



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Mathias Scroccaro Costa

Desenvolvimento de dispositivo de telemetria para hidrômetros sob a ótica IoT: Estudos de geração e consumo energético

Campinas

2020

Mathias Scroccaro Costa

**Desenvolvimento de dispositivo de telemetria para
hidrômetros sob a ótica IoT: Estudos de geração e
consumo energético**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Tiago Manêra

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Mathias Scroccaro Costa, e orientada pelo Prof. Dr. Leandro Tiago Manêra.

Campinas

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C823d Costa, Mathias Scroccaro, 1994-
Desenvolvimento de dispositivo de telemetria para hidrômetros sob a ótica IoT : Estudos de geração e consumo energético / Mathias Scroccaro Costa. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Leandro Tiago Manêra.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telemetria. 2. Colheita de energia. 3. Internet das coisas. I. Manêra, Leandro Tiago, 1977-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma:

Development of a telemetry device for water meters from an IoT perspective

: Energy generation and consumption studies

Palavras-chave em inglês:

Telemetry

Energy harvesting

Internet of things

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Leandro Tiago Manêra [Orientador]

Fabiano Fruett

Flávio José de Oliveira Morais

Data de defesa: 19-06-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-3170-9218>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8628441744647407>

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato(a): Mathias Scroccaro Costa RA: 210322

Data de defesa: 19 de junho de 2020

Titulo da Tese: “Desenvolvimento de dispositivo de telemetria para hidrômetros sob a ótica IoT: Estudos de geração e consumo energético”

Prof. Dr. Leandro Tiago Manêra (Presidente)

Prof. Dr. Fabiano Fruett

Prof. Dr. Flávio José de Oliveira Moraes

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*Dedico esta dissertação aos que defendem a democratização e o acesso ao conhecimento.
Aos que lutam pela universidade pública, gratuita e de qualidade. Aos esforços dos
programadores de Softwares Livres.*

Agradecimentos

À minha família, minha mãe, irmã e pai, pelo suporte, carinho e paciência. Sem o apoio irrestrito à educação que sempre recebi nenhum passo em direção à universidade e ao conhecimento estruturado seriam dados.

À Amanda C., a qual esta dissertação, toda experiência do mestrado e muitos momentos felizes que passei nos últimos anos não seriam possíveis se não a tivesse conhecido.

Ao meu professor orientador Leandro T. Manera, pelo acolhimento e confiança. À liberdade e autonomia concedidas. À possibilidade para meu crescimento pessoal, tanto técnico quanto moral. Obrigado pelo contato frequente em sala de aula, que me conduzem a sentimentos de admiração e inspiração.

Ao pessoal do laboratório LSERF (Laboratório de Soluções em Eletrônica e Rádio-Frequência), pelo conhecimento que construímos juntos, pelo acolhimento e vivências compartilhadas, em especial ao Lucas P., Felipe F., Alexandre K., Talita B. e Luiz F.

Às amigas que desenvolvi, em especial ao Adelson e ao Marllon. À Laura e à Isabella R., pelo debate ideológico e vigília comportamental. Ao Bens e à Nihao, pela estímulo à sensibilidade artística, fundamental em tempos de repressão, como os que atualmente assombram o Brasil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Se as máquinas produzirem tudo o que precisamos, o resultado vai depender de como as coisas serão distribuídas. Todos podem usufruir de uma vida de luxo e prazer se a riqueza produzida pelas máquinas for compartilhada, ou a maioria das pessoas pode acabar miseravelmente pobre, caso a pressão dos proprietários das máquinas contra a distribuição da riqueza obtenha êxito. Até agora, a tendência parece seguir na segunda opção, com a tecnologia conduzindo a uma desigualdade cada vez maior”
(Stephen Hawking)

“É preciso ter esperança, mas ter esperança do verbo esperar; porque tem gente que tem esperança do verbo esperar. E esperança do verbo esperar não é esperança, é espera. Esperançar é se levantar, esperar é ir atrás, esperar é construir, esperar é não desistir! Esperançar é levar adiante, esperar é juntar-se com outros para fazer de outro modo. . . ”

“Seria uma atitude ingênua esperar que as classes dominantes desenvolvessem uma forma de educação que proporcionasse às classes dominadas perceber as injustiças sociais de maneira crítica.”
(Paulo Freire)

Resumo

Nos últimos anos, a expansão da eletrônica móvel tem sido estimulada sob uma nova forma de dispositivos, denominados IoT (*Internet of Things*). Tais dispositivos, no contexto de cidades inteligentes, podem contribuir para o supervisionamento e controle de eventos de interesse público, como o monitoramento de recursos hídricos, por exemplo. A identificação de vazamentos e desperdícios da rede de distribuição hídrica, o acompanhamento de tendências de consumo, o monitoramento e a informatização dos dados, são algumas vantagens propiciadas por este tipo de inserção tecnológica. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de telemetria de hidrômetros, utilizando tecnologias emergentes de colheita de energia (*energy harvesting*) solar, supercapacitores, eletrônica e rádio de comunicação de baixo consumo. Para tanto, estratégias de projetos de eletrônica envolvendo sensoriamento, processamento de dados e comunicação via rádio *Bluetooth Low-Energy* (BLE) foram desenvolvidas, sob o horizonte energético propiciado por um bloco de colheita de energia. Medidas que avaliaram a geração fotovoltaica em ambientes internos foram tomadas. Para estimativas de demanda energética, o consumo de corrente do dispositivo foi avaliado por três métodos. O desempenho também foi verificado em ambiente externo, através de um circuito *datalogger* desenvolvido para esse objetivo. O sistema fabricado mostrou funcionalidade coerente, salvando dados de telemetria em memória e os enviando via comunicação BLE. Os resultados indicaram consumo de corrente médio de $10,9 \mu\text{A}$, em ensaios de bancada. Através do monitoramento em ambiente externo, foi verificado consumo médio de $13,42 \mu\text{A}$. O dispositivo apresentou autonomia energética, propiciada pelos circuitos de colheita de energia solar e armazenamento em supercapacitor, sem a necessidade do uso de baterias.

Palavras-chaves: Sistema de Telemetria; Colheita de Energia; Eletrônica de Baixo Consumo.

Abstract

In recent years, the expansion of mobile electronics has been stimulated under a new form of devices, called IoT (Internet of Things). In the context of smart cities, such devices can contribute to the supervision and control of events of public interest, such as the monitoring of water resources, for example. The identification of leaks and waste from the water distribution network, the monitoring of consumption trends and data informatization, are some advantages provided by this type of technological insertion. The objective of this work was the development of a telemetry system for water meters, using emerging technologies such as solar energy harvesting, supercapacitors, low-power electronics and communication radio. To this end, strategies for electronics projects were developed, involving sensing, data processing and Bluetooth Low-Energy (BLE) radio communication, under the energy horizon provided by an energy harvesting block. Measures involving photovoltaic generation in indoor environments were taken. For energy demand estimation, the current consumption of the device was assessed using three methods. Performance was also verified in an external environment, through a circuit datalogger developed for this purpose. The manufactured system showed coherent functionality, saving telemetry data in memory and sending it via BLE communication. The results indicated an average current consumption of $10.9 \mu\text{A}$, in laboratory tests. Through outdoor monitoring, an average consumption of $13.42 \mu\text{A}$ was verified. The device presented energy autonomy, provided by the circuits of solar energy harvesting and storage in supercapacitor, without the need of batteries.

Keywords: Telemetry System; Energy Harvesting; Low-Power Electronics.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Visão geral do projeto desenvolvido.	18
Figura 3.1 – Circuito equivalente para modelo prático de célula fotovoltaica.	19
Figura 3.2 – Curva característica I-V. Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).	20
Figura 3.3 – Canais BLE sobrepostos aos canais Wi-Fi. Em destaque os três canais BLE modo <i>advertising</i> . Adaptado de (Nikoukar et al., 2018).	22
Figura 4.1 – Sistema de extração de curva I-V.	26
Figura 4.2 – Circuito de condicionamento analógico.	27
Figura 4.3 – Diagrama de blocos do sistema de telemetria.	28
Figura 4.4 – Circuito elaborado para captação, armazenamento e gerenciamento energético.	29
Figura 4.5 – Hidrômetro a ser utilizado. Destacado em (1) o local onde será instalado o sensor ótico.	30
Figura 4.6 – Suporte para o sensor óptico, (a) projeto e (b) protótipo.	31
Figura 4.7 – Proposta de circuito de condicionamento analógico para o sensor ótico.	32
Figura 4.8 – Circuito elaborado para controle microcontrolado.	33
Figura 4.9 – Circuito elaborado para conexão de memória EEPROM.	34
Figura 4.10 – Circuito elaborado para <i>debug</i>	34
Figura 4.11 – Esquemático do circuito elaborado para o primeiro método de medida de corrente.	35
Figura 4.12 – Esquemáticos dos circuitos elaborados para o segundo método de medida de corrente.	36
Figura 4.13 – Esquemático para medida de corrente através de decaimento de tensão no supercapacitor.	36
Figura 4.14 – Circuito de alimentação do <i>datalogger</i>	37
Figura 4.15 – Circuitos de filtro passa-baixas.	38
Figura 4.16 – Circuito e conexões do microcontrolador.	39
Figura 4.17 – Circuito e conexões da memória <i>flash</i>	39
Figura 5.1 – Extração da curva I-V com simulador solar.	40
Figura 5.2 – Da esquerda à direita: interface microcontrolada, circuito de condicionamento analógico e célula solar.	41
Figura 5.3 – Localizações selecionadas pra medida de curva I-V.	42
Figura 5.4 – Momento de tomada de medida de cronopotenciometria, no laboratório Carbon Sci-Tech Labs da Unicamp.	44
Figura 5.5 – Medida de cronopotenciometria através de potenciostato.	44
Figura 5.6 – <i>Layout</i> do circuito do dispositivo de telemetria do hidrômetro.	45

Figura 5.7 – Placa de circuito impresso desenvolvida para o dispositivo de telemetria.	46
Figura 5.8 – Diagrama de estados do <i>firmware</i> programado.	46
Figura 5.9 – Indicador de medida de consumo através do celular.	48
Figura 5.10–Tensão sobre o capacitor de sensoriamento.	48
Figura 5.11–Intervalo de amostragem do circuito de sensoriamento.	49
Figura 5.12–Túnel de vento para simulação de fluxo de água.	50
Figura 5.13– <i>Layout</i> do circuito <i>datalogger</i> .	50
Figura 5.14–Placa de circuito impresso desenvolvida para o dispositivo <i>datalogger</i> .	51
Figura 5.15–Diagrama de estados do <i>firmware</i> programado.	51
Figura 5.16–Circuito elaborado para comparação das medidas do dispositivo.	52
Figura 5.17–Monitoramento da tensão ao longo do tempo, observada sobre supercapacitor.	52
Figura 5.18–Corrente total medida através do multímetro.	53
Figura 5.19–Tensão observada sobre resistor <i>shunt</i> de 10 Ω , em momento de transmissão de pacotes via rádio BLE.	54
Figura 5.20–Corrente observada quando não há transmissão via BLE.	55
Figura 5.21–Monitoramento da tensão ao longo do tempo, observada sobre supercap, parametrizadas pelo intervalo de envio dos pacotes <i>Advertising</i> BLE.	56
Figura 5.22– <i>Setup</i> montado para medida em ambiente externo.	58
Figura 5.23–Monitoramento da tensão, observada sobre supercapacitor de 1 F, ao longo de pouco mais de 4 dias.	59
Figura 5.24–Fluxograma do algoritmo de funcionamento otimizado.	60

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Resultados da caracterização da célula fotovoltaica no simulador solar.	41
Tabela 5.2 – Resumo dos dados obtidos com medidas I-V.	43
Tabela 5.3 – Dados resumidos do procedimento de cronopotenciometria.	45
Tabela 5.4 – Comparativo de funcionamento do circuito <i>datalogger</i> com multímetro.	53
Tabela 5.5 – Decaimento da tensão no supercapacitor, parametrizado pelo intervalo de envio de pacotes <i>advertising</i> BLE.	56
Tabela 5.6 – Resumo do consumo de corrente estimado pelos diferentes métodos.	57
Tabela 5.7 – Custo aproximado dos componentes utilizados no projeto.	61

Lista de Acrônimos e Abreviações

μ C	Microcontrolador
ADC	Conversor Analógico para Digital
BLE	<i>Bluetooth Low-Energy</i>
DAC	Conversor Digital para Analógico
ESR	Resistência em série equivalente
IoT	<i>Internet of Things</i>
MPP	Ponto de Operação de Máxima Potência
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>

Sumário

1	Introdução	16
2	Motivação e objetivos	17
3	Referencial teórico	19
3.1	Colheita de energia solar	19
3.2	Capacitores e medidas de caracterização de interesse ao projeto	21
3.3	Interface de comunicação <i>Bluetooth Low-Energy</i>	22
3.4	Trabalhos semelhantes	24
3.5	Nuances do projeto	25
4	Metodologia e projetos desenvolvidos	26
4.1	Estudo de captação energética fotovoltaica em ambiente interno	26
4.1.1	Sistema de medida I-V	26
4.1.2	Desenvolvimento do circuito de condicionamento analógico	27
4.2	Desenvolvimento do dispositivo de telemetria para hidrômetros	28
4.2.1	Captação, armazenamento e gerenciamento energético	28
4.2.2	Sensoriamento e condicionamento de sinais	30
4.2.3	Microcontrolador, memória e rádio de comunicação BLE	33
4.3	Medidas de consumo em bancada	34
4.3.1	Método #1 - Exclusivamente com multímetro	35
4.3.2	Método #2 - Multímetro e osciloscópio	35
4.3.3	Método #3 - Decaimento de tensão no supercapacitor, baseado em procedimento de cronopotenciometria	36
4.4	Medidas em ambiente externo	37
4.4.1	Desenvolvimento de circuito <i>datalogger</i>	37
5	Resultados e discussões	40
5.1	Captação energética fotovoltaica em ambiente interno	40
5.1.1	Caracterização da célula fotovoltaica	40
5.1.2	Manufatura do dispositivo para aquisição de medida I-V	41
5.1.3	Dados aquisitados com o experimento	42
5.2	Caracterização do supercapacitor utilizado no trabalho	43
5.3	Circuito de telemetria de hidrômetros	45
5.3.1	Manufatura do <i>Hardware</i>	45
5.3.2	Programação do <i>Firmware</i>	46
5.3.3	Funcionalidade da memória EEPROM e rádio de comunicação	47
5.3.4	Funcionalidade do circuito de sensoriamento	47
5.4	Circuito <i>datalogger</i>	49
5.4.1	Manufatura do <i>Hardware</i>	50

5.4.2	Programação do <i>Firmware</i>	51
5.4.3	Comparativo de funcionamento entre circuito <i>datalogger</i> e multímetro	51
5.5	Medidas de consumo em bancada	53
5.5.1	Método #1 - Exclusivamente com multímetro	53
5.5.2	Método #2 - Multímetro e osciloscópio	53
5.5.3	Método #3 - Decaimento de tensão no supercapacitor	55
5.5.4	Considerações e comparativos sobre os métodos de medida de corrente	57
5.6	Comportamento do circuito de telemetria em ambiente externo	58
5.7	Algoritmo para o funcionamento otimizado	60
5.8	Custos do projeto	61
6	Conclusões	62
7	Trabalhos futuros	64
	Referências	65

1 Introdução

Com o escalamento da tecnologia MOS, novas funcionalidades integram cada vez mais os dispositivos eletrônicos, em diferentes aspectos, os quais se estendem desde sensores integrados até blocos transmissor/receptor de rádio-frequência. Nesta tendência tecnológica, o consumo energético por circuito tende a diminuir, favorecendo um cenário de crescimento da eletrônica móvel.

Nos últimos anos, a expansão da eletrônica móvel tem sido estimulada sob uma nova forma de dispositivos, denominados IoT (*Internet of Things*). Tais dispositivos, no contexto de cidades inteligentes, podem contribuir no monitoramento e controle de eventos de interesse público, de diferentes domínios, como monitoramento de condições ambientais (qualidade do ar e qualidade da água), controle de tráfego, administração e distribuição de recursos (hídricos e elétricos), entre outras funções (Gyrard; Zimmermann; Sheth, 2018).

Particularmente para soluções IoT de monitoramento de consumo d'água doméstico, as vantagens da implementação de um sistema de telemetria tangenciam questões de caráter ambiental, econômico e social. A identificação de vazamentos e desperdícios da rede, o acompanhamento de tendências de consumo, o monitoramento e a informatização dos dados, são algumas das vantagens que, no limite, são visadas pelas companhias administradoras dos recursos hídricos devido à redução do custo operacional.

Propostas de telemetria alinhadas ao monitoramento de medidas d'água podem ser vistas em (SHARATH et al., 2015; TAVARES et al., 2018; HSIA; HSU; CHANG, 2012; LI et al., 2017), no entanto, para esses trabalhos, não há um estudo sistematizado voltado à fonte de alimentação dos sistemas. Quando há o estudo, como apresentado em (LEE; EUN; OH, 2008), a estratégia de armazenamento energético é pouco sustentável, pelo uso exclusivo de baterias.

Neste trabalho, será apresentado um sistema de telemetria para hidrômetros, que possui um bloco de colheita de energia (*energy harvesting*). Este bloco adicional tem função de geração energética, contribuindo para um tempo adicional de funcionamento do dispositivo, prolongando o período de eventuais manutenções. Uma vez que o desenvolvimento do dispositivo foi centralizado sob a temática de otimização energética, foram realizados estudos relacionados à geração, armazenamento e consumo de energia.

2 Motivação e objetivos

A internet das coisas (IoT) é a tendência tecnológica que agrega o conceito de conectividade dos objetos. Alguns compromissos de projeto alinham-se com a proposta: baixo-consumo, confiabilidade, baixo-custo, disponibilidade e mecanismos de coexistência (Nikoukar et al., 2018). Nesse contexto, os sistemas a serem desenvolvidos devem dispor de sensores ou atuadores que mantenham comunicação via rádio, organizados em uma rede de comunicação (Xu; He; Li, 2014). Dentre os pontos-chaves a serem trabalhados em um nó IoT, sob o panorama da eletrônica móvel e sem fio, o consumo energético norteia os circuitos constituintes. Assim, é do interesse do projetista otimizar os gargalos energéticos do sistema, como o bloco de alimentação e rádio.

A proposta dos circuitos *energy harvesting* é suprir energeticamente sistemas de baixo consumo, para uma autonomia prolongada quando há baterias ou até mesmo as eliminando. É conveniente dispositivos IoT usufruírem de tais circuitos, quando as especificações do projeto permitem. O processo produtivo de equipamentos eletrônicos que evitam o consumo de baterias contribui para tecnologias mais limpas, cujo impacto ambiental é atenuado no ciclo de vida do dispositivo. Desta maneira, o estudo do ramo tecnológico de circuitos de colheita de energia contribui para consolidação de conhecimentos emergentes, que envolvem frentes multidisciplinares, mas sobretudo voltados à eletrônica de baixo consumo.

O objetivo geral deste projeto foi o desenvolvimento de um sistema de telemetria para hidrômetros, como prova de conceito de circuitos de colheita de energia. Foi desenvolvido um sistema de medição de hidrômetros, capaz de transmitir dados via protocolo *Bluetooth Low-Energy* (BLE), alimentado por circuito de colheita de energia solar. Para tanto, o sistema foi concebido com blocos: de gerenciamento energético, envolvendo colheita de energia através de células fotovoltaicas e armazenamento em supercapacitor; sensoriamento do hidrômetro; processamento de dados e comunicação via rádio. Cada bloco componente será visto na Seção 4.2, de maneira mais detalhada. Assim, os seguintes objetivos específicos foram propostos e executados:

- Revisão dos fenômenos que regem o funcionamento de caráter gerador energético de células fotovoltaicas. Estudo sobre a capacidade de geração fotovoltaica em possíveis cenários onde o sistema estaria inserido, e o desenvolvimento de um circuito para entrega controlada de tensão de colheita de energia.
- Desenvolvimento de circuito para o manejo energético, capaz de controlar as fontes de energia, com bateria ou por *harvesting*.

