

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Controle de Potência em um Sistema de Monitoramento de Abelhas *off-grid*

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina

como requisito para a aprovação da disciplina:

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

Filipe Eduardo Moecke

Florianópolis, Julho de 2019

Controle de Potência em um sistema de monitoramento de abelhas *off-grid*

Filipe Eduardo Moecke

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

e aprovada na sua forma final pelo

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira

Banca Examinadora:

Prof. Marcos Moecke
Orientador na Empresa

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira
Orientador no Curso

Prof. Hector Bessa Silveira
Responsável pela disciplina

_____, Avaliador

_____, Debatedor

_____, Debatedor

*Este trabalho é dedicado aos apicultores de Santa Catarina, que cuidam de nossas abelhas,
que polinizam nossas flores e nos trazem o precioso mel.*

Agradecimentos

Agradeço a minha esposa linda, Débora Melissa Petry Moecke, que me suportou e me auxiliou nessa batalha que travei com o PFC, ao meu pai que me auxiliou e me orientou no projeto, a minha família e amigos e a Deus que nunca me abandonou.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

O monitoramento das condições ambientais de colmeias de abelhas e da sua saúde é um fator muito importante para os apicultores, seja na produção de mel e seus derivados, ou em outros ramos da agricultura como na polinização de flores e na fruticultura. O desenvolvimento de equipamentos que permitam monitorar indicadores dessa atividade produtiva é de fundamental importância pois podem resultar no seu incremento. Este trabalho lida com o desenvolvimento de um sistema de controle por tempo de atividade para a redução do consumo de energia de sistemas embarcados existentes (RFabelhas) que se comunicam através de sinais de radio *Long Range* ou Longo Alcance (LoRa) e transmitem esses sinais para um servidor e banco de dados em nuvem. No suprimento de energia para esse sistema existe uma restrição natural pois ele é instalado no campo, sem acesso a rede comercial. Por isso, a solução é o uso de fontes alternativas de alimentação. Ficou pré-definido que inicialmente o projeto seria alimentado por um sistema solar com baterias para autonomia para 5 dias e noites. Os resultados mostram que foi possível reduzir de forma significativa o consumo de energia tanto do módulo *colmeia* como do *gateway*, possibilitando a redução em peso, tamanho e custo final do sistema, com melhoria das suas características técnicas.

Palavras-chave: apicultura de precisão, alimentação off-grid, redução de consumo de potência, LoRa, GPRS, controle por RTC.

Abstract

Monitoring honey bees and hives is an important factor in developing and increasing honey production and improving bee health. It can also improve other agricultural branches that depend on the pollination of flowers. Across the world, an estimated \$ 124 billion in farm income is dependent on insect pollination. Therefore, Development of equipment that allows measuring and monitoring indicators of this productive activity are fundamental as a support for this activity. herefore, the development of equipment that allows the monitoring of this productive activity is fundamental. This work deals with the development of a time-of-activity control system to reduce the energy consumption of an existing embedded system (RFabelhas) that uses LoRa radio signals to transmit data from the hives to a cloud server and database. For this type of system, there is a natural restriction in its power supply, since this system is installed mainly in agricultural field and away from the main lines of energy supply and commercial energy. Therefore, alternative sources of energy are needed. The system will use as energy source a solar system connected to batteries to provide autonomy for at least 5 days. The results shows that it significantly reduces the energy consumption of both the **hive** and the **gateway** modules, allowing the reduction in weight, size and final cost of the system, with further improvement of its technical characteristics.

Keywords: precision apiculture, off-grid, power consumption reduction, LoRa, GPRS, control by RTC.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema RFabelhas	34
Figura 2 – Sistema RFabelhas: detalhe dos módulos colmeia e gateway	35
Figura 3 – Atlas Solar brasileiro	37
Figura 4 – Diagrama do Sistema de alimentação	39
Figura 5 – Cobertura da rede Claro em 2G na região da grande Florianópolis	42
Figura 6 – Cobertura da rede Claro em 4G na região da grande Florianópolis	43
Figura 7 – Cobertura da rede Tim em 2G na região da grande Florianópolis	43
Figura 8 – Transmissão LoRa	44
Figura 9 – Arquitetura LoRaWAN	45
Figura 10 – Janelas de recepção dos dispositivos de classe A	46
Figura 11 – Interligação de vários escravos a um mestre com interface SPI	47
Figura 12 – Barramento típico de uma interface I2C	48
Figura 13 – Características gerais dos modelos de Arduino	51
Figura 14 – Pico de corrente e queda de tensão durante as rajadas de transmissão (especificação)	53
Figura 15 – Pico de corrente e queda de tensão durante as rajadas de transmissão (medição no módulo GPRS)	54
Figura 16 – Rajada de transmissão de dados por GPRS com diferentes operadoras	55
Figura 17 – Consumo de corrente na colmeia durante o pulso de transmissão LoRa	55
Figura 18 – INA219 configurado para medição de corrente por shunt ($I_{shunt} =$ V_{Shunt}/R_{Shunt}) e tensão de barramento (VBUS)	57
Figura 19 – Circuito de <i>wake-up</i> da Raspberry Pi	59
Figura 20 – Fluxograma dos serviços	61
Figura 21 – Carga da bateria de 12V 1.2 Ah medido pelo MCO e visualizado no Grafana	66
Figura 22 – Medição de de perdas do conversor CC-CC usando o sistema Monitoramento e Controle Online (MCO) com o módulo de relés	67
Figura 23 – Sistema de alimentação do módulo colmeia	69
Figura 24 – Circuito para carga da bateria	71
Figura 25 – Estágios de carregamento	72
Figura 26 – Carregamento da bateria de 1,2 Ah com a fonte CC 14 V @270 mA e controlador de carga Morningstar SHS10, obtida com o sistema Monito- ramento e Controle Online (MCO)	72
Figura 27 – Circuito para a descarga da bateria	73
Figura 28 – Curva teórica de descarga	74

Figura 29 – Curvas de descarga da bateria de 7 Ah com controlador de carga Morningstar SHS10, obtidas com o sistema MCO, usando uma corrente de descarga de 22 mA	74
Figura 30 – Ciclos de vida/profundidade de descarga	75
Figura 31 – Ciclo diário de carga da bateria de 7Ah a partir de um painel solar de 10W, medido com o MCO a cada 10 segundos	76
Figura 32 – Possibilidades de alimentação do Arduíno MEGA 2560	82
Figura 33 – Cenário de medição do consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo <i>colmeia</i> . Alimentação pelo conector P4 ou USB do Arduíno	82
Figura 34 – Cenário usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo. Com conversor CC-CC <i>step down</i> (LM2596) e alimentação pelo Vin ou USB do Arduíno <i>colmeia</i>	83
Figura 35 – Cenário CGW1 usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo <i>gateway</i> alimentado por fonte CA-CC e transmissão dos dados por Ethernet	84
Figura 36 – Cenário CGW2 usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo <i>gateway</i> e GPRS alimentados por fonte CA-CC	85
Figura 37 – Cenário CGW3 usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo <i>gateway</i> e GPRS alimentados sistema de alimentação solar	85
Figura 38 – Corrente e tensões no módulo <i>colmeia</i> para tempo entre transmissão de 30 segundos, detalhe da medição com osciloscópio	88
Figura 39 – Monitoramento da corrente no módulo <i>colmeia</i> para tempo entre transmissão de 5 minutos, adquirido pelo sistema MCO	88
Figura 40 – Corrente e tensões no módulo <i>colmeia</i> para uma descarga completa de bateria de 12V @1.3Ah com algoritmo de controle por tensão da bateria, adquirido pelo sistema MCO	89
Figura 41 – Monitoramento da corrente e tensões no módulo <i>gateway</i> para tempo de <i>wake-up</i> de 15 minutos, adquirido pelo sistema MCO	91
Figura 42 – Localização da ERB da TIM e do <i>gateway</i>	92
Figura 43 – Sincronismo entre a transmissão das <i>colmeias</i> e períodos de atividade do <i>gateway</i> , dados obtidos com o Monitoramento e Controle Online (MCO)	93
Figura 44 – Recepção dos dados das transmissões das <i>colmeias</i> na aplicação na <i>The Things Network</i> (TTN)	94
Figura 45 – Medições da corrente e tensão da bateria na operação do módulo <i>colmeia</i> , dados obtidos com o Monitoramento e Controle Online (MCO)	98

Figura 46 – Os valores da tensão de desligamento da carga (Epsolar Landstar
LS0512E) para o módulo colmeia 99

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tipos de painéis	38
Tabela 2 – Tipos de baterias	40
Tabela 3 – Relação entre a tensão da bateria e horários de ligamento dos módulos <i>gateway</i> e <i>colmeia</i>	61
Tabela 4 – Valores de <i>offset</i> de corrente dos sensores <i>INA219</i>	68
Tabela 5 – Tensão de desligamento e auto-consumo dos controladores de carga . .	70
Tabela 6 – Consumo de corrente relativo à corrente da bateria para controlador de carga Mornigstar SHS10, bateria de 12V/7Ah e conversor <i>CC-CC step down</i> (<i>LM2596</i>)	83
Tabela 7 – Consumo de corrente estimado para uma bateria de 4V sem necessidade de conversor	84
Tabela 8 – Perdas nos estágios do sistema de alimentação de acordo com o modo de operação (ciclo de trabalho) do módulo <i>colmeia</i> , alimentada de acordo com o cenário <i>CC3 @5V</i>	86
Tabela 9 – Consumo de corrente dos controladores de carga para diferentes estados de funcionamento	87
Tabela 10 – Consumo de corrente medido com o Monitoramento e Controle Online (<i>MCO</i>) para o sistema de alimentação do módulo <i>colmeia</i>	90
Tabela 11 – Comparação das características de transmissão do sistema proposto com outros sistemas comerciais existentes	95
Tabela 12 – Comparação das características de alimentação e tipos de sensores existentes do sistema proposto com outros sistemas comerciais existentes	95
Tabela 13 – Comparação de custos do sistema proposto com outros sistemas comerciais existentes	96
Tabela 14 – Os valores das tensões de referência e capacidade de carga estimada das baterias e respectivos modos de operação. Para <i>gateway</i> com bateria de 12V @12Ah	97
Tabela 15 – Os valores das tensões de referência e capacidade de carga estimada das baterias e respectivos modos de operação. Para <i>colmeia</i> com bateria de 12V @2.6Ah, e controlador Epsolar Landstar <i>LS0512E</i>	97
Tabela 16 – Quadro comparativo do módulo <i>colmeia</i> original (versão v1) e o atual (versão v2) quanto ao atendimento das especificações	100

Lista de abreviaturas e siglas

- ADC** *Analog-to-Digital Converter* ou Conversor Analógico-Digital
- Ah** Ampere-hora
- ANATEL** Agência Nacional de Telecomunicações
- API** *Application Programming Interface*
- APN** *Access Point Name*
- ARM** *Advanced RISC Machine*
- BLE** *Bluetooth Low Energy*
- CA** Corrente Alternada
- CC** Corrente Contínua
- CMRR** *Common-Mode Rejection Ratio* ou Taxa de Rejeição de Modo Comum
- CSS** *Chirp Spread Spectrum*
- EEPROM** *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*
- EPAGRI** Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
- ERB** Estação Radio Base
- FSK** *Frequency-Shift Keying*
- GFSK** *Gaussian Frequency-Shift Keying*
- GMSK** *Gaussian Minimum Shift Keying*
- GPIO** *General-Purpose Input/Output*
- GPRS** *General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio
- GSM** *Global Service Messaging* ou Serviço global de mensagens
- HDMI** *High-Definition Multimedia Interface*
- I2C** *I²C - Inter-Integrated Circuit*
- IDE** *Integrated Development Environment*
- IFSC** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
- IoT** *Internet of Things*
- IP** *Internet Protocol*
- ISM** *Industrial, Scientific and Medical*
- ITU-T** *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*
- LED** *Light-Emitting Diode* ou diodo emissor de luz
- LoRa** *Long Range* ou Longo Alcance
- LoRaWAN** *Long Range Wide Area Network*

LPWAN *Low Power Wide Area Network*
MAC *Medium Access Control*
MCO Monitoramento e Controle Online
MISO *Master In Slave Out*
MOSI *Master Out Slave In*
MPPT *Maximum Power Point Tracking*
MSK *Minimum-Shift Keying*
NTP Network Time Protocol
OOK *On-Off Keying*
PFC Projeto de Fim de Curso
PPP *Point-to-Point Protocol* ou protocolo ponto-a-ponto
PWM *Pulse Width Modulation*
Raspi Raspberry Pi
RTC *Real Time Clock* ou Relógio de Tempo Real
SCK *Serial Clock*
SCL *Serial Clock*
SDA *Serial Data*
SMS *Short Message Service*
SPI *Serial Peripheral Interface*
SQL *Structured Query Language*
SRAM *Static Random-Access Memory*
SS *Slave Select*
TCP *Transmission Control Protocol*
TTN *The Things Network*
TWI *Two Wire Interface* ou Interface de Dois Fios
UDP *User Datagram Protocol*
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina
USB *Universal Serial Bus*
UTC *Coordinated Universal Time*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação	26
1.2	Justificativa	30
1.3	Objetivos	30
1.4	Estrutura do trabalho	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	Sistema RFabelhas	33
2.2	Energia solar	36
2.3	Painel fotovoltaico	36
2.4	Sistema de alimentação	39
2.5	Interfaces utilizadas	41
3	DESENVOLVIMENTO	49
3.1	Especificações do sistema	49
3.2	Escolhas das tecnologias	50
3.3	Implementação das modificações nos módulos	50
3.4	Hardware adicional utilizado	52
3.5	Implementação do controle na Raspberry Pi	58
3.6	Bibliotecas de software utilizadas no Arduíno	63
3.7	Instrumentação utilizada	65
3.8	Sistema de alimentação	69
3.9	Alterações feitas nos módulos colmeias e gateway	78
4	RESULTADOS	81
4.1	Sistema de alimentação	81
4.2	Módulo colmeia	87
4.3	Módulo gateway	90
4.4	Sincronismo entre módulos gateway e colmeias	91
4.5	Comparação entre o sistema RFabelhas e outros sistemas	94
5	CONCLUSÃO	103
5.1	Trabalhos futuros	105
5.2	Considerações finais	106

REFERÊNCIAS 107

1 Introdução

O monitoramento das condições ambientais de colmeias e da sua saúde é um fator muito importante para os apicultores, seja para a produção de mel e seus derivados ou para outros ramos da agricultura, devido à relevância que as abelhas têm na polinização. Deste modo, é fundamental a criação e uso de equipamentos que permitam medir os indicadores necessários para seu melhor manejo, de modo a incrementar a produtividade de mel e garantir a saúde das abelhas e posteriores polinizações.

A Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina ([EPAGRI](#)) em conjunto com o campus de São José do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina ([IFSC](#)) desenvolvem um projeto de sistema autônomo e remoto de medição e monitoramento de colmeias para ser aplicado em larga escala entre os apicultores do estado de Santa Catarina. A região Sul concentra 43,1% do total de mel produzido no país. [[Epagri 2019](#)] O estado catarinense foi em 2016, o 4º maior produtor de mel do país, tendo uma produtividade de mais que o dobro por colmeia em relação à média brasileira [[EPAGRI 2018](#)]. O mel produzido no estado de Santa Catarina também foi várias vezes premiado como melhor mel do mundo. [[Epagri 2019](#)]

Visando monitorar dados da produção e do ambiente interno e externo das colmeias, e devido à locação remota das mesmas, normalmente distante de centros urbanos e sem acesso à rede elétrica, e muitas vezes até sem acesso a rede de telecomunicações, foi necessário desenvolver um sistema que pudesse concentrar as medições e transmiti-las usando alguma rede de telecomunicações de grande capilaridade e alcance. Assim, viu-se a necessidade de criar um equipamento que tivesse diversos sensores para monitoramento, mas que também tivesse sua alimentação independente da rede elétrica comercial.

Para resolver a situação de transmissão, optou-se por conectar as colmeias (módulos COLMEIA) a um equipamento concentrador (módulo **gateway**) utilizando o sistema de transmissão [LoRa](#). Por conta do seu baixo consumo e grande alcance permite que as colmeias transmitam as informações de lugares remotos para um **gateway** que esteja alocado em um ponto no qual é possível ter acesso à rede internet através da rede *General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio ([GPRS](#)).

Para reduzir ao máximo o processamento, tanto nos equipamentos das colmeias como no **gateway**, todo o armazenamento e tratamento das informações é realizado em nuvem computacional, através da Internet das Coisas. Essa tecnologia possibilita um fácil acesso e armazenamento de dados, que podem depois ser minados para aplicação de diferentes estudos e análises e assim construir melhores soluções.

Quanto a alimentação de energia dos equipamentos de campo, colmeias e **gateway**,

optou-se pelo uso da energia solar, através de painéis solares e baterias, pois normalmente essa energia tem boa disponibilidade nos locais escolhidos para a apicultura.

A definição da potência necessária e dimensionamento detalhado desse sistema foi postergada na fase inicial do projeto, sendo atribuída a este Projeto de Fim de Curso (PFC), no qual em parceria com o IFSC, EPAGRI e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foram avaliadas formas de solucionar a questão da alimentação independente da rede elétrica comercial, lidando com a redução de consumo dos módulos autônomos (colmeias e gateway), e dimensionamento dos componentes de alimentação tais como painéis solares, baterias, controladores de carga e fontes de alimentação. Visa-se ainda, se possível, reduzir o tamanho e peso desses componentes, pois em muitas situações é necessário que os equipamentos sejam portáteis, visto que as caixas de colmeia podem ser transportadas para diferentes lugares e cultivos para haja polinização de diferentes floradas.

O uso de fontes renováveis para a micro geração elétrica como forma de economia tem sido muito estudado, tais como o uso de energia fotovoltaica, eólica e biomassa. Porém, para o pequeno consumidor o uso de algumas fontes alternativas pode não ser possível por limitações de espaço, restrições legais ou até mesmo por aspectos estéticos. A biomassa, em geral, é mais apropriado para áreas de produção rural, proximidade de matas ou florestas, ou com uso de resíduos de esgoto, que são difíceis para o empreendimento individualizado. A eólica, para uma geração substancial de energia, precisa da existência de vento, razoável espaço de instalação e atender a questões de interferência com a vizinhança, sendo mais apropriada para geração de grandes blocos de energia em áreas não habitadas e interligadas ao sistema de transmissão nacional. Nesta análise, a energia fotovoltaica se apresenta como uma alternativa mais viável, pois em nada perturba a natureza, pode ser instalada nos próprios telhados das caixas das colmeias, podendo gerar pequenas quantidades de energia suficientes para a alimentação dos módulos.

1.1 Motivação

O Brasil possui mais de quatro mil espécies de abelhas. Segundo os organizadores do projeto, as abelhas realizam a polinização de mais de 70% das culturas agrícolas e 85% das plantas com flores. Os pesquisadores afirmam que a causa do sumiço dos insetos pode estar relacionada com as ações humanas e poderá impactar a oferta de alimentos no futuro. A abelha do gênero *úpis* é a mais ameaçada por ser mais utilizada.

Vírus, bactérias, fungos e desnutrição são alguns dos fatores que tornaram os insetos mais sensíveis. A ação dos defensivos agrícolas também pode colaborar com o seu desaparecimento. De acordo com os pesquisadores, os pesticidas possuem um efeito muito extensivo sobre os insetos. Todos estes fatores têm ameaçado a saúde e produção das

abelhas, havendo declínio na sua população e a possibilidade de um colapso na produção de alimentos. Diante deste quadro, vem se tornando cada vez mais necessário o monitoramento contínuo sobre os diferentes aspectos da saúde das colmeias, bem como a centralização destas informações.

A produção melífera catarinense tem algumas características que podem influenciar no monitoramento de abelhas. As colmeias costumam estar localizadas em locais remotos, em encostas de montanha, longe da rede elétrica e sujeitas a fenômenos climáticos extremos. Além disso, de modo a diversificar a produção e também garantir a polinização de diferentes cultivos agrícolas, muitos apicultores costumam mover suas colmeias regularmente e viajam longas distâncias para tal.

Assim sendo, para monitorar a saúde e produtividade das abelhas adequadamente, é necessário que o sistema seja capaz de atuar fora da rede de energia, podendo se comunicar através da internet, funcionar mesmo em condições adversas de clima e ser portátil.

Diante deste cenário, viu-se a possibilidade da construção de um sistema de alimentação solar *off-grid* que permita que sistemas de baixo porte conectados em rede possam ser alimentados através da energia solar em um sistema que combine bateria e um controle de potência.

Abelhas

Os insetos são a classe mais numerosa e mais difundida entre os animais, podendo ser encontrados em quase todos os lugares do planeta. [RAMOS J. M.; CARVALHO 2007] Eles são de grande importância como agentes de polinização, vetores de doenças, pragas na agricultura, parasitismo, produção de alimentos, entre outros. [KANDEPI 2015] O grupo de insetos que chama muita atenção são os insetos sociais, devido principalmente a sua capacidade organização e ao seu papel ecológico. Entre eles, se destacam as abelhas por possuir umas das mais complexas organizações sociais. [RAMOS J. M.; CARVALHO 2007]

As abelhas são insetos sociais e apresentam 3 castas de indivíduos: rainha, operárias e zangões. Todas essas castas passam pelas fases de ovo, larva, pupa até atingir a fase adulta e possuem tarefas bem definidas na colmeia. Uma colmeia abriga de 60 a 100 mil abelhas, tendo uma rainha, cerca de 100 zangões e milhares de operárias. A rainha vive até 5 anos enquanto as operárias vivem de 28 a 48 dias. [RAMOS J. M.; CARVALHO 2007]

A espécie *Apis mellifera* é uma das mais estudadas em função da importância para a sociedade humana, pela produção de mel e pela contribuição na produtividade agrícola e manutenção da vida vegetal feita por meio da polinização. A espécie objeto de estudo deste trabalho é a *Apis mellifera*, pertencente ao reino Animal, filo *Arthropoda*, classe *Insecta*, ordem *Hymenoptera*, subordem *Apocrita* e superfamília *Apoidea*. [KRONENBERG F.; HELLER 1982]

Os indivíduos adultos se alimentam geralmente de néctar e são os mais importantes agentes de polinização. As abelhas geralmente polinizam flores de todos os tipos, embora algumas espécies se especializam em determinadas flores. Na busca pelo pólen e néctar, uma abelha visita em torno de dez flores por minuto, fazendo em média quarenta voos diários, tocando em 40 mil flores durante a vida adulta. Com a língua, as abelhas recolhem o néctar do fundo de cada flor e guardam-no numa bolsa localizada na garganta. Depois, voltam à colmeia e o néctar vai passando de abelha em abelha. Desse modo, a água que ele contém se evapora, ele engrossa e se transforma em mel. [Kviesis A.; Zacepins 2012]

A maioria das abelhas transporta uma carga eletrostática, que ajuda-as na aderência ao pólen. Em média, uma abelha produz 5 gramas de mel durante toda sua curta vida e para cada quilo de mel produzido, as abelhas precisam visitar cerca de 5 milhões de flores. Visando a manutenção da colmeia, é necessária a produção de cera, sendo que para cada grama de cera as abelhas consomem de 6 a 7 gramas de mel.

Apenas as abelhas fêmeas trabalham na produção de mel, enquanto a principal missão dos machos é fecundar a rainha, além de proteger a colmeia de outros insetos que possam ameaçá-la. Apesar de não possuir ferrão, as suas presas servem para atacar outros insetos que tentem invadir a colmeia, como vespas ou formigas. A rainha voa o máximo que pode e é fecundada pelo macho que conseguir ir até ela, esse voo se chama: voo nupcial. Depois de cumprirem essa missão em particular, eles não são mais aceitos na colmeia. O número de operárias também cai no final do verão ou quando há pouco mel na colmeia. [Kviesis A.; Zacepins 2012]

As abelhas mantém cooperativamente a homeostase dentro da colmeia, regulando propriedades biofísicas tais como: temperatura, umidade e gases respiratórios. Ao fazerem isso, elas criam um ambiente adequado, evitando condições adversas. A atividade de controle de temperatura no ninho é conhecido como termorregulação. Insetos são animais pecilotérmicos ou "animais de sangue frio", pois sua temperatura corpórea varia de acordo com a temperatura do meio em que vivem. As abelhas têm seu metabolismo e atividade influenciados pela temperatura corpórea, que por sua vez, está quase inteiramente na dependência da temperatura do ambiente. Temperaturas baixas dificultam a atividade, enquanto altas temperaturas estimulam o animal. [KANDEPI 2015]

No caso dos insetos sociais, tais como formigas, abelhas, vespas e cupins, controlar a variação da temperatura é fundamental para garantir a gestação apropriada das crias e sobrevivência da colônia. As longas exposições a temperaturas muito baixas, durante o inverno, ou altas temperaturas no verão, podem levar a mortes ou malformações das crias, assim como o colapso fisiológico de operárias ou de forrageiras em voo. Alguns experimentos mostram que uma temperatura interna do ninho em 41 °C, resulta no abandono da colmeia pelas abelhas, porém as colônias só abandonaram o ninho após uma longa exposição à essas altas temperaturas. Isso só reforça que a termorregulação é umas das atividades

mais importantes para sobrevivência e bom funcionamento da colmeia. [KRONENBERG F.; HELLER 1982]

Visando melhorar o desempenho da colmeia na produção melífera e assim diminuir o gasto energético das abelhas em regular a temperatura interna, pode se utilizar de aquecedores dentro destas, que esquentam o ambiente e assim melhoram a produção e impedem a ocasional morte de abelhas em épocas mais frias. Esse recurso é particularmente relevante na cultura de abelhas sem ferrão como a *Apidae:Meliponina*, que preferem uma colmeia com temperatura em torno dos 30 °C. [Globo 2012]

Apicultura de precisão

Na apicultura moderna é fundamental medir os diferentes indicadores de saúde e produção das colmeias. A apicultura de precisão é uma estratégia de gerenciamento de apiários baseada no monitoramento de colônias de abelhas individuais para minimizar o consumo de recursos e maximizar a produtividade das abelhas. Seu principal requisito é a possibilidade de coletar e analisar dados sobre a colmeia continuamente, em tempo real e de forma automatizada, reduzindo a necessidade de manuseio das colmeias. [MEZQUIDA D. A.; MARTÍNEZ 2009]

Os sistemas de monitoramento modernos podem fornecer ao apicultor dados em tempo real e informações sobre parâmetros importantes de uma colônia, os quais são usados para tomar medidas visando a maximização da produção das suas colmeias. Além disso, as tecnologias de comunicação e sensores sem fio podem ser aplicadas na apicultura para medir parâmetros necessários de uma colônia sem que seja necessário interferir na colmeia. [LOLI 2008]

Entre as informações normalmente medidas para fazer o monitoramento das colmeias estão a temperatura e umidade relativa interna, além do peso da colmeia. A variação deste último parâmetro é usada para determinar a produção de mel, a entrada e saída das abelhas, bem como uma estimativa do número de abelhas na colmeia. Outras medições das condições ambientais do meio externo tais como temperatura, luminosidade, pluviometria e umidade relativa também são importantes para o manejo correto das colmeias.

Além desses fatores, existem outros que são interessantes de monitorar visando evitar sérios problemas na saúde da colmeia, como a taxa de dióxido de carbono e o ruído sonoro dentro e fora dela. Este segundo permite prever algumas atividades e movimentos, tais como o fenômeno de *swarming* e o *fanning*, usado pela colmeia para baixar a temperatura para seu valor ideal. [KRONENBERG F.; HELLER 1982]

1.2 Justificativa

As abelhas têm um papel fundamental na agricultura de um país, fertilizando plantas, garantindo variabilidade genética e produzindo mel. Santa Catarina consta atualmente como o maior produtor de mel brasileiro. Deste modo, torna-se essencial monitorar seus indicadores, os quais nos permitem saber a quantidade de abelhas, de mel, o fluxo de entrada e saída dos insetos, a saúde da colmeia, a presença de pragas e características da produção.

Assim sendo, é fundamental instalar sensores que transmitam esses dados para os produtores e um sistema que centralize essas informações a fim de gerar um diagnóstico da saúde e produção das colmeias. Como muitas destas estão localizadas em locais remotos, viu-se a necessidade de desenvolver uma tecnologia que permita seu funcionamento em locais distantes da rede elétrica e com capacidade de envio dos seus dados à rede. [MEZQUIDA D. A.; MARTÍNEZ 2009]

Já existem alternativas que permitam isso, porém possuem um custo altíssimo e não atendem todos os requisitos tidos como importantes para o seu correto funcionamento. Diante disto, outra prerrogativa do trabalho é manter o custo baixo para que os produtores possam utilizar a tecnologia em suas colmeias e lucrar com isso.

1.3 Objetivos

Ser capaz de manter o sistema de monitoramento de colmeias **RFabelhas** funcionando independente da rede elétrica, a fim de que as informações monitoradas sejam transmitidas a uma taxa diária especificada de no mínimo de hora em hora, sendo desejado que as medições sejam feitas a cada 5 minutos, porém admitindo redução nessa taxa até 1 medição por hora.

Objetivos específicos

- Viabilizar o uso da energia solar para a alimentação do sistema **RFabelhas**, manter o módulo **gateway** e o módulo **colmeia** alimentado apenas com energia solar e baterias;
- Reduzir o consumo de energia dos módulos mantendo suas funcionalidades especificadas;
- Monitorar a carga da bateria para decidir quando realizar a transmissão das informações coletadas;
- Utilizar relógios sincronizados no **gateway** e nas **colmeias** para aumentar o intervalo entre as transmissões de dados, e também o tempo de atividade do módulo **gateway**

quando a bateria está com baixa carga, possibilitando a transmissão dos dados de 5 em 5 minutos até 1 vez por dia;

- Definir e implementar uma lei de controle para garantir a transmissão das informações monitoradas na taxa diária especificada, admitindo perdas de dados em função da redução da carga da bateria;
- Adicionar ao sistema RFabelhas a conexão por [GPRS](#) a internet para possibilitar a mobilidade do gateway, anteriormente conectado através de cabo *ethernet*.

1.4 Estrutura do trabalho

Nesta introdução foi apresentada a motivação, um panorama da apicultura e seu monitoramento, a justificativa e o escopo desse projeto em particular. Por ser uma parte de um projeto maior RFabelhas, iniciado a partir de uma parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) e Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), o trabalho foi limitado aos objetivos específicos. A seguir, na fundamentação teórica são abordadas as grandezas medidas, é feita uma análise do uso da tecnologia da energia solar e é dada uma visão geral do projeto RFabelhas e de onde este ele está inserido. Também são apresentados os módulos de hardware utilizados no sistema, o sistema de alimentação proposto e o sistema de controle.

No desenvolvimento do trabalho é apresentada a metodologia, o sistema para a medição, as medições realizadas no sistema original, o novo sistema de alimentação e o controle proposto. Ao final do documento são apresentados os resultados obtidos e sua análise, conclusões e é discutida a relevância do trabalho.

2 Fundamentação teórica

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos e conhecimentos necessários para a compreensão do trabalho realizado. Como este trabalho é uma sequência de um projeto de pesquisa anterior, uma parte do sistema relativa a aquisição dos dados através dos sensores não é descrita já que não é tema deste trabalho. As seções que seguem tratam da fundamentação teórica das modificações realizadas no sistema **RFabelhas**, baseadas no uso de energia solar em um sistema *off-grid* com controle de consumo e transmissões.

