3.7V	Average Voltage at 0.2C ₅ A discharge
Charge Current	Standard 0.2 C ₅ A \ Max 1 C ₅ A	Working temperature: 0~40℃
Charge cut-off Voltage	4.20±0.03V	
Standard Discharge Current	0.2C ₅ A	Working temperature: 20~60℃
Max Discharge Current	2.0C ₅ A	Working temperature: 0~60℃
Discharge cut-off Voltage	2.75 V	
Cell Voltage	3.7-3.9 V	When leave factory
Impedance	≤ 300 mΩ	AC 1KHz after 50% charge
Weight	Approx: 15g	
Storage temperature	≤1 month	-20~45℃
	≤3 month	0~30℃
	≤6 month	20±5℃
Storage humidity	65±20% RH	Best 20±5℃ for long-time storage

4 ☐ General Performance

Definition of Standard charging method ☐ At 20±5℃ charging the cell initially with constant current 0.2C₅A till voltage 4.2V, then with constant voltage 4.2V till current declines to 0.05C₅A.

Item	Test Methods	Performance
4.1 0.2C Capacity	After standard charging, laying the battery 0.5h, then discharging at 0.2C ₅ A to voltage 2.75V, recording the discharging time.	≥ 300min
4.2 1C Capacity	After standard charging, laying the battery 0.5h, then discharging at 1C ₅ A to voltage 2.75V, recording the discharging time.	≥ 51 min
4.3 Cycle Life	Constant current 1C ₅ A charge to 4.2V, then constant voltage charge to current declines to 0.05C ₅ A, stay 5min ☐ constant current 1C ₅ A discharge to 2.75V ☐ stay 5min. Repeat above steps till continuously discharging time less than 36min.	≥ 300times
4.4 Capability of keeping electricity	20±5℃ After standard charging, laying the battery 28days, discharging at 0.2C ₅ A to voltage 2.75V, recording the discharging time.	≥ 240min

UNIONFORTUNE PRODUCT SPECIFICATION	Doc. No.	2006.3.16
	Edition No.	2.0
	Sheet	2/5

5□Environment Performance

Item		Test Methods	Performance
5.1	High temperature	After standard charging, laying the battery 4h at 60□, then discharging at 0.2C ₅ A to voltage 2.75V, recording the discharging time.	≥ 270min
5.2	Low temperature	After standard charging, laying the battery 4h at 0.2C ₅ A, then discharging at 0.2C ₅ A to voltage 2.75V, recording the discharging time.	≥ 210min
5.3	Constant humidity and temperature	After standard charging, laying the battery 48h at 40±2□, RH 90±2%. Recording 0.2C ₅ A discharging time	No distortion No electrolytes leakage ≥ 270 min
5.4	Temperature shock	After standard charging, battery stored at -20□ for 2 hours, then stored at 50□ for 2 hours. Repeat 10 times.	No electrolytes leakage

6□Mechanical Performance

Item		Test Methods	Performance
6.1	Vibration	After standard charging, put battery on the vibration table. 30 min experiment from X,Y,Z axis. Scan rate: 1 oct/min; Frequency 10-30Hz, Swing 0.38mm; Frequency 30-55Hz, Swing 0.19mm.	No influence to batteries' electrical performance and appearance.
6.2	Collision	After vibration test, batteries were laying on the vibration table about X, Y, Z axis. Max frequency acceleration: 100m/s ² ; collision times per minutes: 40~80; frequency keeping time 16ms; all collision times 1000±10.	No influence to batteries' electrical performance and appearance.
6.3	Drop	Random drop the battery from 10m height onto concrete one times.	No explosion or fire

7□Safety Test

Test conditions □The following tests must be measured at flowing air and safety protection conditions. All batteries must standard charge and lay 24h.

Item		Test Methods	Performance
7.1	Over charge	At 20±5□ charging batteries with constant current 3C ₅ A to voltage 4.8V, then with constant voltage 4.8V till current decline to 0. Stop test till batteries' temperature 10□ lower than max temperature.	No explosion or fire
7.2	Over discharge	At 20±5□ discharge battery with 0.2C ₅ A continuously 12.5h.	No explosion or fire
7.3	Short-circuit	At 20±5□ connect batteries' anode and cathode by wire which impedance less than 50mΩ, keep 6h.	No explosion or fire
7.4	Extrusion	At 20±5□ put the battery in two parallel steal broad, add pressure 13kN.	No explosion or fire
7.5	Thermal shock	Put the battery in the oven. The temperature of the oven is to be raised at 5±1□ per minute to a temperature of 130±2□ and remains 60 minutes.	No explosion or fire

UNIONFORTUNE PRODUCT SPECIFICATION	Doc. No.	2006.3.16
	Edition No.	2.0
	Sheet	3/5

8 Cautions

1. Cautions of batteries' operation

The batteries must be careful of proceed the operation for it's soft package.

☐ Aluminum packing materials

The aluminum packing material was easily damaged by the sharp edge part, such as nickel-tabs.

- ☐ forbid to use the sharp part touching the battery;
- ☐ should cleaning working condition, avoiding the sharp edge part existence;
- ☐ forbid to pierce the battery with nail and other sharp items;
- ☐ the battery was forbidden with metal, such as necklace, hairpin etc in transportation and storage.

☐ Sealed edge

Sealing edge is very easily damaged and don't bend it.

The Al interlayer of package has good electric performance. It's forbidden to connect with exterior component for preventing short-circuits.

☐ Folding edge

The folding edge is formed in batteries' processes and passed all hermetic tests, don't open or deform it. The Al interlayer of package has good electric performance. It's forbidden to connect with exterior component for preventing short-circuits.