- Estudo a cerca dos fenômenos elétricos que regem os supercapacitores, não somente, utilizar tal dispositivo como elemento armazenador de energia, obtida do meio ambiente. Necessariamente, desenvolvimento de circuito para administrar fluxo de cargas, carregamento e consumo de energia;
- Desenvolvimento de circuito de sensoriamento e leitura do hidrômetro;
- Revisão do protocolo *Bluetooth Low-Energy*, estudo sobre a programação do dispositivo microcontrolado que o embarca e sua implementação para o envio de dados de telemetria;
- Estudos de caráter avaliativo referentes ao desempenho do sistema, tanto de funcionalidade quanto de consumo energético.

O diagrama de blocos da Figura 2.1 mostra uma visão geral de todo o sistema desenvolvido. Os circuitos propostos de colheita de energia e sensoriamento microcontrolado foram embarcados em um sistema protótipo de telemetria. As leituras de telemetria foram mimetizadas por comunicação em curta distância com um *smartphone* compatível com rádio BLE.

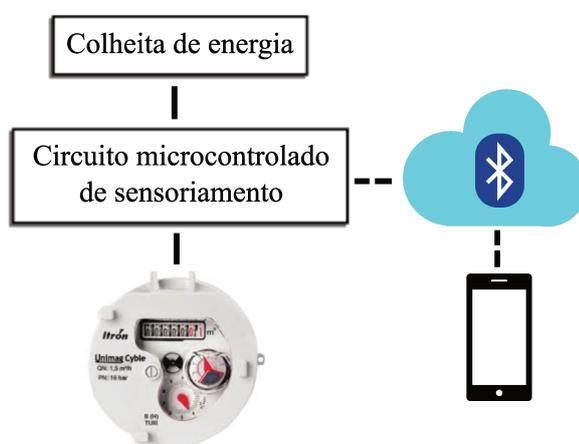


Figura 2.1 – Visão geral do projeto desenvolvido.

3 Referencial teórico

Para o desenvolvimento do sistema de telemetria, foi necessária uma fundamentação teórica para sustentar a viabilidade prática. Desta maneira, nesta seção, foi realizada uma breve revisão bibliográfica sobre temas específicos abordados no projeto. As temáticas envolvem conceitos teóricos e verificações práticas sobre o sistema de colheita de energia, sobre o armazenamento de energia em capacitores e o rádio de comunicação, no contexto da aplicação em IoT. Ao final da seção, também é realizada uma revisão de trabalhos semelhantes encontrados na literatura, com comentários sobre os pontos mais importantes, bem como uma exposição de nuances do projeto.

3.1 Colheita de energia solar

Em sistemas de conversão de luz em eletricidade o principal dispositivo utilizado é a célula fotovoltaica. Sua constituição elementar é uma junção P-N, cuja região de depleção é exposta à luz (SWART, 2008). Diversos são os materiais empregados no dispositivo (GREEN et al., 2019), sendo o silício comercialmente mais aceito.

Quando fótons incidentes no material possuem energia suficiente para separar os elétrons de suas ligações covalentes há a geração de cargas, pares elétron-lacunas. Como a geração das cargas é projetada para ocorrer majoritariamente no campo elétrico da região de depleção P-N, há então, por parte fracionada das cargas, um deslocamento de mesmo sentido e, conseqüentemente, uma corrente nos terminais do dispositivo, se fechado o circuito (SWART, 2008).

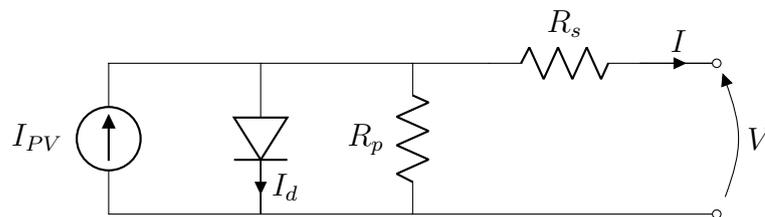


Figura 3.1 – Circuito equivalente para modelo prático de célula fotovoltaica.

A modelagem de uma célula fotovoltaica prática pode ser realizada de diferentes maneiras (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; SERA; TEODORESCU; RODRIGUEZ, 2007; CELIK; ACIKGOZ, 2007). O esquema elétrico adotado neste trabalho pode ser representado conforme a Figura 3.1, baseado no proposto por (VILLALVA; GAZOLI;

FILHO, 2009), cujo equacionamento é visto na Equação (3.1).

$$I = I_{PV} - \underbrace{I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_S I}{V_T a}\right) - 1 \right]}_{I_D} - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (3.1)$$

No modelo é prevista uma corrente I_{PV} , gerada pela luz incidente na célula fotovoltaica, linearmente proporcional à irradiação incidida e também dependente da temperatura. Uma parcela I_D , correspondente à corrente do diodo presente no modelo, cujo V_T é a tensão térmica e “ a ” é o fator de idealidade. R_S , resultante do somatório de resistências em série estruturais do dispositivo fotovoltaico. Finalmente, R_P , que é a resistência em paralelo devido à corrente de fuga da junção P-N. Ambas as resistências apresentam valores nominais dependentes do processo de fabricação.

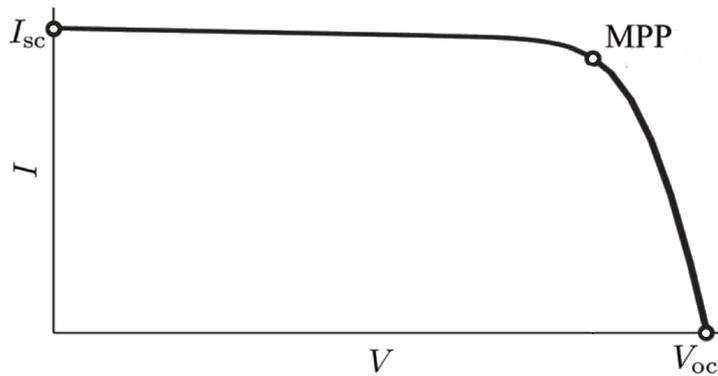


Figura 3.2 – Curva característica I-V. Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

Um esboço da curva característica I-V de uma célula fotovoltaica é mostrado na Figura 3.2. Parâmetros de desempenho, como a corrente de curto circuito I_{sc} , tensão de circuito aberto V_{oc} , resistência em série e paralelo, podem ser extraídos tipicamente através da medida I-V. Quando as células são submetidas a determinadas condições, como variação da intensidade de luz ou temperatura, padrões de comportamento são evidenciados na curva. Não somente, com esta medida é possível obter o ponto de operação de máxima potência (MPP) (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009), naturalmente almejado em sistema com limitações energéticas, como é o caso de circuitos de *energy harvesting*.

Em relação à densidade energética capaz de se obter com células fotovoltaicas, a potência por área verificada na literatura para ambientes internos é em torno de $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (TAN; PANDA, 2011; PARADISO; STARNER, 2005) e para ambientes externos de $10 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (TAN; PANDA, 2011) a $15 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (Kansal; Hsu; AND, 2005). Sabendo a ordem de grandeza energética disponível e o contexto dos recursos de *hardware* a serem utilizados na aplicação, é possível dimensionar a área mínima da célula fotovoltaica para uma estimativa autônoma do sistema de telemetria.

3.2 Capacitores e medidas de caracterização de interesse ao projeto

A nível macroscópico, a principal função matemática que expressa o comportamento elétrico de um capacitor é

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}, \quad (3.2)$$

em que C é a capacitância, ε_0 e ε_r são as constantes de permissividade elétrica do vácuo e relativa do isolante, respectivamente. A é a área e d é a distância entre as placas condutoras do dispositivo.

Podem ser genericamente classificados em três tipos: capacitores eletrostáticos, eletrolíticos e eletro-químicos. Os dois primeiros dispositivos são construídos de maneira semelhante, de modo que, geralmente são empregados eletrodos de metal, separados por um dielétrico. A diferença física entre eles se dá principalmente na constituição do dielétrico, em que o capacitor eletrostático apresenta um material separador não condutivo e o eletrolítico apresenta uma solução salina condutiva. Os capacitores eletrolíticos de Alumínio, por exemplo, possuem uma fina camada não-condutora de óxido entre seus eletrodos, resultando, não somente, em uma maior capacitância, se comparado aos eletrostáticos, mas também, em uma polaridade para seu adequado funcionamento (SHARMA; BHATTI, 2010; Gavrilá; Gontean, 2012; Both, 2015).

O terceiro tipo, capacitores eletro-químicos, são conhecidos por diferentes nomenclaturas, tais como: supercapacitores, *power capacitors* e *double-layer capacitors*. Estes dispositivos armazenam energia entre uma interface de eletrodos sólidos e um eletrólito líquido. Os eletrodos são tipicamente fabricados de carvão ativo ou óxidos metálicos, de alta porosidade. Assim, a área efetiva de superfície aumenta consideravelmente, resultando numa maior capacitância, comparado aos capacitores convencionais eletrostáticos e eletrolíticos. Algumas vantagens técnicas os tornam comercialmente atraentes, como o grande número de ciclos de carga e descarga, rápida taxa de carga e descarga, menor impacto ambiental, comparado às baterias (TABERNA; SIMON, 2013; SHARMA; BHATTI, 2010). Desta maneira, o emprego de supercapacitores tem se tornado uma opção cada vez mais latente em circuitos de eletrônica de potência.

A fim de se medir características elétricas em supercapacitores, como a capacitância, o procedimento de cronopotenciometria pode ser realizado. Este ensaio se traduz no monitoramento da tensão entre os terminais do dispositivo, mediante ciclos de carga e descarga, através de uma fonte de corrente constante (TABERNA; SIMON, 2013).

3.3 Interface de comunicação *Bluetooth Low-Energy*

Com o crescente número de objetos conectados à internet, impulsionados pela tendência IoT, diversas tecnologias de rádio têm surgido para suprir essa demanda (Nikoukar et al., 2018). O *Bluetooth Low-Energy* tem se mostrado de grande potencial para comunicação de curta distância em dispositivos IoT (Jeon et al., 2018).

Bluetooth v4.0 Low Energy (BLE), também conhecido por *Bluetooth Smart*, é a tecnologia sucessora do *Bluetooth* clássico. Na época de seu desenvolvimento, foi projetado com o objetivo de ser o protocolo de menor consumo energético para comunicações de curtas distâncias (HEYDON, 2012).

A banda de frequências do espectro eletromagnético utilizadas pelo BLE compreende 40 canais distribuídos de 2,4 GHz a 2,48 GHz, faixa não licenciada ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), garantindo, assim, menores custos de produção, comparado a rádios que utilizam faixas licenciadas. Não somente, para evitar interferências e perdas de sinal, o protocolo realiza saltos nos canais, de maneira adaptativa, esquema conhecido como *adaptive frequency hopping*. A modulação utilizada é GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), com taxa de símbolos e bit ambas de 1 Mbps. A potência de transmissão é padronizada de -20 dBm a 10 dBm (Nikoukar et al., 2018; HEYDON, 2012; Lin; Talty; Tonguz, 2015).

Mudanças tanto em camadas de *software* e *hardware* diferem a versão *Low-Energy* de seus antecessores, principalmente sob a ótica do consumo energético: O tráfego de dados suportado pelo BLE é reduzido; Seu tempo para estabelecer conexões e troca de dados também o é, resultando em um consumo energético significativamente menor; Diferente de sua versão clássica, é evitado o constante pareamento e troca de dados. O BLE não foi desenvolvido para melhorar sua versão clássica, mas sim para atender um novo mercado emergente de dispositivos sem fio, atribuídos à tendência IoT (HEYDON, 2012; Jeon et al., 2018).

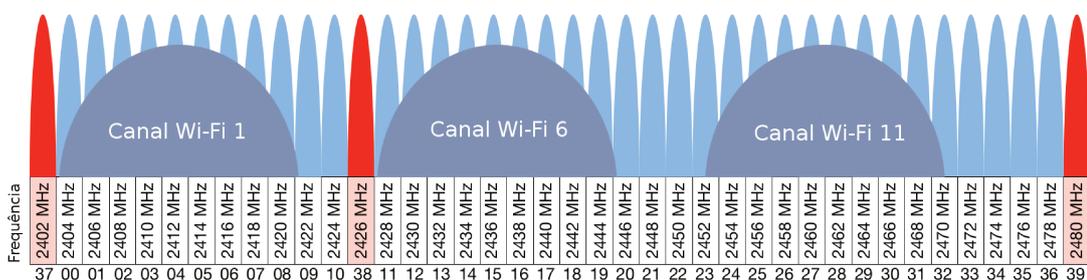


Figura 3.3 – Canais BLE sobrepostos aos canais Wi-Fi. Em destaque os três canais BLE modo *advertising*. Adaptado de (Nikoukar et al., 2018).

Dentre os tipos de pacotes utilizados pelo BLE, o modo *advertising* faz uso de 3 dos 40 canais disponíveis ao protocolo. Na Figura 3.3 são mostradas as bandas de

frequências utilizados pelo BLE ao longo do espectro eletromagnético e destacado em vermelho as empregadas no modo *advertising*. É importante lembrar que redes Wi-Fi são vastamente utilizadas e operam na mesma faixa ISM de 2,4 GHz, como mostram os canais 1, 6 e 11 na Figura. Desta maneira, o modo *advertising* reduz interferências quando faz uso de bandas adjacentes aos canais Wi-Fi (Jeon et al., 2018), garantindo maior confiabilidade.

Estudos comparativos entre tecnologias de rádio cogitadas para IoT e o BLE tem evidenciado a característica de baixo consumo energético do protocolo. No trabalho de (MIKHAYLOV; PLEVRITAKIS; TERVONEN, 2013), o autor mostrou que o BLE consumiu de 4 a 7 vezes menos energia que os protocolos IEEE 802.15.4 e SimpliciTI, para transmissão de um mesmo *payload*, além de possuir o menor preço entre os *chips* empregados (todos *Texas Instruments* com microcontrolador baseado no Intel 8051). No entanto, o tamanho acumulado de memória flash e RAM necessária para implementação da pilha BLE foi de 4 a 8 vezes maior. (SIEKKINEN et al., 2012) aplicou a métrica “utilidade energética” em seu artigo, que é a relação de KBytes/Joule transmitidos. Foi comparada a utilidade energética em função da quantidade de *bytes* transmitidos e velocidade de comunicação, para os padrões BLE e IEEE 802.15.4. Seus resultados mostraram que o padrão BLE possui, de fato, maior utilidade energética em ambas as comparações. O autor de (Lin; Talty; Tonguz, 2015) levantou um quadro comparativo entre circuitos integrados *Texas Instruments* CC2504 e CC2430, com suporte para BLE e ZigBee embarcados, respectivamente. É mostrado que o consumo para transmissão dos pacotes e o preço do *chip* BLE é menor que o ZigBee.

3.4 Trabalhos semelhantes

A automação de medidas de consumo de água não é um assunto novo na literatura. Trabalhos sobre medidores inteligentes podem ser datados desde 2008. No entanto, com o passar dos anos, a principal diferença discutida entre os trabalhos é sobre as técnicas empregadas, seja no sensoriamento do dispositivo, na tecnologia de comunicação, no gerenciamento energético ou até no processamento dos dados de medidas. A seguir, serão descritos alguns trabalhos semelhantes encontrados na literatura e comentados pontos pertinentes à temática do presente trabalho.

Lee *et al.* (2008) desenvolveu um dispositivo de telemetria com sensoriamento por efeito hall. Um dos compromissos de seu projeto foi a durabilidade de funcionamento do sistema por 8 anos, utilizando baterias de Lítio. Desta maneira, o dispositivo foi projetado para depender exclusivamente de baterias para manutenção de seu funcionamento, sendo uma solução de maior impacto ambiental, comparado ao uso de supercapacitores. No trabalho, é mostrado um estudo a cerca do consumo energético do sistema, totalizando pouco mais de $80 \mu\text{A}$. A comunicação do dispositivo é viabilizada pela tecnologia ZigBee.

Hsia *et al.* (2012) mostra um novo método de digitalização das medidas de hidrômetros. É proposta a leitura das aletas mecânicas da relojoaria do hidrômetro através do acoplamento capacitivo que elas proporcionam. Para tanto, os autores utilizam um circuito de condicionamento de sinais com FPGA (*Field Programmable Gate Array*). A comunicação de dados é viabilizada pela tecnologia GSM. No trabalho, não fica evidenciado as estratégias utilizadas na alimentação do circuito, muito menos é objeto de estudo.

No trabalho de Sarath *et al.* (2015), é desenvolvido um dispositivo que utiliza sensoriamento por efeito hall e estabelece comunicação através da interface ZigBee. É descrito o sistema através de um diagrama de blocos, cuja alimentação é realizada através da rede de alimentação. Não são feitos estudos sobre o consumo energético do dispositivo.

O dispositivo de Mudumbe e Abu-Mahfouz (2015) utilizou sensoriamento Reed switch e tecnologia de comunicação 6LowPAN. A fonte de alimentação é provida de colheita de energia solar, cujo armazenamento é feito em baterias recarregáveis. Embora a solução de gerenciamento energético adotada contribua para uma menor taxa de manutenção do dispositivo, o número de ciclos de carga e descarga de uma bateria é expressivamente menor comparado a um supercapacitor. Não fica evidenciado o consumo energético total do dispositivo.

Li *et al.* (2017) desenvolveu um sistema de telemetria que utiliza sensoriamento por reed switch e comunicação via LoRa e GPRS. Segundo autor, o consumo médio do dispositivo é de $50 \mu\text{A}$, projetado unicamente para drenar cargas de uma bateria de Lítio 3,7 V. Não é feito um detalhamento de como são realizadas as medidas de consumo de

corrente do dispositivo. Detalhes construtivos são mostrados em diagramas de blocos.

Tavares *et al.* (2018) desenvolveu um dispositivo de telemetria que utiliza sensoriamento reed switch e tecnologia de comunicação por Wi-Fi. A fonte de alimentação é através da rede de alimentação e não é feito um estudo sobre o consumo energético do dispositivo.

Com as referências levantadas, fica evidente que não há um compromisso, por parte dos autores, em desenvolver um dispositivo de telemetria compatível com as propostas IoT e que não utilize baterias, ou outras fontes de armazenamento energético de menor impacto ambiental. Assim, o presente trabalho visa a preencher esta lacuna, trazendo uma solução de telemetria energeticamente autônoma e com tecnologia de armazenamento mais sustentável.

3.5 Nuances do projeto

A proposta de desenvolvimento do dispositivo de telemetria surgiu como uma solução às demandas de telemetria das companhias de administração da rede hídrica. A ideia central foi que, em um primeiro momento transitório, profissionais leituristas, que manualmente aferem os hidrômetros, utilizariam uma tecnologia portátil capaz de processar a telemetria.

O trabalho dos leituristas ainda seria necessário, uma vez que seriam mantidos os postos de trabalho, mas passaria a incorporar uma ferramenta tecnológica. A telemetria seria procedida de maneira remota, através de comunicação sem fio de curta distância, de maneira que não necessitasse o contato direto com a relojoaria. O leiturista poderia, então, dispor de um veículo de transporte e extrair dinamicamente as medidas dos hidrômetros, de forma mais rápida.

Adicionalmente, outro requisito importante foi a avaliação do não uso de baterias, associada a uma eletrônica embarcada no hidrômetro que não necessitasse de manutenções periódicas regulares. Desta maneira, as tecnologias empregadas de supercapacitor e rádio de comunicação *Bluetooth Low-Energy* convergiram em uma solução eletrônica de baixo consumo alinhada com a viabilidade da técnica de colheita de energia solar.

4 Metodologia e projetos desenvolvidos

O presente trabalho é centralizado no desenvolvimento de um sistema de telemetria para hidrômetros, de baixo consumo, capaz de utilizar tecnologias de captação, armazenamento e consumo energético, otimizadas em função do saldo de energia. Assim, não somente estudos relacionados à técnica do desenvolvimento do sistema de telemetria foram realizados, mas também quanto à geração e consumo.

O texto a seguir foi dividido em seções correspondentes ao estudo de captação energética em ambientes internos (Seção 4.1), desenvolvimento do dispositivo de telemetria (Seção 4.2), estudos em laboratório de consumo do dispositivo (Seção 4.3) e, por fim, estudos testes realizados em ambiente externo (Seção 4.4).

4.1 Estudo de captação energética fotovoltaica em ambiente interno

A colheita de energia solar é uma fonte intermitente de recursos, que está diretamente condicionada à localização inserida. Ambientes sombreados ou com iluminação solar indireta apresentarão desempenho de captação inferior aos dispostos em sol pleno. Uma vez mapeado MPP em regiões onde estão disponíveis os menores índices de intensidade luminosa, é possível prever e projetar a capacidade de colheita de energia nos cenários menos favorecidos.