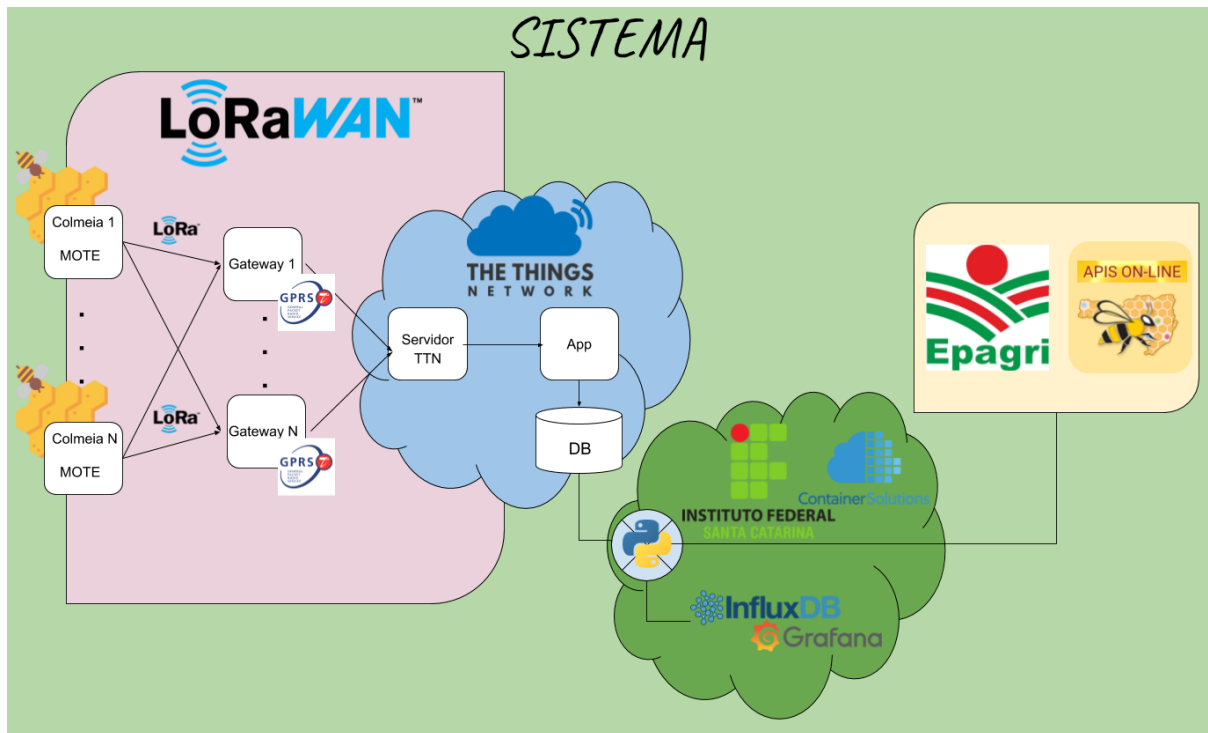
2.1 Sistema RFabelhas

Através de uma cooperação entre o **IFSC** e a **EPAGRI**, foi proposto um projeto de pesquisa para desenvolver uma solução para o sensoriamento remoto das colmeias de abelhas para apicultores do estado de Santa Catarina. A solução proposta utiliza tecnologia *Long Range Wide Area Network* (**LoRaWAN**) para a transmissão dos dados e técnicas de *Internet of Things* (**IoT**) e sistema embarcados no desenvolvimento dos módulos. A tecnologia **LoRa**® foi selecionada pois possibilita a comunicação via RF em longas distâncias, alcançando até 12 km em campo aberto com linha de visada direta, com possibilidade de trabalhar com baixo consumo de energia.

Na especificação do projeto foi definido que as colmeias deveriam ter sensores para monitorar e medir: peso (kg); iluminância (lux), temperatura (°C) e umidade relativa (em %) tanto internas como externas. A escolha desses sensores foi da **EPAGRI**, pois são informações importantes das condições da colmeia usados na apicultura, que possibilitam agregar melhorias no manejo das abelhas e extração melífera. O conhecimento dessas informações poderá resultar em aumento da produtividade de mel, redução da necessidade de contato humano com a colmeia, e assim preservar mais o processo natural das abelhas. Prevê-se que o sensoriamento irá beneficiar os apicultores do estado, impactando na produtividade da região, transformando-se em um fator de melhoria sócio-econômico.

O sistema, denominado **RFabelhas** é apresentado na **Figura 1** foi implementado utilizando módulos de monitoramento das colmeias (módulos *colmeia*) e um módulo *gateway* que recebe as informações de várias *colmeias* e as retransmite através da internet (através de cabo *ethernet* ou **GPRS**) para o módulo *nuvem_abelhas*, no qual as informações coletadas são processadas, armazenadas e disponibilizadas para outros serviços e para consulta. A transmissão entre a *colmeia* e o *gateway* é feita através de um sistema de radio frequência **LoRa**®. O módulo *nuvem_abelhas* foi implementado em uma nuvem computacional de contêineres no Instituto Federal de Santa Catarina - Campus São José. As informações coletadas transmitidas pelas *colmeias* são criptografadas pelo sistema

Figura 1 – Sistema RFabelhas



Fonte: Relatório final do projeto RFabelhas, IFSC 2018.

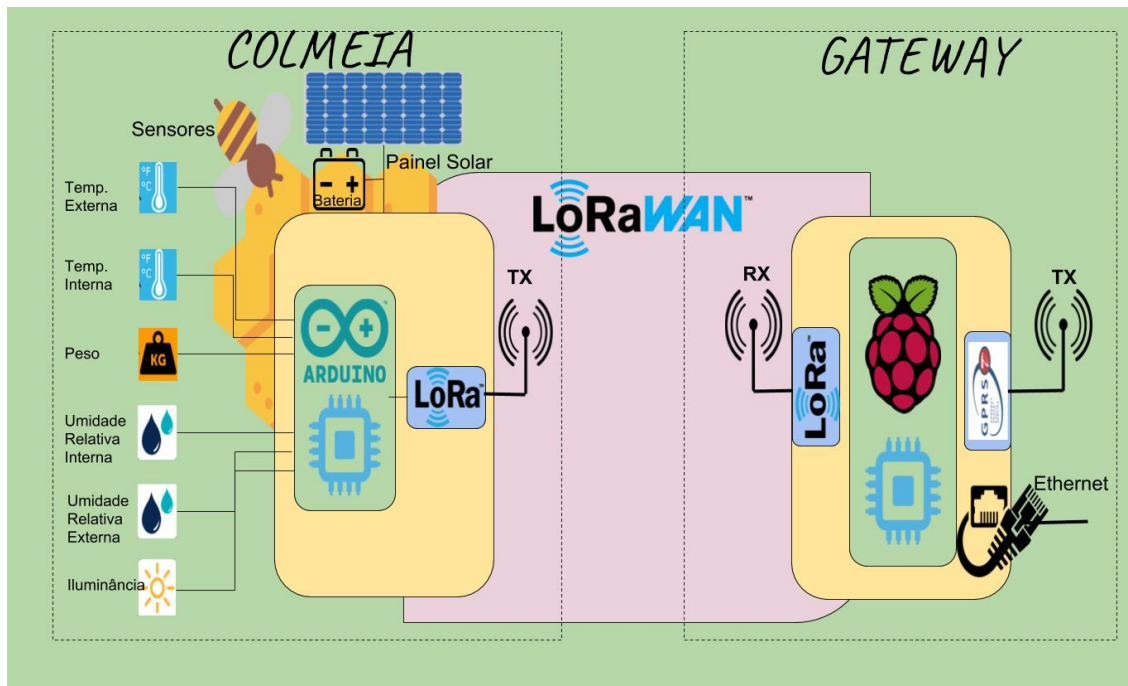
LoRaWAN, sendo descritografadas em uma aplicação na TTN, garantindo o sigilo das informações transmitidas e tratamento posterior dos dados. Após cada transmissão da colmeia, esta pode durante 2 segundos receber informações da aplicação na TTN através do canal de retorno.

O módulo `nuvem_abelhas` além de coletar as informações na TTN, armazena os dados em um banco de dados e pode performar diversas ações atualmente é realizado o cálculo de valores máximos, mínimos, médios antes de transmiti-los de hora em hora para o sistema `Apis-online` da EPAGRI. A disponibilização dos dados para os apicultores é feita a partir desse último sistema.

Os sensores integrados no módulo `colmeia` estão ilustrados na Figura 2, sendo inicialmente utilizados sensores para temperatura interna, externa, umidade relativa interna e externa, iluminância, peso. Em função da necessidade de realizar o controle de consumo, foi acrescido a este módulo um *Real Time Clock* ou Relógio de Tempo Real (RTC) e um sensor para monitoramento da alimentação do módulo. Futuramente se pensa em acrescentar um sensor de ruído para detectar possíveis predadores e fenômenos das abelhas.

Para o desenvolvimento dos protótipos dos módulos optou-se pelo uso de sensores comerciais e unidades de processamento de baixo custo. O protótipo do módulo `colmeia` foi implementado utilizando também alguns materiais e equipamentos cedidos pela EPAGRI, tais como caixa de colmeia (ninho, sobre-caixa, teto e proteção para chuva), painel solar,

Figura 2 – Sistema RFabelhas: detalhe dos módulos colmeia e gateway



Fonte: Relatório final do projeto RFabelhas, IFSC 2018.

controlador de carga, baterias e caixa ambiental para a proteção do equipamento contra intempéries. Como sensores de peso foram utilizadas 4 células de carga de 50 kg de baixo custo, dispostas nos cantos da caixa da colmeia. Os sensores de umidade e temperatura interna (AM2302 DHT22) foram inseridos bem no centro do ninho da colmeia. Na parte externa foram ainda instalados um sensor de luminosidade (BH1750FVI Lux) e outro sensor de umidade e temperatura. Todos esses sensores estão conectados a uma plataforma micro-controlada Arduino Mega 2560 R3, a qual também está conectada um módulo *transceiver* LoRaWAN (modelo RFM95PW) operando na banda *Industrial, Scientific and Medical (ISM)* de 915 MHz. A alimentação desse módulo é realizada por um sistema solar constituído de um painel solar, controlador de carga e bateria.

O protótipo do módulo *gateway* foi desenvolvido utilizando um processador Cortex A53 1,2 GHz (Raspberry Pi Model 3B), o qual controla o *hardware* de um *Gateway* LoRa, modelo LRF2S001 com 8 canais na faixa de 915 MHz. Para a conexão com a internet originalmente o sistema utilizava um cabo *ethernet*, mas foi necessário acrescentar uma conexão sem fio, e optou-se pela rede GPRS, pois a EPAGRI utiliza esse tipo de comunicação para a maioria de seus serviços de monitoramento. uma vez que é uma tecnologia difundida no interior do Brasil e facilmente conectável a rede por antenas próximas.

Devido a necessidade de controle do consumo, em ambos módulos foi também acrescentado um sensor de corrente, tensão e potência (INA219 da Texas Instruments)¹,

¹ [Instruments 2015]

para realizar o monitoramento dos parâmetros de alimentação por bateria dos módulos. A partir desses parâmetros o método de controle desenvolvido nesse trabalho seleciona o modo de operação (ciclo de trabalho) para o módulo, visando manter o sistema o maior tempo possível em funcionamento, mesmo durante a noite e quando ocorrem dias seguidos nublados nos quais a bateria não é carregada pelo painel solar. Para implementar o controle, foi também necessário adicionar um circuito de *Real Time Clock* ou Relógio de Tempo Real (RTC) de modo a poder sincronizar os módulos entre si e com o relógio *Coordinated Universal Time* (UTC).

O sistema antes do início deste trabalho já era composto pelos dois módulos, usando com os dispositivos LoRa e os sensores de peso, iluminância, temperatura e umidade. O módulo colmeia utilizava uma bateria de 12V/12Ah ligado diretamente a entrada do Arduino, e o módulo gateway era ligado na rede elétrica e se comunicava com a TTN por uma conexão *ethernet*.

2.2 Energia solar

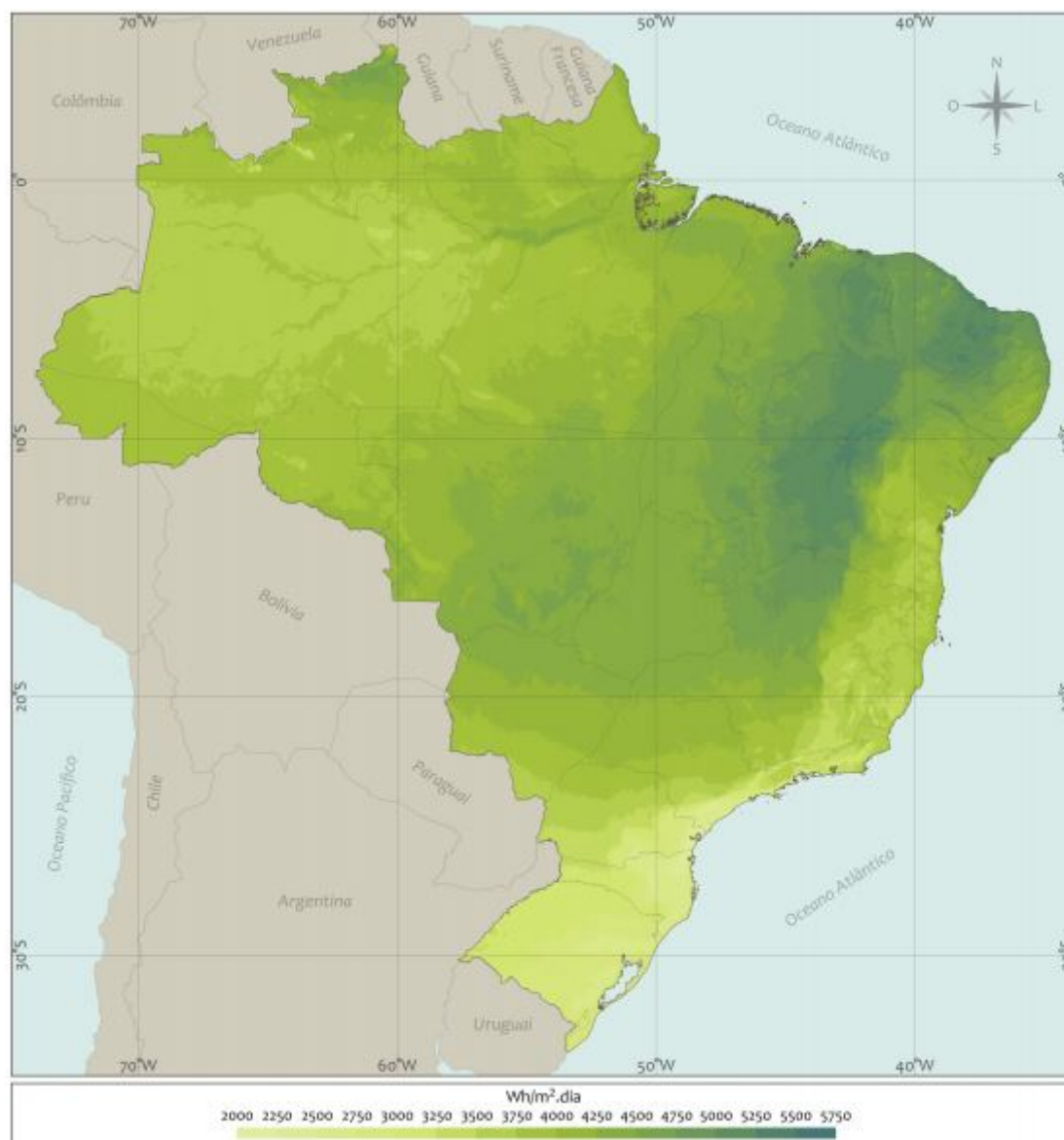
Segundo o Atlas Solar brasileiro de disponibilidade e energia solar (ver Figura 3), o estado de Santa Catarina recebe uma média de radiação solar entre 2,15 kWh/m² e 1,70 kWh/m², porém com uma variação anual considerável recebendo menos da metade da radiação no inverno em relação ao verão. Isso torna o desenvolvimento de um sistema alimentado por energia solar mais complexo, já que nos períodos de menos insolação é necessário um gasto energético menor ou uma maior capacidade de estoque de energia, devido ao menor período de sol.

Por outro lado, as áreas onde normalmente as caixas de colmeias são localizadas podem ter um agravante a mais, por serem localizadas em encostas de morros, além do fator climático que pode reduzir a insolação devido a nuvens, nevoeiros, e o fenômeno da cerração que é comum na serra catarinense, fazendo com que regiões fiquem por muitos dias sem receber a luz solar direta.

2.3 Painel fotovoltaico

A energia fotovoltaica diz respeito à tecnologia que gera potência elétrica em Corrente Contínua (CC) a partir de materiais semicondutores quando estes são iluminados por fótons. O componente individual do painel fotovoltaico (PV) é a célula solar, e ela gera potência elétrica (medida em Watts) enquanto houver incidência radiação solar. As células solares são constituídas por materiais chamados semicondutores, que tem elétrons ligados de forma fraca que ocupam uma faixa energética chamada banda de valência (*valence band*). Quando uma energia superior a um certo limite, energia de *band gap*, é exercida

Figura 3 – Atlas Solar brasileiro



Fonte: Atlas Solar Brasileiro [Labrem 2017].

sobre um elétron de valência, suas ligações são quebradas e o elétron fica livre para se deslocar para a camada de condução (*conduction band*), na qual é possível a condução de eletricidade no material semicondutor. Os elétrons livres da banda de condução são separados da banda de valência pelo intervalo de banda (medidos em unidades de elétron de volts V, ou eV). Essa energia necessária para a libertação do elétron, pode ser fornecida por fótons, que são partículas de luz. Resumindo, de forma geral, quando as células solares se encontram expostas à luz solar, os fótons atingem os elétrons da banda de valência, quebrando as suas ligações e transportando-os para a camada de condução, na qual através de um contato seletivo é feita a coleta dos elétrons e estes são encaminhados para um circuito externo produzindo a corrente elétrica.

Existem diferentes tecnologias utilizadas em células fotovoltaicas para transformar

a radiação luminosa em energia elétrica. Cada uma tem diferentes taxas de aproveitamento, custos, disponibilidade, durabilidade e manejo, conforme mostra a [Tabela 1](#). Para a escolha apropriada do painel fotovoltaico é necessário conhecer a carga a ser alimentada, o espaço disponível para sua instalação, a tensão necessária para uma melhor transferência de energia entre o painel e a carga e a irradiação solar diária média no local de instalação. No tipo de aplicação deste projeto, o ideal é que seja usado “o ângulo com maior valor mínimo mensal de irradiação solar e assim maximizar a produção de energia diminuindo o tamanho e custo dos componentes tornando ele mais escalável e portátil.

Tabela 1 – Tipos de painéis

Tipo	Eficiência	Sensível a temperatura	Capacidade	Custo
Célula Solar	0,23	Sim	10W	R\$1.000,00
Silício	0,15	Não	100W	R\$5.000,00
Flexível	0,18	Sim	20W	R\$400,00
Cromium	0,1	Não	200W	R\$10.000,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o cálculo da potência necessária de geração o sistema proposto a ser instalado terá que satisfazer a carga a considerar (seja esta diária, semanal ou mesmo mensal). Para além disso, a potência necessária de painéis solares a instalar depende da eficiência total do sistema a considerar.

Assim, pode-se calcular a potência necessária do painel fotovoltaico P_{FV} :

$$P_{PFV} = Efi_{cab} * Efi_{reg} * Efi_{bat} * Efi_{cc} * P_{bat} \quad (2.1)$$

onde Efi_{cab} é a eficiência dos cabos, Efi_{reg} é a eficiência do regulador de carga, Efi_{bat} a eficiência da bateria e Efi_{cc} é a eficiência do conversora CC-CC.

A partir dessa potência é possível escolher um painel com menor custo e maior disponibilidade. A questão da disponibilidade de energia quando não há sol normalmente é solucionado pela implementação de um circuito de alimentação com bateria, que consiste de um controlador de carga e de fonte chaveada que alimenta a carga. No caso do projeto RFabelhas, essas cargas são os módulos colmeia e gateway.

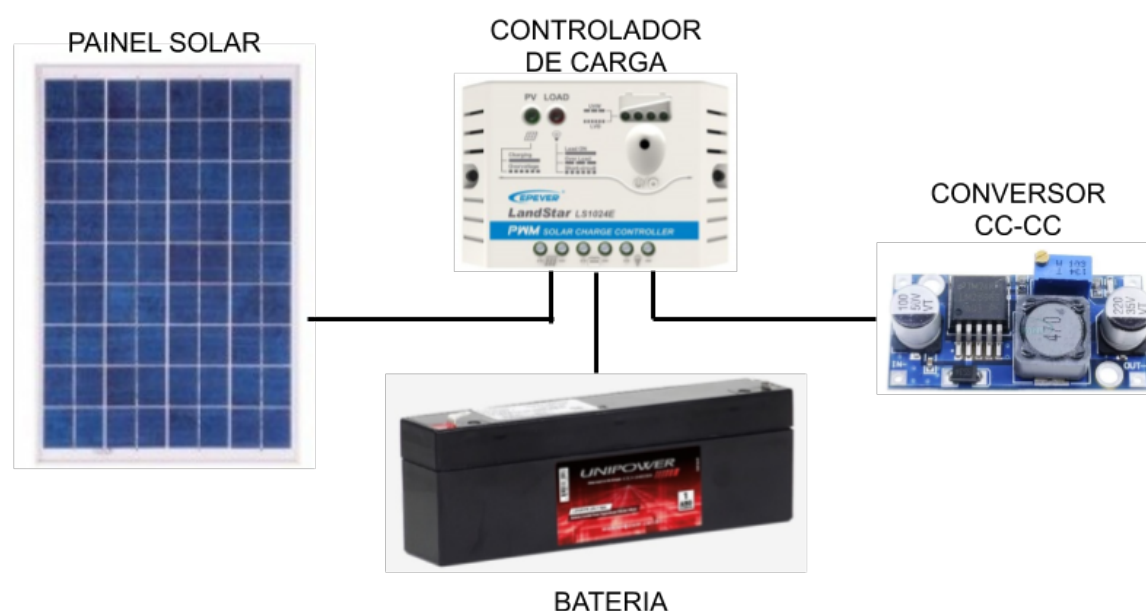
Outra informação importante para a definição do painel é a escolha da tensão em corrente contínua (V_{CC}) que alimentará o sistema. De forma geral, é recomendado que a tensão de funcionamento do sistema aumente com o aumento de carga diária consumida. [LUQUE A.;HEGEDUS 2003] Para cargas pequenas (até 1 kWh diários) pode utilizar-se $V_{CC} = 12 V$. Para cargas intermédias (3 a 4 kWh por dia), recomenda-se 24V e para cargas diárias maiores que 4 kWh diários deve-se utilizar $V_{CC} = 48 V$. Esta escolha leva a uma diminuição de perdas por efeito Joule nos fios de alimentação do sistema. No

caso do módulo colmeia a tensão mínima deve ser tal que permita uma regulação da tensão entre 1,8 V a 5,5 V. já para a Raspberry é necessária uma tensão de 5V. [Raspbian 2017]

2.4 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação dos módulos do sistema RFabelhas é composto pelo painel solar, ligado a um controlador de carga, a bateria e uma fonte chaveada que regula a tensão para o nível desejado. O mesmo tipo de sistema de alimentação é usado tanto no módulo colmeia como no gateway.

Figura 4 – Diagrama do Sistema de alimentação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Baterias

A bateria é um dispositivo que transforma em corrente elétrica a energia desenvolvida numa reação química. Cada célula de uma bateria contém um terminal positivo (cátodo) e um terminal negativo (ânodo). O processo químico de troca de elétrons é conhecido como oxirredução. Os tipos de metais usados no cátodo e no ânodo em conjunto com a quantidade de células de carga na bateria são os fatores que definem sua tensão de operação e sua capacidade de armazenamento, medida em Amperes-hora (Ah). A Tabela 2 mostra algumas tecnologias utilizadas em baterias, com algumas de suas características. [Cresesb 2014]

O dimensionamento da bateria é feito a partir da carga média do sistema e a quantidade de tempo que esta carga deve ser alimentada pela bateria. Portanto, a bateria deve ter uma capacidade de armazenamento, em Amperes-hora (Ah), suficiente para manter o sistema alimentado com sua corrente média durante os dias de autonomia pretendidos. Além do consumo do sistema, devem ser consideradas as perdas de energia no sistema de alimentação. Na escolha da bateria também deve ser levado em conta o valor de descarga mensal, que pode variar entre 20% e 5%, e também o seu ciclo de vida. No caso do sistema foco deste trabalho, esse parâmetro é muito importante, pois é necessário que a bateria seja capaz sofrer muitas carregas e descarregas sem a necessidade da sua substituição. [LUQUE A.;HEGEDUS 2003]

Dentre as opções comercialmente disponíveis e que atendem bem as especificações do sistema Rfabelhas e de aplicações *off-grid* de energia solar, estão as baterias seladas de chumbo-ácido. Elas tem uma capacidade entre 0,5 e 72 Ah e tem seu ponto ótimo de funcionamento ótimo em carga completa (flutuação). Outros aspectos importantes dessas baterias são: não têm o chamado "efeito memória"; tem alta retenção de carga (não descarregam fora de uso); e devem ter preferencialmente ciclos curtos de carga, ou seja, devem ser recarregadas quando menos de 80% de sua capacidade de carga foi utilizada. [Cresesb 2014]

Controlador de carga

No sistema de alimentação o controlador de carga tem como principal objetivo a proteção das baterias contra eventuais sobrecargas e descargas excessivas. Ele também controla se a energia do painel deve ser fornecida para a bateria ou para a carga. No seu dimensionamento é necessário levar em conta a corrente de entrada que ele irá suportar e a velocidade com que a tensão da bateria decrescerá, essa tensão é o valor que limita o funcionamento do equipamento. Outro fator importante a considerar é a sua tensão de operação, que deve ser próxima à gerada pelo painel fotovoltaico. [Epsolar 2015]

No mercado a venda, existem basicamente dois tipos básico de controladores de carga: os baseados em *Pulse Width Modulation* (PWM) e *Maximum Power Point*

Tabela 2 – Tipos de baterias

Tipo de Bateria	Tensão de operação	Tensão descarregada	Capacidade	Custo
Chumbo-ácido 12 V	12,8 V	10,4 V	3 a 10 Ah	R\$ 50 a R\$90
Chumbo-ácido 6 V	6,4 V	5,2 V	3 a 6 Ah	R\$30 a R\$50
Íon-lítio	3 V	2 V	1 a 2 Ah	R\$10 a R\$20
Níquel-cádmio	13 V	10 V	5 a 20 Ah	R\$80 a R\$200

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tracking (MPPT). De modo simplificado, os primeiros estabelecem um teto de tensão que necessariamente é o mesmo da bateria, e mantém a corrente sempre no mesmo valor. Por outro lado, os que usam o algoritmo MPPT, ao cortarem a tensão para a limite aceita pela bateria, elevam a corrente aumentando dessa forma a potência transferida para a bateria. A eficiência de transferência pode 20 a 25% maior nos controladores MPPT que nos controladores PWM, mas eles também tem um custo e tamanho maior e são projetados para sistema de maior capacidade. Assim ao fazer um *trade-off*, entre custo e desempenho do sistema de alimentação completo, eles acabam perdendo para os PWM em sistemas pequenos como é o caso dos módulos do sistema RFabelhas.

Conversor CC-CC e fonte chaveada

Como a tensão de alimentação dos módulos, processadores, sensores normalmente é menor que a tensão da bateria, é necessário utilizar um conversor CC-CC para reduzir a tensão de alimentação para o nível especificado pelos fabricantes desses módulos, circuitos integrados, ou do projeto eletrônico realizado. No caso desse projeto a tensão de alimentação desejada é de 5 V (podendo ser reduzida abaixo até 3,8 V no caso do módulo colmeia). Os tipos de conversor mais comuns são: fonte linear que regula a tensão de saída dissipando na forma de calor a diferença de tensão; ou do tipo fonte chaveada. [LUQUE A.;HEGEDUS 2003] Uma vez que é usada um desses conversores, haverá perdas no processo regulação da tensão, as quais dependem do tipo de conversor e também das correntes supridas pelo conversor.

Dependendo da escolha da tensão da bateria e da especificação dos circuitos utilizados, é possível conectar diretamente o controlador de carga ao módulo, evitando-se as perdas do processo de regulação linear ou chaveado. Essa escolha não foi possível pois no mercado, apesar de existirem baterias chumbo-acidas de 4 V e 6 V, não tem disponível controladores de carga para essas baterias, as quais normalmente são usadas em sistemas como alarmes, lampadas de emergência, sendo carregadas a partir da rede comercial de energia. [Cresesb 2014]

2.5 Interfaces utilizadas

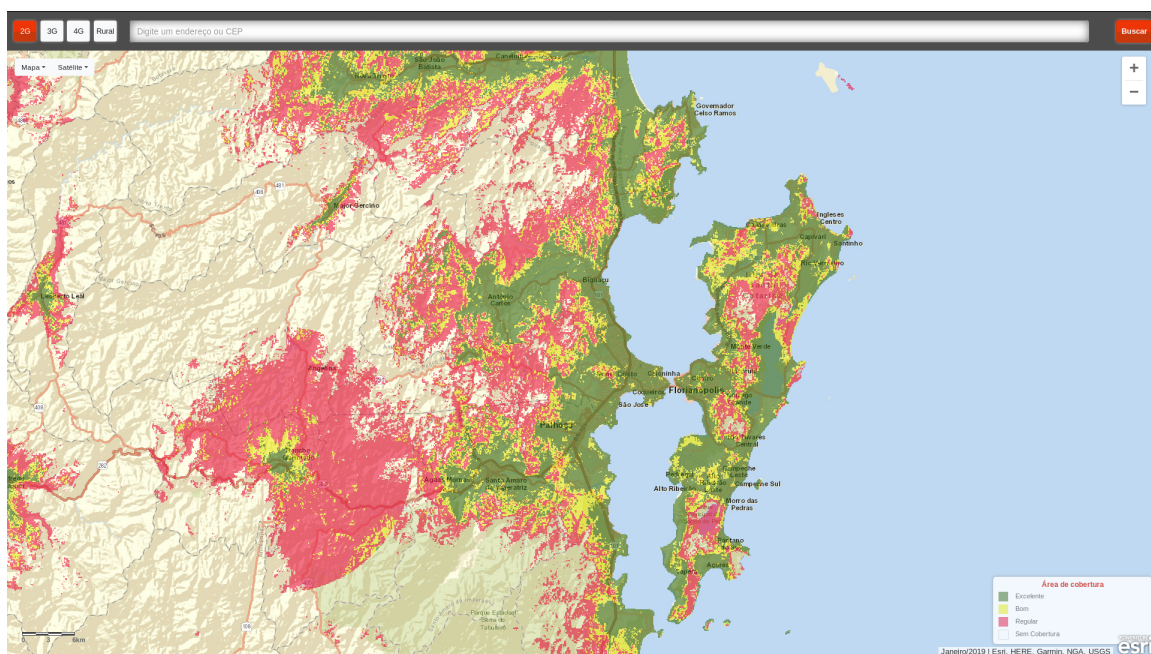
Para a comunicação entre os módulos e dos dispositivos que compõem, foi necessária a utilização de diferentes interfaces, as quais estão descritas nas subseções seguintes.