☐ Tabs

The batteries' tabs are not so stubborn especially for aluminum tabs. Don't bend tabs.

☐ Mechanical shock

Don't fall, hit, bent the batteries' body.

☐ Short-circuit

Short-circuit is strictly prohibited. It should damage batteries badly.

2. Standard Test Environment for polymer lithium-ion batteries

Environment temperature: $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$

Humidity: 45-85%

3. Cautions of charge & discharge

☐ charge

Charging current should be lower than values that recommend below. Higher current and voltage charging may cause damage to cell electrical, mechanical, safety performance and could lead heat generation or leakage.

- ☐ Batteries charger should charging with constant current and constant voltage mode;
- ☐ Charging current should be lower than (or equal to) $1\text{C}_5\text{A}$;
- ☐ Temperature $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ is preferred when charging;
- ☐ Charging voltage must be lower than 4.25V.

ANEXO B - Especificação da proteção à bateria de 860mAh

广州鹏辉电池有限公司

Great Power Battery Co., Ltd.

项目名称 Item name	最小值 min	典型值 type	最大值 max	单位 unit
过充保护电压over-charge protection voltage	4.255	4.280	4.305	V
过充保护恢复电压over-charge protection discover voltage	4.030	4.080	4.130	V
过放保护电压over-discharge protection voltage	2.827	2.900	2.973	V
过放保护恢复电压over-discharge protection discover voltage	3.022	3.100	3.178	V
放电过流检测电压over-discharge current detected voltage	0.110	0.125	0.140	V
放电过流保护电流over-discharged protection current	3.0	4.5	6.0	A
过充电检测延迟时间over-charge detect delay time	0.7	1.0	1.3	s
过放电检测延迟时间over-discharging detect delay time	14	20	26	ms
过电流检测延迟时间overcurrent detect delay time	8	12	16	ms
短路保护延迟时间short-circuit protection delay time	230	300	500	μs
正常状态下静态电流 Normal state quiescent current		4	8	μA
过放状态下静态电流 Over-discharging state quiescent current	-	1.2	2.0	μA
导通内阻On-resistance	-	-	150	mΩ
输入电压 (B+与B-间) Input voltage	-1.3	-	12	V
最大持续充电电流 Maximum continuous charging current		-	2.5	A
最大持续放电电流 Maximum continuous discharging current		-	2.5	A
工作温度 working temperature	-40	-	85	°C
推荐贮存条件Recomended storage condition	20	25	30	°C
0V电池充电功能0V battery charging function		可能		

2.6 可靠性测试

恒温恒湿测试Humidity test : +40±2 °C 90%RH 48Hours 高温测试High temperature test : +55±2 °C 2Hours
低温测试Low temperature test : -20±2 °C 16Hours

ANEXO C - Arquivo completo de tomada de dados da BattleLoad

Solar Cell Analysis

```

-----
Voc= 19505 mV
Isc= 1170 mA
Pmax= 15535 mW
Vmax= 14796 mV
Imax= 1050 mA
-----
70;19505;1365
90;19438;1749
100;19405;1940
130;19338;2513
160;19305;3088
180;19271;3468
220;19138;4210
240;19104;4584
270;18971;5122
300;18937;5681
320;18871;6038
350;18804;6581
360;18770;6757
400;18670;7468
420;18570;7799
440;18537;8156
470;18436;8664
500;18303;9151
520;18236;9482
550;18169;9992
580;18069;10480
600;18036;10821
630;17869;11257
660;17802;11749
670;17702;11860
700;17568;12297
730;17401;12702
740;17334;12827
770;17234;13270
780;17034;13286
820;16933;13885
850;16700;14195
870;16566;14412
880;16332;14372
930;16065;14940
960;15865;15230
980;15531;15220
1010;15163;15314
1050;14796;15535
1070;14128;15116
1100;11723;12895
1120;5711;6396
1160;2104;2440
1150;1035;1190
1150;601;691
1160;501;581
1150;434;499
1150;367;422
1150;367;422
1150;367;422
1140;300;342
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1140;334;380
1150;300;345
1150;300;345

```

1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1140;300;342
1150;300;345
1150;300;345
1160;334;387
1150;300;345
1150;300;345
1140;300;342
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1150;334;384
1150;300;345
1150;334;384
1160;300;348
1150;300;345
1170;334;390
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1150;367;422
1140;300;342
1160;334;387
1160;334;387
1160;367;425
1150;334;384
1150;334;384
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1160;334;387
1140;367;418
1150;334;384
1150;334;384
1150;300;345
1140;300;342
1160;334;387
1150;300;345
1140;334;380
1150;300;345
1150;300;345
1160;300;348
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1150;334;384
1150;300;345
1140;300;342
1150;300;345
1150;300;345
1140;334;380
1150;334;384
1150;334;384
1150;334;384
1150;300;345
1160;300;348
1150;300;345
1150;300;345
1160;300;348
1150;300;345
1170;300;351
1140;300;342

1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1160;300;348
1150;300;345
1160;300;348
1170;300;351
1150;334;384
1150;367;422
1160;367;425
1160;334;387
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1160;300;348
1160;300;348
1150;367;422
1160;334;387
1150;300;345
1150;300;345
1160;300;348
1140;300;342
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;267;307
1160;267;309
1150;233;267
1150;267;307
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1160;300;348
1150;300;345
1160;300;348
1150;300;345
1150;300;345
1140;300;342
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1160;334;387
1150;334;384
1150;300;345
1150;300;345
1150;334;384
1160;334;387
1160;334;387
1150;334;384