Assim, com o objetivo de se prever o potencial gerador fotovoltaico em casos críticos, foi desenvolvido um circuito para extrair a curva I-V de células solares. Através do processamento de curvas I-V, foi mapeado o MPP em ambientes internos da faculdade de engenharia elétrica da Unicamp.

4.1.1 Sistema de medida I-V

O circuito completo para extração da curva I-V consiste de um computador, uma interface de controle microcontrolada e um circuito de condicionamento analógico. Na Figura 4.1 é mostrado um diagrama de blocos simplificado do sistema.

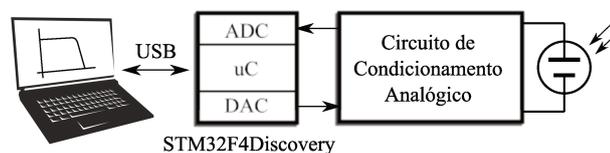


Figura 4.1 – Sistema de extração de curva I-V.

Inicialmente, para realizar uma medida I-V, o computador envia comandos de configuração via interface USB ao circuito microcontrolado. O dispositivo, em contrapartida, responde as requisições, sintetiza sinais analógicos através de um DAC (Conversor Digital para Analógico) e realiza conversão nos canais do ADC (Conversor Analógico para Digital). Os sinais manipulados pelo microcontrolador (μC) interagem com o circuito de condicionamento analógico, o qual está diretamente conectado à célula fotovoltaica.

4.1.2 Desenvolvimento do circuito de condicionamento analógico

Existem diferentes metodologias para extração da curva I-V (ARANDA et al., 2009; JEEVANDOSS; KUMARAVEL; KUMAR, 2011), variando de acordo com a precisão ou custo operacional. A técnica utilizada neste trabalho consistiu no controle de uma corrente variável sobre a célula fotovoltaica e o monitoramento da tensão em seus terminais. Na Figura 4.2 é mostrado o esquemático completo do circuito de condicionamento analógico.

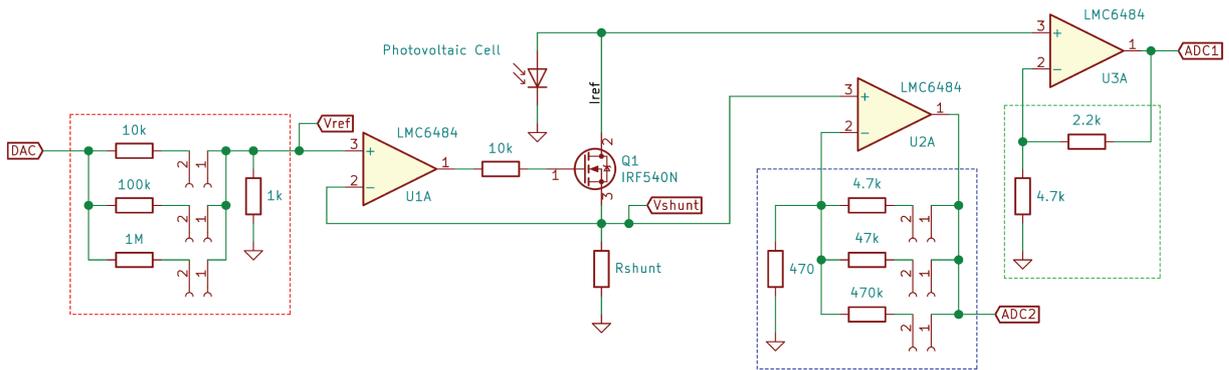


Figura 4.2 – Circuito de condicionamento analógico.

Ao lado esquerdo do esquemático, destacado em vermelho, *jumpers* com divisores de tensão são selecionados para decrementar a excursão do sinal gerado pelo DAC do microcontrolador. Assim, a possibilidade de máximos níveis de tensão em V_{ref} são aproximadamente 3,3 mV, 33,3 mV e 330 mV.

Por meio da realimentação formada em U1A e Q1, $V_{ref} \approx V_{shunt}$. Assim, a fonte de corrente I_{ref} tem magnitude de V_{ref}/R_{shunt} . A resistência R_{shunt} foi selecionada com valor de 1Ω , entregando, então, correntes máximas de 3,3 mA, 33,3 mA and 330 mA em I_{ref} . O MOSFET utilizado no circuito é um IRF540, transistor que apresenta baixo valor de $R_{ds(on)}$, tipicamente com $0,077 \Omega$.

Ao lado direito do esquemático existem dois estágios de ganho, que amplificam o valor de corrente e tensão da célula fotovoltaica, destacados em azul e verde, respectivamente. O ganho de corrente é ajustável por meio de jumpers, alterando em U2A ganhos de magnitudes 11 V/V, 101 V/V e 1001 V/V. O ganho de tensão é fixo e dado pela realimentação formada pelos resistores de 4,7 k Ω e 2,2 k Ω em U3A. Os valores de tensão

resultantes desses dois circuitos produzem as amostras das medidas I-V, que são lidas pelos nós ADC1 e ADC2 do microcontrolador.

Os resultados da prototipagem do circuito, bem como das medidas de curvas I-V serão mostrados adiante na Seção 5.1.

4.2 Desenvolvimento do dispositivo de telemetria para hidrômetros

O desenvolvimento do dispositivo de telemetria exigiu a concatenação de subsistemas singulares em um único dispositivo. A fim de se detalhar o projeto, nessa Seção serão mostradas particularidades dos circuitos desenvolvidos.

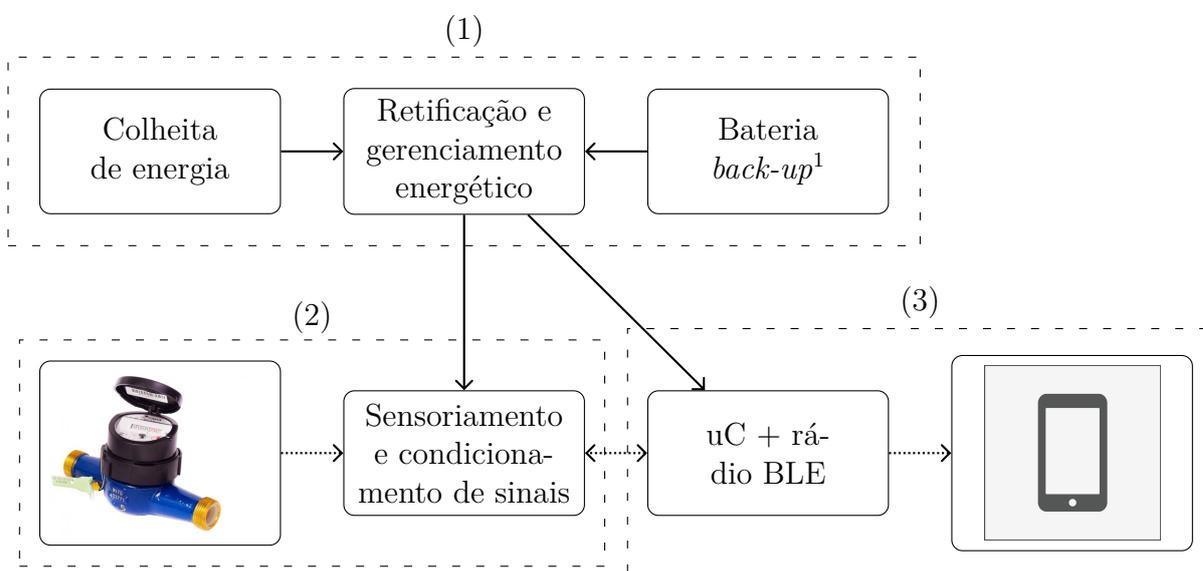


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do sistema de telemetria.

Na Figura 4.3 é mostrado um diagrama de blocos com os principais sistemas embarcados no dispositivo de telemetria. A fim de se facilitar a compreensão dos assuntos no texto, os subconjuntos tracejados enumerados de (1) a (3) agrupam respectivamente: sistema de captação, armazenamento e gerenciamento energético; sensoriamento e condicionamento de sinais; microcontrolador, memória e rádio de comunicação BLE. As setas com traço sólido indicam fluxo exclusivo de energia, alimentação ao longo dos sistemas; enquanto as setas pontilhadas representam o fluxo de informações de consumo do hidrômetro.

4.2.1 Captação, armazenamento e gerenciamento energético

O cerne do gerenciamento energético se constitui na manutenção plena de funcionamento do sistema de telemetria, isto é, dispor condições energéticas favoráveis

¹ Bateria está prevista no projeto, mas sua utilização não é mandatória.

para as tarefas de sensoriamento, processamento e comunicação via rádio. Para tanto, foi necessário prever a inconstância do circuito de colheita de energia, sem perder de controle a entrega de tensão e corrente. Tendo em vista os compromissos de projeto citados, foi desenvolvido o circuito conforme o esquemático da Figura 4.4. O dispositivo foi planejado para empregar energia solar coletada do meio ambiente na manutenção de seu funcionamento e, se necessário, utilizar uma bateria reserva.

Destacado em (1) na Figura, é mostrado o bloco referente à fonte energética *back-up* de bateria. Neste recorte, à esquerda no esquemático, são mostradas as conexões para bateria (*Battery Cell*), *jumper* de teste e acionamento (*Battery jumpers*) e circuito de conexão ao barramento de energia do sistema *Power Bus*.

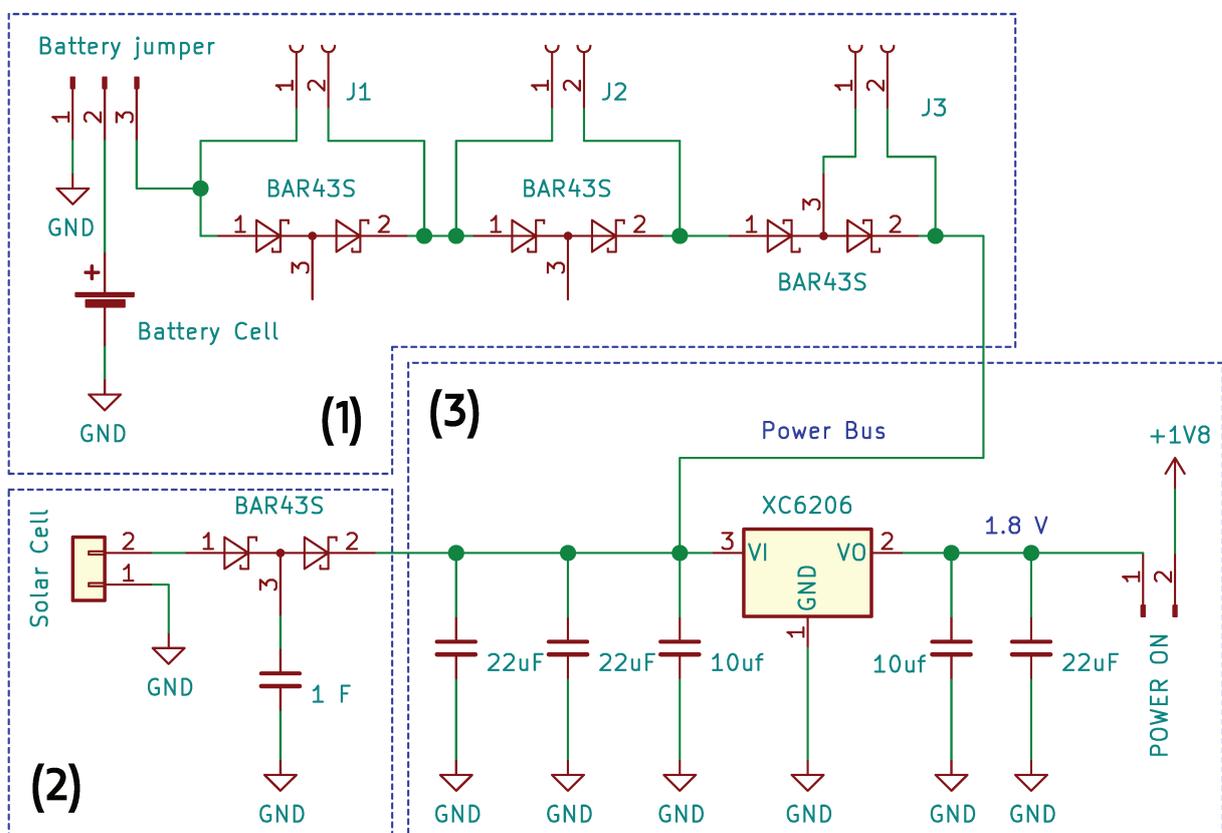


Figura 4.4 – Circuito elaborado para captação, armazenamento e gerenciamento energético.

Foi selecionada bateria de *back-up* de Ion Lítion modelo CR2032, devido ao seu tamanho compacto. Sua tensão nominal de operação é 3,6 V e não-intermitente, constante. Assim, através da rede de diodos BAR43S dispostos em série e *jumpers* enumerados de J1 a J3, o nível de tensão mínima no nó *Power Bus* pode ser controlado, comum à fonte de colheita de energia fotovoltaica e de *back-up*. Os diodos selecionados são modelo BAR43S, cuja queda de tensão é no máximo 0,330 V, quando diretamente polarizado, e corrente reversa de 500 nA (ON SEMICONDUCTORS, 2015).

Agora destacado em (2), a célula fotovoltaica é conectada ao circuito por meio

de bornes (*Solar Cell*) e sua tensão retificada através do BAR43S é entregue ao supercapacitor de 1 F, cuja tensão máxima é de 5,5 V. Em série ao supercapacitor há outro diodo, para conexão de sua carga ao nó *Power Bus*.

Por fim, o circuito de regulação da tensão do nó *Power Bus* é mostrado em (3). Tanto a fonte de tensão proveniente da carga do supercapacitor quanto da bateria apresentam resistências série de magnitudes que podem comprometer o desempenho do sistema, quando altas correntes são drenadas. Precavendo eventuais quedas de tensão na alimentação do sistema, um banco de capacitores de 22 μF foi adicionado ao circuito que antecede e sucede o regulador de tensão.

O regulador linear de tensão empregado é um modelo XC6206, que possui corrente quiescente de 1 μA e tensão de *dropout* de 0,250 mV, tipicamente (TOREX SEMICONDUCTORS, 2008). A tensão por ele regulada é em 1,8 V e entregue aos demais circuitos mediante o acionamento do *jumper POWER ON*. Na sequência, todos os circuitos do dispositivo de telemetria utilizam esta fonte de alimentação em 1,8 V.

Tendo em vista os níveis de tensão que operam os diodos, regulador linear e supercapacitor, é possível estimar a excursão da tensão de funcionamento do circuito. Somando o *dropout* do regulador linear e a queda de tensão do diodo, a tensão mínima observada no supercapacitor é de 2,38 V, para pleno funcionamento do circuito. A tensão máxima suportada pelo supercapacitor é de 5,5 V. Assim, a excursão possível no supercapacitor é a diferença entre os dois níveis de tensão, máximo e mínimo, com valor de 3,12 V.

4.2.2 Sensoriamento e condicionamento de sinais

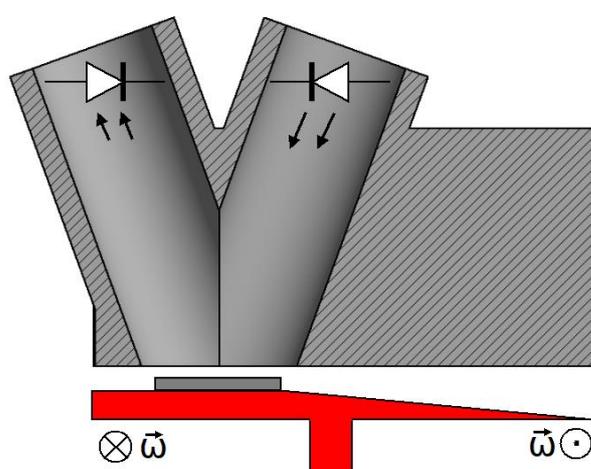
O modelo de hidrômetro utilizado como prova de conceito para telemetria é o padrão residencial Itron Unimag Cyble PN10, conforme mostra a Figura 4.5.



Figura 4.5 – Hidrômetro a ser utilizado. Destacado em (1) o local onde será instalado o sensor ótico.

Destacado em (1) na Figura 4.5, este é o local no dispositivo utilizado para o acoplamento do sensor ótico. Para esse modelo, a aleta metálica em destaque completa uma volta a cada 10 litros de vazão d'água, possibilitando, assim, estimar o consumo quando identificada uma rotação. A solução de sensoriamento encontrada para este caso foi o emprego de um *link* ótico.

O aluno de iniciação científica Lucas Perissinotto desenvolveu protótipos do suporte mecânico para o sensor ótico em plástico ABS, através da impressora 3D presente no laboratório, e seu trabalho foi continuado. Um esboço do acoplamento ótico é mostrado na Figura 4.6a e do suporte mecânico finalizado na Figura 4.6b.

(a) Perfil do *link* ótico.

(b) Suporte mecânico para o sensor.

Figura 4.6 – Suporte para o sensor ótico, (a) projeto e (b) protótipo.

Por meio de um diodo infravermelho e fototransistor, diferentes níveis de radiação são captados em função da posição que a aleta metálica se encontra. Conseqüentemente, níveis de corrente diferenciados fluem através do componente semiconductor ótico que, quando convertidos em níveis de tensão, possibilitam o emprego de circuitos comparadores.

Para o condicionamento de sinais do sensor ótico, foi elaborado o circuito baseado em célula de pixel ativo (MONTEIRO, 2002), conforme mostrado na Figura 4.7. À esquerda no esquemático é mostrado o circuito para transmissão do sinal ótico. Há um NMOS para polarização do diodo infravermelho LED_IR, somente quando for necessário, evitando perda de energia em momentos que os sinais não são amostrados. O valor do resistor R empregado no circuito de polarização é de 51 Ω .

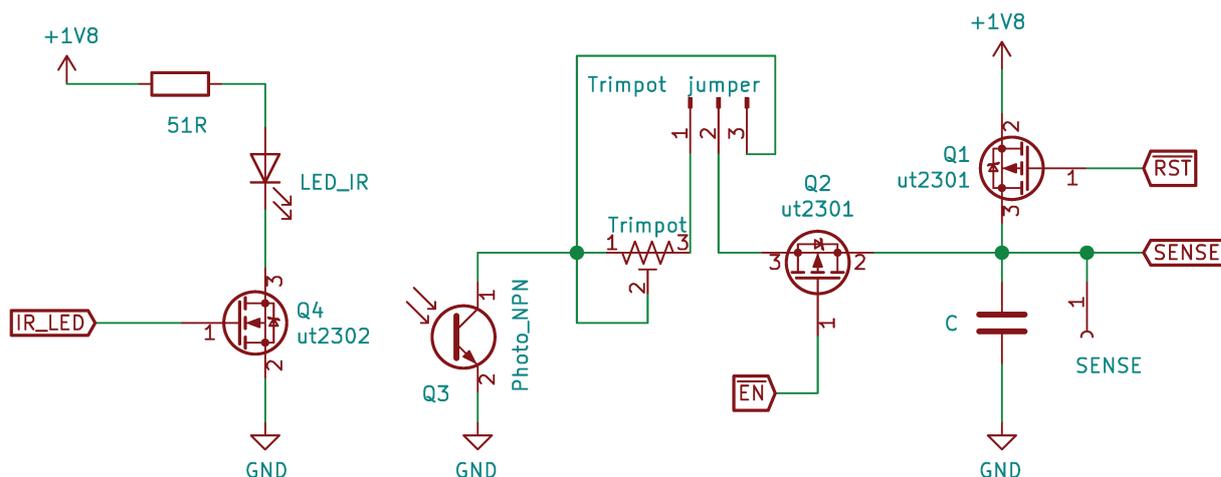


Figura 4.7 – Proposta de circuito de condicionamento analógico para o sensor óptico.

À direita no esquemático há a parte de recepção dos sinais ópticos. A ideia central de funcionamento do circuito receptor pode ser dividida na sequência de momentos: (1) Através do pino de controle \overline{RST} , há devida polarização do PMOS Q1 e o carregamento do capacitor C; (2) Logo em seguida, é cessado o carregamento de C e o pino SENSE passa a ser monitorado pelo comparador *low-power*. Simultaneamente, o pino de controle \overline{EN} polariza o PMOS Q2, como consequência, é habilitado o dreno da carga do capacitor C.