Serviços Gerais de Pacote por Rádio - GPRS

O *General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio (GPRS) é uma tecnologia de comutação de pacotes baseada na rede celular *Global Service Messaging* ou Serviço global de mensagens (GSM). Ela permite a conexão baseada no protocolo

IP para diversas aplicações empresariais e comerciais, sendo os dados transformados em pacotes e transmitidos através do rádio e núcleo da rede GSM. Uma vantagem dessa tecnologia são as conexões instantâneas nas quais as informações podem ser transmitidas e recebidas imediatamente desde que haja cobertura de rádio. O GPRS pode oferecer taxas de dados de até 171,2 kbps. Para o uso dessa rede é necessário utilizar um telefone ou modem e ter uma assinatura em um operador celular que disponibilize essa rede. (<http://www.telecomspace.com/datatech-gprs.html>) Uma grande vantagem da rede 2G é a maior cobertura das operadoras em relação às tecnologias mais novas como (3G, 4G e 5G), conforme pode ser visto nos mapas de cobertura das operadoras Claro (ver [Figura 5](#) e [Figura 6](#)) e da operadora TIM (ver [Figura 7](#)).

Figura 5 – Cobertura da rede Claro em 2G na região da grande Florianópolis



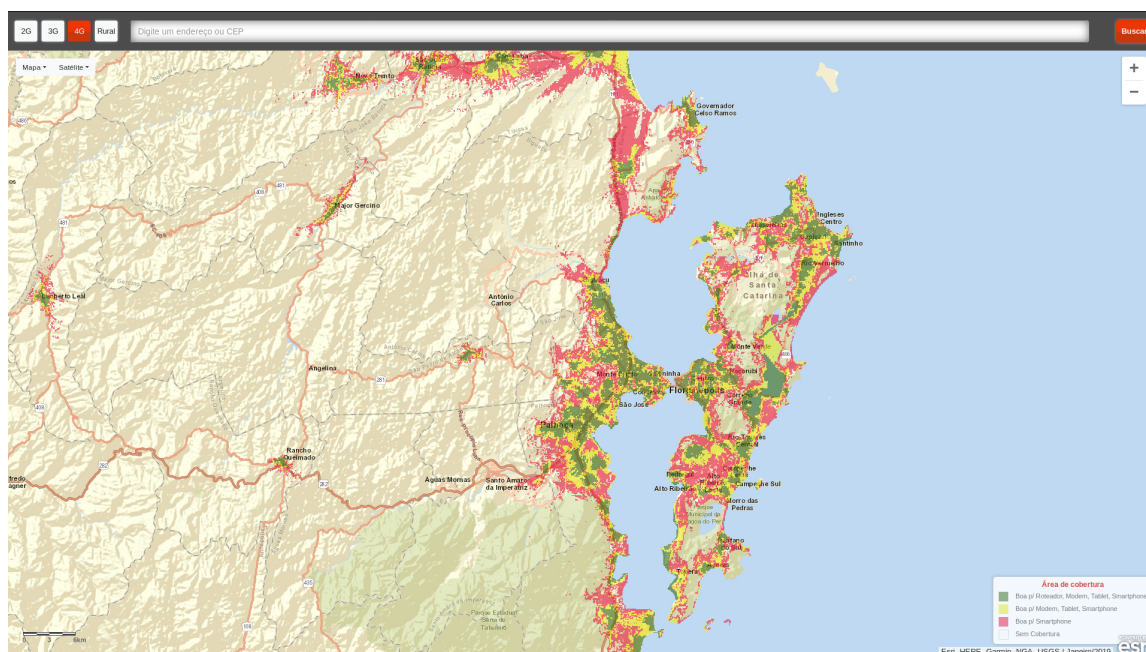
Fonte: <https://cobertura.claro.com.br> (dados de 2019).

Modulação LoRa

O **LoRa** é uma tecnologia proprietária criada em 2010, que permite uma comunicação em longas distâncias com baixo consumo de energia. A modulação LoRa é baseada na tecnologia CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse) Spread-Spectrum (CSS), que lida bem com os ruídos de canal, atenuações de multi percursos, efeito Doppler e baixa potência do sinal.

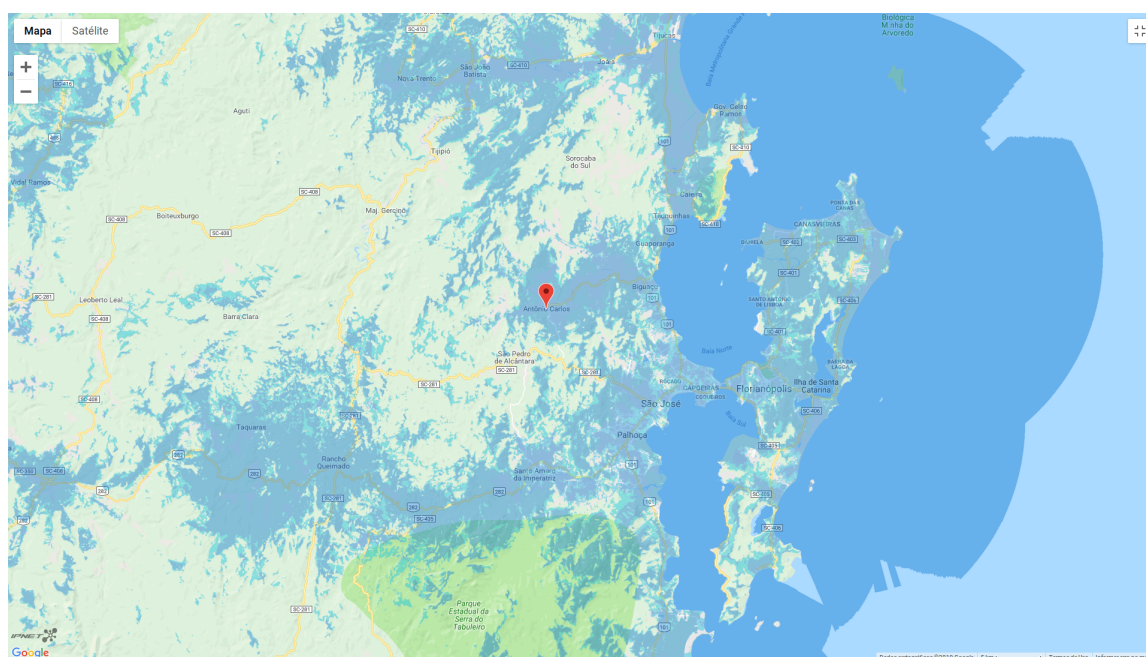
A taxa de dados a ser transmitidos depende da largura de banda (125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz) a ser utilizada e do fator de espalhamento. O uso combinado do fator de espalhamento e a largura de banda permitem controlar a taxa de dados e o tempo no ar, o que implica diretamente no tempo em que o rádio está consumindo a potência

Figura 6 – Cobertura da rede Claro em 4G na região da grande Florianópolis



Fonte: <https://cobertura.claro.com.br> (dados de 2019).

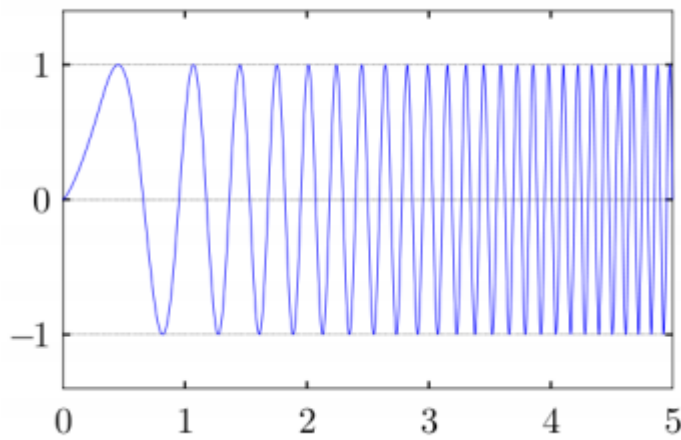
Figura 7 – Cobertura da rede Tim em 2G na região da grande Florianópolis



Fonte: <https://tim-geoportal.geoportal3d.com.br/porta1/index.html> (dados de 2019).

de transmissão. Quando a largura de banda é dobrada (de 125 kHz para 250 kHz), é possível transmitir o dobro de dados no mesmo tempo. Por outro lado, mudando o fator de espalhamento de 1 passo (de SF10 para SF9) também permite dobrar o número de bits transmitidos por tempo. No entanto, essa redução do fator de espalhamento dificulta a recepção da transmissão pelo gateway, pois aumenta a sensibilidade ao ruído. [LoRaWAN

Figura 8 – Transmissão LoRa



Fonte: TTN.org.

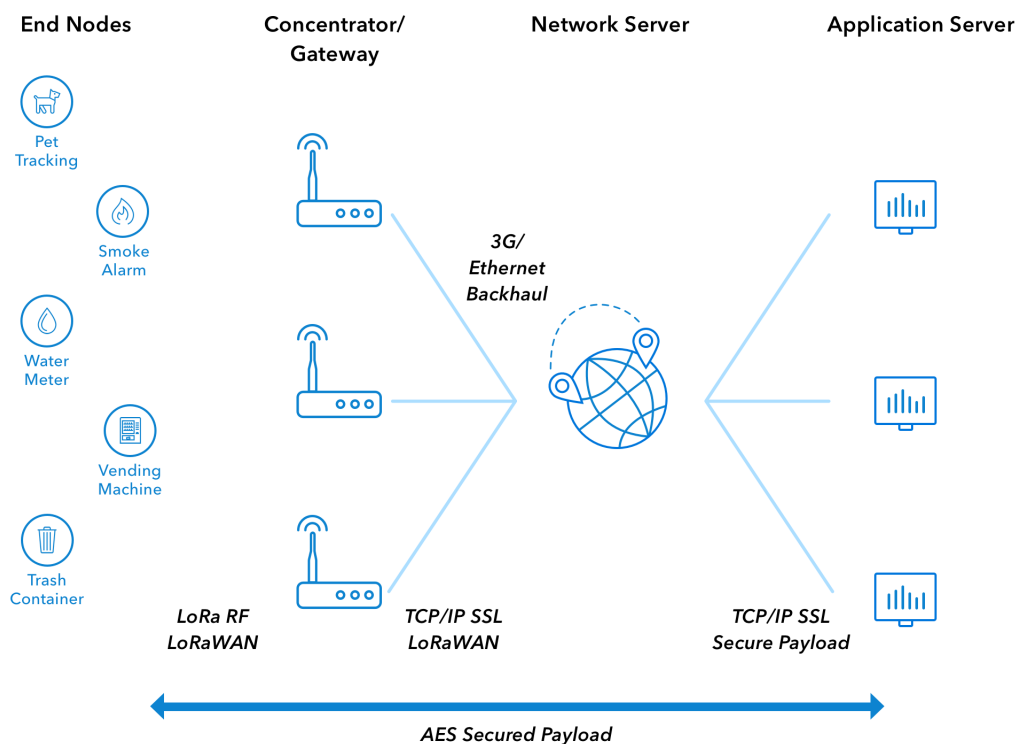
2019] Algumas das características que se destacam no [LoRa](#) são o longo alcance (5 a 15 km), o baixo consumo de potência e a baixa largura de banda de transmissão (51 bytes/mensagem), sendo usualmente implementado em conjunto com a [TTN](#), que permite um fácil acesso a informação e a segurança de transmissão, por ser criptografado.

Em relação ao consumo de potência, é possível controlá-lo variando os seguintes parâmetros: 1) potência de transmissão, 2) largura de banda e 3) fator de espalhamento. Reduzindo a potência de transmissão, reduz-se o consumo, mas também o alcance do sinal. No caso da aplicação no monitoramento de colmeias, o ideal é estabelecer a potência de acordo com a distância entre estas e o módulo *gateway* [[LoRaWAN 2019](#)].

As frequências a serem utilizadas em cada região do mundo é regulado pelo *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector* ([ITU-T](#)) através de um plano de uso de frequências. No Brasil a Agência Nacional de Telecomunicações ([ANATEL](#)) estabeleceu que “EQUIPAMENTOS UTILIZANDO TECNOLOGIA DE ESPALHAMENTO ESPECTRAL OU OUTRAS TECNOLOGIAS DE MODULAÇÃO DIGITAL [...] NAS FAIXAS 902-907,5 MHz, 915-928 MHz, 2.400-2.483,5 MHz E 5.725-5.850 MHz [...]” [[Anatel 2019](#)]. Assim a frequência a ser utilizada no Brasil deve estar em uma destas faixas, podendo utilizar a faixa entre 902-907,5 MHz e 915-928 MHz. A [LoRaWAN](#) é um protocolo *Medium Access Control* ([MAC](#)) com especificação aberta padronizado para *Low Power Wide Area Network* ([LPWAN](#))s, que implementa os detalhes de funcionamento da rede [LoRa](#). Ele estabelece as normas na qual os dispositivos irão acessar as redes sem fio, tais como segurança fim-a-fim, adaptação de taxa de dados, qualidade de serviço e ajustes de potência, visando aumentar a duração da bateria dos dispositivos.

O [LoRaWAN](#) é formado por três tipos de dispositivos: Os dispositivos finais, que são sensores/atuadores normalmente operados por baterias conectados através da interface

Figura 9 – Arquitetura LoRaWAN



Fonte: www.thethingsnetwork.org.

de rádio **LoRa** a um ou mais **gateways** que são o segundo tipo de dispositivos. Esses, por sua vez, são concentradores que fazem a ponte entre os dispositivos finais e o servidor de rede, que é o terceiro dispositivo da **LoRaWAN**, responsável por controlar toda a rede. Assim o LoRa

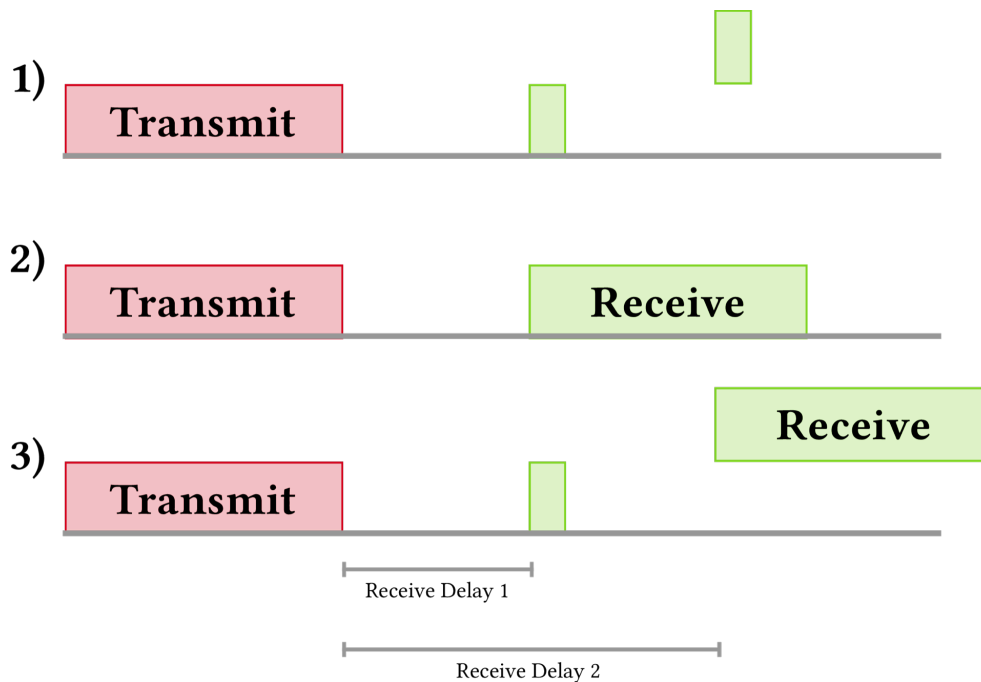
Adicionalmente deve-se considerar uma regra de uso *TTN Fair Access Policy*², segundo a qual a transmissão dos dados dos dispositivos finais (*nodes*) deve ser em média no máximo de 30 segundos de tempo de *uplink* por dia. Além disso cada dispositivo deve respeitar o máximo de 10 mensagens de *downlink* por dia. Assim, normalmente se tem como objetivo transmitir um *payload* menor que 12 bytes em intervalos de alguns minutos.

A especificação do LoRaWAN define ainda três tipos de dispositivos, onde todos tem que minimamente se enquadrar na Classe A, cujas extensões são as classes B e C. A classe A estabelece que os dispositivos tem que ser capazes de comunicação bidirecional entre o dispositivo e o **gateway** sendo que o *uplink* pode ser enviado a qualquer momento, já a comunicação inversa de recepção no dispositivo pode ocorrer em duas janelas de recepção 1s e 2s após o envio da transmissão *uplink*. Caso o servidor não responda a nenhuma dessas janelas de recepção a próxima oportunidade será somente após a próxima transmissão

² <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/limitations-data-rate-packet-size-30-seconds-uplink-and-10-messages-downlink-per-day-fair-access-policy/1300>

do dispositivo. Os de classe B estendem a classe A ao adicionar janelas agendadas de recebimento onde o dispositivo abre janelas de recepção periodicamente. Já os de classe C estendem a classe A ao se manterem disponíveis à recepção em todo o tempo que não estiverem transmitindo. Para o escopo deste trabalho serão utilizados dispositivos de classe A. Detalhes da camada LoRaWAN que assegura a transmissão criptografada

Figura 10 – Janelas de recepção dos dispositivos de classe A



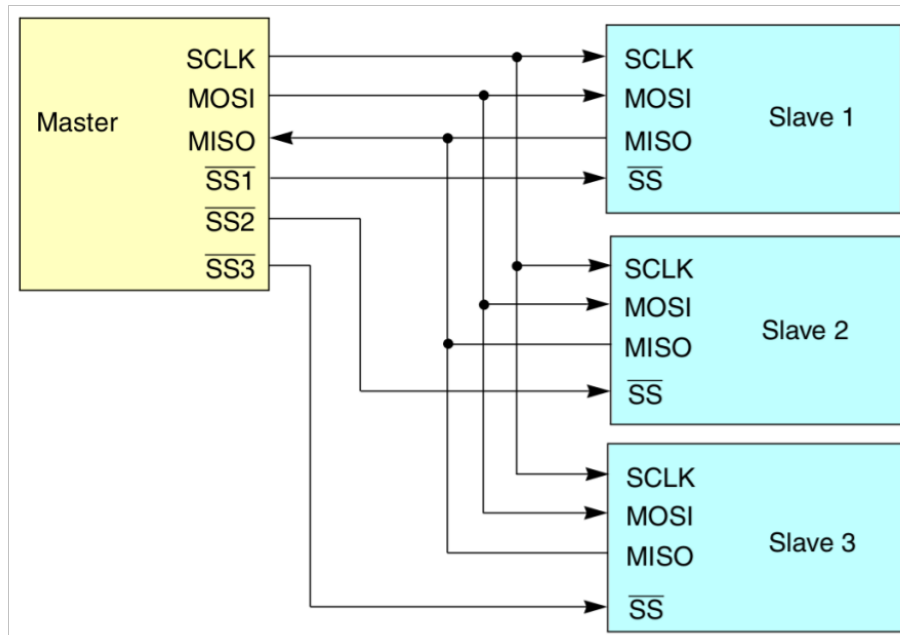
Fonte: [Semiconducto 2019].

entre o node e a aplicação que é executada no servidor de aplicação, cadastramento dos gateways, registro dos nodes e criação das aplicações finais e armazenamento de dados não são descritas pois não interferem no projeto deste sistema, mas podem ser obtidas em detalhes no site da TTN (<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/> LoRaWAN Overview)

Serial Peripheral Interface (SPI)

A interface serial para periféricos SPI é uma interface síncrona que pode ser utilizada tanto na comunicação entre microcontroladores, como entre um ou mais dispositivos periféricos e um microcontrolador [Instruments 2012]. A distância de transmissão dessa interface depende de *clock* a ser usado, capacitância da linha, sendo limitada a poucos metros, no entanto, por ter uma linha para cada direção de comunicações ela é *full-duplex* e possibilita a comunicação em taxas de dados de até 20 Mbps no caso de algumas memórias [ATMEL 2004]. Apesar do amplo uso dessa interface em dispositivos sensores, memórias, conversores analógicos-digitais, a especificação dessa interface não é padronizada, havendo por isso diversas variantes [MCT 2019].

Figura 11 – Interligação de vários escravos a um mestre com interface SPI



Fonte: [Semiconductors 2019].

I²C - Inter-Integrated Circuit (I2C)

A I²C é uma interface também é conhecida como protocolo *Two Wire Interface* ou Interface de Dois Fios (TWI). Ela é uma interface de comunicação serial que utiliza os fios *Serial Data* (SDA) para a comunicação de dados do mestre para o escravo e vice versa e o *Serial Clock* (SCL)³. A existência de uma linha única de comunicação de dados, limita a comunicação a *half-duplex*, de modo que o envio e recepção de dados de um dispositivo não é simultânea. Como todos os dispositivos ficam conectados a um barramento, o endereçamento dos dispositivos é feita através de endereço que é transmitido no barramento pelo mestre (*master*). Cada dispositivo deve ter um endereço único de 7 bits (ou 10 bits) o qual muitas vezes pode ser configurável nos dispositivos sensores através de *jumpers* ou pinos de endereçamento. Nessa interface, a taxa de transmissão de dados pode ser desde 10 kbits/s, no modo de baixa velocidade, e até 5 Mbit/s na versão 6 (Ultra Fast-mode) [Semiconducto 2000]. O alcance de transmissão máximo, para o caso das taxas de transmissão menores, é de até 10 metros e varia de acordo com a capacitância do meio e velocidade de transmissão [Mosaic 2019].

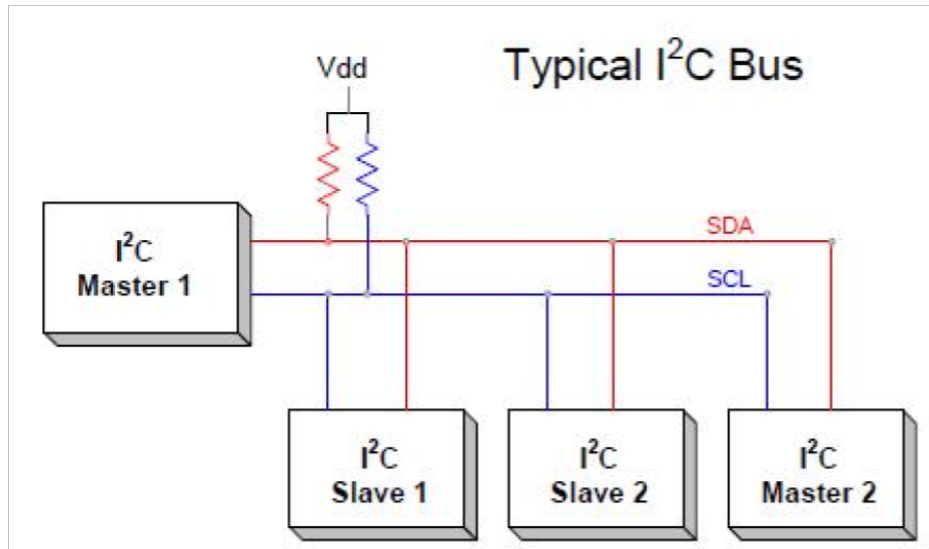
A organização I2C Devices⁴ mantém uma listagem dos dispositivos que utilizam essa interface, facilitando o seu uso. Também existem softwares para uso nas mais diversas plataformas como Arduíno e Raspberry Pi (Raspi), que permitem detectar os endereços

³ <https://www.i2c-bus.org/i2c-interface>

⁴ <https://i2cdevices.org/addresses>

dos dispositivos escravos conectados ao barramento. Exemplos são o "I2C scanner"⁵ para Arduino e "I2C detect"⁶ para a Raspi.

Figura 12 – Barramento típico de uma interface I2C



Fonte: [Cypress 2019].

⁵ <https://playground.Arduino.cc/Main/I2cScanner>

⁶ <https://learn.adafruit.com/adafruit-16-channel-servo-driver-with-raspberry-pi/configuring-your-pi-for-i2c>

3 Desenvolvimento

Ao iniciar este trabalho, uma boa parte dos módulos *colmeia* e *gateway* já estavam com um protótipo inicial montado e funcionando. Para o desenvolvimento desse protótipo utilizou-se além dos itens adquiridos com verba de capital do projeto IFSC-FAPESC, alguns itens cedidos através de parceria pela [EPAGRI](#) tais como: painéis solares; controladores de carga; baterias; caixas ambientais e caixa de colmeia (sobre-caixa, teto e proteção para chuva).

A instalação dos equipamentos e dos sensores havia sido realizada colocando os sensores de peso (50 kg célula de carga) nos quatro cantos do fundo da caixa da colmeia. Os sensores de umidade e temperatura foram adaptados de forma que não afetassem o comportamento das abelhas nem o processo dos apicultores, sendo os sensores internos instalados no centro da caixa do ninho e o sensor externo sob a caixa da colmeia. O sensor de luminosidade foi instalado ao lado da caixa da colmeia. Os demais circuitos como o microprocessador, controlador de carga, placa de conexões e bateria foram instalados dentro de uma caixa ambiental para proteger contra intempéries e a ser fixada no pedestal que suporta a caixa da colmeia.

3.1 Especificações do sistema

O projeto *RFabelhas* surgiu a partir de uma necessidade da [EPAGRI](#) e dos apicultores de Santa Catarina em monitorar suas colmeias, de modo a ampliar sua produção e ter uma forma mais adequada de avaliar a saúde das abelhas. Para isso, seria importante fazer medições a cada 5 minutos. Apesar disso, a [EPAGRI](#) solicitou que essas medições fossem disponibilizadas a cada hora em seu banco de dados. Com esses requisitos foram definidas as seguintes especificações para o projeto:

- Funcionar *off-grid* isolado da rede elétrica;
- Ser portátil para ser transportado e continuar funcionando perfeitamente desde que o *gateway* tenha acesso a rede [GPRS](#);
- Ser capaz de transmitir dados para a [TTN](#) a cada hora, preferencialmente a cada 5 minutos;
- Ser capaz de alertar possíveis falhas de modo que o apicultor possa intervir;

- O custo deve ser baixo para que os apicultores possam adquirí-lo. O último sistema de monitoramento contratado pela [EPAGRI](#) tem um custo de R\$30.000, portanto existe uma espaço de custo a ser trabalhado.

3.2 Escolhas das tecnologias

Para o atendimento das especificações foram necessárias algumas escolhas prévias, anteriores ao início do presente trabalho, como:

- O fornecimento de energia para o sistema deve ser a partir da energia solar em conjunto bateria para uma autonomia de no mínimo 5 dias;
- Os sensores a serem utilizados no protótipo inicial são: de peso, de temperatura e umidade relativa (interna da colmeia de abelhas e externa) e de luminosidade;
- A escolha do microcontrolador Arduíno MEGA 2560 para o módulo colmeia e Raspberry Pi Model 3B para o módulo gateway.

Microcontrolador

Após os dados serem medidos, estes serão enviados para um microcontrolador, sendo a opção de microcontrolador adotada para esta primeira etapa do projeto um Arduíno Mega 2560, mas outras opções também serão estudados em trabalhos futuros. Neste projeto existem algumas especificações importantes para essa escolha, sendo estas: um baixo consumo de energia tanto em modo *idle* como modo normal de processamento; capacidade suficiente de memória e processamento para: aquisição de dados dos sensores; execução dos algoritmos de tratamento de dados; encapsulamento de informações; envio dos pacotes por [LoRa](#); capacidade de portas e interfaces requeridas pelos sensores previstos; e capacidade de controlar o módulo transmissor [LoRa](#).

Dentre outras opções que poderiam ser consideradas, destacam-se outras versões do Arduíno como o Zero, o Leonardo, o Nano e o Due, além de outros microcontroladores como os da família PIC. A [Figura 13](#) resume as características de alguns desses microprocessadores.

3.3 Implementação das modificações nos módulos

Inicialmente, foi realizado um estudo do consumo energético de cada elemento do sistema em seus diferentes modos de operações. Assim, foi possível ter uma ideia dos gargalos e dos reais desafios do trabalho.

Figura 13 – Características gerais dos modelos de Arduino

	UNO	MEGA 2560	LEONARDO	DUE	ADK	NANO	PRO MINI	ESPLORA
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2.x) ou ATmega328 (versão 3.x)	ATmega168	ATmega32u4
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14	-
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6	-
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8	-
Memória	32K (0,5K usado pelo bootloader)	256K (8K usado pelo bootloader)	32K (4K usado pelo bootloader)	512K disponível para aplicações	256K (8K usado pelo bootloader)	16K (ATmega168) ou 32K (ATmega328) (bootloader: 2K)	16K (2K usado pelo bootloader)	32K (4K usado pelo bootloader)
Clock	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz	16Mhz	16Mhz	8Mhz (modelo 3.3v) ou 16Mhz (modelo 5v)	16Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial/Módulo USB externo	Micro USB
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Tensão de operação	5V	5V	5V	3.3V	5V	5V	3.3 ou 5V, dependendo do modelo	5V
Corrente máxima portas E/S	40mA	40mA	40mA	130mA	40mA	40mA	40mA	-
Alimentação	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	7-12Vdc	3.35-12V (modelo 3.3v) ou 5-12V (modelo 5v)	5V

Fonte: <https://www.Arduino.cc>.

O protótipo do módulo *colmeia* já estava sendo alimentado pelo sistema solar, enquanto que o módulo *gateway* estava sendo alimentado na rede elétrica pois os picos de corrente e o consumo diário eram muito altos, não suportados pelo sistema de alimentação solar. Toda a parte de transmissão de dados, banco de dados e visualização desses dados *online* já estava funcionando, com os dados da rede *LoRaWAN* sendo devidamente tratados e armazenados em um banco de dados em nuvem. Foi no entanto necessário implementar a comunicação *GPRS* para substituir a comunicação via cabo *ethernet* existente.

Para fazer as medições de corrente e tensão desse sistema inicial foi usada uma fonte de tensão de bancada, uma ponteira de corrente por efeito Hall para medição e uma ponteira de tensão ligados a um osciloscópio, para assim obter as tensões e correntes e a respectiva potência dissipada.

Com o sistema de medição montado, foram medidas as correntes em cada um dos sensores, para depois investigar o consumo do módulo *colmeia* completo. O gargalo inicialmente imaginado que seria a transmissão *LoRa* foi a primeira a ser investigada, verificando que a transmissão *LoRa* durava cerca de 100ms com corrente de pico em torno de 400mA. Essa condição foi considerada bem adequada, pois o sistema realizava uma

transmissão a cada 15 minutos, resultando em um *duty cycle* de atividade de 0.001%. Portanto, a tecnologia LoRa possibilita realmente transmitir a partir dos *end nodes* pequenas quantidades de dados a longas distâncias e com um baixo consumo de energia.

Na medição do consumo módulo *colmeia* completo verificou-se que a corrente na entrada do módulo era de $150mA$ e que com esse consumo uma bateria de $12V@12Ah$ seria capaz de manter alimentado o sistema por 3 dias sem receber energia solar. Assim, percebeu-se claramente que seria necessário encontrar alguma solução para reduzir o consumo de energia desse módulo, desligando funções, portas, LEDs ou periféricos que não sejam essenciais. Realizando alguns ajustes iniciais dos parâmetros, foi possível reduzir o consumo para $55mA$ e para $30mA$ quando o microcontrolador Arduíno era colocado em modo *idle*. Portanto, com essa nova forma de operação, o módulo poderia e uma bateria de $12V@12Ah$ seria capaz de manter alimentado o sistema por 16,6 dias sem receber energia solar.

Para o módulo *gateway* eram esperados resultados muito piores, por se tratar de um sistema mais complexo baseado em um processador *Advanced RISC Machine (ARM)*, com sistema operacional Linux que executava muitas funções. Primeiramente foi investigada a condição inicial existente para em seguida desenvolver métodos para reduzir o consumo de energia no microcontrolador. Como uma Raspberry Pi (*Raspi*) consome no modo normal $480mA$ ¹ concluiu-se que seria necessário adicionar um circuito externo com *RTC* aos módulos *colmeia* e *gateway* para sincronizar seus relógios de modo que os momentos de atividade fossem síncronos. Assim, seria possível desligar o *gateway* quando não estivesse esperando transmissões das *colmeias* e reduzir significativamente o consumo da Raspberry Pi (*Raspi*)² que é de $480mA$ no modo normal, de $200mA$ no modo *idle* e entre de $20a30mA$ no modo *power down*. No entanto, por ter um sistema operacional, o tempo de inicialização mais o tempo de atividade superava os 5 minutos, de modo que esses modos somente poderiam ser utilizados se o intervalo entre as fosse de 15 minutos.

3.4 Hardware adicional utilizado

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário o acréscimo de diferentes módulos e componentes ao sistema. Os módulos implementados nas placas expansão para Arduíno e Raspberry Pi (*Raspi*) foram preparados para a execução de tarefas específicas, e sua escolha foi influenciada pelos fatores: consumo energético, custo, confiabilidade e adequação a função proposta. Segue abaixo uma breve descrição dos módulos utilizados.

¹ <https://www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption>

² <https://www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption>

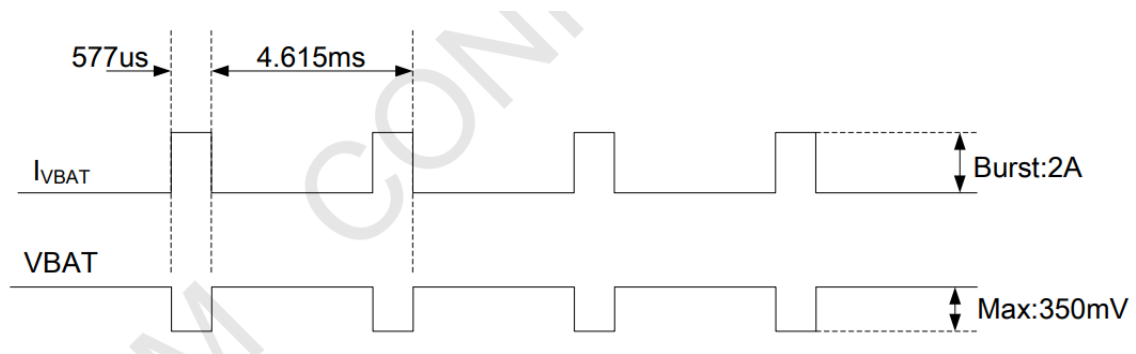
GPRS SIM800L

O módulo GPRS³ dispõe de um chip SIM800L, que é uma solução completa *Quad-band* GSM/GPRS nas frequências 850/900/1800/1900 MHz, podendo transmitir voz, *Short Message Service* (SMS) e dados com baixo consumo de potência. O seu tamanho reduzido $17,6 \times 15,7 \times 2,3$ mm permite a realização facilitada e compactas de aplicações embarcadas. O GPRS é de classe 12, suportando até 85,6 kbps no *downlink* e *uplink*. [Simcom 2012]

A alimentação do chip SIM800L é por tensão na faixa de 3,4 a 4,4 V, mas o módulo funciona com tensão de 5 V e sua interface serial *Universal Serial Bus* (USB) é compatível com microcontroladores de 3,3 e 5 V, simplificando a conexão com placas como Arduino e Raspberry Pi. [FilipeFlop 2012] O controle do modem é feito através de um extenso conjunto de comandos AT para configuração de rede GPRS, envio e recebimento de SMS, chamadas de voz e comunicação de dados através de protocolo *Transmission Control Protocol* (TCP)/*Internet Protocol* (IP) e *Point-to-Point Protocol* ou protocolo ponto-a-ponto (PPP) [Simcom 2012]. O fabricante do chip disponibiliza uma extensa documentação em seu site, tornando seu uso e configuração bastante facilitada [SimCom 2016]

Em relação ao consumo de potência de um módulo, alguns detalhes são importantes para este projeto. Como o módulo possui vários modos de operação, listamos as principais características de consumo de corrente (para $V_{bat} = 3,8$ V). A corrente média do módulo é de $50 \mu A$ em modo *power down*, entre 1 e 2 mA em modo *sleep*, e 18,7 mA em modo *idle*. No modo de transmissão de dados GPRS a corrente média depende da banda utilizada, sendo as correntes médias para as bandas as seguintes: 1) GSM850 - 453,57 mA, 2) EGSM900 - 344,74 mA, 3) DCS1800 - 216,20 mA e 4) PCS1900 - 274,04 mA. Durante a rajada de transmissão de dados, a corrente de pico pode chegar a 2 A. [SimCom 2016]

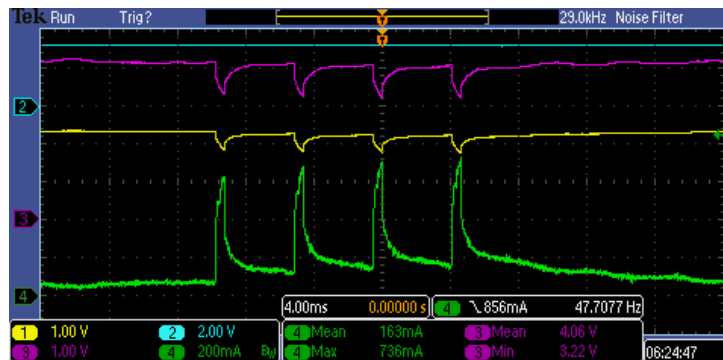
Figura 14 – Pico de corrente e queda de tensão durante as rajadas de transmissão (especificação)



Fonte: [SimCom 2016].

³ utilizado no módulo gateway

Figura 15 – Pico de corrente e queda de tensão durante as rajadas de transmissão (medição no módulo GPRS)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando que o sistema *RFabelhas* será utilizado inicialmente por apicultores do estado de Santa Catarina, é importante considerar que o consumo de potência durante as transmissões dos dados irá variar de acordo com a operadora a ser utilizada. As bandas utilizadas pelas operadoras são: Tim (DCS1800), Claro (EGSM900) e Vivo (GSM850)⁴. Os dados experimentais mostraram que a operadora TIM resultou em picos de corrente menores, sendo menos exigente para a fonte de alimentação. A [Figura 16](#) mostra uma sequência de transmissão de dados com as operadoras Tim e Vivo. Nestas figuras é possível notar a diferença nos picos de corrente (sinal verde).

Gateway LoRa da RisingHF

O módulo RHF0M301⁵ é construído com o *chip* SX1301 da Semtech, e se constitui em um *Gateway* LoRa/LoRaWAN de alto desempenho⁶. Possui 10 canais de radio frequência sendo 8 de múltiplo espalhamento espectral (Multi-SF), um canal padrão LoRa e um canal FSK. Dispõe de opções de banda de frequência ISM 434 MHz, 470 MHz, 780 MHz, 868 MHz e 915 MHz, sendo a última autorizada no Brasil pela ANATEL. O *Gateway* é controlado pelo hardware de uma Raspberry Pi Model 3B, e executa o software de `packet_forward`⁷ desenvolvido pela Semtech [[Semtech 2017](#)].

RF LoRa Module RFM95PW

O módulo RFM95PW⁸ é um *transceiver* de RF baseado no técnica de modulação LoRa, podendo operar nas frequências da banda ISM de 868 MHz e 915 MHz. Ele possui uma sensibilidade de recepção de até -136 dBm, e possui um amplificador que permite

⁴ Esse dado pode ser obtido após o registro do *SIM card* usando o comando `AT+COPS=?` em um terminal `minicom`

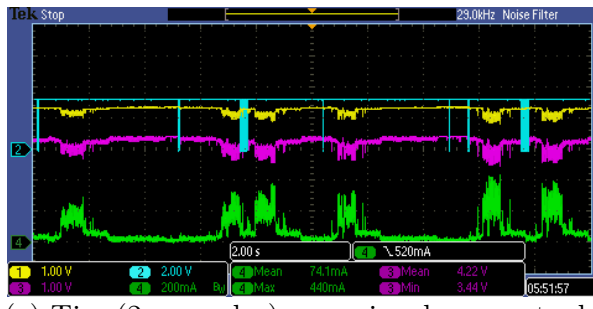
⁵ utilizado no módulo `gateway`

⁶ http://www.risinghf.com/#/product-details?product_id=6&lang=en

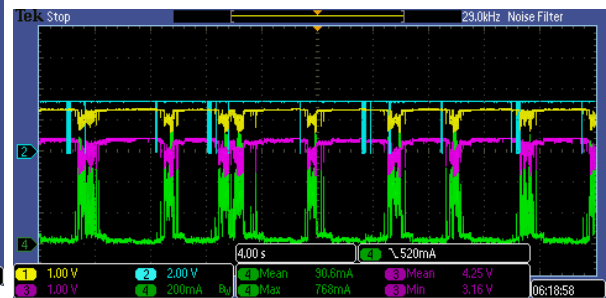
⁷ disponível em https://github.com/Lora-net/packet_forwarder

⁸ utilizado no módulo `colmeia`

Figura 16 – Rajada de transmissão de dados por GPRS com diferentes operadoras



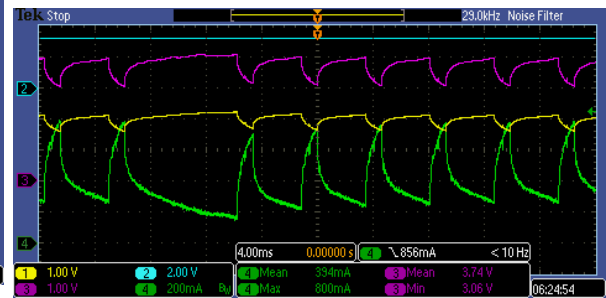
(a) Tim (2 segundos) com pico de corrente de 440 mA e média de 74,1 mA



(b) Tim - detalhe do sinal



(c) Vivo (40 segundos) com pico de corrente de 768 mA e média de 90,6 mA

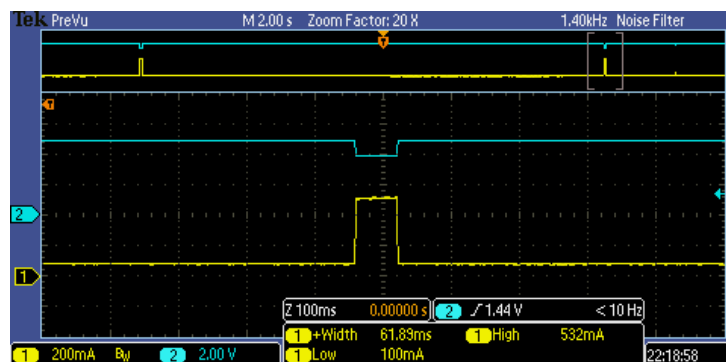


(d) Vivo - detalhe do sinal

Fonte: Elaborada pelo autor.

transmitir sinais de até +27 dBm, o que amplia a alcance desse rádio para até 12 km. A taxa de dados pode chegar a 300 kbps. O módulo também pode utilizar complementarmente as modulações *Frequency-Shift Keying (FSK)*, *Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK)*, *Minimum-Shift Keying (MSK)*, *Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)* e *On-Off Keying (OOK)* [HopeRF 2015]. Uma grande vantagem deste módulo de rádio é a baixa corrente (13 mA) na recepção de sinais. No entanto durante a transmissão, a corrente pode atingir 532 mA, conforme mostra a medição realizada na Figura 17.

Figura 17 – Consumo de corrente na colmeia durante o pulso de transmissão LoRa



(a) Cenário de teste com módulo colmeia sem otimização de potência, alimentado por fonte de 5 V.

(b) As correntes da entrada do módulo: corrente no modo normal de 100 mA e durante o pulso de transmissão de 532 mA. A duração do pulso é de 61,89 ms.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ethernet Shield W5100

O módulo `Ethernet Shield W5100`⁹ utiliza o *chip* `Wiznet W5100` [WizNet 2008] (*datasheet*) para possibilitar a conexão de módulos da família `Arduíno` a rede internet utilizando tanto o protocolo `TCP` como o *User Datagram Protocol* (`UDP`). A utilização desse módulo na plataforma `Arduíno` é facilitada pelo uso da biblioteca `Modified Arduíno Ethernet Library`, a qual suporta os controladores de `Ethernet Wiznet W5100, W200, e W500` [WizNet 2008]. Para comunicação com o `Arduíno` é utilizado o barramento `SPI`.

Módulo sensor de temperatura e umidade relativa

Está sendo utilizado o sensor de umidade e temperatura `AM2302 DHT22`.¹⁰ Este sensor tem uma resolução de 0,1% e acurácia (exatidão) de $\pm 2\%$ no sensor de umidade relativa e resolução de 0,1% e acurácia (exatidão) de $\pm 0,5\%$ no sensor de temperatura. [Aosong 2008]

Módulo sensor de iluminância

Está sendo utilizado o sensor de luz `BH1750FVI Lux`.¹¹, que permite realizar medições entre 1 e 65.535 lux, possui um conversor `AD` de 16 bits e funciona com tensões entre 3 e 5 V. Este sensor utiliza uma interface `I2C` para a comunicação¹² [Rohm 2010].

Módulo sensor de peso

Para a medição do peso da caixa da colmeia com abelhas estão sendo usadas 4 células de carga de até 50 kg em conjunto com o módulo conversor `HX711`.¹³ As células de carga estão ligadas em ponte de *Wheatstone*, sendo composta por quatro pares de extensômetros que são posicionados sob a caixa da colmeia. A medida da tensão de desequilíbrio da ponte é amplificada no módulo `HX711` e passa por um *Analog-to-Digital Converter* ou Conversor Analógico-Digital (`ADC`) com resolução de 24 bits, sendo enviada para o `Arduíno` usando uma interface `SPI`. Considerando uma tensão de 5 V foram configurados o uso de extensômetros de $2 \times 1 \text{ k}\Omega$ de modo que temos uma corrente de aproximadamente 2,5 mA sendo dissipada no circuito. Esse sensor de peso tem como função medir o peso da colmeia incluindo a caixa (ninho + sobre-caixa + teto e proteção + sensores internos), que pode chegar até 70 kg e deve ser capaz de registrar variações de 15 g no peso da colmeia. [SEMICONDUCTOR 2008]

⁹ utilizada no sistema `MCO`

¹⁰ utilizado no módulo `colmeia`

¹¹ utilizado no módulo `colmeia`

¹² Foram usados os seguintes pinos: (1) `VDD` - Power (3.3 V-5.5V); (2) `GND` - Ground; (3) `SCL` - Clock line; (4) `SDA` - Serial data, bidirectional port; (5) `ADDR` - Slave address selector

¹³ utilizado no módulo `colmeia`

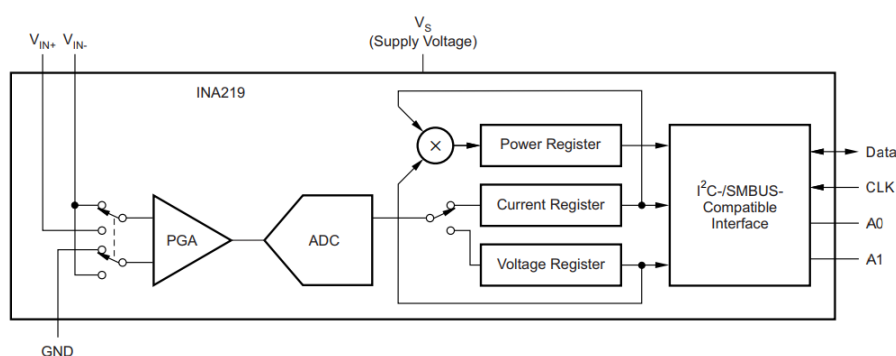
Módulo relógio de tempo real

Para permitir a ativação sincronizada das medições e transmissões, foi utilizado um RTC DS3231.¹⁴ Em sua placa vem embutido um sensor de temperatura e um cristal oscilador para melhorar sua exatidão. Este RTC utiliza uma interface I2C para a comunicação¹⁵.

Módulo sensor de tensão e corrente

Para realizar as medições de tensão e corrente nos módulos *colmeia* e *gateway*, bem como no sistema Monitoramento e Controle Online (MCO), foi utilizado o sensor INA219 da Texas Instrument [Instruments 2015], pela sua facilidade de uso através da interface I2C, que está disponível tanto no Arduíno MEGA 2560 quanto na Raspberry Pi. Além disso, permite medir diretamente tensões de até 26 V, suficientes para a aplicação na qual são usadas baterias de 12 V (tensão máxima de 16,7 V) [UNIPOWER 2015], e os painéis solares que podem chegar a uma tensão máxima de 19,96 V [Sinosola 2012]. Esse sensor possui uma resolução na medição da tensão de barramento de 4 mV e de $10\mu\text{V}$ na tensão *shunt*. Utilizando um *shunt* com resistência de $0,1\omega$ obtém-se numa resolução de $100\mu\text{A}$ na medição de corrente. A precisão para ambas tensões é de $\pm 0,2\%$ e uma *Common-Mode Rejection Ratio* ou Taxa de Rejeição de Modo Comum (CMRR) de 120 dB.

Figura 18 – INA219 configurado para medição de corrente por shunt ($I_{shunt} = V_{Shunt}/R_{Shunt}$) e tensão de barramento (VBUS)



Fonte: [Instruments 2015].

Módulo de relés

Para a variação de parâmetros, uso de diferentes configurações e medições a distância, foi utilizado o módulo de relés SRD-05VDC-SL-C¹⁶ [SRD 2008]. Este módulo possui 8 relés de 5 V conectados em uma placa em que é possível acionar cargas de 220 V

¹⁴ utilizado no módulo *colmeia* e no *gateway*

¹⁵ Foram usados os seguintes pinos: (1) GND - Ground; (2) VDD - Power (3,3 - 5,5 V); (3) SDA - Serial data, bidirectional port; (4) SCL - Clock line

¹⁶ utilizado o Monitoramento e Controle Online (MCO)

em Corrente Alternada (CA), tais como lâmpadas, equipamentos eletrônicos e motores, usando um microcontrolador Arduíno para controle remoto dos mesmos.

Circuito de *wake-up*

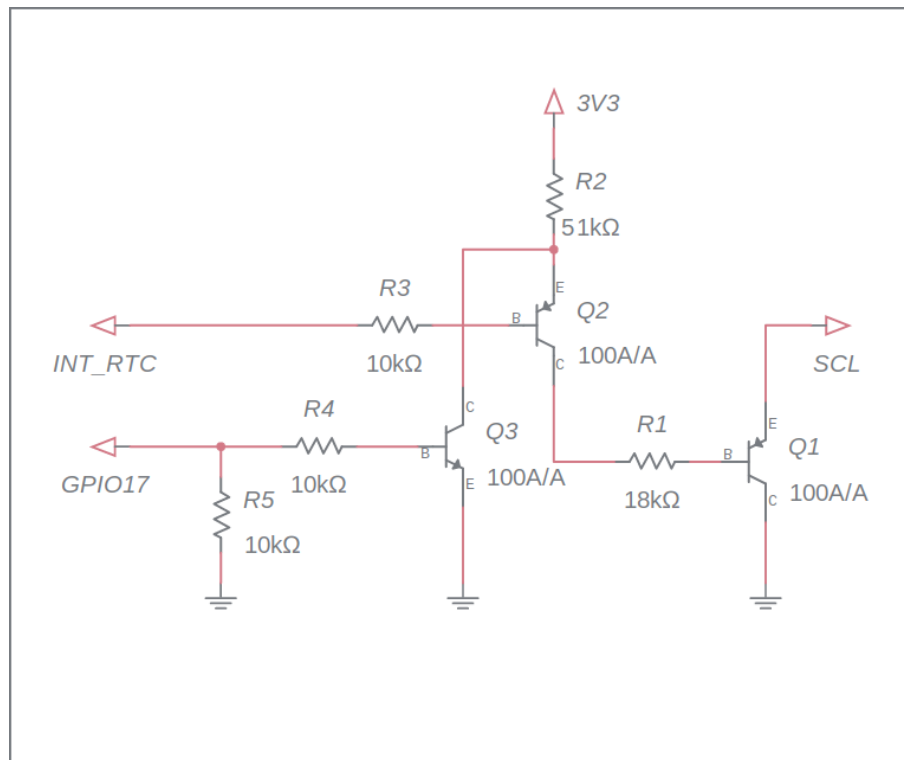
Segundo o manual da Raspberry Pi Model 3B (Raspi), as opções disponíveis para ligar uma Raspi que está no modo *power down* são via sinais externos, podendo ser através do pino de *reset*, que realiza o *reset* da Raspi, ou através do pino 5 (GPIO¹⁷ 03) que permite o religamento via uma interrupção. Após alguns testes, decidiu-se utilizar a interrupção para o religamento da Raspi. Como este pino também tem a função SCL da interface I2C, que é utilizada para a programação do módulo RTC, tanto para o seu relógio interno como dos alarmes usados para realizar o *wake-up* do processador, foi necessário desenvolver um circuito externo para permitir esse religamento.¹⁸ O circuito de *wake-up* atua enviando um nível lógico baixo no pino SCL quando a Raspi está no modo *power down*, porém é necessário que o circuito fique em alta impedância durante o funcionamento normal da Raspi. Assim, foi utilizado um transistor em coletor aberto (Q1), o qual passa para o nível lógico baixo apenas se o transistor Q3 está aberto (GPIO 20), em alta impedância ou nível lógico baixo) e o pino INT_RTC é acionado para baixo, saturando o transistor Q2 e o transistor Q1. O correto funcionamento do circuito depende de configurar o Raspi para deixar a GPIO 20 em alta impedância quando está no modo *power off*, e alterar esse nível para alto assim que é realizado o *boot*, caso contrário não é possível utilizar a interface I2C para acessar o RTC.

3.5 Implementação do controle na Raspberry Pi

Para o desenvolvimento do sistema de controle de ligamento (*wake-up*) e desligamento (*power down*) do processador Raspi, foi necessário utilizar *timers* e *services* do `systemctl` [ArchLinux 2019]. O código desses serviços foi escrito em Python, usando bibliotecas de acesso aos módulos RTC, INA219 e GPRS, sendo esse código acrescentado ao *gateway* da Semtech que já estava previamente em funcionamento contínuo utilizando a conexão *ethernet* para a comunicação com o servidor LoRaWAN (TTN) executado na nuvem. A conexão da Raspberry Pi era cabeada e alimentada na rede elétrica, assim a Raspberry Pi começava o serviço do *gateway* de `packet-forwarder` assim que ligado, e retransmitia tudo o que recebia via LoRa para a TTN sem filtro e ininterruptamente. Diante da necessidade de instalação em lugares remotos com alimentação solar optou-se por modificar seu modo de funcionamento, instalando um módulo GPRS para envio de dados a TTN, e implementando um mecanismo de controle para manter o sistema em

¹⁷ *General-Purpose Input/Output (GPIO)*

¹⁸ utilizado o Monitoramento e Controle Online (MCO)

Figura 19 – Circuito de *wake-up* da Raspberry Pi

¹⁹Diagrama esquemático feito no <https://www.multisim.com>

Fonte: Elaborada pelo autor.

funcionamento apenas com bateria por longos períodos de tempo (pelo menos 5 dias de autonomia).

Programação do módulo GPRS

Para a instalação do módulo GPRS foi necessário fazer uma análise das correntes durante o seu funcionamento, tendo em vista que a corrente demandada pelo módulo durante a transmissão atingia picos de corrente de até 2 A. Optou-se por alimentar o módulo diretamente através de conversor CC-CC conectado a bateria separado da alimentação da Raspberry Pi. Para a comunicação com a Raspberry Pi é utilizada a comunicação serial via pinos TX e RX. Apesar de estar corretamente conectado, percebeu-se que o módulo não funcionava corretamente, pois desligava logo após ser ligado devido a tensão baixa gerada pelos surtos de corrente durante a comunicação do rádio GPRS. A solução para este problema foi acrescentar capacitor eletrolítico de 2000 uF/16 V, em paralelo com a alimentação do módulo, além de utilizar outra provedora de acesso a rede GPRS. A adoção da operadora TIM no lugar da Claro reduziu os surtos de corrente, permitindo o funcionamento do módulo, verificado através do uso de comandos AT em um terminal conectado a Raspberry Pi. Uma vez resolvido o problema da corrente foi modificada a configuração da Raspi para utilizar a conexão de internet via PPP. Esse protocolo de

enlace de dados estabelece uma conexão direta entre dois pontos e é usado pelas redes celulares para acesso a internet via **GPRS**. Para o seu funcionamento é necessário definir o endereço *Access Point Name* (**APN**), que é a opção de configuração que permite que seu celular acesse a Internet através da provedora de dados. Em seguida, o serviço **pppd** realiza uma série de troca de informações com a rede **GPRS** até a obtenção do endereço IP garantindo o acesso a Internet e permitindo o funcionamento do **gateway** através do serviço de **packet forwarder**.

Sistemática de temporização e serviço no gateway

É necessário que o sistema possa funcionar sem receber carga do painel solar em dias sem sol. Para reduzir o consumo adotou-se uma estratégia de mantê-lo desligado e só ligá-lo nos momentos de recepção LoRa e transmissão GPRS. Para que a inicialização seja a mais rápida possível, foi reduzido ao máximo os serviços executados pela Raspberry Pi de modo que o **gateway** estivesse disponível para transmissão o mais rápido possível e assim reduzisse o tempo que a Raspberry Pi estivesse ligada. Para gerenciamento, criação e remoção de serviços foi utilizado o gerenciador de serviços do Linux **systemd**, através de sua interface **systemctl** [ArchLinux 2019].

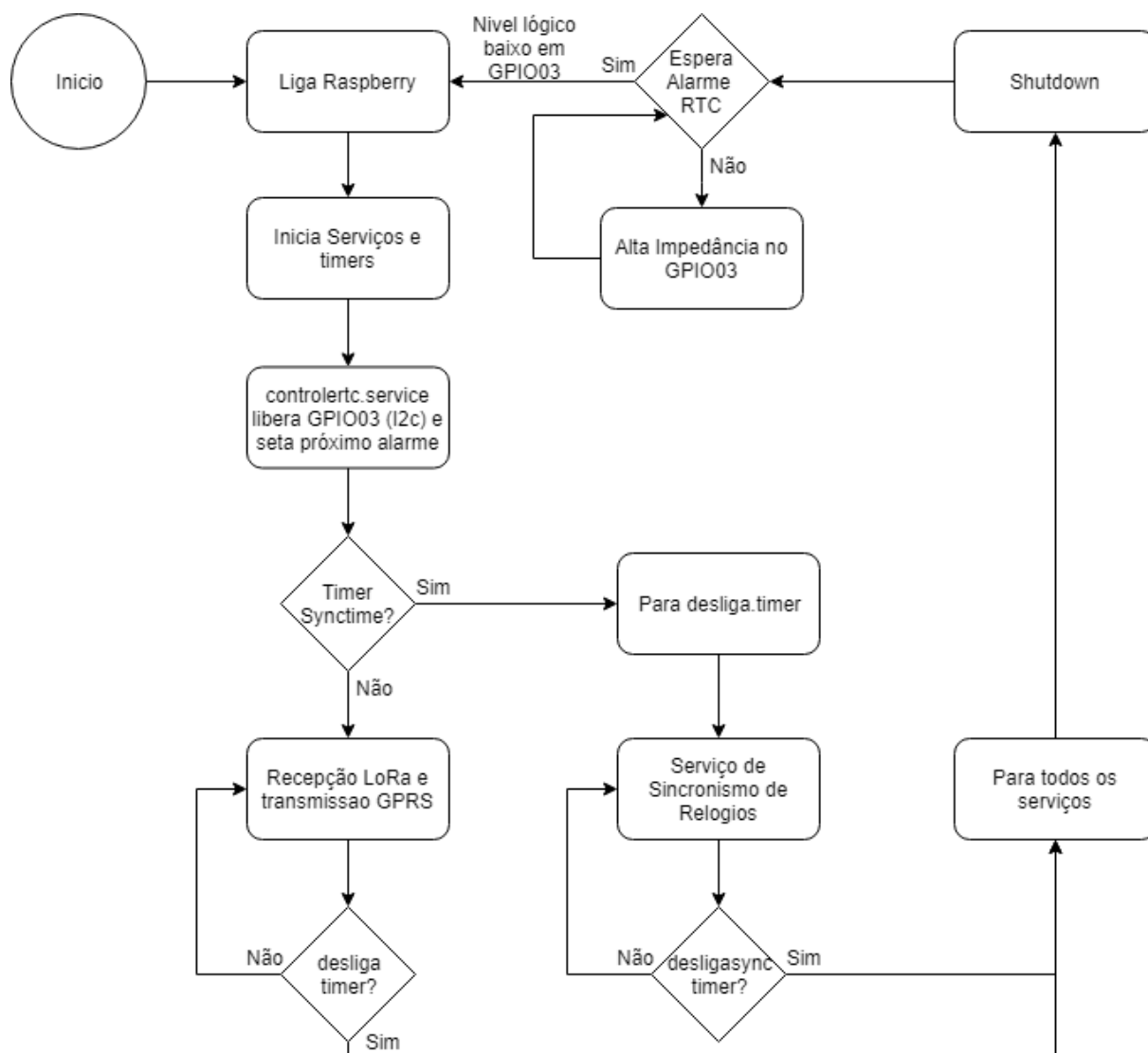
Foram criados serviços (*service*) no **systemd** e duas temporizações (*timer*): 1) o **controlrtc.service** é usado para controlar o religamento; 2) o **desliga.service** é o serviço temporizado que desliga o módulo; 3) o **timesync.service** é um serviço temporizado que é utilizado para a sincronização dos relógios das colmeias com o **gateway**; 4) o **desliga.timer** é um *timer* que atua 120 segundos após a religamento do módulo; 5) o **timesync.timer** é um *timer* que religa o módulo às 11:50 e desliga ele às 12:10.

O fluxograma da **Figura 20** mostra o funcionamento completo do **gateway**. É importante destacar que o funcionamento o sistema depende da programação da interrupção gerada pelo RTC e do circuito de *wake-up* externo descrito anteriormente.

Serviço de religamento do gateway

O serviço **controlrtc.service** trata as informações do RTC, libera o uso do pino 05 (GPIO 03) para uso da I2C e programa a próxima interrupção de alarme de acordo com a tensão da bateria do módulo, medida pelo sensor **INA219**. A decisão do momento para o próximo alarme é definida a partir dos valores de tensão de referência mostrados na **Tabela 3**, os quais são determinados de tal modo que o **gateway** mantenha o sincronismo com todas as **colmeias** conectadas a ele.

Figura 20 – Fluxograma dos serviços



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Relação entre a tensão da bateria e horários de ligamento dos módulos gateway e colmeia

Carga estimada	Faixa de tensão (V)	Intervalos	Horários
1,0C - 0,7C	acima de 12,60	5 min	0, 5, 10, ... 50, 55 min
0,7C - 0,5C	12,60 - 12,10	15 min	0, 15, 30, 45 min
0,7C - 0,5C	12,60 - 12,10	30 min	0, 30 min
0,7C - 0,5C	12,60 - 12,10	2 h	0, 2, 4, ... 20, 22 h
0,7C - 0,5C	12,60 - 12,10	6 h	0, 6, 12, 18 h
0,7C - 0,5C	12,60 - 12,10	24 h	12 h
0,7C - 0,5C	11,45 - 0,00		desligado ²⁰

Fonte: Elaborada pelo autor.