O dreno da carga ocorre devido à polarização do elemento fototransistor Q3, ou seja, quanto maior a intensidade de iluminação recebida pelo elemento sensor óptico, mais abrupta é a queda de tensão monitorada no capacitor. Nesta malha de corrente, o *trimpot* desempenha função de prolongar o decaimento de tensão e pode ser desabilitado por meio do *Trimpot jumper*, o que, de fato, foi realizado no dispositivo final de telemetria. Com todo esse mecanismo, é possível distinguir quando a aleta metálica está sobre o link óptico, ou não, e contabilizar o número de voltas.

A família de transistores utilizados, ut2301 e ut2302, possuem tensão de *threshold*, em módulo, da ordem de 0,45 V. Desta maneira, é possível polarizá-los com tensões tão baixas quanto 1,8 V da alimentação, para os sinais de corrente trabalhados. Não somente, entre dreno e fonte, apresentam resistência menor que 200 m Ω , quando polarizados, e corrente de fuga menor que 1 μ A, quando não polarizados.

Sabendo que a vazão máxima possível para este modelo de hidrômetro é de 1500 litros por hora e o período de cada rotação da aleta metálica é proporcional a 10 L d'água/rotação, o intervalo mínimo para uma rotação pode ser calculado, sendo de 24 segundos. Desta maneira, o tempo de amostragem do sensor foi fixado em 5 segundos.

4.2.3 Microcontrolador, memória e rádio de comunicação BLE

O microcontrolador empregado no dispositivo de telemetria é o NRF51822 da Nordic Semiconductors. O μC em questão possui núcleo ARM M0, com frequência máxima de trabalho de 16 MHz, 256 kB de memória flash e 16 kB de memória RAM (*Random Access Memory*). Apresenta os periféricos *Low-Power Comparator* (LPCOMP), *Universal Synchronous Receiver/Transmitter* (UART), *Real Time Clock* (RTC), *Timer* e rádio compatível com BLE, os quais foram empregados no projeto. Está embarcado em uma placa de circuito impresso, assim um *socket* (*shield*) para o módulo teve de ser projetado. O esquemático do circuito desenvolvido pode ser visto na Figura 4.8.

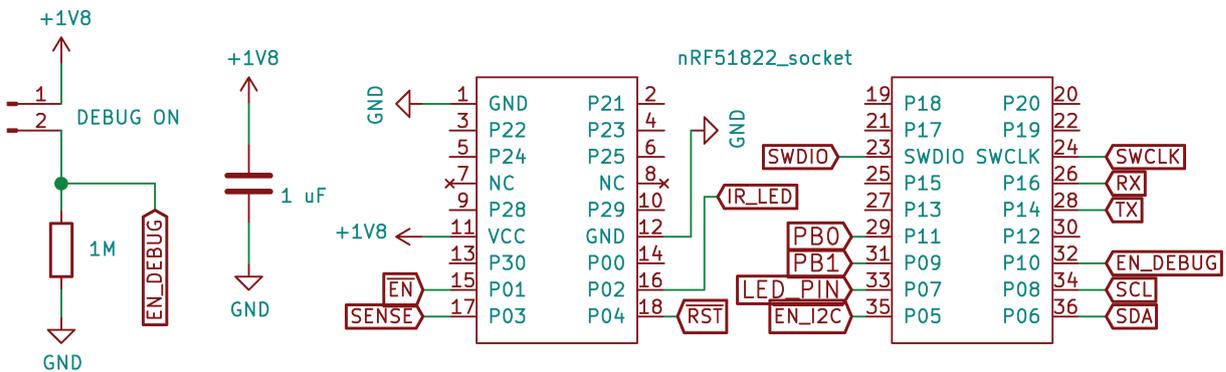


Figura 4.8 – Circuito elaborado para controle microcontrolado.

À esquerda no esquemático, foi previsto *jumper* DEBUG ON para seleção do modo de operação *debug*. Somente quando setado, o periférico UART passa a ser ativado e os botões polarizados, evitando consumo indesejado.

Em relação às conexões acopladas diretamente ao μC : \overline{EN} , $SENSE$, \overline{RST} e LED_PIN são pinos de controle do sistema de sensoriamento; $PB0$ e $PB1$ são entradas para sinais de botões, cujo esquemático será comentado adiante; $SWCLK$ e $SWDIO$ são pinos para gravação do μC ; RX e TX pinos de comunicação UART; por fim, SCL , SDA e EN_I2c , pinos para comunicação com a memória EEPROM, via interface I2C (*Inter-Integrated Circuit*), cujo esquemático também será mostrado adiante.

Os dados de telemetria do hidrômetro, bem como variáveis internas da máquina de estados do dispositivo, foram projetados para serem salvos em memória não volátil. Desta maneira, foi acoplado ao circuito uma memória EEPROM modelo PT24C02, cujo esquemático é mostrado na Figura 4.9. A comunicação da memória com o μC foi estabelecida por meio do protocolo I2C, assim, resistores de *pull-up* R1 e R2 foram inseridos aos nós SDA e SCL. Terminais de *debug* (I2C_Debug) foram previstos a fim de verificar eventuais problemas de comunicação com a memória.

A fim de se criar uma interface de interação direta com o dispositivo de telemetria, dois botões e um led de indicação foram incluídos no projeto, como mostrado na Figura 4.10. Os botões somente são alimentados quando o *jumper* DEBUG ON é curto-

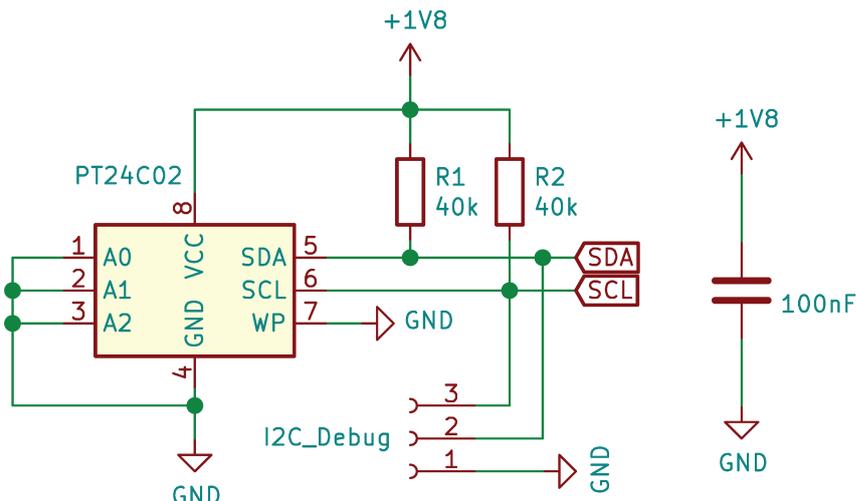


Figura 4.9 – Circuito elaborado para conexão de memória EEPROM.

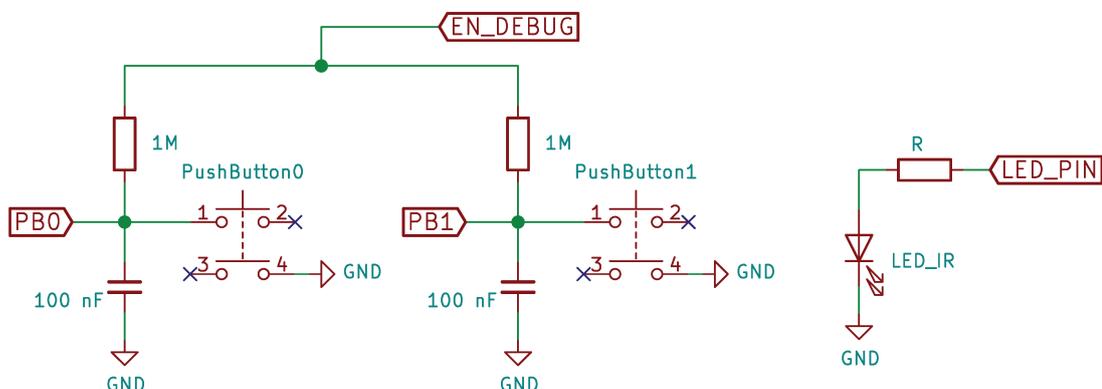


Figura 4.10 – Circuito elaborado para *debug*.

circuitado (esquemático da Figura 4.8). Estes recursos adicionais somente foram utilizados em fases iniciais da programação do microcontrolador, como ferramentas de aprendizado.

4.3 Medidas de consumo em bancada

Após prototipagem e programação do dispositivo de telemetria, três métodos para medida de corrente do sistema foram empregados. Primeiramente, foi utilizado o mais simples e comum processo para medida de corrente, através de um amperímetro. Em um segundo momento, foi utilizado um misto de técnicas com multímetro e osciloscópio. O terceiro e último método consistiu de uma adaptação da técnica de cronopotenciometria (TABERNA; SIMON, 2013), tipicamente realizado em supercapacitores. O objetivo dos procedimentos foi avaliar o consumo, através de diferentes estratégias, observar e discutir técnicas aplicadas.

4.3.1 Método #1 - Exclusivamente com multímetro

Uma maneira intuitiva de se medir o consumo de corrente de um circuito é através de um amperímetro, e assim se originou o primeiro método. O dispositivo de telemetria foi alimentado com tensão de 3,7 V e disposto em série com um multímetro HP 3458A, conforme mostrado no esquemático da Figura 4.11. O instrumento foi configurado como amperímetro e com intervalo de integração 1000 ciclos de rede, para incluir efeitos transitórios da corrente, quando há transmissão de dados via BLE.

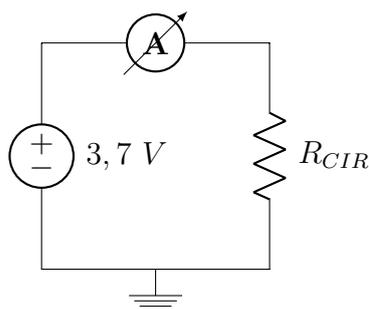


Figura 4.11 – Esquemático do circuito elaborado para o primeiro método de medida de corrente.

4.3.2 Método #2 - Multímetro e osciloscópio

O dispositivo de telemetria opera em sua maior parte do tempo em modo de baixo consumo, com exceção do momento que o rádio de comunicação é ligado, para manutenção da pilha BLE. Este comportamento do dispositivo é repetitivo, periódico. Pensando nisso, o segundo método utilizado teve por objetivo inferir o consumo de corrente justamente nos dois momentos, de baixo consumo e transitório em que o rádio é ligado. O procedimento foi baseado nos trabalhos de (Kang Eun Jeon; Tong; She, 2016; KAMAT; LINDH, 2010).

O método utilizado pode ser dividido em três passos. Em um primeiro momento, foi medida a corrente do circuito de telemetria com rádio desligado, através do multímetro HP 3458A, conforme exibido no esquemático da Figura 4.12a. O instrumento foi configurado como amperímetro, com intervalo de integração das medidas em 1000 ciclos de rede.

Em um segundo momento, agora com rádio ligado, o circuito de telemetria foi ligado em série a um resistor *shunt* de valor de 10 Ω , como mostrado na Figura 4.12b. A tensão vista sobre o resistor foi monitorada por um osciloscópio Keysight InfiniiVision MSOX2012A, com propósito de se observar o transitório do consumo de corrente exigido no momento de comunicação BLE.

Por fim, o último passo é definido pelo cálculo da corrente média, através dos valores parciais de corrente ponderados pelo período que ocorrem. A Equação 4.1 mostra

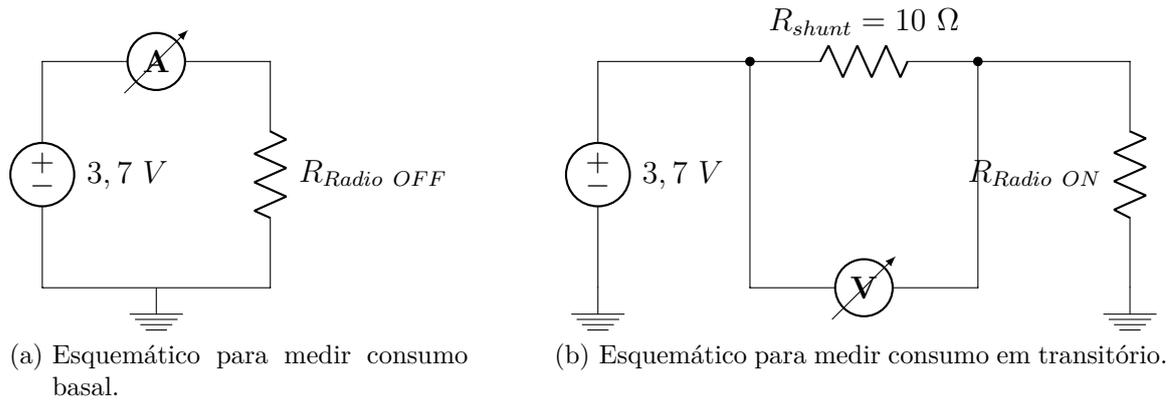


Figura 4.12 – Esquemáticos dos circuitos elaborados para o segundo método de medida de corrente.

de maneira algébrica a computação a ser feita,

$$\bar{i} = \frac{t_{RadioON} \times i_{RadioON} + t_{RadioOFF} \times i_{RadioOFF}}{t_{RadioON} + t_{RadioOFF}}, \quad (4.1)$$

em que \bar{i} é a corrente média, $i_{RadioOFF}$ e $i_{RadioON}$, corrente de baixo consumo e de transiente (rádio ligado), $t_{RadioOFF}$ e $t_{RadioON}$, período em modo de baixo consumo e de transiente, respectivamente.

4.3.3 Método #3 - Decaimento de tensão no supercapacitor, baseado em procedimento de cronopotenciometria

Idealmente, quando um capacitor se encontra em série com uma carga resistiva (circuito RC), sua corrente de descarregamento I_C é a mesma corrente consumida pela carga I_{LOAD} , como mostrado no esquemático da Figura 4.13. Para um capacitor previamente carregado, sabendo de antemão o valor da capacitância C e monitorando o decaimento da tensão V_C , ao longo do tempo, é possível estimar a corrente $I_C = I_{LOAD}$.

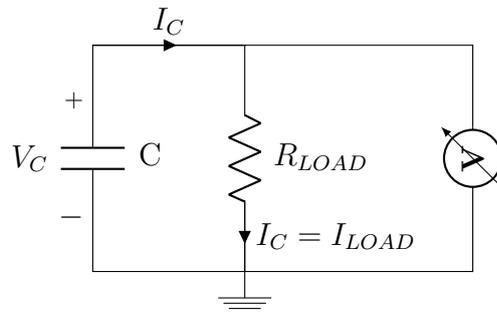


Figura 4.13 – Esquemático para medida de corrente através de decaimento de tensão no supercapacitor.

O terceiro método de medida de consumo médio de corrente se ampara neste comportamento do circuito RC. Foi inspirado no procedimento de cronopotenciometria (Seção 3.2), com a diferença que a fonte de corrente é variável e a capacitância previamente caracterizada.

Para aplicação do método, um supercapacitor de 1 F foi carregado e em série acoplado o dispositivo de telemetria. O dispositivo de telemetria foi ligado e o decaimento da tensão no supercapacitor foi monitorado ao longo do tempo. A tensão inicial do supercapacitor variou ao longo dos procedimentos, bem como o instrumento de medida, multímetro ou *datalogger*. Esses fatores serão comentados a seguir.

4.4 Medidas em ambiente externo

Grande parte dos hidrômetros residenciais estão instalados em ambiente externo, parcialmente ou completamente exposto às intempéries de chuva, vento e, o que é de interesse energético ao projeto, radiação solar. Assim, visando extrair medidas de geração e consumo energético em ambiente próximo ao real, foi elaborado um circuito *datalogger* móvel. O método de medida projetado a ser usado pelo circuito é o #3, pois é possível realizá-lo em um espaço de tempo estendido, o qual o μC majoritariamente permanece dormindo, diminuindo seu consumo.

4.4.1 Desenvolvimento de circuito *datalogger*

O circuito *datalogger* foi projetado para realizar medidas em ambiente remoto, desta maneira, a fonte de alimentação do circuito foi suprida por meio de bateria modelo CR2032. Na Figura 4.14 é apresentado o circuito de alimentação do circuito *datalogger*.

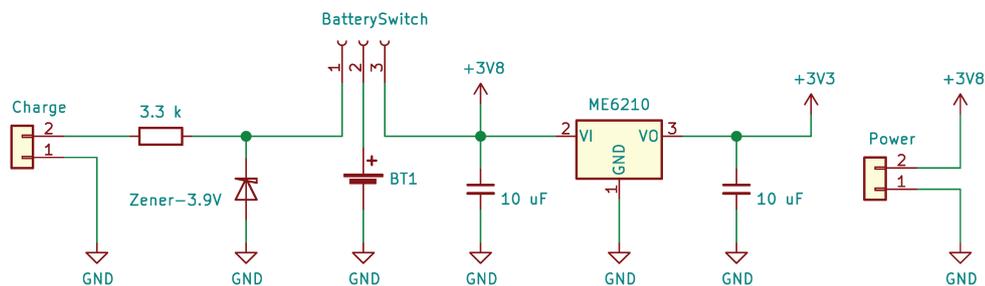


Figura 4.14 – Circuito de alimentação do *datalogger*.

À esquerda no esquemático é mostrado circuito de carregamento da bateria, através do borne (Charge), resistor de $3,3\text{ k}\Omega$ para a limitação de corrente e o diodo zener de $3,9\text{ V}$ para limitação de tensão. O jumper *BatterySwitch* é utilizado para seleção entre o carregamento da bateria ou seu uso na alimentação do regulador de tensão ME6210. A tensão regulada é entregue ao circuito *datalogger* com nível de $3,3\text{ V}$. Os capacitores de

10 μF são recomendados pelo *datasheet* do regulador para atenuação de ruídos e oscilações na tensão de saída.

Foi prevista a leitura de tensão por meio de dois canais analógicos no circuito *datalogger*. Para ambos os canais, há divisores resistivos, possibilitando a leitura de sinais de até pouco mais de 6 V. Após esta atenuação, os sinais chegam a dois amplificadores operacionais, por meio dos pinos AnalogPin0 e AnalogPin1, como mostrado no esquemático da Figura 4.15. Os amplificadores operacionais (Amp Op) atuam como *buffer* de tensão e filtros passa-baixas, com frequências de corte em 0,16 Hz (Figura 4.15a) e 1,06 kHz (Figura 4.15b). Estas configurações diminuem o dreno de cargas indesejadas e previnem *alias* no processo de amostragem da tensão. Finalmente, após a filtragem, os sinais são entregues ao ADC do μC através dos pinos AN0 e AN1.

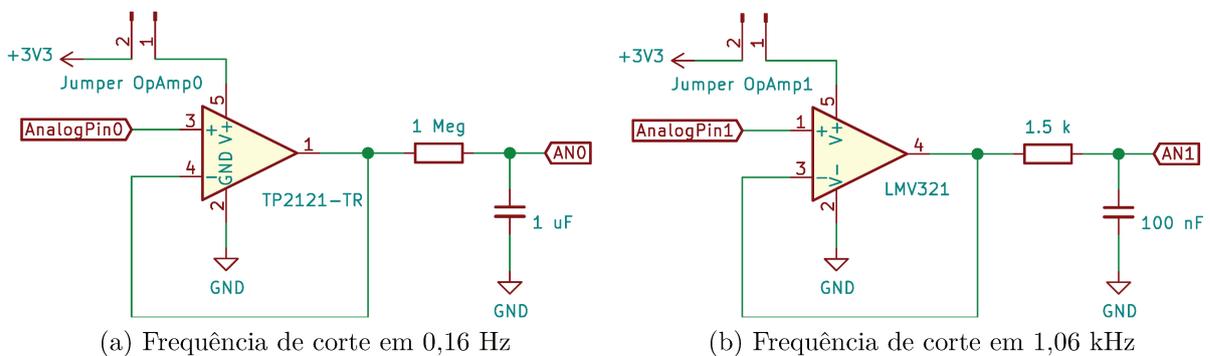


Figura 4.15 – Circuitos de filtro passa-baixas.