Serviço de desligamento do gateway

O serviço `desliga.service` é o serviço temporizado pelo `desliga.timer` que ativa o modo *power down* da Raspi. O tempo de funcionamento da Raspi no modo ativo é determinado pelos tempos necessários para: (1) inicialização da Raspi até a conexão com a internet via PPP²¹; (2) permitir que as *colmeias* ativas transmitam as informações de monitoramento através do rádio LoRa e o *gateway* retransmita essas informações para o servidor LoRaWAN na nuvem (estimado inicialmente em 79 segundos); (3) desligamento da Raspi (2 segundos). Considerando os tempos (1) e (2), definiu-se que o *gateway* deve ser desligado 120 segundos após o último religamento. Na determinação do tempo (2) foi utilizada uma janela de recepção pelo *gateway* das transmissões LoRa e sua retransmissão para a internet pelo rádio GPRS. Além disso, é necessário tolerar pequenas diferenças entre os relógios das *colmeias* e do *gateway*. Em caso de necessidade de economia de energia a janela ativa da Raspi pode ser estreitada, perdendo porém confiabilidade na recepção dos pacotes LoRa. O tempo (3) é importante que seja o mínimo possível, pois deve ser considerado na programação do próximo religamento. Esse desligamento é efetuado através de um código em Python que desliga todos os serviços. A última atividade antes do *shutdown* é *reset* das *flags* de alarme e interrupção do RTC, para evitar que o pino RTC_INT esteja ativo antes do desligamento da Raspberry Pi que faria com que o módulo não acordasse mais.

Serviço de sincronismo de relógios

O serviço `timesync.service` é um serviço temporizado que é utilizado para a sincronização dos relógios das *colmeias* com o *gateway*. É ativado pelo temporizador `timesync.timer` quando o módulo está ligado às 11h50, situação que só pode ocorrer caso o *gateway* esteja operando no modo com maior carga na bateria, ou seja, transmitindo a cada 5 minutos. Esse serviço interrompe o `desliga.timer` e, através de dados de atualização que são enviados para a TTN, ressincroniza os relógios de todas as *colmeias* e do próprio *gateway* usando o relógio global (UTC). Essa atualização da *colmeia* é feita no momento que ela se comunica com a TTN para transmitir os dados, utilizando a janela de recepção disponível no protocolo LoraWAN para dispositivos do tipo Classe A. Para garantir o tempo de comunicação de todas *colmeias* com a TTN este serviço fica ligado durante 20 minutos, sendo portanto o *gateway* desligado apenas às 12h10 através da temporização `desligasync.timer`. O funcionamento desse serviço está descrito no fluxograma da Figura 20.

²¹ este tempo foi estimado em 41 segundos pela análise do *system log*

Procedimento para transmissão das colmeias

As colmeias e gateway se comunicam através de janelas de transmissões com horários que garantem que o dispositivo com menor carga seja efetivo na sua transmissão, ou seja, se a colmeia estiver com menor carga todas suas transmissões serão recebidas pelo gateway, se o gateway estiver com a carga menor suas transmissões via GPRS conterão as informações recebidas pelas colmeias, isso é garantido usando intervalos de tempo de denominador comum. Conforme mostra a Tabela 3 os intervalos de transmissão podem ser de 5, 15, 30 minutos ou até mesmo de 2, 6, 24 horas. Assim, por exemplo, se um dos módulos (gateway ou colmeia) estiver operando no intervalo de 30 minutos ele se comunicará com o outro módulo que esteja operando a cada 5, 15 ou 30 minutos. Para diminuir o conflito de pacotes enviados pelas colmeias o momento da transmissão é definido de forma randômica na janela de recepção do gateway, que é de 2 minutos.

3.6 Bibliotecas de software utilizadas no Arduíno

Para a programação do módulo colmeia foi utilizada a *Integrated Development Environment* (IDE) do editor web²² do Arduíno, na qual foram importadas diversas bibliotecas de *software* fornecidas em C e C++. Essas bibliotecas facilitam a programação e acesso ao hardware específico, pois fornecem uma *Application Programming Interface* (API) de acesso aos diferentes módulos comerciais e protocolos de comunicação necessários no projeto. Como o *hardware* da colmeia relativo aos sensores das grandezas das colmeias de abelhas, bem como da transmissão LoRa já estavam previamente implementados, elas não estão detalhadas neste trabalho. Assim, nas subseções que seguem são descritas as bibliotecas utilizadas dentro do escopo deste trabalho para realizar as modificações nesse módulo com o objetivo de implementar a redução de consumo e o algoritmo de controle da transmissão dos dados para a TTN.

Wire library

A biblioteca Wire²³ [Arduino 2015] permite a comunicação do Arduíno com dispositivos ligados a interface I2C, que utiliza dois pinos para a comunicação de dados, o *Serial Data* (SDA) e o *Serial Clock* (SCL)²⁴.

²² Interface de programa para kit Arduíno, disponível em <https://auth.Arduino.cc/login>

²³ <https://www.Arduino.cc/en/Reference/Wire>

²⁴ No caso específico das placas Arduíno Mega2560, utilizada no projeto essa interface está disponível nos pinos 20 (SDA), 21 (SCL)

Ethernet library

A biblioteca `Ethernet` para Arduino²⁵ [Arduino 2015] é usada para o acesso aos dispositivos baseados nos controladores de *ethernet* W5100, W5200 e W5500. Ela permite a conexão das placas Arduino com a internet tanto como servidor nas conexões de entrada, como cliente nas conexões de saída. Neste projeto foi necessário utilizar a conexão tipo cliente para a transmissão das informações do módulo MCO para o banco de dados InfluxDB em nuvem, e a conexão servidor para receber os comandos de controle dos relés desse módulo.

Time library

A biblioteca `Time`²⁶ provê as funcionalidades necessárias para medições de tempo, incluindo data e hora do módulo Arduino. Ela é necessária para lidar com o módulo RTC e controlar modos de operação dos módulos colmeia.

Adafruit INA219 library

A biblioteca `Adafruit INA219`²⁷ provê o acesso em ao sensor INA219 utilizando a interface I2C para a configuração e comunicação de dados.

SPI library

A biblioteca `SPI`²⁸ [Arduino 2015] é utilizada na comunicação do Arduino com dispositivos que utilizam a interface *Serial Peripheral Interface* (SPI). Da forma como foi implementada, ela restringe o Arduino a ser dispositivo mestre (*master*), ou seja, não permite usar o Arduino com escravo (*slave*).

Os sinais utilizados na interface são: 1) *Master In Slave Out* (MISO) para enviar os dados dos escravos para o mestre; 2) *Master Out Slave In* (MOSI) para transmissão dos dados do mestre para os escravos; 3) *Serial Clock* (SCK) que transmite pulsos de *clock* gerados pelo mestre para sincronizar as transmissões dos demais sinais. No caso do Arduino Mega2560 esses sinais estão disponíveis nos pinos 50, 51, e 52, respectivamente.

A interface SPI ainda prevê um sinal *Slave Select* (SS), que pode ser usado para a habilitação de diferentes dispositivos escravos conectados ao mestre, podendo ser utilizada qualquer porta digital do Arduino para esta função. É importante notar que como a interface SPI possui este endereçamento pelo hardware SS e não por endereço, o seu uso

²⁵ <https://www.Arduino.cc/en/Referen/Ethernet>

²⁶ <https://www.Arduinolibraries.info/libraries/time>

²⁷ <https://www.Arduinolibraries.info/libraries/adafruit-ina219>

²⁸ <https://www.Arduino.cc/en/Reference/SPI>

implica em um maior número de conexões de fios que a interface I2C. Por isso, ela é menos utilizada em módulos de sensores.

RTC library

Apesar de existir uma biblioteca padrão de RTC na plataforma Arduino²⁹, não foi possível utilizá-la, por incompatibilidade com o módulo RTC (DS3231) utilizado no projeto. Assim, foi utilizada a biblioteca `Arduino library for DS3231 RTC`³⁰ [Rodan 2018] que implementa as funções de leitura, escrita e acesso as *flags* e pinos do módulo DS3231. Com essa biblioteca podemos definir a data e hora do RTC e utilizar esse dado para controlar um alarme para ligamento dos módulos *colmeia* e *gateway*.

Outras bibliotecas utilizadas

Além das bibliotecas indicadas nas subseções anteriores também são utilizadas algumas bibliotecas que já faziam parte da versão inicial do módulo *colmeia*. Foram utilizadas as bibliotecas: 1) `DHT sensor`³¹ que tem a função de comunicação através de uma interface *1-Wire* [Microchip 2008] com o sensor AM2302 - DHT22 permitindo fazer a leitura da temperatura e umidade relativa interna e externa da colmeia de abelhas; 2) `BH1750FVI sensor`³² tem a função de comunicação através de uma interface I2C com o sensor BH1750FVI para obter o nível de iluminância em lux na parte externa da colmeia de abelhas; 3) `HX711 sensor`³³ é utilizada para a calibração, tara e também obtenção dos dados de peso da colmeia de abelhas. O módulo utiliza a interface `SPI` para a comunicação, e está conectado a 4 células de carga³⁴ de 50 kg do tipo extensômetro que estão configuradas em ponte de Wheatstone³⁵. O funcionamento detalhado desses módulos e bibliotecas não foi descrito neste trabalho pois são partes que não foram modificadas.

3.7 Instrumentação utilizada

Para a medição do consumo dos módulos antes e depois das modificações propostas neste trabalho e sua posterior análise, foram utilizados diferentes equipamentos para medição e geração de dados, os quais são descritos nas próximas subseções.

²⁹ <https://www.Arduino.cc/en/Reference/RTC>

³⁰ <https://github.com/rodan/ds3231>

³¹ <https://www.Arduinolibraries.info/libraries/dht-sensor-library>

³² <https://www.Arduinolibraries.info/libraries/bh1750-fvi>

³³ https://www.Arduinolibraries.info/libraries/hx71_adc

³⁴ <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-peso-50kg-celula-de-carga>

³⁵ <https://www.transducertechniques.com/wheatstone-bridge.aspx>

Osciloscópio e multímetro

Para a obtenção dos dados de picos e médios de transmissão tanto do rádio LoRa como do GPRS foi utilizado um osciloscópio Tektronix DPO 2004B [Tektronix 2012] com 3 ponteiros de tensão e uma ponteira de corrente do modelo A622 100 Amp AC DC Current probe/BNC [Tektronix 2012]. Isso permitiu obter medições mais precisas de tempos e valores de picos, máximos, mínimos e médios de tensões e correntes, usando ponteira de medição de tensão e a ponteira de medição da corrente por efeito Hall. Apesar de essa ponteira ter uma especificação para corrente entre 50 mA até 10 A, ela foi utilizada tanto pela facilidade de uso, como pelo valor comparativo das medidas. Adicionalmente, em algumas situações foi usado um multímetro digital Radioshack 42-Range EFD [RadioShack 2015] para medir os valores médios de tensões e correntes.

Sistema de Monitoramento e Controle Online (MCO)

Para o monitoramento instantâneo e de longo prazo foi desenvolvido um sistema de medição de correntes, tensões e potência. O sistema, denominado Monitoramento e Controle Online (MCO), utiliza um microcontrolador Arduino MEGA 2560, para ler os dados de 4 sensores INA219 [Instruments 2015] e transmite eles para um banco de dados em nuvem através de um módulo Ethernet [WizNet 2008] em intervalos de tempo predeterminados. Para o banco de dados foi utilizado o InfluxDB que é do tipo tempo-serial em nuvem fornecido como *Open Source* pela InfluxData ³⁶.

Figura 21 – Carga da bateria de 12V 1.2 Ah medido pelo MCO e visualizado no Grafana



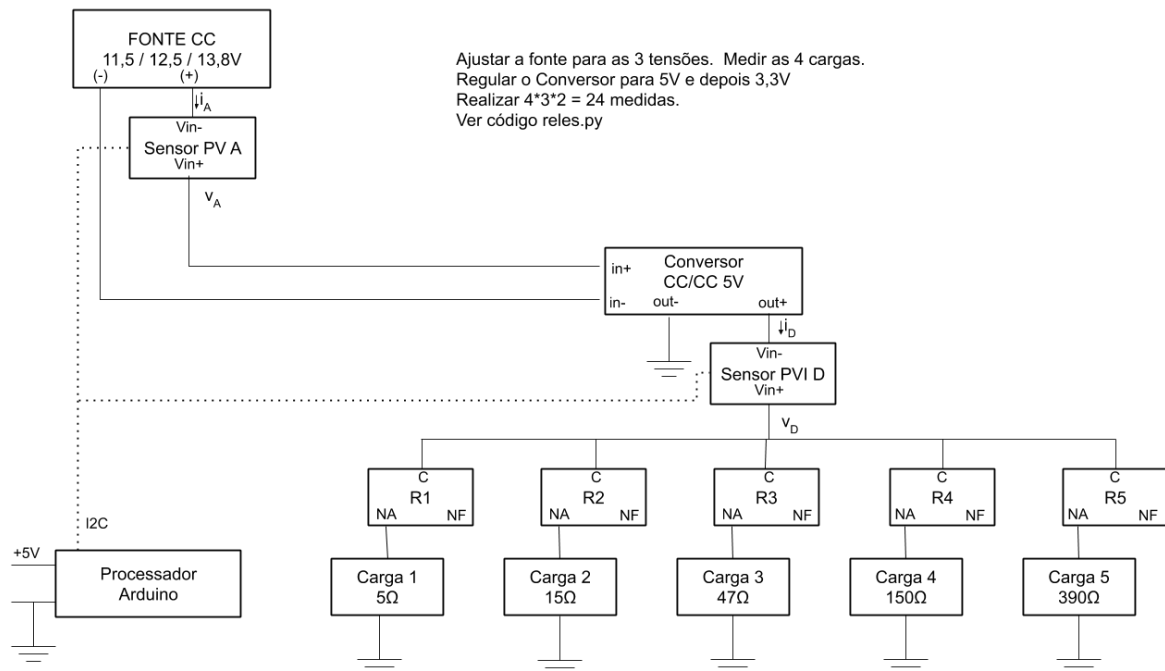
Fonte: Elaborada pelo autor.

³⁶ <https://www.influxdata.com>

Para a visualização gráfica dos dados é utilizado o **Grafana**³⁷, que é a uma aplicação executada em nuvem que consulta através de *queries* em *Structured Query Language* (SQL) os dados armazenados no **InfluxDB**, gerando mostradores e gráficos das variações instantâneas e/ou médias das tensões, correntes e potências medidas. Dessa forma, com o sistema **MCO** é possível monitorar remotamente e *on-line* os consumos, bem como analisar os dados armazenados para qualquer intervalo temporal (minutos, horas, dias ou meses). A **Figura 21** mostra um exemplo de tela de medição do **Grafana** na qual estão monitorados os dados de carga de uma bateria de 12 V durante o período de 9,5 horas.

O sistema **MCO** também possui um módulo de relés (Modelo SRD-05VDC-SL-C) que permite controlar o chaveamento das cargas e fontes, possibilitando a reconfiguração remota e automatizada das medições. O código adicionado ao sistema permite esse controle através de um servidor *ethernet* que recebe os comandos através de uma *string* enviada pela internet, de algum computador que tenha acesso ao endereço IP e porta definida no código. Exemplos de comandos que podem ser utilizados para controle são: 1) comando R1R5- ligar os relés R1 e R5 e desligar os demais; 2) comando R1R2R3R4R5R6R7R8- ligar os relés de R1 a R8; 3) comando null- desligar todos relés.

Figura 22 – Medição de de perdas do conversor CC-CC usando o sistema **MCO** com o módulo de relés



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como os relés tem 3 contatos: NA (normalmente aberto); C (comum) e NF (normalmente fechado), e todos os relés são isolados entre si e do circuito de comando,

³⁷ <https://grafana.com>

é possível controlar e chavear cargas ou fontes de até $30V_{CC} \times 2 \times 10A$. Assim, conforme a necessidade do cenário de medições a ser usado, é possível, por exemplo, controlar remotamente a resistência de carga durante a descarga de uma bateria, mudar o controlador de carga, mudar a fonte de tensão a ser usada e realizar outras configurações. Com o acréscimo dessa funcionalidade de controle remoto, o sistema passa a permitir a troca do estado dos relés de forma controlada no tempo exato desejado. Um exemplo de uso desse sistema para a medição das perdas do conversor CC-CC utilizado no projeto. No cenário mostrado na [Figura 22](#) cada relé foi conectado a uma carga diferente (5Ω a 390Ω), os resultados das medições serão apresentados mais adiante.

Calibração dos instrumentos

Para a obtenção de dados com maior acurácia, foi necessário calibrar os circuitos antes de realizar as medições. No caso dos sensores de corrente **INA219**, usados no sistema MCO e nos módulos *colmeia* e *gateway*, foram realizadas medições sem tensão e nem corrente para obter a corrente de *offset*, a qual deve ser cancelada no código de medição. A tensão em aberto neste sensor é de aproximadamente $1V$, mas não é um *offset* e portanto não é cancelada no código. Para a determinação da corrente de *offset* dos sensores **INA219** foram feitas 100 medições durante pelo menos 5 minutos com as portas *in+* e *in-* desconectadas. O valor médio dessas medições foi usado para minimizar o *offset* médio na medição final da corrente. A [Tabela 4](#) mostra os valores de *offset* obtidos para cada um dos sensores **INA219** utilizados no trabalho.

Tabela 4 – Valores de *offset* de corrente dos sensores **INA219**

alocação do sensor	offset (mA)
sensor 1 do MCO	-3,12
sensor 2 do MCO	0,22
sensor 3 do MCO	-0,26
sensor 4 do MCO	0,77
colmeia 0001	0,12
colmeia 0003	0,14
gateway GW2	0,51

Fonte: Elaborada pelo autor.

A calibração da ponteira de corrente por efeito Hall da Tektronix deve ser realizada com maior frequência em função da variação da carga da bateria de $9V$ que alimenta o circuito Hall da ponteira. Essa calibração é feita através de um *dial* na própria ponteira, devendo ser tomando o cuidado de não ter corrente passando pelo anel de medição durante a calibração. O ideal é selecionar uma escala de tempo $< 1ms$ e medir o valor médio da corrente, buscando minimizar este valor. Na prática os valores medidos depois do

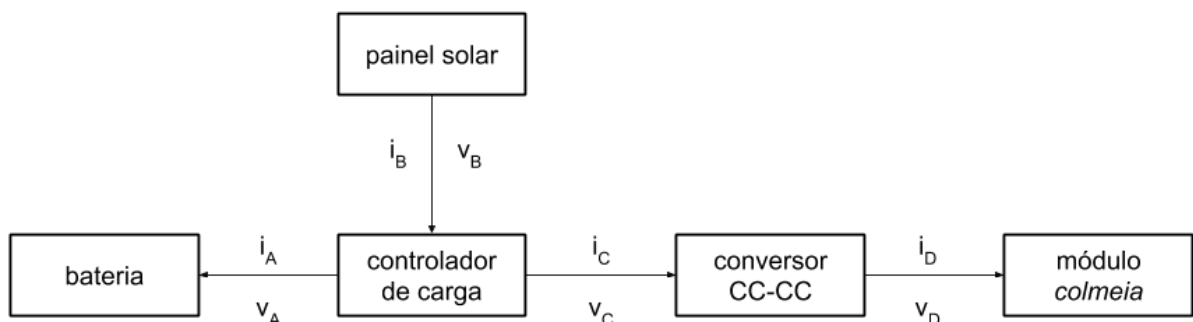
ajuste variaram entre $\pm 2 \text{ mA}$. As ponteiros de tensão da Tektronix não necessitaram de calibração pois já vem calibradas de fábrica.

3.8 Sistema de alimentação

O sistema RFabelhas, por ter a necessidade de funcionar em locais sem alimentação de energia pela rede comercial, depende para o seu funcionamento de formas alternativas de energia que sejam *off-grid*. A opção definida durante a concepção do projeto original foi pelo uso de um sistema com energia solar e armazenamento em baterias para o funcionamento ininterrupto do sistema, independente das condições atmosféricas e do período do dia. Inicialmente foi definido que o sistema deveria ter uma autonomia de bateria de 5 dias, para prever situações climáticas que dificultassem a carga da bateria a partir da energia solar. Mesmo assim, antes da realização deste projeto, a alimentação do módulo *gateway* era feita usando uma fonte CA-CC ligada a rede comercial, exigindo que este módulo fosse instalado próximo a rede de energia. O módulo *colmeia* era alimentado por bateria de 12 V/12 Ah para suprir consumo médio que era em torno de 100 mA.

O diagrama de ligação do sistema de alimentação do módulo *colmeia* é mostrado na Figura 23, onde além da bateria e do painel solar, existe também a necessidade de um controlador de carga, e de um conversor CC-CC para reduzir a tensão da bateria para o $5V_{CC}$. Apesar de o módulo Arduino ter uma fonte linear regulada conectada a entrada do *plug* P4 optou-se por não utilizá-la pois as perdas nesse regulador linear são maiores do que em uma fonte chaveada externa.

Figura 23 – Sistema de alimentação do módulo *colmeia*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, para poder reduzir a dimensão, peso e custo final do sistema de alimentação, foi necessário realizar um diagnóstico das perdas em cada componente desse sistema, bem como determinar alguns parâmetros dos componentes. Diversas medições foram realizadas e estes resultados são apresentados na sequência desse desenvolvimento pois

foram utilizados para a definir um sistema de controle e ajustes nos módulos *gateway* e *colmeia* visando reduzir ao máximo o consumo de energia.

As modificações que foram implementadas no projeto para reduzir o consumo dos módulos foram as seguintes:

- Ajustes no *software* (da *colmeia* e *gateway*) para desativar *hardware*, *services* e *clocks* não utilizados;
- Uso de modo *sleep* (na *colmeia*) e *power down* (no *gateway*), reduzindo a atividade dos processadores para reduzir o consumo de energia;
- Uso do RTC para sincronização das transmissões e recepções via rádio LoRa entre a *colmeia* e o *gateway*;
- Uso da tensão da bateria para controlar o *duty cycle* de atividade dos módulos;
- Ajustes no *hardware* do sistema de alimentação, tais como: inclusão do conversor CC-CC, redimensionamento da bateria, painel solar, troca do controlador de carga.

Controlador de carga

Foram testados os dois modelos de controladores de carga disponíveis no projeto: o modelo SHS10 da Morningstar e o modelo Landstar LS0512E da Epsolar. O primeiro tem capacidade de corrente de até 10 A e o segundo apenas de 5 A. O intuito deste teste foi obter a tensão de desligamento da carga pelo controlador, e também determinar o consumo próprio desse componente. Para fazer o teste foi utilizado o sistema Monitoramento e Controle Online (MCO), que através do sistema de controle de reles, além de medir as correntes e tensões na entrada e saída do controlador, permitia alternar entre o estado de carregamento da bateria a partir de uma fonte e a sua descarga através de uma carga constante de $1,5 \Omega$. Com isso, foi possível determinar tanto a tensão de desligamento da carga como a corrente de auto-consumo do controlador de carga, conforme mostra a [Tabela 5](#).

Tabela 5 – Tensão de desligamento e auto-consumo dos controladores de carga

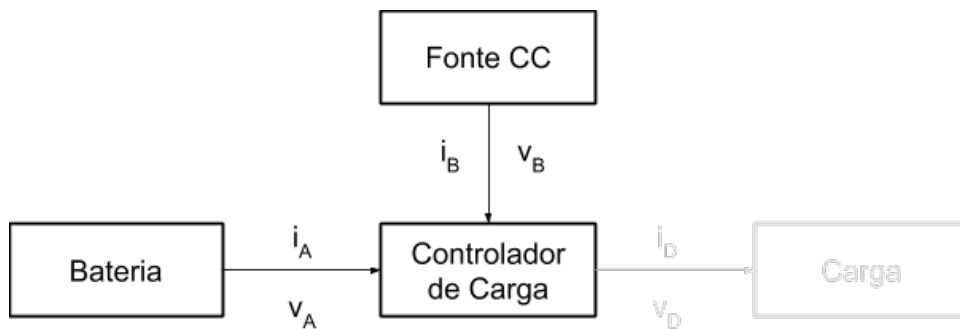
Controlador	Tensão desligamento (V)		Auto-consumo (mA)	
	Especificado	Medido	Especificado	Medido *
Morningstar SHS10	11,5	11,45	8,0	5,6
Epsolar Landstar LS0512E	11,1	10,8	5,0	2,0

* O auto-consumo medido na realidade depende da tensão da bateria, pois uma parte importante do consumo corresponde aos *Light-Emitting Diode* ou diodo emissor de luz (LED)s de sinalização do controlador. Assim o valor indicado na tabela é para a situação final, no qual apenas um LED está piscando

Bateria

Para a bateria, foi necessário medir as características de carga e descarga para obtenção de suas curvas, utilizando diferentes parâmetros de consumo de carga e de tensão de carga. Foram usadas 3 baterias diferentes para medições no sistema de 1,3 Ah, 7 Ah e 12 Ah. Foram utilizados dois circuitos de medição diferentes, um para a carga da bateria e outro para a descarga da mesma.

Figura 24 – Circuito para carga da bateria

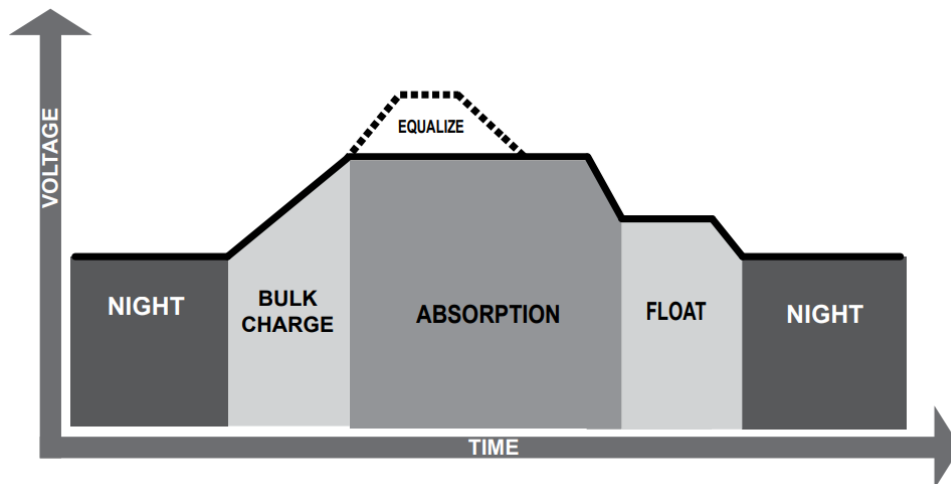


Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito de carga consiste em conectar a bateria ao controlador que está conectado a uma fonte de tensão CC conforme mostra a [Figura 24](#), com a carga do sistema desconectada. Para realizar as medições foi usado o sistema MCO para medir a tensão e corrente em A e B. O objetivo da medição é determinar a variação no tempo dos valores de tensão e corrente na bateria (A) e na fonte (B) e assim medir dados do carregamento da bateria junto com o carregador, podendo determinar como este realiza o carregamento da bateria e como irá performar quando conectado ao painel solar. A carga de uma bateria deve ser realizada segundo mostrado na [Figura 25](#), a qual demonstra as 4 fases de carga quando o controlador Mornigstar é utilizado.

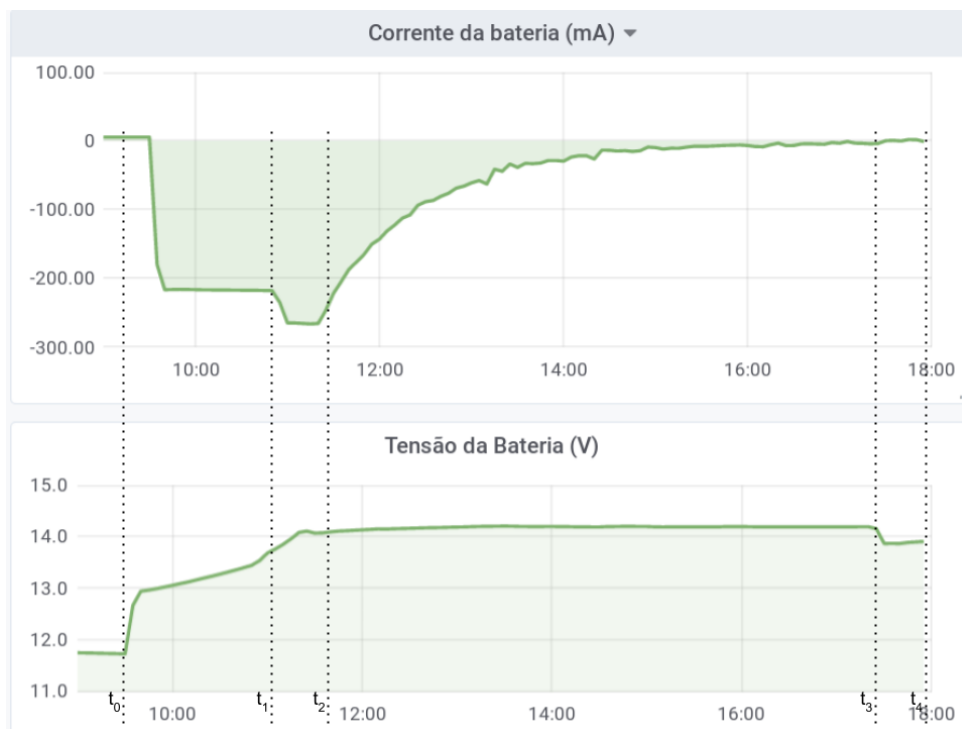
A curva de tensão de carregamento real da bateria 7Ah foi obtida com o controlador de carga Morningstar SHS10, e é mostrada na [Figura 26](#). Durante o tempo de t_0 até t_1 o controlador operou com corrente constante no chamado estágio de massa (*bulk charge*), de t_1 a t_2 no estágio de equalização com uma corrente um pouco maior, de t_2 a t_3 operou com tensão constante (14 V) no estágio de absorção, e finalmente entre t_3 e t_4 no estágio de flutuação estágio onde a bateria já está carregada. Os dados obtidos mostram que para uma carga completa da bateria são necessárias no mínimo 3 horas de carga uma vez que a corrente máxima de carga é de 0,3 CA. Assim para a bateria de 1,2 Ah a corrente máxima de carga é de 0,36 A. Esses detalhes do carregamento permitem definir o tempo de carregamento da bateria quando conectada a um painel solar, sendo que na [Figura 26](#) a bateria levou cerca de 8 horas para atingir o estágio de flutuação mas em 3 horas a maior parte da bateria já estava carregada.

Figura 25 – Estágios de carregamento



Fonte: [Morningstar 2015].

Figura 26 – Carregamento da bateria de 1,2 Ah com a fonte CC 14 V @270 mA e controlador de carga Morningstar SHS10, obtida com o sistema Monitoramento e Controle Online (MCO)

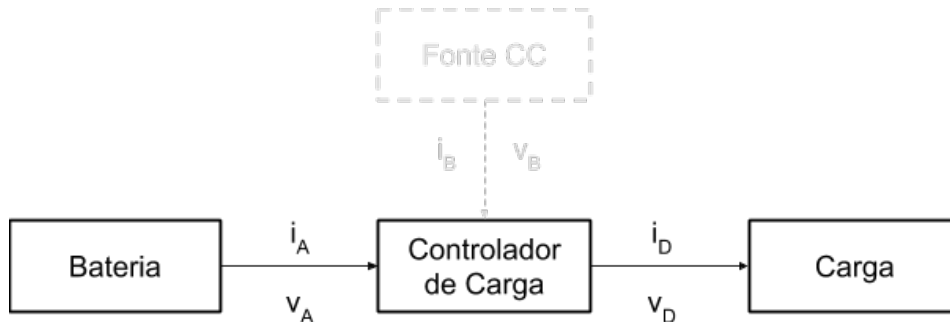


Fonte: Elaborada pelo autor.

Após realizar os testes de funcionamento do controlador durante a carga da bateria, foram realizados testes de descarga da bateria com o mesmo controlador. Para possibilitar a avaliação do funcionamento com diferentes correntes de descarga foi novamente utilizado o conjunto de relés do MCO, para chavear as diferentes cargas em uma série de testes a

fim de obter uma curva completa de descarga. Nesse caso, o objetivo é medir a descarga da bateria quando submetida a uma carga constante para verificar se existe alguma linearidade que permita determinar valores de tensão de bateria para controlar o ciclo de trabalho dos módulos.

Figura 27 – Circuito para a descarga da bateria



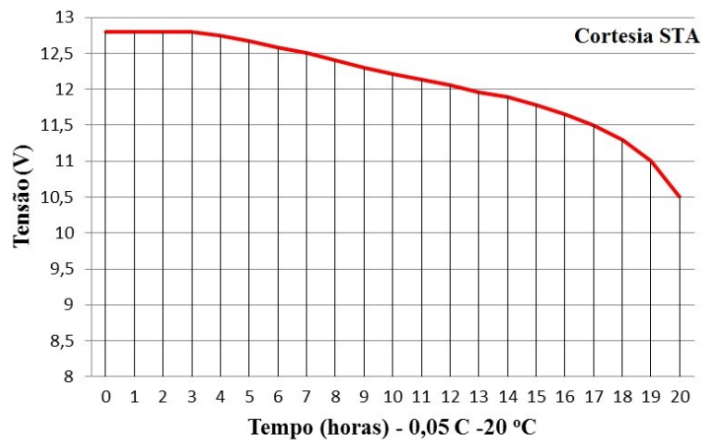
Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito de descarga consiste em conectar a bateria ao controlador e este a carga conforme mostra a [Figura 27](#). Para realizar as medições o MCO foi conectado em (A) e (D), sendo novamente o objetivo desta medição determinar a variação no tempo da tensão e corrente na bateria (A) e na carga (D), e assim medir dados da descarga da bateria em conjunto com o controlador. O valor do resistor usado como carga foi determinado para que a bateria fosse descarregada em 20 horas. Assim, para a bateria de 7 Ah foi usada uma carga que resultou em uma corrente média de 350 mA, sendo possível comparar com a curva de descarga fornecida pelo fabricante da bateria, conforme mostra a [Figura 28](#), com a medida no sistema mostrado na [Figura 29](#). A curva de descarga da bateria de 7 Ah obtida com os dois controladores disponíveis mostra que a tensão reduz rapidamente durante o tempo de t_0 até t_1 . De t_1 a t_2 a redução da tensão ocorre de forma linear, este período corresponde a operação do sistema entre 100% e 20% da carga da bateria para um consumo de 350 mA (5% de 7A). Entre t_2 e t_3 podemos observar que a tensão passa a cair de forma mais acentuada, até chegar a tensão de desligamento da carga pelo controlador na tensão 11,5V (instante t_3 da curva). Essa tensão é a mesma obtida no experimento de inicialização. A partir de t_3 a corrente passa a ser constante, pois a carga é desligada pelo controlador, permanecendo apenas o auto-consumo do controlador.

$$\begin{aligned} \text{Capacidade} &= 17/20 = 85\% \\ \text{Corrente} &= (85\% / (5\text{dias} * 24\text{h})) * C = 49,58\text{mA} \end{aligned} \quad (3.1)$$

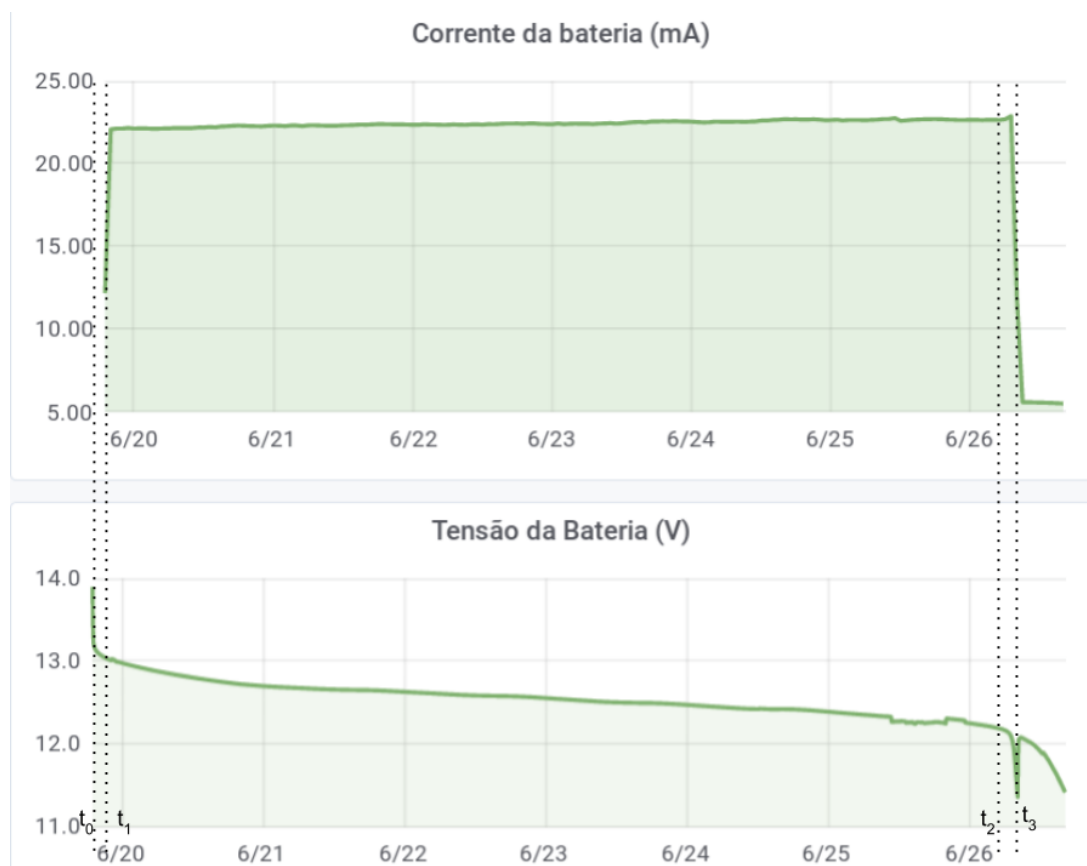
onde C é o valor nominal da bateria em Ah, portanto na curva teórica para a bateria de 7 Ah ($C = 7$) e a corrente de descarga é de $0,05C = 350$ mA, assim considerando a tensão de corte pelo controlador de 11,5 V obtemos que a bateria pode fornecer no limite uma corrente de 350mA durante 17 h, resultado semelhante ao calculado teoricamente.

Figura 28 – Curva teórica de descarga



Fonte: [STA 2015].

Figura 29 – Curvas de descarga da bateria de 7 Ah com controlador de carga Morningstar SHS10, obtidas com o sistema MCO, usando uma corrente de descarga de 22 mA

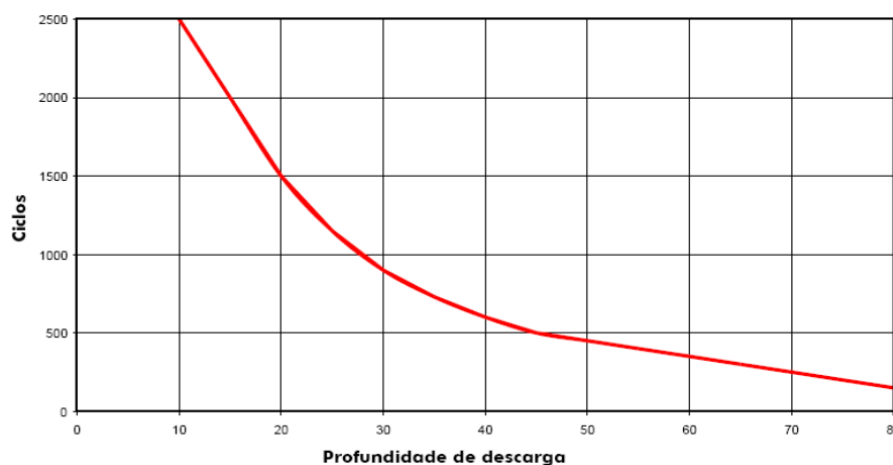


Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, para que o sistema tenha uma autonomia de 5 dias (120 horas), é necessário que a corrente da carga média não exceda 49,6 mA.

Além da capacidade de carga e autonomia desejada da bateria, outro fator relevante para a tomada de decisão da bateria a ser utilizada tem relação com o ciclo de vida já que o de uma bateria selada de chumbo-ácido está diretamente relacionado com a profundidade de suas descargas. Desta forma, quanto mais profunda for cada uma das descargas, menor se torna a durabilidade da bateria. O número típico de ciclos de carga/descarga a 25°C no que diz respeito à profundidade de descarga é: 150 a 200 ciclos com 100% de profundidade de descarga (descarga completa); 400 a 500 ciclos com 50% de profundidade de descarga (descarga parcial); e mais de 1000 ciclos com 30% de profundidade de descarga (descarga rasa). Desta forma, é importante se encontrar um ponto ótimo entre tamanho da bateria, peso, autonomia e ciclo de vida, para um correto dimensionamento do sistema.

Figura 30 – Ciclos de vida/profundidade de descarga



Fonte: Unicoba [Unicoba 2017].

Painel solar

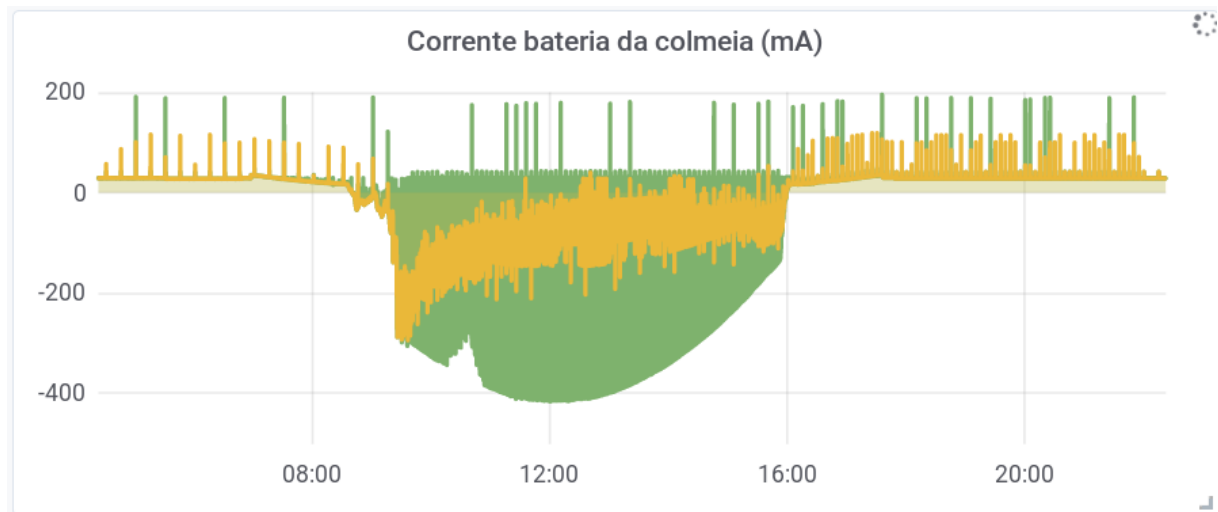
Quanto aos painéis solares, estão disponíveis no laboratório do IFSC os seguintes painéis fotovoltaicos: Shell ST20 (20 W), Siemens ST20 (20 W), Sinosola SA60-36P (60 W), Sinosola SA30-36P (30 W) e Sinosola SA10-36P (10W). Os painéis solares foram testados conectados ao circuito sem carga e também ao circuito com os módulos colmeia e gateway como carga. A Figura 31 mostra o funcionamento do painel solar de 10 W carregando a bateria de 7 Ah em um dia típico de sol. É importante destacar que essa imagem corresponde ao segundo dia, no qual a carga da bateria é completada.

Conversor de tensão CC-CC

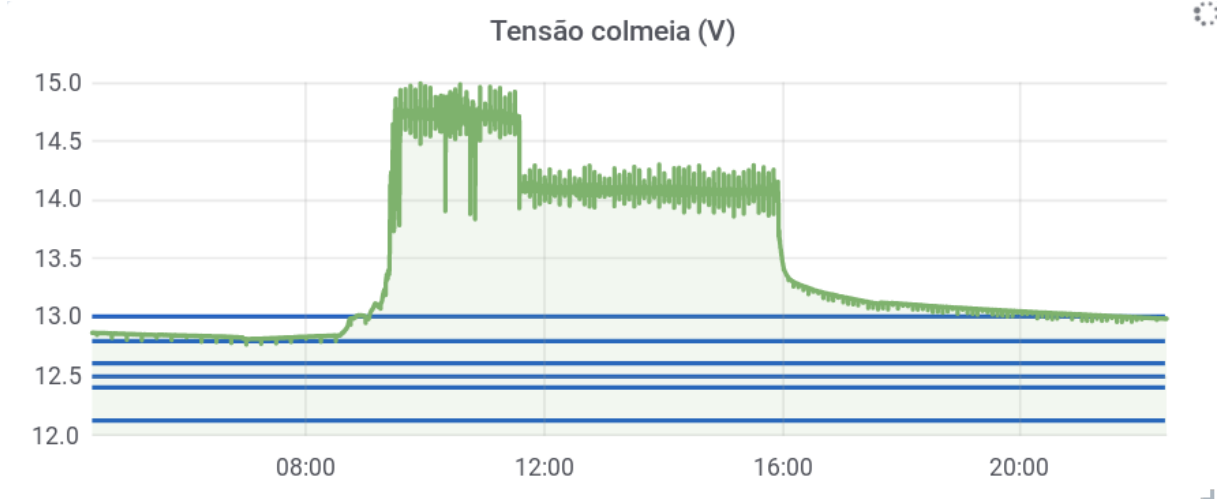
Para baixar a tensão de 11,5-13,8 V fornecida pela bateria para uma tensão de 5 V de modo que ela se torne compatível com a tensão dos módulos gateway e colmeia, necessitamos usar um conversor CC-CC³⁸, entretanto existe uma perda considerável de

³⁸ Conversor abaixador de tensão do tipo *buck* ou *step-down converter*

Figura 31 – Ciclo diário de carga da bateria de 7Ah a partir de um painel solar de 10W, medido com o MCO a cada 10 segundos



(a) Corrente da bateria - amarelo valor médio, verde valor máximo



(a) Tensão da bateria - linhas azuis representam os limiar de chaveamento dos modos de operação

Fonte: Elaborada pelo autor.

potência neste tipo de fonte, principalmente em situações de baixas potências, sendo necessária a medição para uma melhor estimativa de consumo do sistema de alimentação (Controlador + Conversor) e para um dimensionamento mais apropriado do sistema. Dados de consumo (perda) do conversor CC-CC são mostrados na [Tabela 6](#).

Dimensionamento do sistema

Para fazer o dimensionamento do sistema são necessárias algumas escolhas de engenharia de acordo com as especificações do sistema desejado. Assim, faz-se necessário especificar:

- O tempo que o sistema deve permanecer ligado apenas na bateria;
- A geração extra do painel em relação ao consumo do sistema;
- O tempo que o painel deve levar para carregar a bateria.

Em posse dessas especificações deve-se calcular o consumo médio do sistema proposto composto pelos consumos fixos e pelos variáveis, no caso do sistema proposto os consumos fixos são compostos pelos:

- Consumo da fonte CC-CC;
- Consumo do controlador de carga;
- Consumo do módulo desligado (*sleep* na *colmeia*) e (*power down* no *gateway*);
- Auto-consumo da bateria (desprezível).

Já os consumos variáveis dependem da estratégia de controle utilizada baseada no consumo médio do módulo em operação, sendo de 4 s de consumo alto na *colmeia* e de 120 s de consumo alto no *gateway*. Assim, podemos fazer o dimensionamento do sistema, isto é, que baterias e painéis serão utilizados.

Para dimensionar a bateria usamos a especificação de tempo e o consumo médio em Ampere-hora (Ah), que é o consumo médio ponderado pela lei de controle

$$CapacidadeDaBateria(Ah) = TempoDeBateria(h) \times Consumo(A) \quad (3.2)$$

A partir daí podemos calcular o painel solar necessário pelo tempo que queremos carregar a bateria ou pela geração extra que desejamos ter

$$PainelSolar(W) = \frac{CapacidadeDaBateria(Ah)}{HorasDeCarga(h)} 13,8(V) \quad (3.3)$$

onde a capacidade da bateria é a obtida em relação as horas de sol e o tempo necessário que ela carregue assumindo que o painel tenha sol para fornecer uma tensão no painel superior a 13,8 V.

$$PainelSolar(W) = \frac{ConsumoPorDia(Ah) \times Extra}{24(h) \times HorasDeSol(h)} 13,8(V) \quad (3.4)$$

O consumo final é a soma dos consumos totais do sistema quando este está operando no seu modo normal (de 5 em 5 minutos), e o extra é o fator pelo qual queremos fornecer a mais de energia para o sistema. Para o cálculo exato do painel solar é importante levar em conta que pode não haver irradiação solar suficiente em alguns momentos do dia para fornecer a tensão mínima de carregamento.

3.9 Alterações feitas nos módulos colmeias e gateway

Para implementar o processo de controle de potência proposto neste trabalho foi necessário fazer tanto alterações de *hardware* com *software* nos módulos colmeia e gateway. Nas subseções a seguir é feito um resumo dessas alterações.

Alterações no *hardware* na colmeia

Para implementação do controle por tempo de transmissão, foram necessárias as adições de alguns dispositivos de *hardware*. O RTC foi acrescentado para manter os tempos entre os módulos sincronizados e alarmar o módulo colmeia através de uma interrupção no Arduíno para quando necessário fazer o seu *wake-up*. Um sensor de corrente e tensão foi incluído para medição da tensão na bateria, e sua respectiva carga, de modo a alterar o modo de operação. Para uma maior redução no consumo optou-se ainda por utilizarmos uma fonte chaveada CC-CC e um controlador de menor consumo com seus LEDs indicadores retirados. Assim, uma vez feitos os cálculos de consumo e autonomia no módulo colmeia, pôde-se ainda modificar o painel e a bateria para capacidades e potências menores. Na parte dos sensores originais não foi necessária nenhuma mudança, sem na configuração do transmissor LoRa.

Alterações de *software* na colmeia

No *software* do Arduíno foram primeiramente feitas alterações para reduzir seu consumo base, desligando componentes e módulos como LEDs, conversores A/D e outros, ajustando o *clock* e retirando funcionalidades não utilizadas. Após essas alterações foi necessário incluir a lei de controle proposta, baseada na leitura da tensão da bateria, para assim calcular o próximo alarme no RTC e gerar a interrupção de *wake-up*. Além disso, se alterou o pacote a ser enviado via LoRa incluindo informações do funcionamento do módulo colmeia: tensão e corrente na bateria.

Alterações no *hardware* do módulo gateway

No módulo gateway foi necessário também a inclusão do RTC e de um sensor de corrente, que também tem o objetivo de auxiliar a determinar o próximo alarme e consequente a interrupção de *wake-up*. Entretanto, por conta da maneira como a Raspberry é projetada foi necessário adicionar um circuito auxiliar de *wake-up* com o uso de transistores para que sempre que o alarme do RTC fosse acionado, fosse gerada uma interrupção para acordar o módulo, mas que uma vez ligado ele pudesse se comunicar via porta I2C que utiliza o mesmo pino da interrupção de *wake-up*. Além disso, para tornar o sistema portátil e independente de conexão de cabo *ethernet*, foi adicionado um módulo GPRS para envio dos dados a rede, sendo ainda necessário adicionr um capacitor para diminuir as correntes

de pico durante a transmissão evitando com que o módulo resetasse. Para alimentação desse módulo optou-se também pelo uso de uma fonte chaveada CC-CC.

Alterações no *software* do módulo de gateway

O *software* e configuração de *boot* da Raspberry Pi foi alterado para reduzir o consumo base (em modo ativo), desligando todos os serviços não utilizados, tais como: a porta *ethernet*, os periféricos, o monitor com interface *High-Definition Multimedia Interface* (HDMI). Também foram alteradas algumas características que não alteram o funcionamento como *gateway*. Além disso, foi feita a programação do módulo GPRS para que a conexão a rede fosse realizada usando a conexão pelo PPP, e ainda incluídos os serviços de controle do RTC e de *shutdown* do módulo.

4 Resultados

Para a comprovação do funcionamento e melhorias do sistema **RFabelhas** após a inclusão das modificações propostas neste trabalho foram realizadas diversas medições, utilizando diferentes cenários com configurações de equipamentos, programação e tempos de medição. Os resultados obtidos são apresentados neste capítulo junto com a sua análise. Como as modificações propostas são aplicadas em diferentes módulos, os resultados foram divididos nas seções: sistema de alimentação, módulo **colmeia**, módulo **gateway** e sistema **RFabelhas**, sincronismo entre módulos **gateway** e **colmeias** e finalmente uma comparação entre o sistema **RFabelhas** e outros sistemas.

4.1 Sistema de alimentação

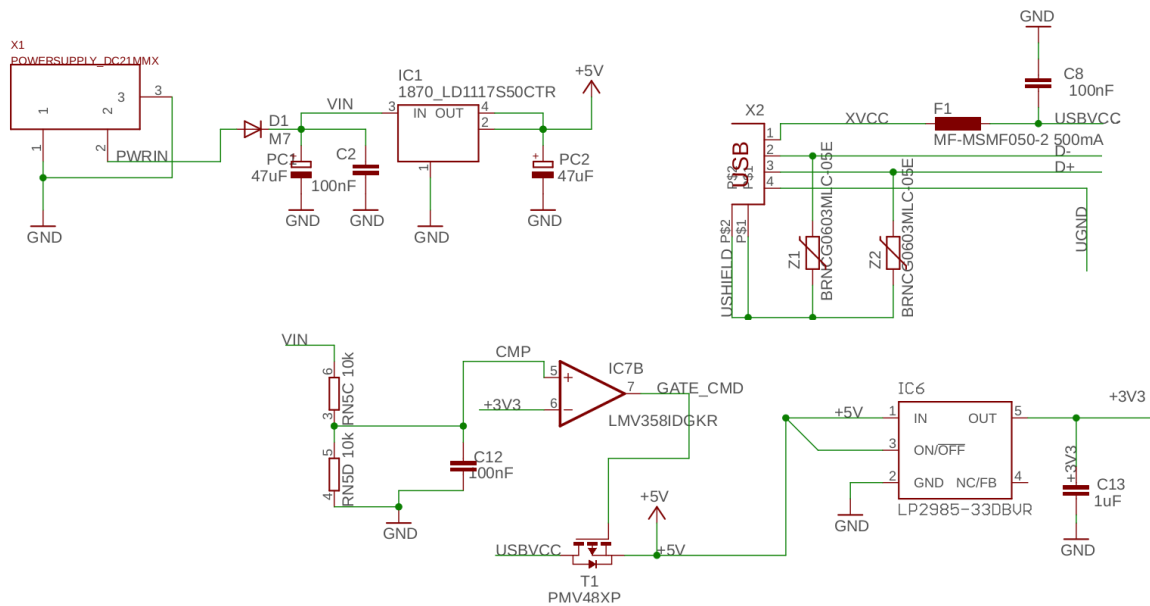
Para avaliar a eficiência das alterações realizadas no módulo **colmeia** e **gateway** foram realizadas medições de tensão, corrente e potência nos pontos indicados nos diagramas que seguem. A principal estratégia utilizada é o uso dos modos *sleep* (na **colmeia**) e *power down* (no **gateway**) durante o período de tempo em que não realizam atividade. Situações em que o consumo próprio do sistema de alimentação se torna mais relevante e onde possíveis ganhos se tornam mais importantes.

Módulo **colmeia**

Para a avaliação do módulo **colmeia** foram utilizados dois cenários de funcionamento anteriores ao desenvolvimento deste trabalho, e também o cenário resultante deste trabalho. No cenário **CC1 @12V** mostrado na [Figura 33](#), o pino P4 de alimentação do Arduíno é conectado diretamente a saída do controlador de carga. Nesta situação toda a regulação da tensão (de 12 V para 5 V) é feita pelo regulador linear disponível na placa do Arduíno [Figura 32](#). Em função de não ser possível fazer a medição da corrente após o regulador da placa, apenas as correntes dos pontos (A) e (C) foram medidos. A corrente de consumo do Arduíno neste caso é de 62,89 mA. Porém, se considerarmos a corrente no caso da alimentação com 5 V, estimamos que a perda pela fonte linear do Arduíno é acima de 70% da corrente consumida na bateria.

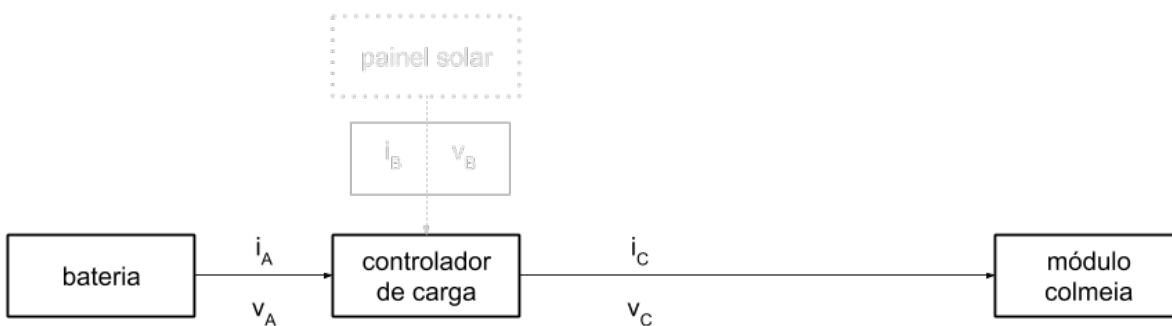
No segundo cenário **CC2 @5V** mostrado na [Figura 34](#), a alimentação do Arduíno é feita através da **USB**, sendo usado o conversor CC-CC do tipo *buck* [[Arduíno 2019](#)] para regular a tensão para 5 V. Neste segundo caso, a corrente de consumo do módulo mais perdas do conversor CC-CC cai para 38,14 mA, pois neste caso o circuito **ATMEGA16U2-MU** que implementa a interface **USB** (ver [Figura 32](#)) é alimentado.

Figura 32 – Possibilidades de alimentação do Arduino MEGA 2560



Fonte: [Arduino 2019].

Figura 33 – Cenário de medição do consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo colmeia. Alimentação pelo conector P4 ou USB do Arduino

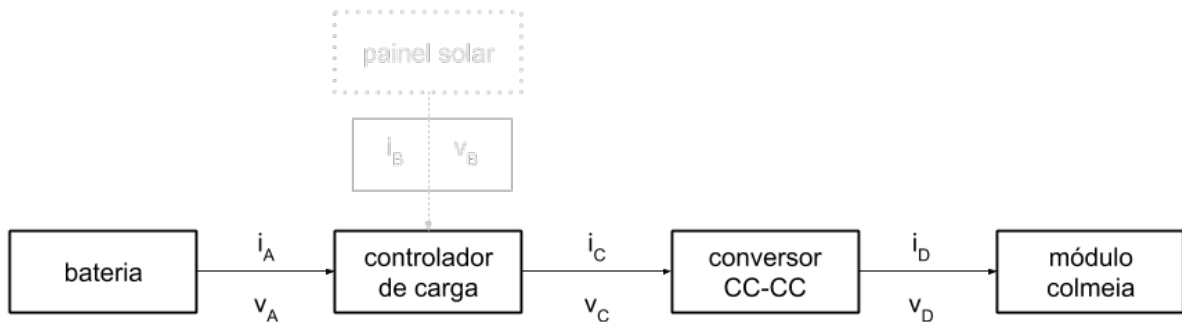


Fonte: Elaborada pelo autor.

No último cenário CC3 mostrado na mesma figura, correspondente a proposta simplificada deste trabalho, a alimentação do Arduino é feita através do pino V_{in} desviando o diodo D1 de entrada, e regulando a maior parte da tensão da bateria com um conversor CC-CC do tipo *buck* para 6 V, 5 V e 4 V, diminuindo assim drasticamente a tensão a ser regulada pela fonte linear. Além disso, para reduzir ainda mais essa perda da fonte linear no Arduino, é preciso tirá-la da placa uma vez que não é possível alimentar o Arduino sem passar por ela. A Tabela 6 mostra de forma clara que a estratégia de utilizar um conversor CC-CC antes da fonte regulada interna é muito mais eficiente, pois, por exemplo, trabalhando com a tensão na entrada do Arduino mais baixa é possível reduzir a corrente equivalente de consumo durante a fase ativa para 26,77 mA @ 5 V (15,77 mA @ 4V). Adicionalmente, a proposta consegue uma maior redução no consumo utilizando o modo

sleep sincronizado com os módulos *gateway* durante o tempo entre medições. Este modo permite reduzir o consumo para até 6,71 mA @ 5V (2,68 mA @ 4V). Neste último caso o consumo da colmeia corresponde a apenas 28,7% (ou 14,8% @4 V) do consumo total, sendo o restante consumido pelo conversor e pelo controlador de carga.

Figura 34 – Cenário usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo. Com conversor CC-CC *step down* (LM2596) e alimentação pelo Vin ou USB do Arduino colmeia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Consumo de corrente relativo à corrente da bateria para controlador de carga Mornigstar SHS10, bateria de 12V/7Ah e conversor CC-CC *step down* (LM2596)

Cenário de medição	Modo de operação	Tensão da bateria (V)	Perda no controlador (mA)	Perda no conversor CC-CC (mA)	Consumo da colmeia (mA)	Consumo da colmeia (%)
CC1 @12V	transmitindo	12,66	7,58	(a)	451,86	98,3
CC1 @12V	ativo	12,71	7,91	(a)	62,89	88,8
CC2 @5V	transmitindo	12,66	7,71	52,83	154,91	71,9%
CC2 @5V	ativo	12,76	7,62	14,25	23,89	52,2%
CC3 @5V	sleep	12,82	7,58	9,88	7,08	28,8%
CC3 @5V	transmissão	12,69	7,28	44,59	127,05	71,0%
CC3 @5V	ativo	12,80	7,73	11,90	14,87	43,1%
CC3 @4V	sleep	12,83	7,67	7,81	2,68	14,8%
CC3 @4V	transmissão	12,82	7,40	23,16	49,48	61,8%
CC3 @4V	ativo	12,82	7,65	9,06	6,71	28,7%

(a) Neste cenário não foi usado o conversor CC-CC

(b) As tensões e correntes de consumo da colmeia foram medidos com o Monitoramento e Controle Online (MCO).

(c) As perdas no controlador e conversor foram calculadas em função da corrente equivalente na tensão da bateria.

(d) O pulso de transmissão LoRa durou 412 ms.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, se utilizarmos uma bateria com tensão menor que não necessite de fonte para reduzir a tensão, teríamos um consumo muito menor resultando numa bateria muito menor. A Tabela 7 mostra o consumo simulado para o caso sem o conversor usando o controlador Epsolar e permitindo assim uma autonomia de 11,5 dias onde o excesso de

energia pode ser utilizado para outras funções na colmeia, sejam com outros sensores ou com a adição de resistores e ventiladores para controle térmico na colmeia e maior produção de mel.