O primeiro Amp Op, TP2121-TR, possui relação de ganho-banda unitário em 18 kHz, corrente quiescente de no máximo 950 nA e necessita de correntes de polarização em suas entradas da ordem de 1 fA (3PEAK, 2017). O segundo, LMV321, seu ganho-banda unitário está em 1 MHz, corrente quiescente de 80 μA e a corrente de polarização para suas entradas é da ordem de 1 pA (3PEAK, 2018). Eles foram selecionados devido ao baixo consumo que apresentam, drenam baixas correntes em suas entradas e conforme a respectiva banda de filtragem que estão diretamente atuando.

Os sinais analógicos foram digitalizados pelo μC NRF51822 da Nordic Semiconductors, cujo esquemático do circuito é mostrado na Figura 4.16. Com relação aos pinos conectados: TX e RX são empregados na comunicação UART, como interface de *download* dos dados ao computador; SWCLK e SWDIO são pinos de gravação do μC ; MISO, MOSI, CS e CLK são pinos de comunicação com a memória flash; PB0 e PB1 são entradas de leitura de tensão de botões; por fim, quatro resistores de indicação são conectados ao μC , através de uma rede de resistores (*Resistor network*), para limitação de corrente.

A taxa de amostragem do ADC foi fixada em uma amostra a cada 512 s, com resolução de 10 bits. Os dados foram salvos em memória *flash*, que estabeleceu

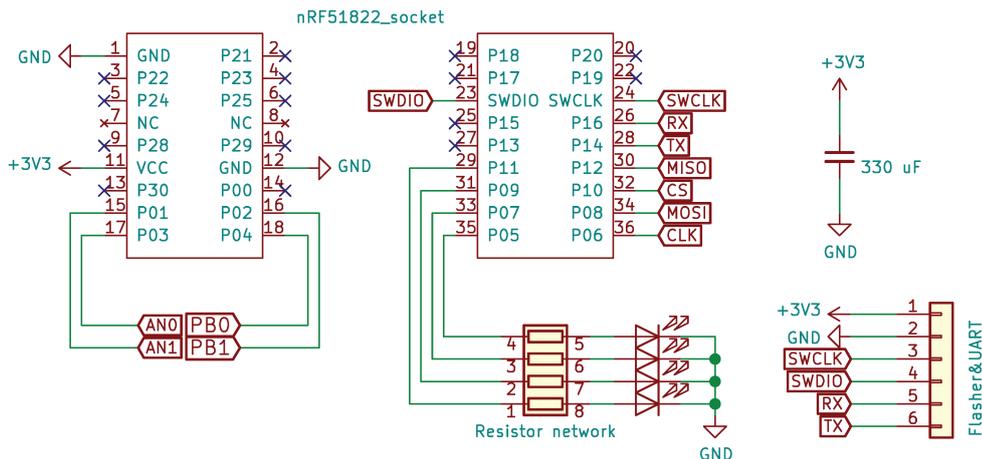


Figura 4.16 – Circuito e conexões do microcontrolador.

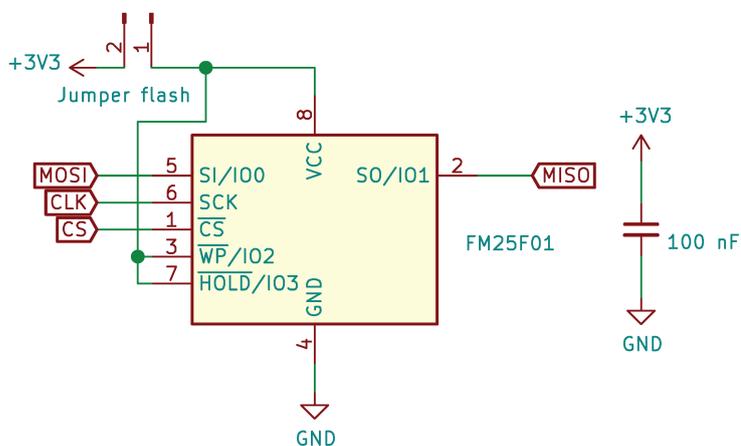


Figura 4.17 – Circuito e conexões da memória flash.

comunicação com μC através de interface SPI (*Serial Peripheral Interface*), como exposto no esquemático da Figura 4.17. A memória em questão é uma modelo FM25F01, que apresenta consumo máximo de $5 \mu A$ em seu modo *stand-by* e 128 KBytes de memória (SHANGHAI FUDAN MICROELECTRONICS, 2015).

5 Resultados e discussões

Nesta seção serão exibidos os resultados tanto dos circuitos confeccionados, quanto dos procedimentos de caracterização e medidas realizadas. Os resultados correspondentes às medidas de captação em ambiente interno podem ser vistos na Seção 5.1. O supercapacitor utilizado ao longo do trabalho foi caracterizado e os dados são mostrados na Seção 5.2. Os circuitos confeccionados para telemetria do hidrômetro e *datalogger* são mostrados nas Seções 5.3 e 5.4, respectivamente. Adicionalmente, as medidas de consumo de corrente, para os três métodos propostos, podem ser vistas na Seção 5.5. Por fim, os dados de medidas em ambiente externo são apresentados na Seção 5.6.

5.1 Captação energética fotovoltaica em ambiente interno

O primeiro procedimento que será exposto foi de medida de captação fotovoltaica em ambientes internos. Inicialmente será vista a caracterização da célula fotovoltaica utilizada nas medidas, logo em seguida detalhes da manufatura do dispositivo portátil de extração das curvas I-V e, por fim, os dados de captação fotovoltaica em ambientes selecionados.

5.1.1 Caracterização da célula fotovoltaica

Para verificar a funcionalidades e caracterizar a célula fotovoltaica usada no trabalho, a curva I-V de uma célula fotovoltaica foi extraída através do simulador solar presente no Laboratório de Componentes Semicondutores da Unicamp. Na Figura 5.1 é mostrado o momento em que a curva I-V foi extraída usando o simulador solar.

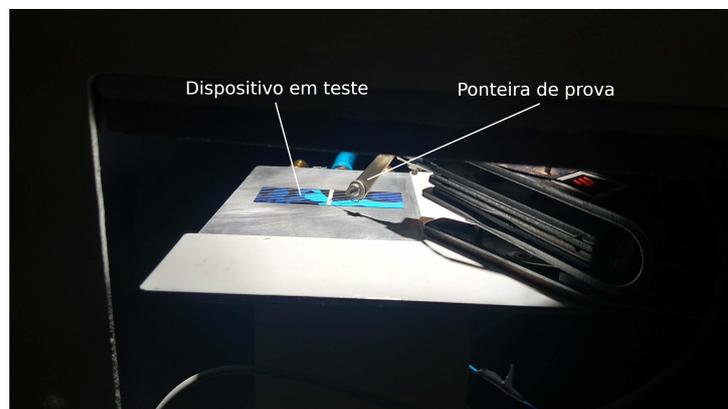


Figura 5.1 – Extração da curva I-V com simulador solar.

O simulador solar irradia 1000 W/m^2 sobre a célula durante as medidas, como determina a padronização (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009; XIAO; DUNFORD; CA-

Tabela 5.1 – Resultados da caracterização da célula fotovoltaica no simulador solar.

Dimensions [cm]	Area [cm ²]	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]
1,9 x 5,0	9,5	0,609	0,318
MPP	MPP/Area	Efficiency @ MPP	
0,133 W @ 0,45 V	140,4 W/m ²	14,04 %	

PEL, 2004). Simultaneamente, a corrente que flui sobre o dispositivo é variada de modo controlado por um instrumento SourceMeter Keithley 2440, que também monitora a tensão entre seus terminais.

Os dados obtidos foram processados e algumas informações relevantes podem ser vistas na Tabela 5.1. A eficiência apresentada pela célula tem valor de aproximadamente 14 %, sendo um pouco abaixo de valores comercialmente encontrados (PARADISO; STARNER, 2005). Adicionalmente, foi verificado ponto de MPP de aproximadamente 73 % de V_{oc} , sendo valor consistente com o encontrado na literatura (ESRAM; CHAPMAN, 2007).

5.1.2 Manufatura do dispositivo para aquisição de medida I-V

A prototipação do circuito de condicionamento analógico foi realizada através de prensa térmica. Os componentes foram devidamente soldados e as conexões checadas. Na Figura 5.2 é exposto todo o sistema.

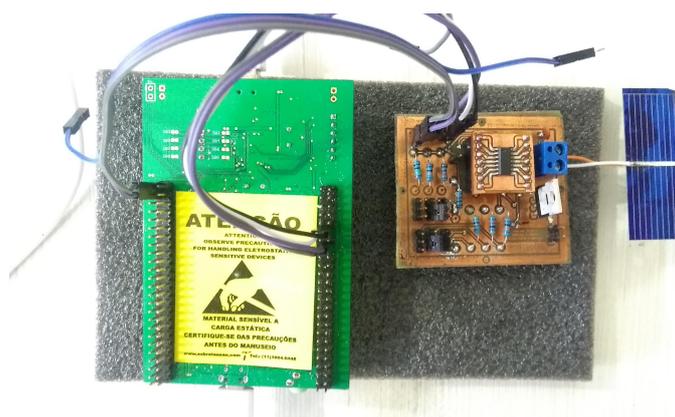


Figura 5.2 – Da esquerda à direita: interface microcontrolada, circuito de condicionamento analógico e célula solar.

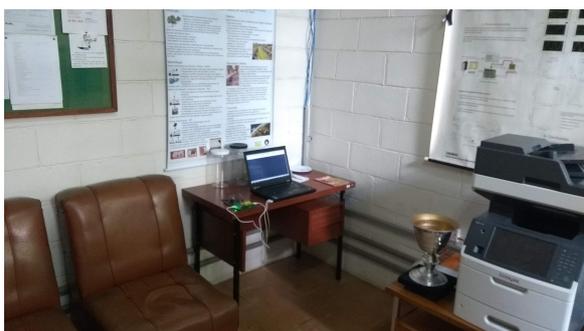
A fim de corrigir *offset* dos amplificadores, calibrar o circuito de condicionamento analógico e verificar a funcionalidade, alguns experimentos foram realizados através dos instrumentos multímetro HP 34401A e fonte de sinais HP 3245A.



(a) Dentro de sala de aula.



(b) Corredor que dá acesso aos laboratórios.



(c) Copa compartilhada entre laboratórios.



(d) Banco com iluminação solar indireta.

Figura 5.3 – Localizações selecionadas pra medida de curva I-V.

O controle do sistema de medida ocorreu por meio de uma interface supervi-sória para computador, enviando comandos ao μC . Por sua vez, o μC geriu o circuito de condicionamento analógico, que interagiu com a célula fotovoltaica.

O algoritmo de controle desenvolvido foi escrito em linguagem de programação Shell Script. Adicionalmente, o microcontrolador foi programado utilizando a ferramenta STM-CubeMX (STMICROELECTRONICS, Acesso em 26-12-2018), em linguagem de programação C. Todos os códigos fontes desenvolvidos estão presentes no repositório (COSTA, Acesso em 26-12-2018).

5.1.3 Dados aquisitados com o experimento

Quatro localizações foram selecionadas dentro da faculdade de engenharia elétrica e computação da Unicamp para medida I-V. Os locais selecionados foram classificados com os índices: (1) uma sala vazia, completamente iluminada por lâmpadas fluorescentes; (2) corredor que dá acesso aos laboratórios, com luz artificial de lâmpadas fluorescentes e parcialmente iluminado por luz natural; (3) copa comum a um conjunto de laboratórios, com condições similares ao (2); (4) banco com luz natural indireta. Os diversos lugares indicados são mostrados nas Figuras 5.3a a 5.3d.

Em todos os testes, arranjos simples e de duas células em série foram utilizados, desta maneira, dez medidas I-V foram realizadas para cada localização e para cada arranjo.

Tabela 5.2 – Resumo dos dados obtidos com medidas I-V.

Location	n° cells	V_{OC} [V]	I_{SC} [mA]	MPP [mW @ V]	MPP/Área [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
(1)	1	0,299	0,931	0,131 @ 0,215	13,8
	2	0,568	0,951	0,258 @ 0,395	13,5
(2)	1	0,278	0,930	0,123 @ 0,202	13,0
	2	0,539	0,927	0,206 @ 0,376	10,8
(3)	1	0,327	1,61	0,707 @ 0,233	28,5
	2	0,614	1,44	0,463 @ 0,433	24,3
(4)	1	0,483	16,2	4,96 @ 0,372	522
	2	0,958	19,3	12,1 @ 0,734	638

As medidas de cada localização e arranjo foram somadas e retiradas uma média, assim obtendo uma curva I-V média. Através de seu processamento, valores de V_{OC} , I_{SC} , MPP e MPP/Área foram coletados nos diferentes ambientes e arranjos. Na Tabela 5.2 são apresentados os dados resumidos.

Os ambientes (1), (2) e (3) foram majoritariamente iluminados por meio de lâmpada fluorescente. Os resultados revelam valores próximos de MPP/Área entre esses ambientes (algumas dezenas de μW). Os valores estão abaixo dos citados por (PARADISO; STARNER, 2005; TAN; PANDA, 2011). Uma possível explicação para este efeito é o baixo iluminamento evidenciado. No entanto, em (4), devido à iluminação solar indireta, MPP/Área foi encontrado entre valores de ambientes internos e externos, conforme mostra (PARADISO; STARNER, 2005; TAN; PANDA, 2011).

Os valores de MPP foram encontrados, para arranjos simples, entre 0,202 V e 0,372 V. Para arranjos em série, 0,335 a 0,734 V. A taxa entre MPP e V_{OC} excursionou entre 69,6 % e 77 %, na média (72,4 %), próximo às medidas realizadas em ambiente controlado, como mostrado na Seção 5.1.1.

Existem atualmente circuitos integrados conversores DC-DC, como LTC3108 e LTC3107, capazes de operar com valores de tensão de entrada tão baixos quanto 20 mV. Outros, como BQ25504 e BQ25570, não funcionam com tensões tão baixas, mas apresentam funcionalidade pertinentes para nós *energy harvesting*, como a manutenção do ponto de operação em MPP através de frações de V_{OC} em células fotovoltaicas. Todos esses casos revelam que é possível trabalhar com nós *energy harvesting* em ambientes internos, uma vez que existem soluções eletrônicas bem estabelecidas para tecnologias de baixo consumo.

5.2 Caracterização do supercapacitor utilizado no trabalho

Para verificar a funcionalidades e caracterizar o supercapacitor utilizado no trabalho, medidas de cronopotenciometria foram extraídas através do instrumento poten-

ciostato SP-200 da BioLogic (BIOLOGIC, 2019), presente no laboratório Carbon Sci-Tech Labs da Unicamp. Na Figura 5.4 é mostrado o momento que foram realizados os procedimentos.



Figura 5.4 – Momento de tomada de medida de cronopotenciometria, no laboratório Carbon Sci-Tech Labs da Unicamp.

Ciclos de carga e descarga foram realizados, com duas fontes de corrente: em um primeiro momento 10 mA; em seguida 5 mA. As curvas obtidas são expostas na Figura 5.5. Com o intuito de se obter o valor de capacitância: foram realizados ajustes, através de funções polinomiais de primeira ordem, do último momento de descarga do supercapacitor, para as duas fontes de corrente. Os ajustes também são mostrados na Figura 5.5; através da derivada das funções obtidas, foram calculados os valores de capacitância. Os dados resumidos deste procedimento são mostrados na Tabela 5.3. A média dos valores

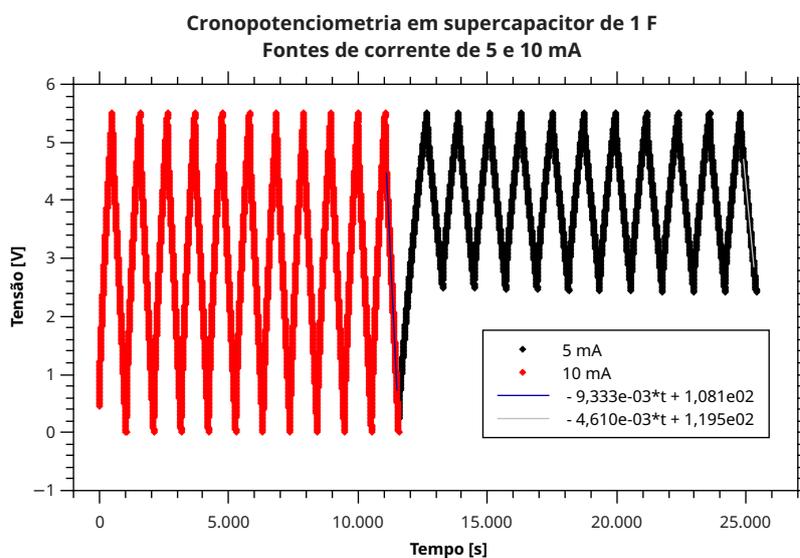


Figura 5.5 – Medida de cronopotenciometria através de potenciostato.

Tabela 5.3 – Dados resumidos do procedimento de cronopotenciometria.

Estimativa de capacitância - Supercapacitor de 1 F			
Dreno de corrente	Regressão linear $V_C(t)$ [V]	R^2	Estimativa de capacitância $C = \frac{i}{\partial V_C(t)/\partial t}$ [F]
5 mA	- 4,610e-03 t + 1,195e02	0,999	1,0846
10 mA	- 9,333-03 t + 1,081e02	0,999	1,0718

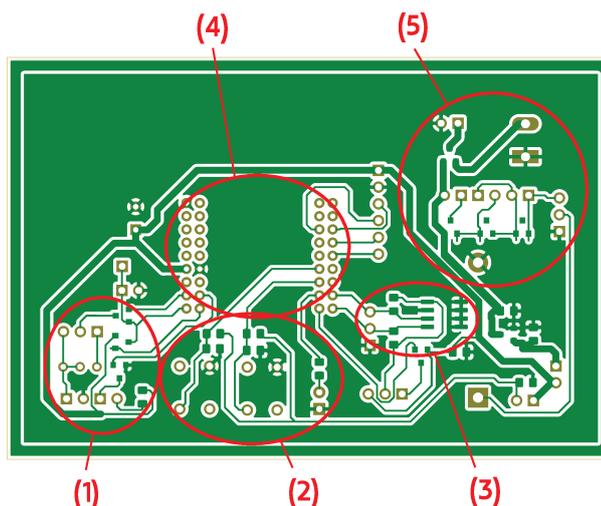
de capacitância foi de 1,0782 F, divergindo 7,82 % do valor nominal.

5.3 Circuito de telemetria de hidrômetros

O segundo procedimento descrito nesta seção de resultados foi sobre a confecção do dispositivo de telemetria para hidrômetros. Na sequência, será apresentada a manufatura do dispositivo, detalhes da programação e também testes de funcionalidade que foram realizados.

5.3.1 Manufatura do *Hardware*

Os circuitos presentes no dispositivo de telemetria do hidrômetro, conforme esquemático descrito na Seção 4.2 (página 28), foram dispostos em uma única placa de circuito impresso. O projeto do *layout* no *software* Kicad é mostrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – *Layout* do circuito do dispositivo de telemetria do hidrômetro.

Destacados na Figura se encontram: (1) circuito de sensoriamento; (2) botões e led de *debug*; (3) memória EEPROM; (4) microcontrolador; e, por fim, (5) gerenciamento energético. Após projeto em software CAD, o *layout* do dispositivo de telemetria

foi confeccionado manualmente em placa de circuito impresso, através do processo de transferência de padrão por prensa térmica.

As Figuras 5.7a e 5.7b mostram frente e verso do circuito de telemetria do hidrômetro. Foi utilizada placa de cobre face simples pois grande parte do circuito é composto por componentes SMD (*Surface Mounting Device*) e foi “routeado” em único lado.

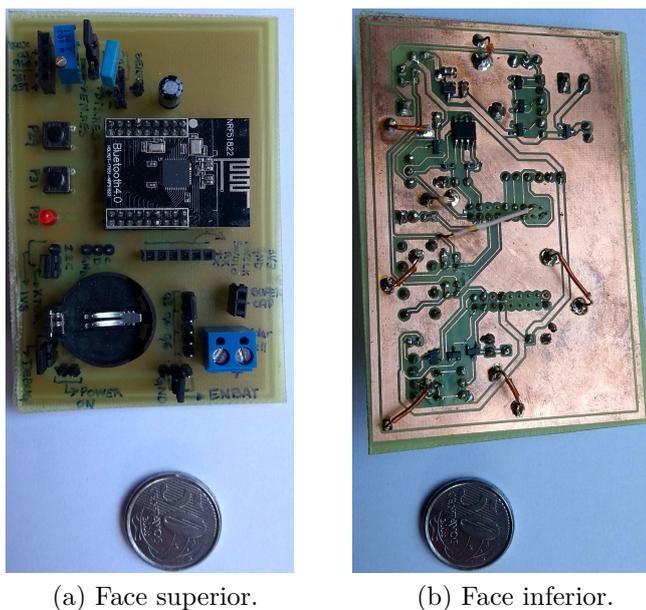


Figura 5.7 – Placa de circuito impresso desenvolvida para o dispositivo de telemetria.