Tabela 7 – Consumo de corrente estimado para uma bateria de 4V sem necessidade de conversor

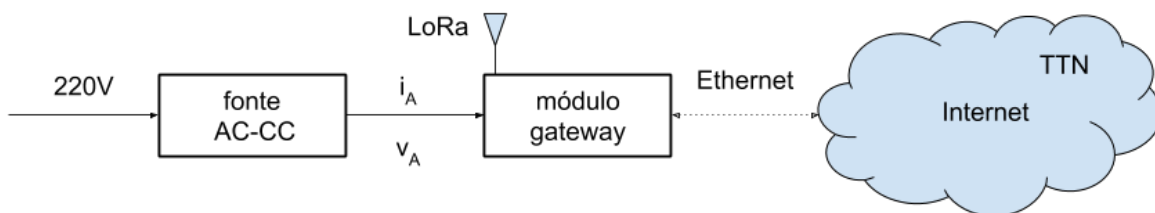
modo de operação	corrente do controlador (mA)	corrente da colmeia (mA)	corrente total (mA)
sleep	1,00	2,68	3,68
transmissão	1,00	49,48	50,48
ativo	1,00	6,71	7,71

Fonte: Elaborada pelo autor.

Módulo gateway

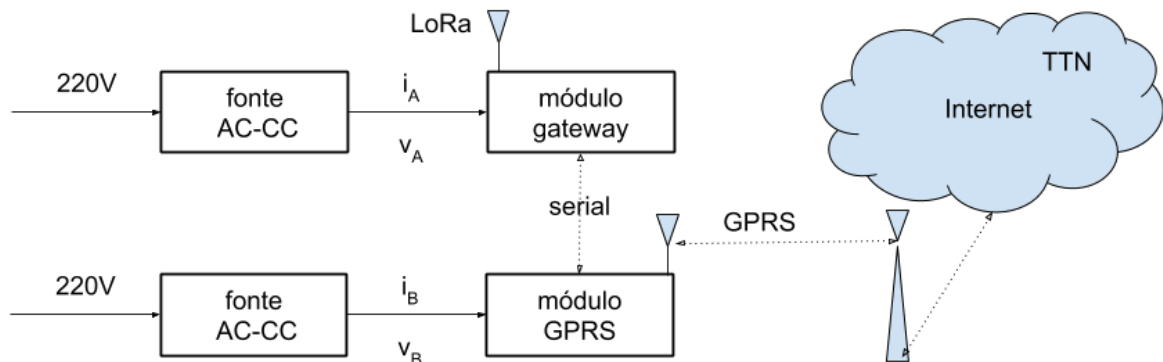
Para a avaliação das melhorias conseguidas em termos de consumo do módulo gateway e também atendimento as necessidades do projeto RFabelhas, foram realizados testes mostrando a situação anterior ao projeto e a atual. Na situação original mostrada no cenário CGW1 o gateway era alimentado por uma fonte CA-CC de 220V/12V @ 3A (ver Figura 35), e realizava a transmissão dos dados recebidos pelo rádio LoRa para a internet e TTN através de um *link ethernet*. Para possibilitar a mobilidade do equipamento e instalação do mesmo em lugares sem acesso a internet por cabo, foi necessário incluir um módulo GPRS para poder realizar a transmissão dos dados. Com isso, foi incluído uma nova fonte de CA-CC de 220 V/12 V @ 2 A para alimentar o módulo GPRS conforme mostrado no cenário CGW2 (ver Figura 36).

Figura 35 – Cenário CGW1 usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo gateway alimentado por fonte CA-CC e transmissão dos dados por Ethernet



Fonte: Elaborada pelo autor.

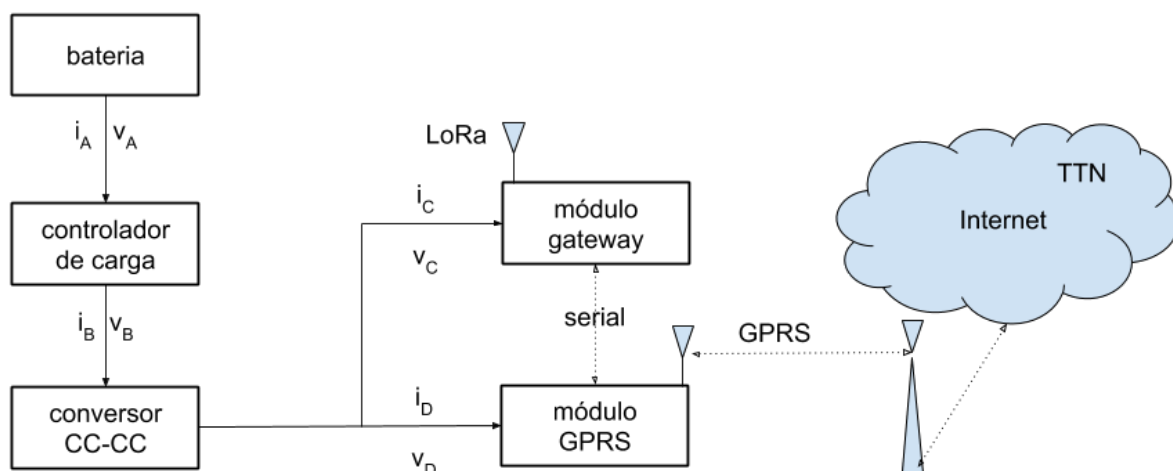
Figura 36 – Cenário CGW2 usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo gateway e GPRS alimentados por fonte CA-CC



Fonte: Elaborada pelo autor.

A alimentação do gateway em lugares distantes da rede de energia comercial só é possível alimentando o módulo com painel solar e bateria, conforme mostrado no cenário CGW3 da Figura 37. Os dados de consumo médio nestas 3 situações mostram claramente uma redução do consumo, principalmente através do uso do modo *power down*, que permite a instalação do gateway usando o cenário CGW3, uma vez que com a redução no consumo de até 6 vezes nos períodos de inatividade do gateway passa a ser viável alimentar o módulo com sistema de alimentação com painel solar de 60W e bateria de 12V @ 12Ah.

Figura 37 – Cenário CGW3 usado medir o consumo e perdas no sistema de alimentação para o módulo gateway e GPRS alimentados sistema de alimentação solar



Fonte: Elaborada pelo autor.

Perdas no controlador de carga

Nos 3 cenários avaliados de alimentação da colmeia, as perdas no controlador de carga foram aproximadamente constantes, correspondentes a 7,61 mA para o controlador Mornigstar SHS10. Essa perda ocorre tanto no período de atividade, transmissão e no modo *sleep*. Considerando os vários ciclos de trabalho da colmeia (ver Tabela 8, percebe-se claramente que é necessário, em futuros trabalhos, investigar melhorias neste controlador, pois as perdas no controlador de carga são uma parcela maior (30%) que o consumo da própria colmeia (20%). O restante da perda do sistema ocorre no conversor CC-CC (50%). Em relação ao controlador de carga, uma solução simples para reduzir seu consumo é eliminar os LEDs de sinalização do estado, mas o ideal é realizar um projeto de um novo controlador para cargas de baixo consumo e painéis solares de baixa potência.

Tabela 8 – Perdas nos estágios do sistema de alimentação de acordo com o modo de operação (ciclo de trabalho) do módulo colmeia, alimentada de acordo com o cenário CC3 @5V

Modo de operação	Corrente média da bateria (mA)	Perda no controlador de carga	Perda no conversor CC-CC	Consumo da colmeia	Autonomia para bateria de 2,4Ah (horas)
5 min	24,86	30,29%	47,87%	21,83%	96,6
15 min	24,61	30,59%	48,35%	21,06%	97,5
30 min	24,55	30,67%	48,47%	20,86%	97,8
2h	24,51	30,73%	48,56%	20,71%	97,9
6h	24,50	30,74%	48,58%	20,68%	98,0
12h	24,49	30,74%	48,59%	20,67%	98,0
24h	24,49	30,75%	48,59%	20,67%	98,0
desliga	7,53	100,00%	0,00%	0,00%	

(a) A corrente média da bateria é calculada em função do ciclos de trabalho do módulo, pois o valor exato não pode ser medido, pois os ciclos durante de 5 minutos a 24 horas

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 9 mostra a variação do consumo conforme o número de LEDs acessos nos dois controladores avaliados. A retirada dos LEDs de sinalização de estado resultariam em uma redução de até 5 mA no caso do controlador EPSOLAR, e consequente ganho na autonomia do sistema.

Perdas no conversor CC-CC

No cenário CC3@5V as perdas no conversor CC-CC, mostradas na Tabela 8, são proporcionais ao consumo da colmeia. No entanto, o conversor sempre utilizado tem um rendimento baixo, que é de de 75% durante os picos de transmissão, 65% durante os segundos no modo ativo e apenas de 60% nos longos períodos em modo *sleep*. Para reduzir estas perdas, visualiza-se duas soluções possíveis: 1) reduzir a tensão da bateria para 6V para alimentar o módulo colmeia diretamente com a bateria, eliminando o conversor

Tabela 9 – Consumo de corrente dos controladores de carga para diferentes estados de funcionamento

Fabricante (Modelo)	Tensão bateria (V)	Consumo sem carga (mA)	Estado dos LEDs
Epever (LS0512E)	>13,5	5,93	LOAD aceso e L1 a L4 acesos
Epever (LS0512E)	13,5 - 12,9	4,95	LOAD aceso e L1 a L3 acesos
Epever (LS0512E)	12,9 - 12,7	3,96	LOAD aceso e L1 a L2 acesos
Epever (LS0512E)	12,7 - 11,8	2,94	LOAD aceso e L1 aceso
Epever (LS0512E)	11,8 - 10,5	2,02 e 2,94	LOAD aceso e L1 piscando
Epever (LS0512E)	<10,5	1,02 e 1,94	L1 piscando
Mornigstar (SH10)	>13,6	3,76	LED verde aceso
Mornigstar (SH10)	13,6 - 11,7	4,60	LED amarelo aceso
Mornigstar (SH10)	11,7 - 11,00	4,60 e 2,80	LED vermelho piscando

(a) Os LEDs L1 a L4 do controlador EPSOLAR indicam o nível de tensão da bateria. O LED LOAD indica que a carga está alimentada e o LED PAINEL indica que o painel solar está fornecendo corrente para a bateria.

(b) Os LEDs VERDE, AMARELO e VERMELHO do controlador Morningstar indicam o nível de tensão da bateria. O LED LOAD indica que a carga está alimentada e o LED PAINEL indica que o painel solar está fornecendo corrente para a bateria.

(c) As correntes e tensões foram medidas com o multímetro.

Fonte: Elaborada pelo autor.

CC-CC, sendo nesse caso necessário projetar um controlador de carga para painéis solares com bateria de 6V (não foi possível realizar estes testes pela inexistência do controlador); 2) projetar um conversor específico para a aplicação que resulte em uma eficiência maior que 90% (trabalho futuro).

4.2 Módulo colmeia

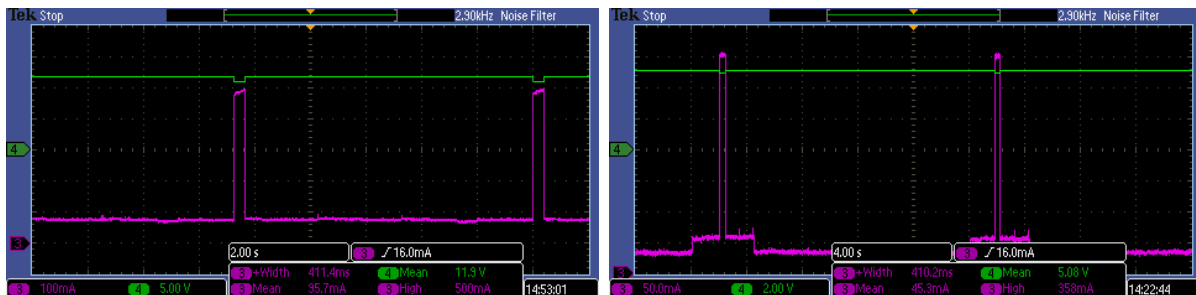
Aqui serão abordados os resultados obtidos quanto ao funcionamento do módulo colmeia, seus diferentes modos de operação, mudança do ciclo de trabalho (intervalo entre atividades) baseado na capacidade de carga restante na bateria. Esses dados são compilados para se formar um algoritmo para cálculo do consumo médio no tempo e consequente autonomia do sistema.

Funcionamento do modo de operação

Para verificar o funcionamento do modo de operação, na primeira etapa de medição o módulo colmeia foi programado para permanecer sempre ativo, em seguida ele passou a entrar em modo *sleep* após realizar as atividades de medição e transmissão dos dados. Conforme mostram os dados da Tabela 6 e ilustram a Figura 38a e 38b, a mudança de modo de operação resulta em significativa redução da corrente consumida pelo módulo. É importante notar que no caso do MODO2, o ciclo de funcionamento da colmeia consiste em 4 momentos que correspondem aos tempos: t1 - a colmeia realiza a inicialização dos

sensores e módulos e realiza a leitura dos mesmos; t2 - o módulo transmite os dados pelo radio LoRa (corresponde ao pico de corrente); t3 o módulo aguarda por 2 segundos alguma informação de atualização pela rádio LoRa; e t4 o módulo entra em modo *sleep* até o início do próximo ciclo. Essas 4 etapas são claramente visíveis na [Figura 38b](#).

Figura 38 – Corrente e tensões no módulo *colmeia* para tempo entre transmissão de 30 segundos, detalhe da medição com osciloscópio



(a) cenário de medição CC1 - original

(b) cenário de medição CC3 - proposto

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados na [Figura 38](#) foram obtidos com o osciloscópio para destacar a diferença entre as correntes nos 4 estados de funcionamento da colmeia. Para visualizar a operação real dessa *colmeia*, sua corrente de alimentação capturada no Monitoramento e Controle Online (MCO) é mostrada na [Figura 39](#). Nesta figura é importante destacar que a transmissão dos dados pela *colmeia* ocorre depois sempre em um período entre 1 minuto e 2 minutos após o tempo programado de sincronismo das *colmeias* e *gateway*. No caso da figura, a primeira transmissão ocorreu as 23h16m14s, e a segunda as 23h21m12s.

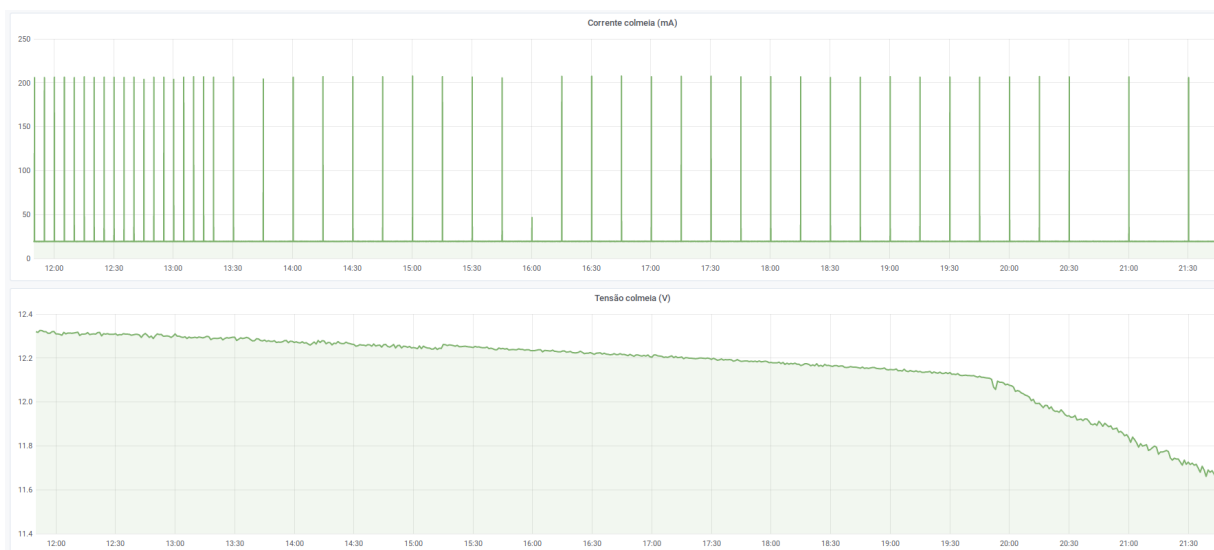
Figura 39 – Monitoramento da corrente no módulo *colmeia* para tempo entre transmissão de 5 minutos, adquirido pelo sistema MCO



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para avaliar a ativação dos diferentes ciclos de trabalho, a colmeia foi mantida alimentada por uma bateria de 1,3A h através do controlador de carga e conversor CC-CC, conforme ilustra o cenário CC3. O resultado do monitoramento pelo Monitoramento e Controle Online (MCO) mostra claramente o chaveamento dos modos de operação a medida que a bateria é descarregada pelo módulo. A Figura 40 mostra o chaveamento do ciclo de 5 minutos para 15 minutos e para 30 minutos.

Figura 40 – Corrente e tensões no módulo colmeia para uma descarga completa de bateria de 12V @1.3Ah com algoritmo de controle por tensão da bateria, adquirido pelo sistema MCO



Fonte: Elaborada pelo autor.

Medição de consumo e tempo

O consumo da colmeia e os tempos de cada etapa do funcionamento são mostrados na Tabela 10. Os dados mostram claramente que o uso do modo *sleep* reduz a corrente tanto consumida pela colmeia como as perdas do conversor CC-CC. Além disso, merece destaque a redução que se pode conseguir caso se alimente o sistema com uma tensão menor (4 V). Experimentos com tensões menores que 3,8 V mostraram que o rádio LoRa utilizado não realiza transmissões neste caso, e estabeleceu-se assim o patamar mínimo em 4 V. Os tempos medidos para o ciclo de operação da colmeia foram: inicialmente 2 segundos de atividade antes do pulso de transmissão; 400 milissegundos para a transmissão; janela de espera de algum retorno da transmissão de 2 segundos após a transmissão; o restante do tempo em modo *sleep* conforme o modo de operação determinado pela tensão da bateria. Apesar de o tempo de transmissão, poder variar dependendo da quantidade de bits e do fator de espalhamento usado na transmissão LoRa, ele é pouco significativo na média de consumo da colmeia.

Tabela 10 – Consumo de corrente medido com o Monitoramento e Controle Online (MCO) para o sistema de alimentação do módulo colmeia

Cenário	Modo de operação	Corrente bateria @12V (mA)	Corrente conversor @12V (mA)	Corrente colmeia (mA)	Tensão colmeia (V)
CC3 @5V	ativo	34,3	26,6	37,9	5,0
CC3 @5V	transmissão	175,8	168,7	315,1	5,0
CC3 @5V	sleep	24,5	16,9	18,1	5,0
CC3 @4V	ativo	23,4	15,84	21,6	4,0
CC3 @4V	transmissão	81,0	73,98	161,0	4,0
CC3 @4V	sleep	18,2	10,33	8,56	4,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Módulo gateway

Essa sessão trata dos resultados obtidos no funcionamento do *gateway*, seus diferentes modos de operação, consumo de corrente, em função das modificações realizadas.

Funcionamento do modo de operação

O *gateway* teve sua lei de controle realizada com base na energia restante na bateria. De forma semelhante ao módulo colmeia, ele opera com diferentes tempos de *wake up* e tempos de atividade conforme o indicador de energia do sistema de alimentação cai (tensão na bateria). A [Figura 41](#) mostra as correntes e tensões do módulo *gateway* enquanto está em um ciclo de atividade a cada 5 minutos. Por ele ser a componente do sistema RFabelhas com maior consumo, e também o que é mais sensível ao controle por tempo de desligamento, também resultou na maior redução dos componentes previstos para a sua alimentação. No entanto, por ser o ponto de transmissão de todas as informações para a internet, onde toda a parte de processamento é realizada, é fundamental que as colmeias estejam sincronizadas com ele, de modo que suas transmissões sejam recebidas e retransmitidas.

Consumos de corrente e tempos de diferentes operadoras de GPRS

A definição da operadora a ser utilizada depende de diferentes fatores, tais como custo do pacote de dados, cobertura e também a tecnologia utilizada por essa operadora. Para a definição das características do sistema de alimentação, as correntes de pico e os tempos de conexão podem representar um importante fator de projeto. Buscou-se realizar a medição dos consumos de corrente de pico e médios para as 4 operadoras com cobertura no IFSC Campus São José (latitude -27.608394 e longitude -48.632988), no entanto, para as operadoras Oi, Vivo e Claro, durante o processo de registro do cartão

Figura 41 – Monitoramento da corrente e tensões no módulo gateway para tempo de *wake-up* de 15 minutos, adquirido pelo sistema MCO



Fonte: Elaborada pelo autor.

SIM, as correntes de pico ultrapassavam os 1000 mA, fazendo com que modem GPRS reiniciasse continuamente devido a queda na tensão interna. Isso impossibilitou o uso dessas operadoras, e conseqüentemente a obtenção de dados de corrente de pico e localização das Estação Radio Base (ERB)s¹. Em relação a operadora TIM, foi possível obter os dados da tecnologia utilizada DCS_MODE, e localização da ERB: latitude = -48.627739 e longitude = -27.603559, portanto localizada a 750m da localização do gateway, conforme mostra a Figura 42. Apesar de não se conseguir estabelecer a conexão completa com outras operadoras, foi possível obter o dado da tecnologia utilizada pela Claro (EGSM_MODE) e Vivo (GSM850_MODE).

4.4 Sincronismo entre módulos gateway e colmeias

A verificação do sincronismo entre os módulos é feita através do sistema Monitoramento e Controle Online (MCO), analisando as correntes dos módulos gateway e colmeia. As correntes durante o período de repouso são indicadas pelos valores mais baixos na Figura 43. Essa corrente reduzida ocorre em função do sistema de controle de potência implementado neste trabalho, que reduz a corrente dos módulos gateway e

¹ Como o sistema de alimentação atual não permite a manutenção da conexão com essas operadoras, seria necessário o desenvolvimento de um sistema de alimentação que suportasse tais picos de corrente. A característica exigida é atender ao surto de corrente de 100 mA para até 2 A durante 600µs

Figura 42 – Localização da ERB da TIM e do gateway



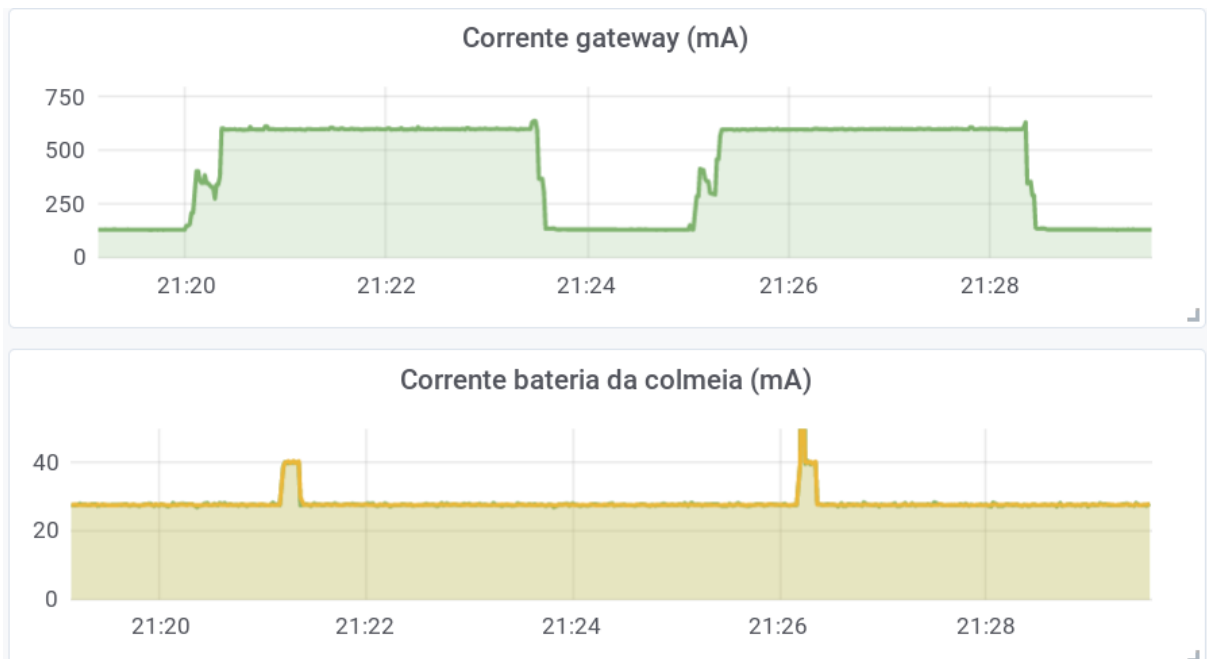
Fonte: Elaborada pelo autor.

colmeia colocando os em *power-down* ou *sleep*, respectivamente. A transmissão as vezes é capturada pelo monitoramento através do pico de tensão na corrente da bateria da colmeia, embora outras vezes não se consiga detectar pois o pico de corrente dura menos que 1 segundo. É importante notar que tanto na Figura 43a, na qual ambos módulos estão em atividade a cada 5 minutos, como na Figura 43b onde o gateway reduziu o tempo de atividade para 15 minutos, o sincronismo entre os módulos ocorre. Na Figura 43b, as transmissões indicadas em torno das 21h20 e 21h25 não são recebidas pelo gateway, mas essa é exatamente a proposta do trabalho, pois naquele momento a energia da bateria no gateway ainda permitiu a transmissão a cada 5 minutos, enquanto a carga da bateria do gateway chaveou este módulo para um ciclo de trabalho de 15 minutos. Como não a comunicação entre os módulos, exceto as 12h00 de cada dia na qual é feito um ajuste dos relógios dos módulos *Real Time Clock* ou Relógio de Tempo Real (RTC). Este horário foi escolhido pois provavelmente os painéis solares estão carregando e alimentando todos os módulos do sistema.

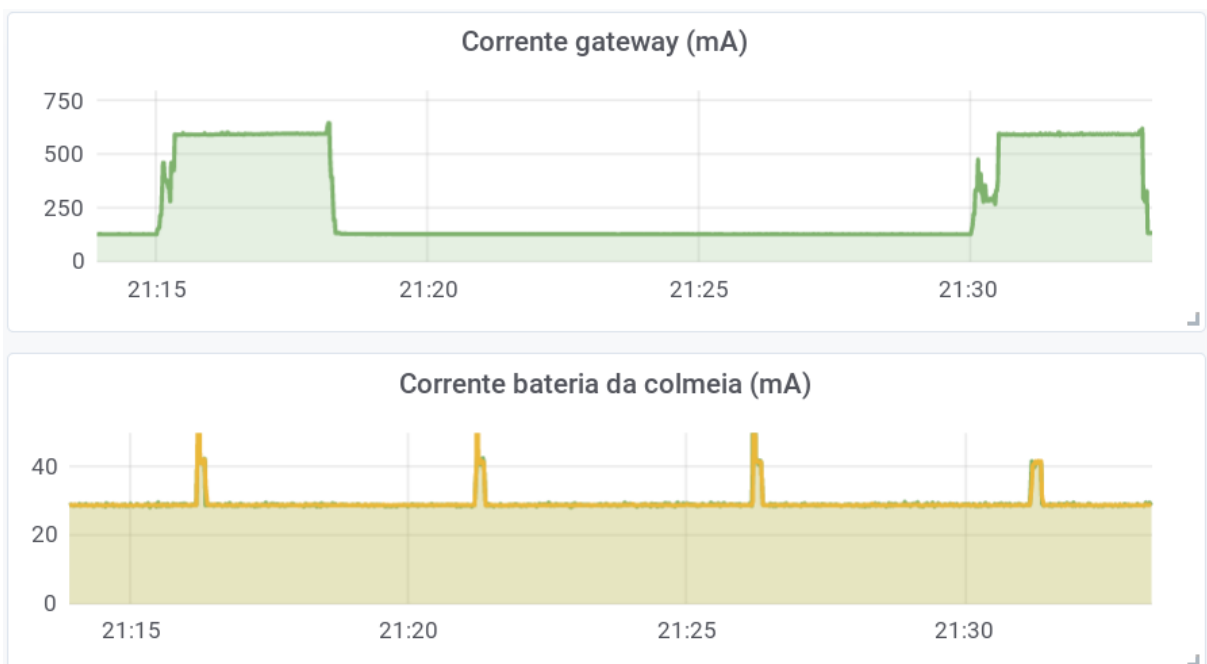
Para verificar a recepção dos dados na nuvem, na aplicação da TTN é possível monitorar *on-line* a atividade de cada colmeia no console disponibilizado². A Figura 44 mostra duas situações que ilustram o funcionamento do controle de potência implementado neste trabalho. Na Figura 44a os dados transmitidos pela colmeia a cada 5 minutos, são recebidos apenas a cada 15 minutos pois o gateway está um ciclo de atividade de apenas

² https://console.thethingsnetwork.org/applications/colmeias_ifsc_v2/data

Figura 43 – Sincronismo entre a transmissão das colmeias e períodos de atividade do gateway, dados obtidos com o Monitoramento e Controle Online (MCO)



(a) Gateway em atividade a cada 5 minutos e colmeia transmitindo a cada 5 minutos



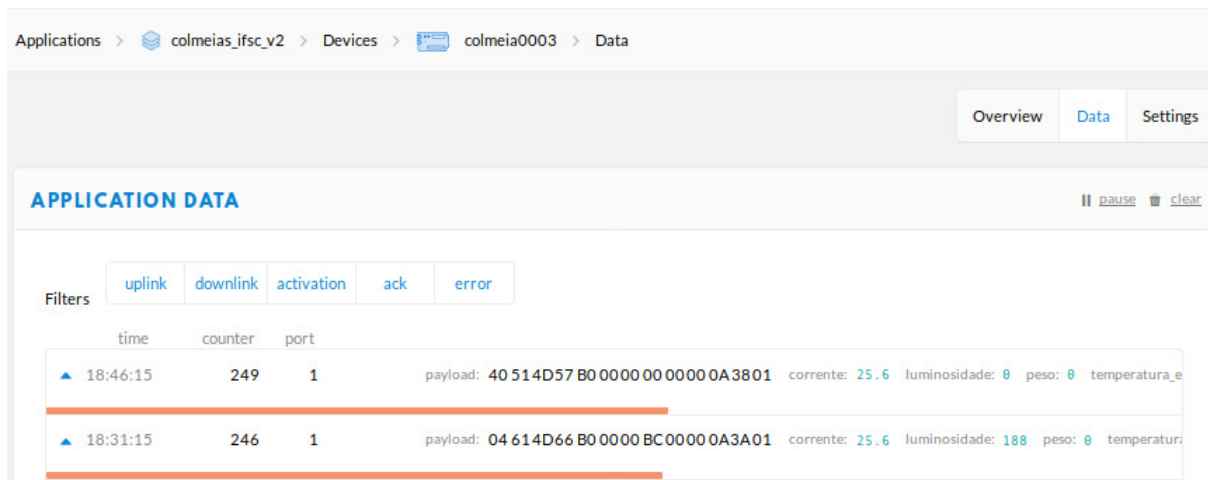
(b) Gateway em atividade a cada 15 minutos e colmeia transmitindo a cada 5 minutos

Nos gráficos da corrente da bateria da colmeia a atividade da mesma é mostrada através da corrente que passa de 30 mA para 40 mA. O pico de corrente resultante da transmissão LoRa pode ser percebido no segundo pulso em (a) e nos três primeiros em (b).

Fonte: Elaborada pelo autor.

15 em 15 minutos. Na [Figura 44b](#) a recepção ocorre a cada 5 minutos.