5.3.2 Programação do *Firmware*

A programação do dispositivo de telemetria foi resumida a um diagrama de estados, mostrado na Figura 5.8, a fim de se facilitar a compreensão do algoritmo. Os estados podem ser descritos conforme os itens a seguir:

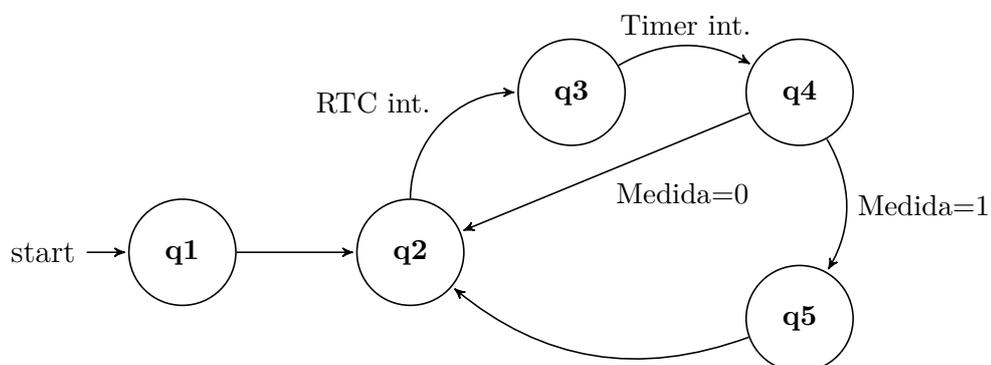


Figura 5.8 – Diagrama de estados do *firmware* programado.

- **q1:** Os periféricos LPCOMP, UART RTC, Timer e a pilha BLE são inicializados. Não somente, a memória EEPROM é lida, com os dados da última telemetria e variáveis da máquina de estados;
- **q2:** O algoritmo entra em modo de espera até que a interrupção do RTC ocorra (RTC int.). O intervalo foi configurado para 5 s, tempo de amostragem do sensor óptico;
- **q3:** Os seguintes pinos do μC são configurados neste estado: $\overline{RST} = 1$; $\overline{EN} = 1$; e $IR_LED = 1$. A interrupção do Timer e do LPCOMP é habilitada. Quando ocorre uma interrupção do Timer (Timer int.) é mudado ao próximo estado;
- **q4:** Os pinos do μC são alterado para: $\overline{RST} = 0$; $\overline{EN} = 0$; $IR_LED = 0$. O periférico LPCOMP é desabilitado. Se ele disparou alguma interrupção uma medida foi processada (Medida=1) e o estado é mudado para **q5**, caso contrário **q2** (Medida=0);
- **q5:** O novo valor de medida é salvo na memória EEPROM e a pilha BLE é atualizada.

5.3.3 Funcionalidade da memória EEPROM e rádio de comunicação

Após a confecção do *hardware* de telemetria do hidrômetro e implementação do algoritmo no microcontrolador, o primeiro teste realizado foi de escrita e leitura na memória EEPROM, além de comunicação via BLE. Para tanto, o dispositivo de telemetria foi alimentado, sua memória EEPROM gravada com valor atualizado de medida e verificada sua comunicação com um *smartphone*, através do aplicativo disponibilizado pela Nordic “nRF Connect”. Na Figura 5.9 é mostrado o procedimento executado.

Destacado em (1), é mostrada a intensidade do sinal de rádio RSSI (*Received Signal Strength Indication*), com valor de -46 dBm, e o intervalo estimado de envio dos pacotes *advertising* BLE, 2993 ms. Em (2), é destacada a medida analógica na relógioaria do hidrômetro e o valor mostrado no *display* do celular, ambos 100,41 m³.

5.3.4 Funcionalidade do circuito de sensoriamento

O próximo teste realizado foi da funcionalidade do circuito de sensoriamento. Como descrito com detalhes na Seção 4.2.2, o funcionamento do sistema de sensoriamento foi baseado no circuito célula de pixel ativo. Nesta técnica, a principal variável a ser monitorada é a tensão vista sobre o capacitor de sensoriamento. Assim, diferentes formas de onda são vistas, quando o *link* ótico está sobre a aleta metálica ou não. Nas Figuras 5.10a e 5.10b são expostas estas respectivas curvas, extraídas sobre a tensão do capacitor de sensoriamento, por um osciloscópio Keysight InfiniiVision MSOX2012A.

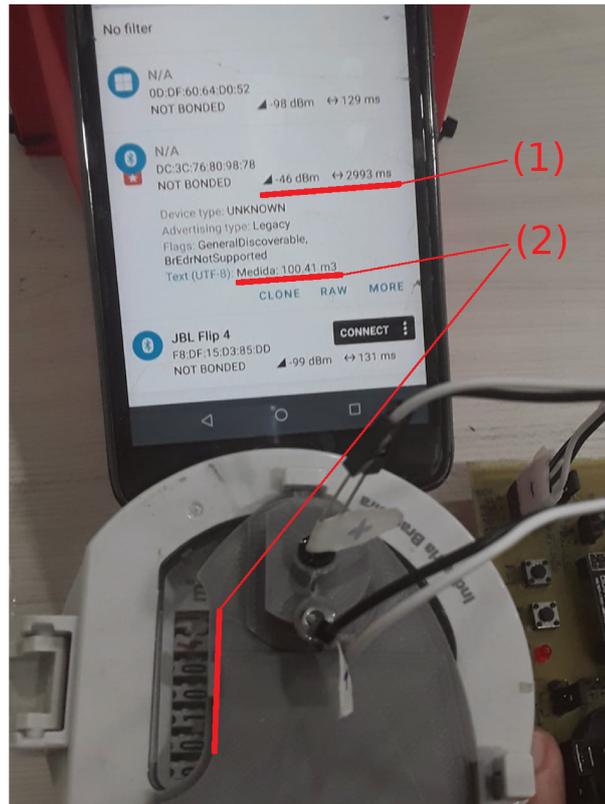
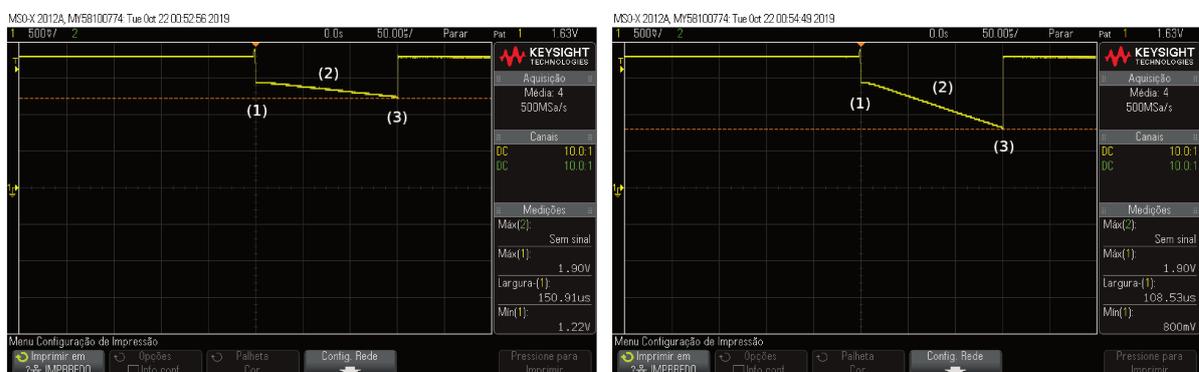


Figura 5.9 – Indicador de medida de consumo através do celular.



(a) Link óptico não está sobre aleta metálica

(b) Link óptico está sobre aleta metálica

Figura 5.10 – Tensão sobre o capacitor de sensoriamento.

Analisando ambas as curvas, quando o pino \overline{EN} é polarizado, momento (1), há uma queda abrupta de tensão, resultante do divisor resistivo entre a resistência interna do capacitor e do fototransistor. Comparando as duas curvas, conforme há retirada de cargas do capacitor, momento (2), diferentes intensidades de decaimento são observadas, devido aos diferentes níveis de polarização do fototransistor. Resultando, assim, numa menor tensão final, conforme momento (3).

Se a tensão verificada sobre o capacitor de sensoriamento atingir o limiar configurado ao comparador (LPCOMP), uma interrupção é engatilhada no microcontrolador,

indicando que o *link* ótico está sobre aleta metálica. Esta informação é tratada pela máquina de estados no *firmware* do dispositivo. Os intervalos temporais foram empiricamente ajustados, bem como o valor de referência a ser comparado pelo LPCOMP.

As formas de onda apresentadas na Figura 5.10 foram novamente monitoradas, mas com intervalo de tempo prolongado. O objetivo deste procedimento foi confirmar a taxa de amostragem do *link* ótico, com período de 5 s. Na Figura 5.11 é mostrado o resultado deste procedimento. As circunferências indicam onde há amostragem e o período, registrado pela ferramenta “*measure*” do osciloscópio.

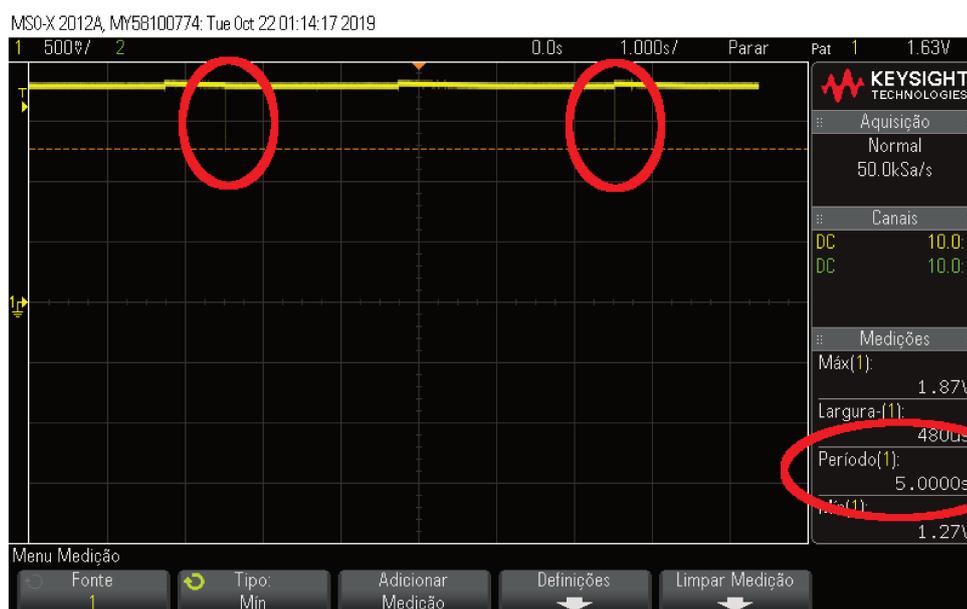


Figura 5.11 – Intervalo de amostragem do circuito de sensoriamento.

Um último ensaio realizado teve por objetivo verificar eventuais erros ou falhas de contabilização na medida de telemetria, e foi auxiliado por um túnel de vento, fabricado para simulação de fluxo de água no hidrômetro. Na Figura 5.12 é mostrado o *setup* montado. O túnel foi acionado durante o período de uma noite, a medida na relojoaria do hidrômetro foi anotada antes e depois do teste, bem como a medida sensorada do dispositivo de telemetria. Os valores convergiram ao final do teste, entre medida do dispositivo de telemetria e relojoaria do hidrômetro.

5.4 Circuito *datalogger*

Neste terceiro tópico da seção de resultados, será mostrado sobre a manufatura no circuito *datalogger*, sua programação e também testes comparativos de funcionalidade.



Figura 5.12 – Túnel de vento para simulação de fluxo de água.

5.4.1 Manufatura do *Hardware*

Os circuitos presentes no dispositivo *datalogger*, conforme esquemático descrito na Seção 4.4.1 (página 37), foram dispostos em uma única placa de circuito impresso. O projeto do *layout* no *software* Kicad é mostrado na Figura 5.13.

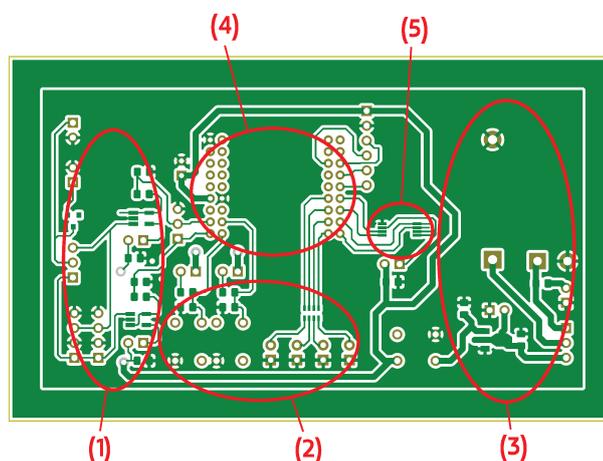


Figura 5.13 – *Layout* do circuito *datalogger*.

Destacados na Figura se encontram: (1) processamento analógico de sinais, através de Amp Ops em configuração *buffer* e filtro; (2) botões e led de *debug*; (3) gerenciamento energético; (4) microcontrolador; e, por fim, (5) memória *flash*. Após projeto em cad, o *layout* do dispositivo *datalogger* foi confeccionado manualmente em placa de circuito impresso, através do processo de transferência de padrão por prensa térmica.

As Figuras 5.14a e 5.14b mostram frente e verso do circuito *datalogger*. Foi utilizada placa de cobre face simples pois grande parte do circuito é composto por com-

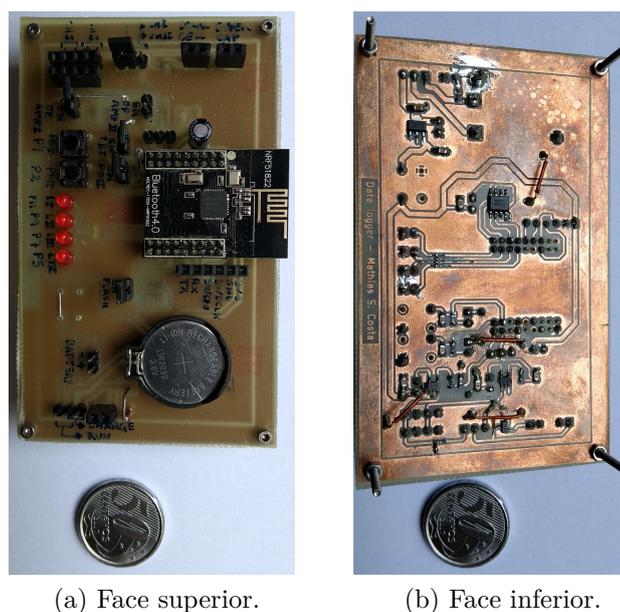


Figura 5.14 – Placa de circuito impresso desenvolvida para o dispositivo *datalogger*.

ponentes SMD e foi “routeado” em único lado.

5.4.2 Programação do *Firmware*

A programação do dispositivo *datalogger* foi resumida a um diagrama de estados, mostrado na Figura 5.15, a fim de se facilitar a compreensão do algoritmo.

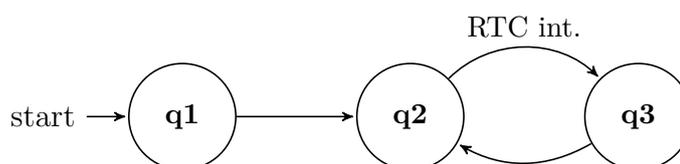


Figura 5.15 – Diagrama de estados do *firmware* programado.

O programa começa (*start*) e os periféricos ADC e RTC são inicializados no estado **q1**. Em seguida, no estado **q2**, o μC espera a ocorrência de uma interrupção do RTC para mudança de estado ao **q3**, cujo intervalo foi configurado em 512 s. Em **q3** é realizada digitalização do canal analógico (ADC) e em seguida volta ao estado de espera **q2**.

5.4.3 Comparativo de funcionamento entre circuito *datalogger* e multímetro

Com o objetivo de comparar o funcionamento entre circuito *datalogger* e um multímetro, procedimentos de cronopotenciometria foram realizados em laboratório, conforme mostrado no esquemático da Figura 5.16.

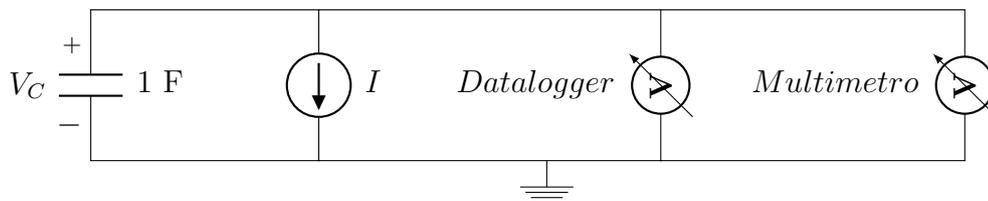


Figura 5.16 – Circuito elaborado para comparação das medidas do dispositivo.

O primeiro passo de todos os experimentos realizados foi o carregamento do supercapacitor de 1 F com tensão V_C de 3,3 V e sua manutenção por uma hora, a fim de se estabilizar as cargas no eletrodo do dispositivo. Em seguida, ao todo, separadamente, dois procedimentos de descarga foram realizados, com fontes de corrente I constantes de $50\ \mu\text{A}$ e $100\ \mu\text{A}$, controladas pelo instrumento *Universal Source* HP 3245A. A tensão entre os terminais do supercapacitor foi monitorada ao longo do tempo, tanto pelo circuito *datalogger* quanto pelo multímetro HP 3458A. As curvas obtidas podem ser vistas na Figura 5.17.

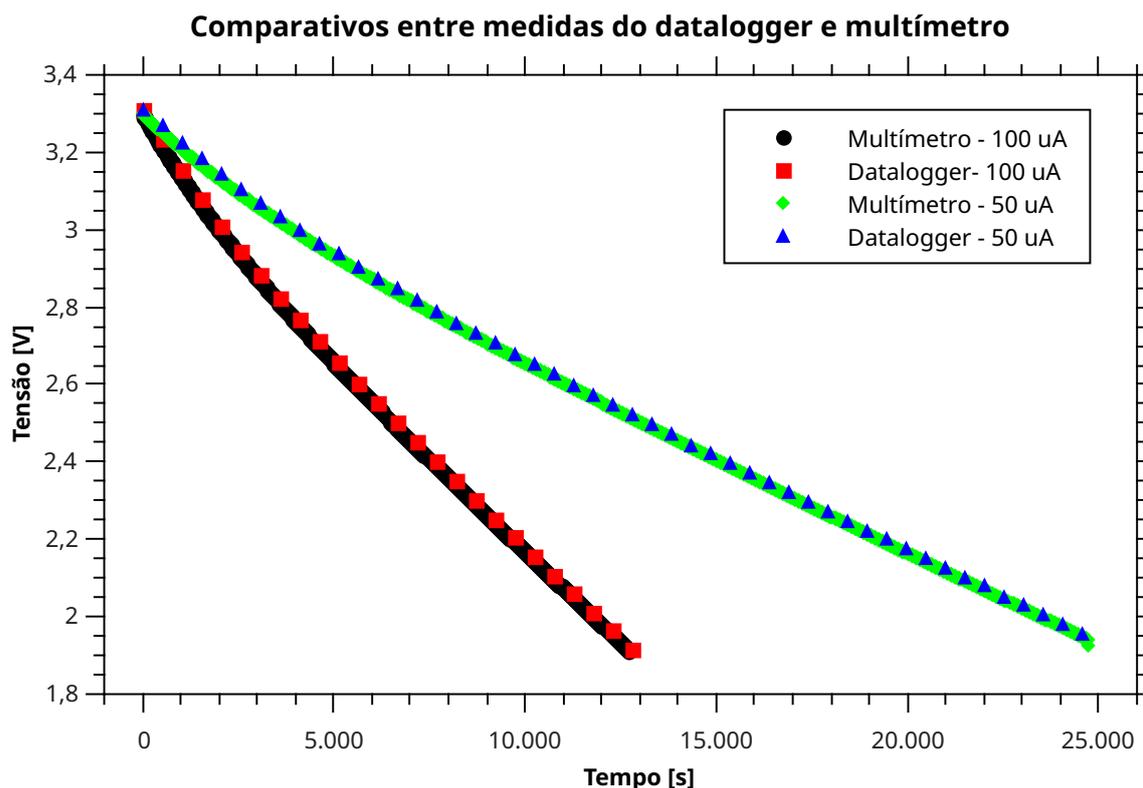


Figura 5.17 – Monitoramento da tensão ao longo do tempo, observada sobre supercapacitor.

As curvas de tensão foram ajustadas em função polinomial de primeira ordem e a estimativa de capacitância calculada. Os dados resumidos deste experimento são mostrados na Tabela 5.4. Foi verificada capacitância média de $0,949 \pm 0,004\text{ F}$.

Tabela 5.4 – Comparativo de funcionamento do circuito *datalogger* com multímetro.

Estimativa de capacitância - Decaimento de tensão no supercapacitor de 1 F				
Dreno de corrente	Instrumento	Regressão linear $V_C(t)$ [V]	R^2	Estimativa de capacitância $C = \frac{i}{\partial V_C(t)/\partial t}$ [F]
50 μ A	Datalogger	$-5,295e-05 t + 3,222$	0,994	0,944
	Multímetro	$-5,256e-05 t + 3,206$	0,995	0,951
100 μ A	Datalogger	$-1,056e-04 t + 3,229$	0,994	0,946
	Multímetro	$-1,047e-04 t + 3,207$	0,995	0,955

5.5 Medidas de consumo em bancada

Utilizando os métodos descritos na Seção 4.3, análises de consumo do dispositivo de telemetria foram realizadas em ambiente de bancada. Para todos os métodos, as configurações do dispositivo de telemetria foram fixas, com exceção do intervalo de envio de pacotes *Advertising* BLE, que foi variado entre 1 s e 3 s, a critério de comparação. A potência de transmissão do rádio permaneceu constante em 10 dBm.

5.5.1 Método #1 - Exclusivamente com multímetro

A medida de corrente indicou 19,06 μ A para intervalo de envio de 1 s; e 11,72 μ A para intervalo de 3 s. Na Figura 5.18 é exibida uma imagem no momento do procedimento.

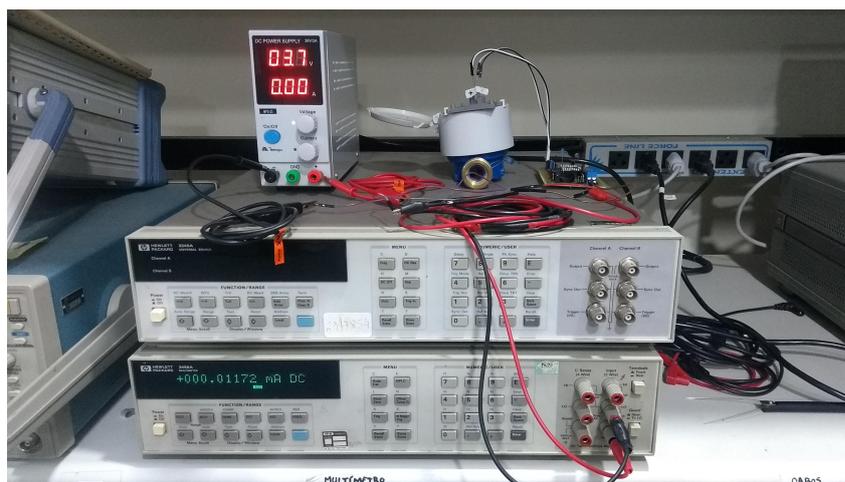


Figura 5.18 – Corrente total medida através do multímetro.

5.5.2 Método #2 - Multímetro e osciloscópio

Em um primeiro passo, o circuito de telemetria foi alimentado, com rádio BLE ligado, em série a um resistor *shunt* de 10 Ω . Então, foi monitorada a tensão sobre o

resistor no momento do transitório, quando há transmissão de pacotes pelo rádio. Na curva da Figura 5.19 é mostrado o resultado desta medida, cujas amostras também foram salvas em arquivo de texto, para posterior processamento. Assim, foi possível descobrir a corrente de consumo e o intervalo de tempo de uma transmissão de dados *Advertising* BLE.

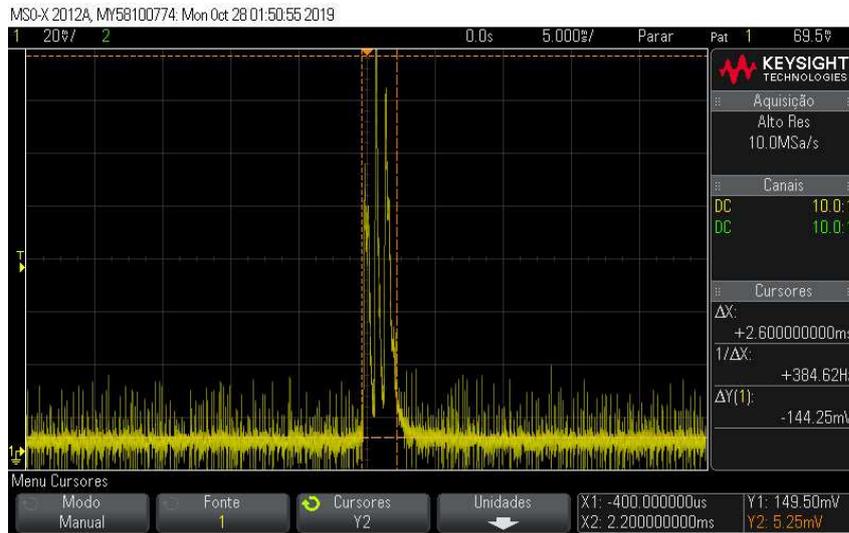


Figura 5.19 – Tensão observada sobre resistor *shunt* de $10\ \Omega$, em momento de transmissão de pacotes via rádio BLE.

Conforme indicado na Figura, foi verificado um intervalo total de 2,6 ms e uma corrente máxima de 14,42 mA. Nota-se três picos de corrente no intervalo de interesse, correspondentes ao envio dos pacotes nos três canais *Advertising* BLE, conforme comentado na Seção 3.3, página 22.

O segundo passo consistiu na desabilitação do rádio BLE e o monitoramento da corrente de consumo basal do circuito de telemetria. Para tanto, o dispositivo foi alimentado em série com um multímetro HP 3458A, configurado para um intervalo de integralização máximo (1000 ciclos de rede). Uma imagem do procedimento é mostrada na Figura 5.20. Foi verificada uma corrente de $4,59\ \mu\text{A}$.

Por fim, efetuou-se o cálculo da corrente média do dispositivo. Como a curva de corrente no momento de transmissão do rádio foi digitalizada pelo osciloscópio, foi possível a integração numérica no intervalo. A função *trapz* do *software* matemático Octave (OCTAVE, 2020) foi utilizada para o método trapezoidal de integração. Dado o vetor y contendo as amostras de corrente no intervalo de transmissão, x as amostras de tempo, a corrente de consumo pôde ser calculada: para intervalo de envio BLE de 1 s,

$$\overline{i}_{1s} = \frac{1s \times 4,59\mu\text{A} + \text{trapz}(x, y)}{1s + 2,6ms} = 20,37\ \mu\text{A}; \quad (5.1)$$

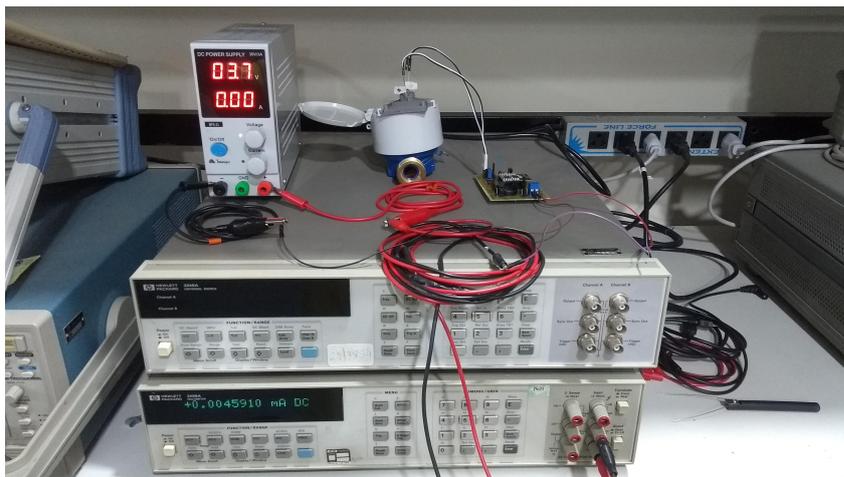


Figura 5.20 – Corrente observada quando não há transmissão via BLE.

enquanto que para um intervalo de envio BLE de 3 s,

$$\overline{i_{3s}} = \frac{3s \times 4,59\mu A + trapz(x,y)}{3s + 2,6ms} = 9,85 \mu A. \quad (5.2)$$

5.5.3 Método #3 - Decaimento de tensão no supercapacitor

O terceiro e último método de medida de corrente é baseado no procedimento de cronopotenciometria, com uma diferença: o valor da capacitância é previamente conhecido, sendo a corrente de descarga a variável de interesse. Dois procedimentos de descarga do supercapacitor foram realizados, parametrizados pelo intervalo de envio dos pacotes BLE, em 1 s ou 3 s.

O primeiro passo de todos os experimentos foi o carregamento do supercapacitor de 1 F com tensão V_C de 3,3 V e sua manutenção por uma hora, a fim de se estabilizar as cargas no eletrodo do dispositivo. Em seguida, separadamente, os dois procedimentos de descarga foram realizados, acoplado o circuito de telemetria do hidrômetro em série ao supercapacitor e o ligando. A tensão entre os terminais do supercapacitor foi monitorada ao longo do tempo, tanto pelo circuito *datalogger*, quanto pelo multímetro HP 3458A. As curvas obtidas podem ser vistas na Figura 5.21.

Devido a queda de tensão necessária para a polarização do diodo de retificação mais o regulador de tensão (esquemático da Figura 4.4, página 29), há um momento que a tensão de alimentação não é suficiente para manutenção do funcionamento do microcontrolador, o conduzindo a um estado de maior consumo. Este efeito se traduz no decaimento de tensão mais rápido sobre o supercapacitor, observado nas menores tensões, ao final de todas as curvas. O valor de tensão aproximado que isto ocorre é em 2,1 V, sendo considerada a tensão mínima no supercapacitor para o funcionamento do dispositivo.

A fim de se obter os valores das correntes, foram realizados ajustes, através

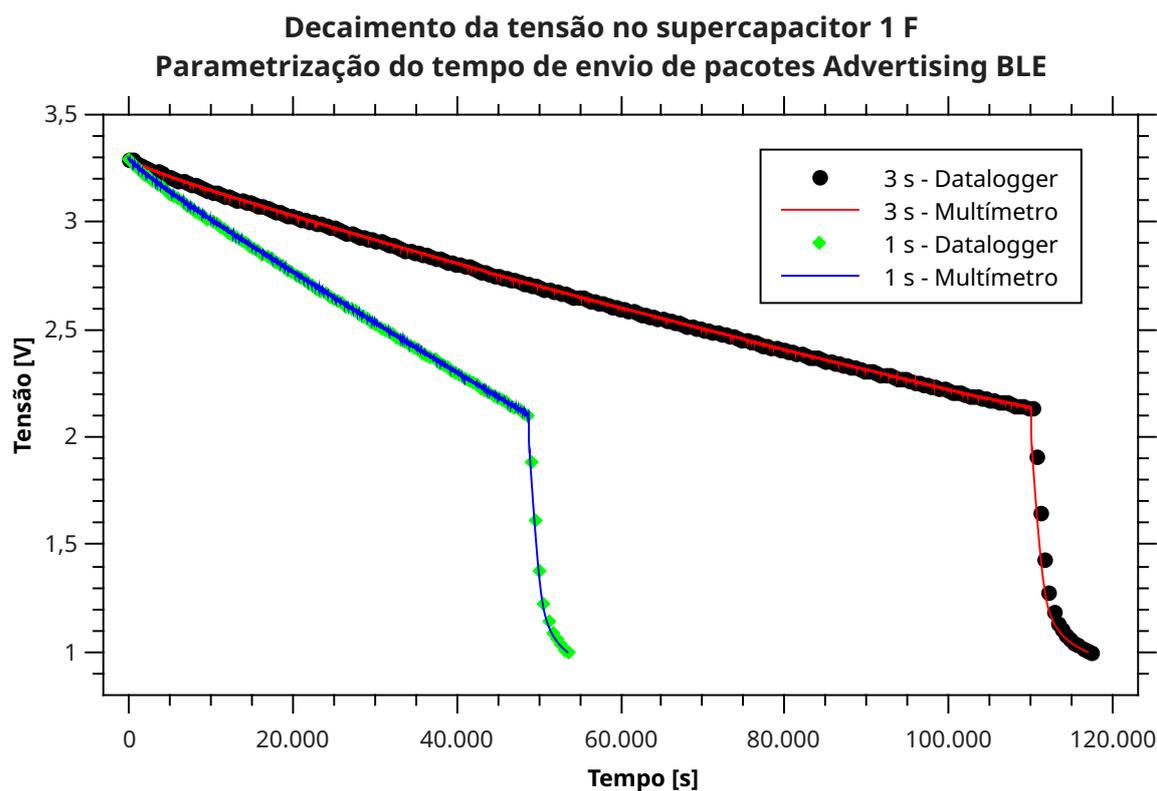


Figura 5.21 – Monitoramento da tensão ao longo do tempo, observada sobre supercap, parametrizadas pelo intervalo de envio dos pacotes *Advertising* BLE.

de funções polinomiais de primeira ordem, de todas as curvas. Através da derivada das funções obtidas, foram calculados os valores de consumo de corrente. A excursão temporal dos dados ajustados foi do início das curvas até pouco antes do decaimento abrupto, ao final das curvas. Os dados resumidos são mostrados na Tabela 5.5.

Como esperado, a menor corrente obtida foi com intervalo de envio dos pacotes BLE de 3 s, com valor médio de $11,12 \mu\text{A}$. Para intervalo de envio de 1 s, o valor médio de corrente é $25,97 \mu\text{A}$.

Tabela 5.5 – Decaimento da tensão no supercapacitor, parametrizado pelo intervalo de envio de pacotes *advertising* BLE.

Estimativa de consumo - Decaimento de tensão no supercapacitor de 1 F					
Intervalo de envio dos pacotes BLE	Instrumento	Regressão linear $\frac{\partial V_C}{\partial t}$	R^2	Valor médio da capacitância [F]	Corrente média [uA]
1 s	Datalogger	$-2,409\text{e-}05 + 3,255$	0,999	1,078	25,974
	Multímetro	$-2,413\text{e-}05 + 3,259$	0,999		26,017
3 s	Datalogger	$-1,033\text{e-}05 + 3,235$	0,997		11,138
	Multímetro	$-1,032\text{e-}05 + 3,238$	0,997		11,127

5.5.4 Considerações e comparativos sobre os métodos de medida de corrente

Diferentes valores de corrente média de consumo do dispositivo foram alcançados em cada método, cujo os resultados são mostrados nas seções 5.5.1, 5.5.2 e 5.5.3. Os dados resumidos de todos os métodos são mostrados na Tabela 5.6. A média de consumo entre os métodos foi de $21,80 \pm 3,68$ para 1 s e $10,90 \pm 0,95$ para 3 s.

Algumas considerações devem ser feitas em relação a cada método, para melhor compreensão das divergências. A primeira delas, para o método #1, erros relacionados a subamostragem e limitação de banda do instrumento são encontrados. A frequência de amostragem do multímetro é limitada em 50 kHz, para o modo de operação empregado. Assim, as nuâncias presentes nas bordas de transição do sinal de corrente, que ocorrem principalmente no momento de transmissão de pacotes BLE, não são digitalizadas.

A segunda consideração a ser feita é em relação ao método #2. Assim como citado ao método #1, erros de subamostragem são evidenciados no método #2, uma vez que a taxa de amostragem dos dados salvos foi de 40 kHz, devido ao janelamento temporal do instrumento. Erros podem ser introduzidos no cálculo devido ao intervalo e método de integração trapezoidal.

Com relação ao último método #3, fenômenos de auto descarregamento e corrente de fuga ocorrem inerentemente no supercapacitor. Desta maneira, os valores de corrente medidos obrigatoriamente incluem efeitos indesejados para medida exclusiva de corrente do dispositivo de telemetria.

Conforme se aumenta o intervalo de envio dos pacotes, o desvio padrão entre os métodos é reduzido. Isso pode ser explicado pela menor incidência de erros associados à subamostragem nos transitórios de envio dos pacotes BLE, quando prolongados.

Tabela 5.6 – Resumo do consumo de corrente estimado pelos diferentes métodos.

Consumo de corrente - Resumo entre métodos			
Intervalo de envio	<i>Advertising</i> BLE	Método	Corrente [μ A]
1 s		#1	19,06
		#2	20,37
		#3	25,99
3 s		#1	11,72
		#2	9,85
		#3	11,13

5.6 Comportamento do circuito de telemetria em ambiente externo

O dispositivo de telemetria de hidrômetros foi projetado para extrair energia fotovoltaica e utilizá-la na manutenção de seu funcionamento. Assim, é interessante ao projeto monitorar o comportamento de geração e consumo energético em ambiente externo, naturalmente onde o dispositivo se encontraria.



Figura 5.22 – *Setup* montado para medida em ambiente externo.

Com o objetivo de se verificar a funcionalidade mais próxima ao real, o seguinte ensaio foi realizado: o dispositivo de telemetria foi alimentado por uma célula fotovoltaica de área $11,25 \text{ cm}^2$; o circuito de colheita de energia armazenou as cargas em um componente supercapacitor de 1 F , inicialmente descarregado; e como elemento de *back-up*, uma bateria CR2032 foi previamente carregada. Essa composição do sistema foi disposta em ambiente externo e monitorada a tensão vista sobre o supercapacitor, durante intervalo de pouco mais de 4 dias, através do circuito *datalogger*. O *setup* montado do procedimento é mostrado na Figura 5.22.

Os circuitos foram alocados dentro de uma caixa plástica, para proteção contra umidade da chuva, com exceção da célula fotovoltaica. O ensaio foi iniciado às 9:45. A curva de tensão obtida com o procedimento é exibida na Figura 5.23.

Analisando o gráfico, logo no início da curva, há um momento de abrupto aumento da tensão vista sobre o supercapacitor. Em seguida, é observado um comportamento periódico. Há oscilações na tensão, ao longo do dia e da noite, que podem ser explicadas pelo carregamento diurno do supercapacitor, através da célula fotovoltaica, e o consumo de sua energia armazenada durante a noite. Embora isto ocorra, em nenhum momento a tensão sobre o supercapacitor atinge a tensão mínima de funcionamento do circuito, mostrada através do procedimento da Seção 5.5.3. Ou seja, a carga de *back-up*

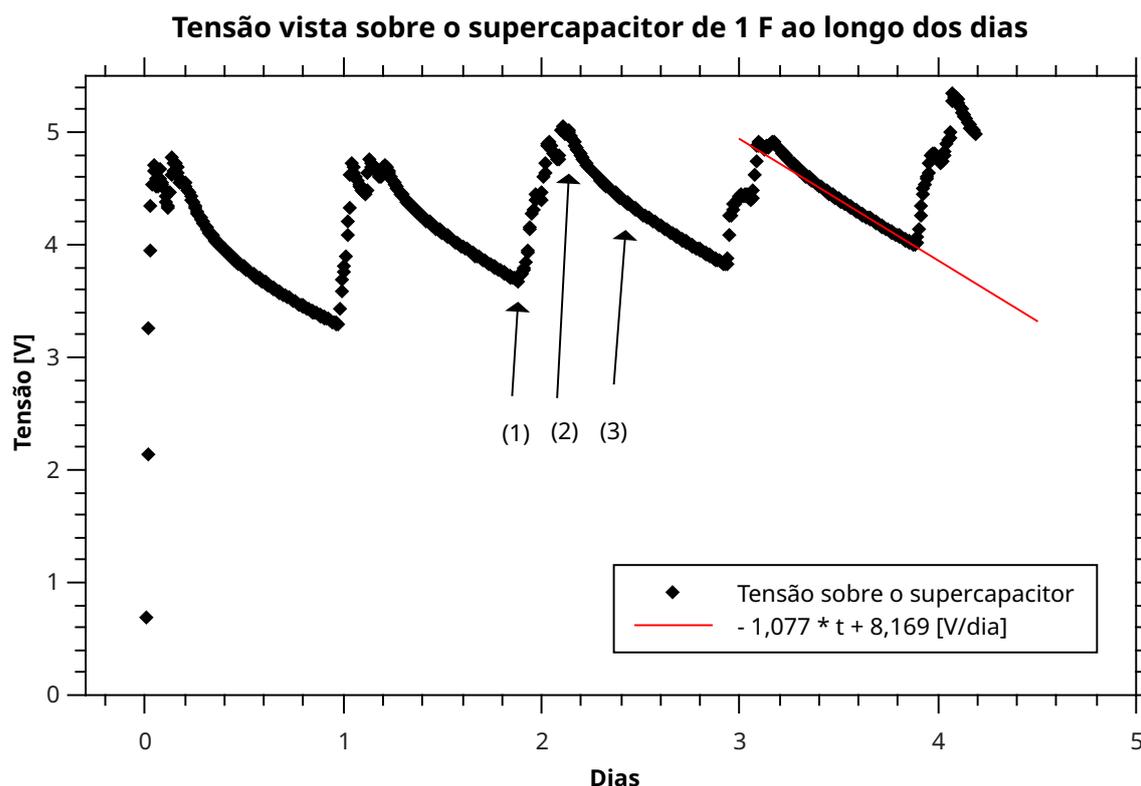


Figura 5.23 – Monitoramento da tensão, observada sobre supercapacitor de 1 F, ao longo de pouco mais de 4 dias.

da bateria de Li-Ion nunca é utilizada. O comportamento observado reforça o conceito intermitente da geração energética em circuitos *energy harvesting*.

Três momentos na curva são interessantes de serem comentados, indicados pelas setas. Destacado em (1), quando as cargas geradas pela célula fotovoltaica conseguem romper a barreira de potencial elétrico do diodo de retificação e carregar o supercapacitor, há o início de uma inclinação positiva na curva. Este momento inicia aproximadamente às 7:00, quando o sol está sobre o horizonte e a luz natural incide com maior intensidade no ambiente em que o dispositivo está inserido.

O supercapacitor é então carregado, sua tensão aumenta, até o momento em que as cargas geradas não conseguem ultrapassar a barreira de potencial, momento destacado em (2), que ocorre aproximadamente às 13:00. Logo em seguida, há um abrupto declínio da tensão, explicado pelo tempo necessário ao equilíbrio de cargas nos eletrodos porosos do supercapacitor.

Por fim, no momento (3), há uma atenuação quase linear na tensão do supercapacitor, resultante de seu descarregamento pela carga do sistema de telemetria. A última curva de descarga foi linearizada, como indica a reta em vermelho, a fim de obter uma estimativa de consumo de corrente. Foi obtida uma equação da tensão em função

dos dias t ,

$$V(t) = -1,077 t + 8,169, \quad (5.3)$$

a qual foi dimensionalmente processada para tensão em função de segundos e, por fim, obtida a estimativa de corrente média, com valor de $13,425 \mu\text{A}$.

O valor de corrente obtido é alinhado ao resultado visto em laboratório, como mostrado na Seção 5.5.3. O aumento de consumo, pouco mais de $2 \mu\text{A}$, pode ser explicado pelo acoplamento da célula fotovoltaica em série ao diodo de retificação, ligado ao supercapacitor. Há, então, uma corrente de fuga, não incluída no teste em laboratório, mas que se manifesta neste ensaio.

5.7 Algoritmo para o funcionamento otimizado

Após finalizar os ensaios de consumo com o rádio de comunicação ligado e desligado, foi possível sugerir um algoritmo de funcionamento otimizado para o dispositivo de telemetria. Na Figura 5.24 é apresentado um fluxograma com a ideia central deste algoritmo.

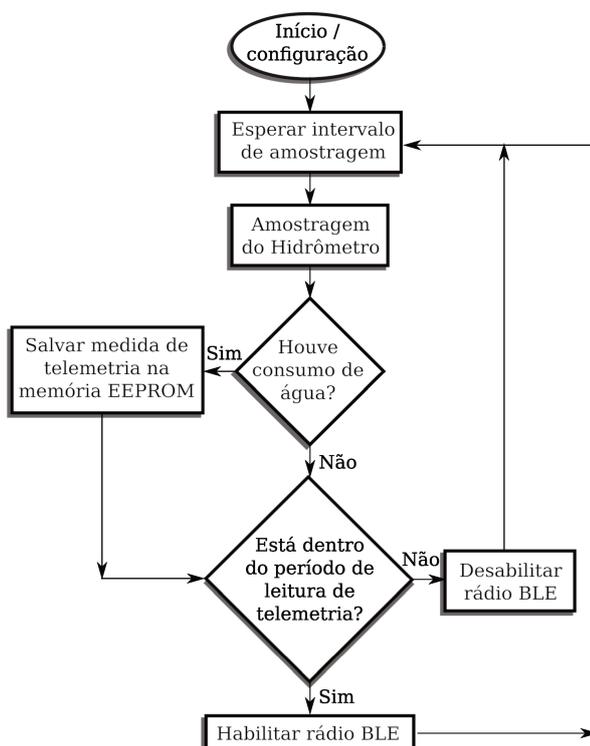


Figura 5.24 – Fluxograma do algoritmo de funcionamento otimizado.

Seguindo o fluxo dos blocos, inicialmente é configurado os periféricos do dispositivo, em seguida há espera para o momento de amostragem do hidrômetro. O dispositivo de telemetria estará grande parte do tempo neste estado de mais baixo consumo, esperando. Quando é o momento adequado, é feita a amostragem do hidrômetro e, caso seja

detectado consumo de água, os novos dados serão salvos na memória EEPROM. Por fim, o rádio de comunicação será habilitado ou desabilitado conforme o cronograma necessário ao leiturista.

A implementação do algoritmo sugere uma eficácia na redução de recursos energéticos, de maneira que o dispositivo de telemetria somente ativaria sua comunicação BLE em um intervalo de leitura determinado. Este intervalo corresponderia ao momento que o profissional leiturista estaria aferindo medidas, passando próximo ao dispositivo. Para todo o tempo restante, o rádio estaria desligado, economizando significativamente a energia armazenada.

5.8 Custos do projeto

Com os ensaios em laboratório e em ambiente externo, foi possível prever o comportamento do dispositivo de telemetria e finalizar o desenvolvimento do primeiro protótipo. Com a intenção de se estimar custeios para sua futura fabricação ou eventual produção em larga escala, foi estimado o custo em dólares (US\$) do projeto. Os valores dos componentes empregados estão resumidos na Tabela 5.7. O valor total para se obter uma réplica do dispositivo de telemetria foi de US\$ 13,47. Neste cálculo, não estão inclusos impostos e taxas de transporte e importação.

Tabela 5.7 – Custo aproximado dos componentes utilizados no projeto.

Custos do projeto			
Componente	Quantidade	Valor unitário (US\$)	Valor total (US\$)
Microcontrolador NRF51822	1	1,98	1,98
Supercapacitor EATON 1 F	1	4,54	4,54
Célula fotovoltaica	1	5,50	5,50
Regulador linear XC6206	1	0,09	0,09
Memória EEPROM PT24C02	1	0,04	0,04
Diodos BAR43	4	0,04	0,16
Resistores	7	< 0,01	0,01
Capacitores	10	0,05	0,50
Transistores	3	0,04	0,12
Diodo IR	1	0,05	0,05
Fototransistor IR	1	0,05	0,05
Adaptador de bateria CR2032	1	0,04	0,04
Bateria CR2032	1	0,32	0,32
Conector	1	0,07	0,07
		Custo total	US\$ 13,47

6 Conclusões

Um circuito para tomada de medidas I-V em ambientes internos foi desenvolvido, com o objetivo de se medir a potência por área em células fotovoltaicas, nos cenários menos favorecidos. Quatro ambientes internos foram selecionados para tomada da medida. A captação energética de algumas dezenas de $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ foi evidenciada em ambientes completamente iluminados artificialmente e algumas centenas $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ quando indiretamente iluminados pelo sol.

O supercapacitor utilizado ao longo do trabalho foi caracterizado através do instrumento potenciostato, por meio de procedimentos de cronopotenciometria e espectroscopia de impedância. Estas medidas revelaram valor médio de capacitância de 1,078 F, divergindo 7,82 % do valor nominal especificado pelo fabricante.

A placa de circuito impresso do dispositivo de telemetria foi devidamente manufaturada. Com a programação do *Firmware*, foi possível verificar a funcionalidade do circuito construído. Dados foram salvos e lidos em memória EEPROM, não somente, transmitidos via rádio BLE.

O sistema de sensoriamento do hidrômetro também obteve desempenho funcional. O suporte mecânico para alocação dos componentes ópticos foi aproveitado de trabalhos antigos e continuou operando de maneira congruente. Com relação ao desempenho, foi possível detectar o movimento da relojoaria do hidrômetro, conseqüentemente, digitalizar medidas de consumo. Após teste de funcionalidade durante pernoite, o circuito de sensoriamento mostrou medida compatível com a relojoaria do hidrômetro.

Três métodos foram empregados para medida de corrente do dispositivo de telemetria: exclusivamente através do multímetro; multímetro e osciloscópio; e decaimento de tensão no supercapacitor, baseado em procedimento de cronopotenciometria. Em todos os métodos, o intervalo de envio dos pacotes BLE foi variado entre 1 s e 3 s; variação que se mostrou decisiva no desempenho energético do dispositivo.

Para o primeiro método, foi observado consumo de corrente de $19,06 \mu\text{A}$, com intervalo de envio de 1 s; enquanto $11,72 \mu\text{A}$, para intervalo de 3 s. O segundo método trouxe dados de consumo de $20,37 \mu\text{A}$ e $9,85 \mu\text{A}$, para a mesma variação de intervalos do método anterior. Por fim, o último método mostrou consumo de $25,99 \mu\text{A}$ e $11,13 \mu\text{A}$. A média de consumo entre os métodos foi de $21,807 \pm 3,681$ para 1 s e $10,900 \pm 0,955$ para 3 s.

Para a medida de consumo em ambiente externo, próximo ao real, onde o sistema de telemetria se encontraria, um circuito *datalogger* foi elaborado. Sua placa de

circuito impresso foi devidamente manufaturada. Testes comparativos com instrumento multímetro mostraram que a amostragem de sinais de tensão é coerente pelo sistema desenvolvido.

Em relação ao ensaio em ambiente externo, mostrado na Seção 5.6, foi verificado o caráter intermitente da colheita de energia. Também foi verificado que o dispositivo de telemetria apresenta consumo de corrente de aproximadamente $13,425 \mu\text{A}$, valor convergente com os encontrados em laboratório.

Para o ambiente testado, o saldo energético propiciou a autonomia de funcionamento do dispositivo de maneira a não ser necessária a atuação da bateria de *back-up*. Este cenário é otimista à aplicação do sistema de telemetria em outros ambientes externos e também à possibilidade de eliminação da bateria, configurações que podem ser testadas em trabalhos futuros.

7 Trabalhos futuros

Foi verificada autonomia energética do dispositivo de telemetria através do ensaio em ambiente externo. Seria possível, então, a remoção de parte do circuito de gerenciamento energético, referente à fonte de energia através da bateria de *back-up* (Figura 4.4). Não somente, com essa mudança, o diodo de retificação existente entre o supercapacitor e nó *power bus* seria desnecessário.

O ensaio de funcionalidade de medida do hidrômetro foi executados durante o período de uma noite. Não foi verificado desvio entre o valor lido na relojoaria e o exibido pelo dispositivo de telemetria. No entanto, para garantia de maior robustez do sistema, seria necessária a realização do mesmo ensaio, mas com intervalo de tempo mais prolongado, por dias ou semanas.

Existem tecnologias de rádio, recém estabelecidas no mercado, como o circuito integrado SX1280 da fabricante Semtech, que são compatíveis com comunicação BLE e também LoRa. Uma possível melhoria ao sistema de comunicação seria o emprego de rádios multiplataformas. Mudanças desta ordem necessitariam obrigatoriamente da reestruturação de todo circuito microcontrolado e de rádio, o que poderia ser aplicado em futuros dispositivos.

Uma possível melhoria que poderia ser implementada ao sistema *datalogger* é o controle do dispositivo por comunicação sem fio, de maneira a setar configurações e adquirir os dados remotamente. Para tanto, mudanças tanto do rádio poderiam ser implementadas, quando, principalmente, na estruturação do *firmware*, para viabilização das funcionalidades. Estes novos recursos necessitariam um tempo adicional de desenvolvimento, o que caberia em trabalhos futuros.

Referências

- 3PEAK. *TP2121/TP2121N/TP2122/TP2124*. [S.l.], 2017. Rev. 1.1. Citado na página 38.
- 3PEAK. *LMV321B/LMV358B/LMV324B*. [S.l.], 2018. Rev. 0. Citado na página 38.
- ARANDA, E. D. et al. Measuring the i-v curve of pv generators. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 3, n. 3, p. 4–14, Sept 2009. ISSN 1932-4529. Citado na página 27.
- BIOLOGIC. *SP-200 Single channel - transportable potentiostat/galvanostat*. 2019. Disponível em: <<https://www.biologic.net/products/sp-200/>>. Citado na página 44.
- Both, J. The modern era of aluminum electrolytic capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 31, n. 4, p. 24–34, July 2015. ISSN 1558-4402. Citado na página 21.
- CELIK, A. N.; ACIKGOZ, N. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy*, v. 84, n. 1, p. 1–15, 2007. ISSN 03062619. Citado na página 19.
- COSTA, M. S. *Algoritmos para computador e microcontrolador*. Acesso em 26-12-2018. <<https://github.com/mathiasscroccaro>>. Citado na página 42.
- ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, n. 2, p. 439–449, June 2007. ISSN 0885-8969. Citado na página 41.
- Gavrila, S.; Gontean, A. Study on the effect of the voltage upon the electrolytic capacitors mounted in reverse polarity. In: *2012 10th International Symposium on Electronics and Telecommunications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 19–22. ISSN null. Citado na página 21.
- GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 53). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 27, n. 1, p. 3–12, 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3102>>. Citado na página 19.
- Gyrard, A.; Zimmermann, A.; Sheth, A. Building iot-based applications for smart cities: How can ontology catalogs help? *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 5, p. 3978–3990, Oct 2018. ISSN 2327-4662. Citado na página 16.
- HEYDON, R. *Bluetooth Low Energy: The Developer's Handbook*. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2012. ISBN 0-13-288836-X. Citado na página 22.
- HSIA, S. C.; HSU, S. W.; CHANG, Y. J. Remote monitoring and smart sensing for water meter system and leakage detection. *IET Wireless Sensor Systems*, v. 2, n. 4, p. 402–408, 2012. ISSN 20436386. Citado na página 16.
- JEEVANDOSS, C. R.; KUMARAVEL, M.; KUMAR, V. J. Sunlight based i-v characterization of solar pv cells. In: *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. ISSN 1091-5281. Citado na página 27.

- Jeon, K. E. et al. Ble beacons for internet of things applications: Survey, challenges, and opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 2, p. 811–828, April 2018. ISSN 2327-4662. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- KAMAT, S.; LINDH, J. *Measuring Bluetooth® Low Energy Power Consumption*. [S.l.], 2010. Citado na página 35.
- Kang Eun Jeon; Tong, T.; She, J. Preliminary design for sustainable ble beacons powered by solar panels. In: *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 103–109. ISSN null. Citado na página 35.
- Kansal and A.; Hsu, J.; AND, J. F. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. In: *IPSN 2005. Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 457–462. Citado na página 20.
- LEE, Y. W.; EUN, S.; OH, S. H. Wireless digital water meter with low power consumption for automatic meter reading. *Proceedings - 2008 International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, ICHIT 2008*, p. 639–645, 2008. Citado na página 16.
- LI, Y. et al. Research on water meter reading system based on LoRa communication. *2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities, ICSGSC 2017*, p. 248–251, 2017. Citado na página 16.
- Lin, J.; Talty, T.; Tonguz, O. K. On the potential of bluetooth low energy technology for vehicular applications. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 1, p. 267–275, January 2015. ISSN 0163-6804. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- MIKHAYLOV, K.; PLEVITAKIS, N.; TERVONEN, J. Performance Analysis and Comparison of Bluetooth Low Energy with IEEE 802.15.4 and SimpliCI. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, v. 2, n. 3, p. 589–613, 2013. ISSN 2224-2708. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2224-2708/2/3/589/>>. Citado na página 23.
- MONTEIRO, D. W. de L. *CMOS-based integrated wavefront sensor*. Tese (Doutorado) — Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2002. Citado na página 31.
- MUDUMBE, M. J.; ABU-MAHFOUZ, A. M. Smart water meter system for user-centric consumption measurement. *Proceeding - 2015 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2015*, p. 993–998, 2015. Nenhuma citação no texto.
- Nikoukar, A. et al. Empirical analysis and modeling of bluetooth low-energy (ble) advertisement channels. In: *2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 10, 17 e 22.
- OCTAVE. *Octave trapz online reference*. 2020. <<https://octave.sourceforge.io/octave/function/trapz.html>>. Acesso em 02-03-2020. Citado na página 54.
- ON SEMICONDUCTORS. *BAR43 / BAR43C / BAR43S - Schottky Diodes*. [S.l.], 2015. Rev. 1.3. Citado na página 29.

PARADISO, J. A.; STARNER, T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Computing*, v. 4, n. 1, p. 18–27, Jan 2005. ISSN 1536-1268. Citado 3 vezes nas páginas 20, 41 e 43.

SERA, D.; TEODORESCU, R.; RODRIGUEZ, P. PV panel model based on datasheet values. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, n. March, p. 2392–2396, 2007. ISSN 978-1-4244-0754-5. Citado na página 19.

SHANGHAI FUDAN MICROELECTRONICS. *FM25F01 - 1M-BIT SERIAL FLASH MEMORY*. [S.l.], 2015. Rev. 1.4. Citado na página 39.

SHARATH, V. C. et al. Smart aqua meter. *2014 International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications, ICAECC 2014*, IEEE, p. 1–5, 2015. Citado na página 16.

SHARMA, P.; BHATTI, T. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 12, p. 2901 – 2912, 2010. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410002438>>. Citado na página 21.

SIEKKINEN, M. et al. How low energy is bluetooth low energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4. *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops, WCNCW 2012*, p. 232–237, 2012. Citado na página 23.

STMICROELECTRONICS. *STM32CubeMX*. Acesso em 26–12–2018. <<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>>. Citado na página 42.

SWART, J. W. *Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações*. Editora Unicamp, 2008. ISBN 9788526808188. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Lau_PgAACAAJ>. Citado na página 19.

TABERNA, P.-L.; SIMON, P. Electrochemical techniques. In: _____. *Supercapacitors*. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. cap. 3, p. 111–130. ISBN 9783527646661. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527646661.ch3>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 34.

TAN, Y. K.; PANDA, S. K. Energy harvesting from hybrid indoor ambient light and thermal energy sources for enhanced performance of wireless sensor nodes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 9, p. 4424–4435, Sep. 2011. ISSN 0278-0046. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 43.

TAVARES, S. A. et al. Telemetry for Domestic Water Consumption Based on IOT and Open Standards. *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2018 - Proceedings*, IEEE, p. 186–191, 2018. Citado na página 16.

TORREX SEMICONDUCTORS. *XC6206Series - Low ESR Cap. Compatible Positive Voltage Regulators*. [S.l.], 2008. ETR0305_008. Citado na página 30.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, May 2009. ISSN 0885-8993. Citado 5 vezes nas páginas 10, 19, 20, 40 e 41.

XIAO, W.; DUNFORD, W. G.; CAPEL, A. A novel modeling method for photovoltaic cells. In: *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 1950–1956 Vol.3. ISSN 0275-9306. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

Xu, L. D.; He, W.; Li, S. Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 4, p. 2233–2243, Nov 2014. ISSN 1551-3203. Citado na página 17.