Figura 44 – Recepção dos dados das transmissões das colmeias na aplicação na TTN



(a) recepção de dados a cada 15 minutos

time	counter	port	payload	corrente	luminosidade	peso	temperatura_exter
21:31:16	86	1	E0 814D 8E B0 00 00 00 00 0A 26 01	25.6	0	0	temperatura_exter
21:26:16	85	1	EC 814D 8E B0 00 00 00 00 00 0A 27 01	25.6	0	0	temperatura_exter
21:21:15	84	1	DC 814D 8E B0 00 00 00 00 00 0A 28 01	25.6	0	0	temperatura_exter
21:16:16	83	1	E0 814D 93 B0 00 00 00 00 00 0A 28 01	25.6	0	0	temperatura_exter

(b) recepção de dados a cada 5 minutos

* Nesta figura é necessário observar a coluna time, que mostra o momento em que o dado chegou na TTN, e a coluna counter que mostra o contador de transmissão. A perda de duas transmissões é visível pelo salto do contador de 246 para 249.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5 Comparação entre o sistema RFabelhas e outros sistemas

As tabelas 11 e 12 apresentam quadros comparativos das características das tecnologias de transmissão das informações e sistemas de alimentação utilizados em alguns sistemas comercializados principalmente na Europa e nos Estado Unidos, entre estes analisamos: Beehivemonitoring³, ApisTech⁴, Pollenity⁵, Solutionbee⁶.

Custo de um sistema de monitoramento

Em relação aos custos do sistema RFabelhas, realizamos duas comparações. A primeira comparação é em relação ao próprio sistema, antes de incluir as melhorias deste

³ <https://beehivemonitoring.com/pt>

⁴ <https://apistech.eu/pt>

⁵ <https://pollenity.com/product/uhive>

⁶ <https://solutionbee.com>

Tabela 11 – Comparação das características de transmissão do sistema proposto com outros sistemas comerciais existentes

Sistema de monitoramento	Transmissão para internet	Tempo entre transmissões	Transmissão entre dispositivos	Distância entre colmeias	Número de colmeias
RFabelhas	GPRS ou Ethernet	5 minutos (a)	LoRa	10 km	50 (b)
beehivemonitoring	GPRS	1 hora	BLE	200 m	50
ApisTech	GPRS	1 hora	BLE	200 m	100
Pollenity	WiFi	(c)	não	(c)	1
Solutionbee	GPRS ou WiFi	30 minutos	BLE	200 m	100

(a) Este tempo depende da carga da bateria, mas em dias normais com sol o sistema tende a transmitir de 5 em 5 minutos, podendo reduzir a taxa para até 1 vez por dia.

(b) O número de colmeias máximo não é fixo. O valor de 50 é um base para transmissões a cada 5 minutos. Aumentando o tempo entre as transmissões é possível incluir mais colmeias no sistema.

(c) Este sistema monitora apenas uma colmeia, e depende do alcance do WiFi.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Comparação das características de alimentação e tipos de sensores existentes do sistema proposto com outros sistemas comerciais existentes

Sistema de monitoramento	Off-grid	Autonomia	Painel solar	Sensores
RFabelhas	Sim	(a)	sim	temperatura interna e externa, umidade relativa interna e externa, peso, iluminação, carga bateria
Beehivemonitoring	Sim	3 meses	não	temperatura interna, peso e ruído
ApisTech	Sim		não	temperatura interna, umidade, peso, acelerômetro
Pollenity	Não	6 meses	Não há	temperatura interna, umidade, ruído
Solutionbee	Sim	40 dias	sim	temperatura interna e peso

(a) A autonomia da bateria é de 8 dias sem sol, mas em condições normais o sistema deve funcionar ininterruptamente por mais de 1 ano.

Fonte: Elaborada pelo autor.

trabalho, mostrado na [Tabela 13](#). A segunda comparação é em relação aos sistemas comerciais apresentados anteriormente.

Na comparação com os sistemas comerciais encontrados adotamos como parâmetros de custo os preços praticados por colmeia supervisionada e os preços fixos independentes da quantidade de colmeias, que normalmente envolvem *software* de monitoramento e *hardware* de coleta das informações (*gateway*). Não foram adicionados os custos de instalação e adequação das colmeias aos sistemas. Conforme mostra a [Tabela 13](#) o sistema RFabelhas tem características únicas que o diferenciam das atuais soluções no mercado. Ele tem autonomia de 5 dias para situações climáticas em que quem haja sol, mas a sua alimentação por painel solar e bateria o torna ideal para as condições de instalação nos lugares em que se encontram os apiários. A tecnologia de transmissão utilizada entre o módulo *gateway* e

Tabela 13 – Comparação de custos do sistema proposto com outros sistemas comerciais existentes

Sistema de monitoramento	gateway(a)	1 colmeia(a)	10 colmeias	15 colmeias	20 colmeias
RFabelhas v1 (b)	2,340.00	710.00	9,440.00	12,990.00	16,540.00
RFabelhas v2 (c)	1,777.00	528.00	7,057.00	9,697.00	12,337.00
RFabelhas v2 (d)	1,777.00	499.00	6,767.00	9,262.00	11,757.00
Beehivemonitoring	379.14	587.88	6,257.94	9,197.34	12,136.74
Pollenity	0.00	805.14	8,051.40	12,077.10	16,102.80
Solutionbee	0.00	1,107.80	11,078.00	16,617.00	22,156.00

(a) custo do módulo considerando valores comerciais dos módulos utilizados no protótipo

(b) sistema original sem o controle proposto

(c) sistema com o controle de potência proposto, com todos sensores EPAGRI

(d) sistema com o controle de potência proposto, com apenas sensor de temperatura interna, peso

Fonte: Elaborada pelo autor.

as **colmeias** possibilita uma distância de até 10 km entre os dispositivos, oferecendo uma solução completa na qual o apicultor pode monitorar colmeias de diferentes localizações com apenas um **gateway** reduzindo assim o custo inicial e operacional do sistema. Isso porque com apenas um **gateway** pode se monitorar uma região com raio até 10 km, enquanto as outras aplicações disponíveis no mercado que utilizam a tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE) para a transmissão de seus dados possibilitam distâncias muito menores, necessitando de mais dispositivos de retransmissão e muitas vezes inviabilizando seu funcionamento por estarem em locais de difícil conexão GPRS.

Para o cálculo dos custos do sistema RFabelhas na Tabela 13 foram adicionados os custos dos componentes comprados de forma individual para o protótipo. Custo esse que no seu preço final deve ser reduzido tanto pela adoção de outros componentes quanto pela escalabilidade dos utilizados. Além do custo, é necessário pensar na precificação do produto que deve incluir além dos custos individuais, os custos de mão de obra e espaço para produção e finalmente a margem de lucro a ser obtida. Assim sendo, tendo já no protótipo um custo equivalente ou menor que os demais produtos disponíveis e com uma funcionalidade muito maior acreditamos que o produto tem um imenso potencial no mercado. Alguns dos componentes acabam elevando os custos e serão mais difíceis de serem modificados, são eles: os dispositivos LoRaWAN, os painéis solares e as baterias.

Autonomia sem sol

Para estimar a capacidade da bateria e sua autonomia, tanto para o módulo **gateway** como para o módulo **colmeia**, foram determinados os valores das tensões de referência dos modos de operação a partir das tensões mínimas e máximas da parte linear da descarga da bateria. Nesse cálculo é considerado o valor da corrente média para cada modo de operação. A Tabela 14 mostra os dados de autonomia obtidos para o **gateway**, e

a Tabela 15 da colmeia. Conforme mostram essas tabelas, operando com os limiares de tensão especificados, o tempo de autonomia esperado é de 120 horas (5 dias) nos dois casos.

Tabela 14 – Os valores das tensões de referência e capacidade de carga estimada das baterias e respectivos modos de operação. Para gateway com bateria de 12V @12Ah

modo de operação	tensão na bateria (V)	capacidade restante	corrente média (mA)	tempo (h)
5 min	13,1 - 13,0	1,00C - 0,89C	285,0	4,63
15 min	13,0 - 12,8	0,89C - 0,69C	145,0	16,55
30 min	12,8 - 12,6	0,69C - 0,54C	110,0	16,36
2h	12,6 - 12,5	0,54C - 0,43C	83,8	15,76
6h	12,5 - 12,4	0,43C - 0,32C	77,9	16,94
12h	12,4 - 12,2	0,32C - 0,21C	76,5	17,26
24h	12,2 - 11,5	0,21C - 0,00C	75,7	33,28
desliga	11,5 - 0,0	0,00C - 0,00C	*	
Total de horas prevista				120,79

* A corrente de consumo no modo desligado é a própria corrente do controlador de carga utilizado. Os valores medidos são 2mA para o controlador LS0512E

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Os valores das tensões de referência e capacidade de carga estimada das baterias e respectivos modos de operação. Para colmeia com bateria de 12V @2.6Ah, e controlador Epsolar Landstar LS0512E

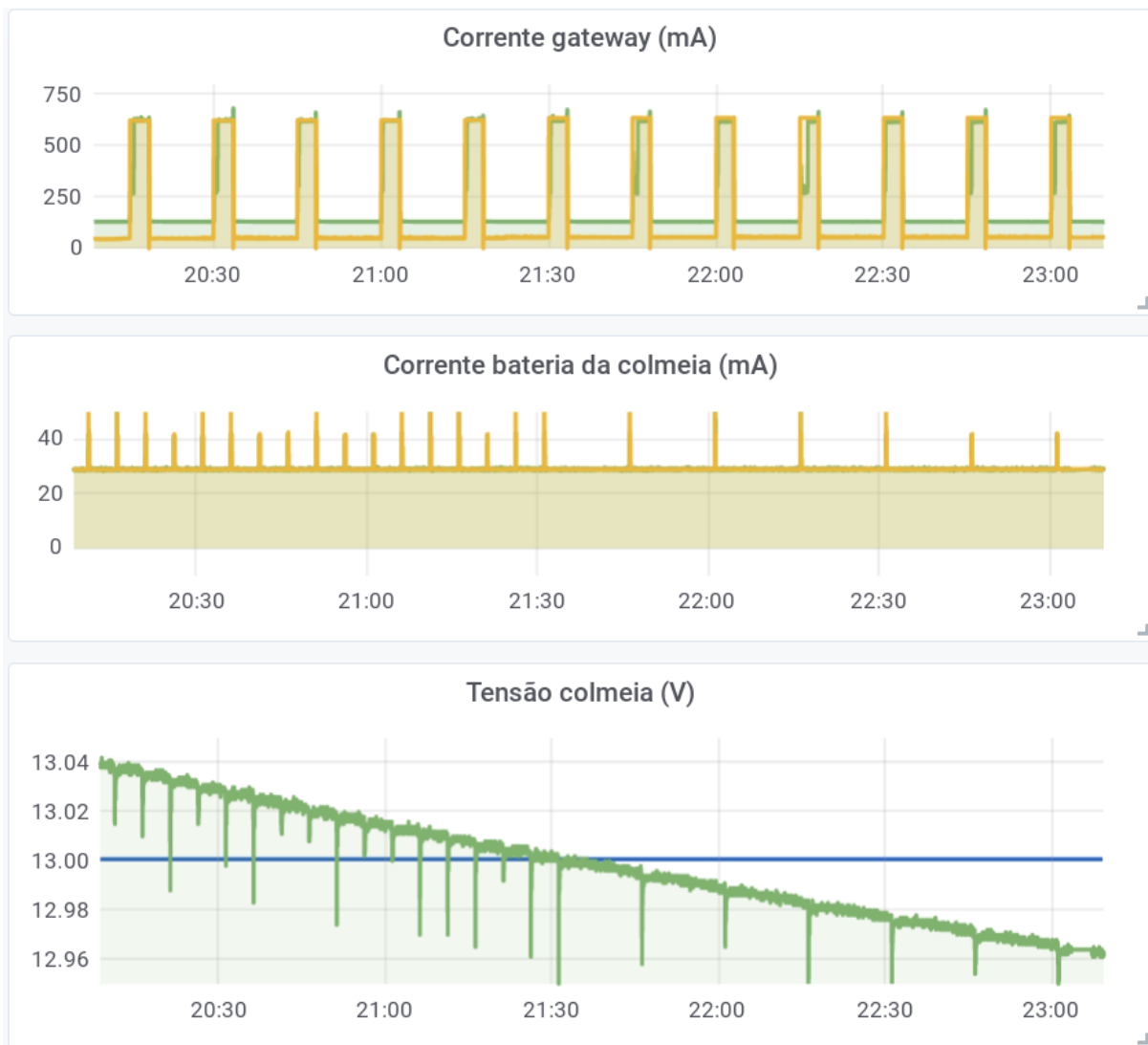
modo de operação	tensão na bateria (V)	capacidade restante	corrente média (mA)	tempo (h)
5 min	13,1 - 13,0	1,00C - 0,90C	23,0	11,32
15 min	13,0 - 12,8	0,90C - 0,70C	21,7	24,01
30 min	12,8 - 12,7	0,70C - 0,54C	21,3	19,51
2h	12,7 - 12,6	0,54C - 0,43C	21,1	13,57
6h	12,6 - 12,5	0,43C - 0,32C	21,0	13,60
12h	12,5 - 12,4	0,32C - 0,21C	21,0	13,61
24h	12,4 - 11,5	0,21C - 0,00C	21,0	25,99
desliga	11,5 - 0,0	0,00C - 0,00C	*	
Total de horas prevista				121,61

* A corrente de consumo no modo desligado é a própria corrente do controlador de carga utilizado. Os valores medidos são 2mA para o controlador LS0512E

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em teste de bancada o módulo colmeia permaneceu em funcionamento por 110 h, mostrando que o modelo usado para estimação da autonomia é válido. A Figura 45 mostra a variação da corrente e da tensão da bateria para o módulo colmeia, na qual é possível perceber os diferentes modos de operação.

Figura 45 – Medições da corrente e tensão da bateria na operação do módulo colmeia, dados obtidos com o Monitoramento e Controle Online (MCO)



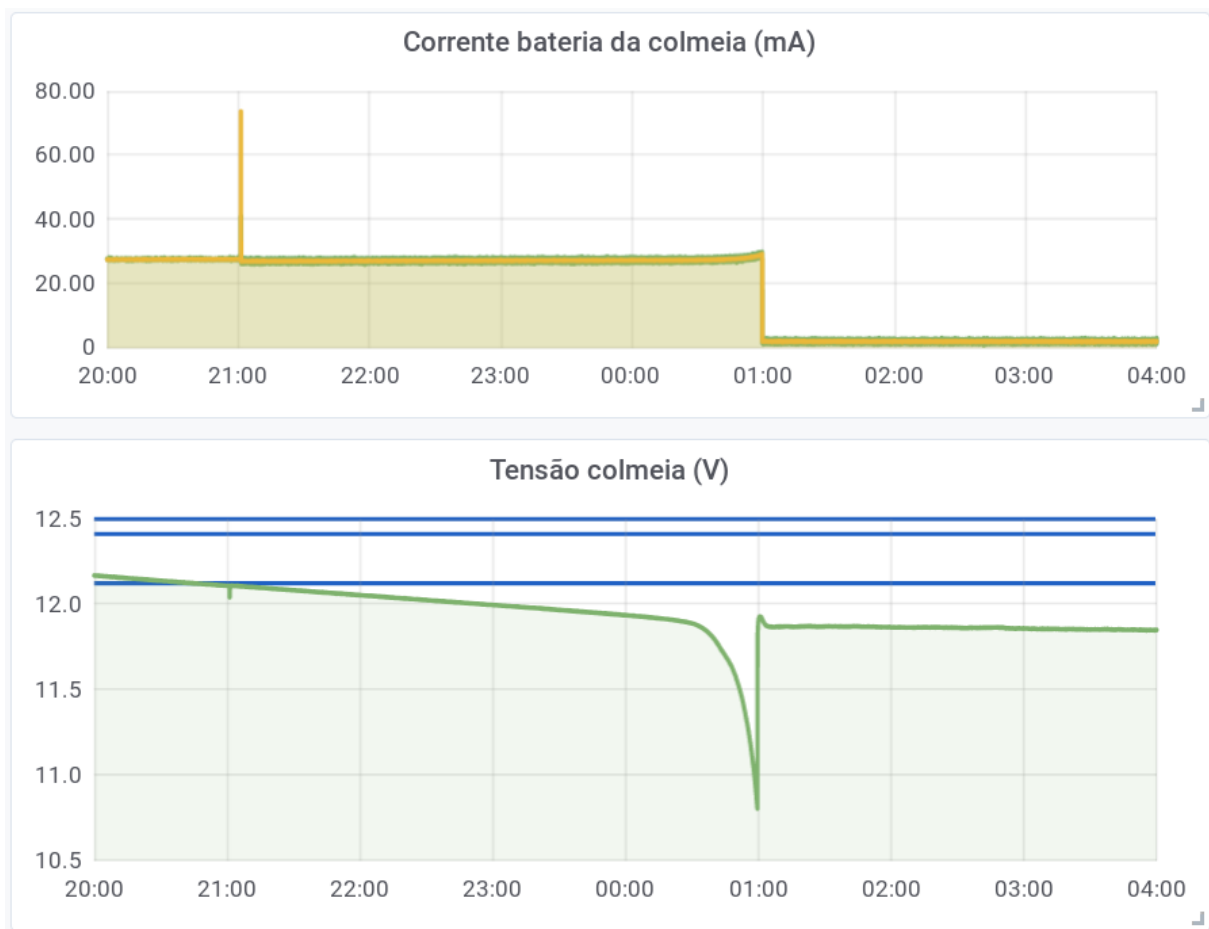
Fonte: Elaborada pelo autor.

A tensão de desligamento da carga é determinada pelo controlador de carga, que no caso dos testes foi utilizado o modelo Epsolar Landstar LS0512E cuja tensão de desligamento do fabricante está predefinida em 11,1 V, no entanto os resultados obtidos na [Figura 46](#) mostram que a partir de 11,8 V, a tensão da bateria tem uma queda abrupta, e em 20 minutos a tensão atinge 10,8 V na qual o controlador desliga a carga, passando a uma corrente de apenas 2,2 mA que é a corrente de auto-consumo do controlador.

Atendimento às especificações

A [Tabela 16](#) mostra um quadro comparativo no qual podemos ver claramente que as características necessárias e desejadas para o módulo colmeia foram atendidas com as melhorias feitas neste projeto. Detalhando um pouco pode-se destacar que anteriormente

Figura 46 – Os valores da tensão de desligamento da carga (Epsolar Landstar LS0512E) para o módulo colmeia



Fonte: Elaborada pelo autor.

as colmeias (da versão v1) já funcionavam *off-grid* e podiam ser transportadas, mas devido ao tamanho do painel solar necessário (30 W) e a bateria utilizada (12 Ah), esse transporte não era simples, pois o painel necessitava de uma base externa para se fixado.

O peso e dimensão dos componentes apesar de não ser um problema grave do sistema original, dificultava o transporte dos módulos quando necessário. Para mostrar a redução tanto de peso como de tamanho do sistema de alimentação dos módulos, os principais componentes foram medidos e comparados. A análise dos dados mostrou que houve uma redução de 60% do peso do módulo *colmeia* (total de 4,4 kg para 1,8 kg), e de 81% do peso do módulo *gateway* (total de 22,7 kg para 4,4 kg). Em relação ao tamanho dos componentes, o principal a se destacar é a redução no tamanho dos painéis solares a serem utilizados. O painel da colmeia passa de 564 x 360⁷ para um de 350 x 252⁸ (uma

⁷ <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FFile-1534542148.pdf>

⁸ <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FFile-1534450601.pdf>

redução de 56.6% em área), enquanto que o painel do gateway tem sua área reduzida em 48,7%, passando de 585 x 676⁹ para 564 x 360.

Outra característica que podia gerar problema era a falta de uma supervisão da carga da bateria e funcionamento do sistema de alimentação, fazendo com que a parada da transmissão dos dados não pudesse ser diagnosticada remotamente. Com a introdução do sensor de corrente e tensão, e o algoritmo de controle de potência, foi possível reduzir o tamanho da bateria e do painel solar, tornando o sistema mais leve e portátil, pois o painel solar agora ocupa uma área menor que o teto da caixa de abelhas, podendo ser colocado diretamente sobre o mesmo. O uso desse sensor permitiu ainda, através do envio dos valores medidos de tensão e corrente, determinar se o painel está funcionando e também conhecer a carga da bateria antes da interrupção das transmissões. A estratégia de variar o intervalo entre as transmissões permitiu que as colmeias transmitam durante o dia, em intervalos de 5 em 5 minutos, e durante a noite reduzam esse intervalo normalmente para 15 em 15 minutos. No caso de falta de irradiação solar para a carga das baterias, esse intervalo pode ser reduzido em até 1 vez por dia.

Tabela 16 – Quadro comparativo do módulo *colmeia* original (versão v1) e o atual (versão v2) quanto ao atendimento das especificações

Característica	Especificação	Colmeia v1	Colmeia v2
Operação off-grid	necessário	sim	sim
Deve ser portátil	necessário	bateria e painel dificultavam	sim
Colmeia com painel e bateria compatível com uma caixa de abelhas	desejada	painel solar grande	redução do painel solar
Peso do equipamento reduzido	desejada	excesso de peso	redução significativa
Reduzir o intervalo de transmissão sempre que possível	no mínimo de hora em hora	intervalos fixos	intervalos variáveis depende da carga da bateria
Permitir a inclusão ou retirada de sensores (modular)	desejada	sim	sim
Possibilitar alertar para falta de bateria	melhoria na operação	não	via banco de dados

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação ao módulo *gateway*, as melhorias implementadas possibilitaram que o módulo antes alimentado por fonte CA-CC ligado a rede de energia e conectado a internet via cabo *ethernet*, pudesse agora ter a portabilidade necessária para ser instalado na melhor localização dentro da propriedade do apicultor. O uso do *GPRS* e da estratégia de controle possibilitou a redução da potencia média consumida e ao mesmo tempo a realização da conexão com a internet sem o uso de cabos. Apesar de muitas vezes essa característica não ser extremamente importante, pois a transmissão entre as colmeias e o *gateway* é feita por *LoRa*, ela permite alocar a *gateway* no lugar onde tem a melhor cobertura da rede celular.

⁹ <https://www.neosolar.com.br/loja/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FFile-1534785128.pdf>

A modularidade do sistema permite que futuramente novos sensores e aplicações possam ser adicionados, visando facilitar ainda mais o manejo e monitoração da saúde e produtividade das abelhas. Essas características tornam o sistema *RFabelhas* ainda mais atrativo, pois comparando com os diferentes sistemas do mercado, percebe-se que algumas melhorias podem ser feitas, seja pela adição de novos sensores, como pelo desenvolvimento de aplicativos para smartphones e computadores *desktop* utilizando os dados coletados para diagnosticar as colmeias de abelhas.

O sistema implementado usa uma tecnologia de transmissão entre as colmeias e o *gateway* que tem alcance de até 12 km [LoRaWAN 2019]. Alimentado a partir de painéis solares que também eliminam a necessidade de troca de baterias que outros sistema possuem. O número de sensores no protótipo está limitado ao mínimo solicitado pelo cliente *EPAGRI* que pode ser ampliado uma vez que dispõe de muito tempo de processamento ainda.

As especificações do projeto foram atendidas de forma plena, atendendo assim o que foi especificado pela *EPAGRI* como suas necessidades de monitoramento e armazenamento de dados, e também possibilitando aos apicultores do estado um melhor entendimento da sua produção e possíveis ganhos de segurança e controle de mortalidade. Acreditamos que fornecendo uma maior inteligência aos produtores, os custos de produção também podem ser reduzidos, seja por necessitar de menos visitas e inspeções como por prever melhor a colheita e os lugares de melhor desempenho para a localização das colmeias. A redução do consumo dos dispositivos possibilitou o uso de componentes menores permitindo assim o seu transporte para novas áreas de acordo com a necessidade do apicultor, de forma simples, sem estar mais preso a uma conexão cabeada, podendo ser instalado em lugares remotos desde que este tenha cobertura de sinal 2G/*GPRS* de alguma operadora celular.

Para o futuro espera-se ainda muitas modificações ao sistema, de modo a reduzir ainda mais seu consumo e custo, para que ele possa começar a ser comercializado e utilizado pelos apicultores de todo estado como uma solução pronta, de rápido retorno de investimento e com uma aplicação de assinatura mensal para diagnóstico e tratamento das informações obtidas.

5 Conclusão

A proposta do trabalho era a realização de estudos visando reduzir o consumo dos módulos *colmeia* e *gateway* para permitir que estes pudessem ser alimentados por sistema de alimentação por painel solar e baterias de pequeno tamanho e peso.

Para atingir este objetivo foram feitos ajustes das configurações da *colmeia* e *gateway*, e também foi implementada uma estratégia de controle dos ciclos de atividade desses módulos, de modo a poder reduzir o consumo médio. No caso do *gateway*, alguns dispositivos da Raspberry Pi que não são utilizados na implementação atual foram desativados, e assim também foi feito com os serviços desnecessários. Com isso, conseguiu-se uma redução no consumo de corrente de cerca de 233 mA no *gateway*, e no caso da *colmeia* a redução foi de aproximadamente 40 mA. Apesar de serem valores significativos, a redução no consumo não era suficiente para viabilizar a alimentação do módulo *gateway* por baterias que fossem portáteis. Assim, a solução encontrada foi estabelecer um controle de tempo de atividade desse módulo baseado no circuito *Real Time Clock* ou Relógio de Tempo Real (RTC).

A adoção de um algoritmo de controle de ciclo de trabalho baseado na tensão da bateria de alimentação, tanto no módulo *colmeia* como no *gateway*, permitiu manter a comunicação possível entre estes módulos e ao mesmo tempo reduzir em 88% a corrente média¹ da *colmeia*, resultando em uma autonomia de 105 horas para uma bateria de 2,6 Ah/12V. Essa redução foi acompanhada pela redução do peso final do protótipo da *colmeia* em 60 %.

De forma semelhante, o algoritmo de controle trouxe uma redução no consumo do *gateway* que permitiu que este funcionasse independentemente da rede elétrica com componentes que permitem a portabilidade do módulo. Com isso, foi possível reduzir em 85% o consumo médio², e uma redução de 81 % em peso. Além disso conseguiu-se garantir uma autonomia de 118,6 horas para uma bateria de 12 Ah/12 V e um funcionamento independente de conexão à rede elétrica e *ethernet*.

A estratégia de controle utilizada em relação às especificações propostas e ao funcionamento do sistema permite sempre que esse opere priorizando o módulo com menor carga de bateria de modo que tenha seu tempo ativo bem utilizado. Portanto, é por *design* do sistema que algumas perdas de dados ocorram, tanto por algum assincronismo na transmissão que será recebida em seguida no próximo despertar (pela sua natureza randômica) como por algum modo de operação diferente que os sistemas estejam. É

¹ Redução de 200 mA para 25 mA, em um ciclo de trabalho variando de 5 minutos até 6 horas

² Redução de 818 mA para 121 mA

importante ressaltar que a informação não transmitida não é essencial e sim necessária para que o sistema se mantenha ativo.

A proposta de sincronizar o **gateway** com a colmeia através de um **RTC** mostrou-se altamente viável, mas no estado atual foi deixada uma folga no tempo ativo do **gateway**, pois o processo de conexão do rádio **LoRa** não ocorre sempre na primeira tentativa, além disso a conexão do GPRS a rede celular também tem um tempo variável, e por isso, considerou-se o minuto inicial como tempo em que o **gateway** está indisponível para as colmeias. Assim as transmissões dessas foram sincronizadas com 1 minuto de atraso em relação a hora marcada de *wake-up*, havendo portanto melhorias nesse processo de conexão, sendo possível reduzir esta previsão de conexão e aumentar a autonomia do sistema ou reduzir o tamanho da bateria.

Apesar de ter sido visto a possibilidade de sincronizar os relógios das colmeias a partir do **gateway** ou da própria nuvem, através de um serviço que utilize o campo de retorno da aplicação na *The Things Network* (**TTN**), esta etapa não foi implementada. Apesar disso, a precisão atual dos relógios dos módulos **RTC** DS3231 utilizados (de 2ppm [Integrated 2015]) permite deixar o sistema sem nenhuma sincronização nova durante um ano, resultando no máximo em 62 segundos de diferença³. Ou seja, teríamos no máximo uma diferença entre os relógios de 1 minuto em um ano, que nos permitiu suprimir a ressincronização diária prevista inicialmente.

Implementou-se um sincronismo de relógios dos módulos de forma a permitir que houvesse controle do chaveamento de modo de operação, garantindo que as especificações mínimas de transmissão e autonomia fossem atendidas. Dessa forma, mostrou-se que o chaveamento resulta em redução da média de consumo, pois na maior parte do tempo o módulo fica em *power down* (*sleep*). Entre o modo de 5 min para o 24 horas, a diferença de consumo médio para a colmeia é de 0,5 mA, e para o **gateway** de 190 mA. Da forma que está implementado é possível adicionar novas funcionalidades, tais como realizar transmissões com menor intervalo ao nascer e pôr do sol, uma vez que próximo desses horários existe grande variação na caixa colmeia.

Para permitir a mobilidade do **gateway** foi adicionado um módulo *General Packet Radio Services* ou Serviços Gerais de Pacote por Rádio (**GPRS**), o qual além de tornar o sistema independente de conexão por fio, também reduziu o consumo médio de corrente em relação a conexão *ethernet*, a qual reduziu de 95 mA. No entanto, o GPRS resulta em picos de corrente que elevam a corrente para mais de 1 A e que comprometem o funcionamento da fonte de alimentação do **gateway**. Conforme mostram os dados obtidos e experimentos realizados, apenas a conexão com a rede da operadora Tim foi possível

³ O cálculo da máxima diferença de tempo entre os relógios considera que o **gateway** se mantém sincronizado pois recebe a informação da internet via protocolo Network Time Protocol (**NTP**) e que as colmeias variem por dia no máximo de $2 \times 10^{-6} \times 60 \times 60 \times 24 = 0,173$ s, o que daria $0,173 \times 365,25 = 62,2$ s em um ano

pois os picos de corrente neste caso eram de até 233 mA. As outras operadoras resultaram em picos de corrente superiores a 800 mA, os quais provoca o *reset* do módulo GPRS impossibilitando a conexão do *gateway* com a rede. A diferença de consumo no pico é resultado das diferentes tecnologias de transmissão utilizadas por cada operadora.

5.1 Trabalhos futuros

Concluído o desenvolvimento deste trabalho, percebeu-se durante os testes diversas características que poderiam ser melhoradas e outras que de antemão foram deixadas de lado. Assim propõe-se que em trabalhos futuros se investigue os tópicos abaixo.

- Todos os testes até agora foram realizados em laboratório, a conclusão dessa etapa habilita a realizar o teste do sistema **RFabelhas** em campo, uma vez que não dependerá mais de alimentação da rede elétrica, e nem da conexão com a internet via cabo;
- Realizar testes de durabilidade da bateria, e carregamento a partir de painéis solares de diferentes potências;
- Avaliar o uso de um *hardware* de microcontrolador (na colmeia) e processador (no *gateway*) diferente dos atuais, visando reduzir o consumo de energia, e consequentemente reduzir o custo, tamanho e peso final do sistema, facilitando a mobilidade dos módulos;
- Alterar a lei de funcionamento do sincronismo de relógios utilizando o relógio UTC (via *NTP*) do servidor em nuvem do sistema **RFabelhas** para atualização dos diversos módulos *colmeia* e do *gateway(s)*, tornando as transmissões entre elas mais pontuais e permitindo a redução das janelas de atividade e também o seu consumo;
- Avaliar a redução do consumo das *colmeias* e *gateway* que pode ser obtida em função da mudança do sistema de alimentação de 12V para 6V;
- A redução do consumo habilita a inclusão de novos sensores e atuadores na colmeia, os quais podem auxiliar ainda mais o processo de apicultura. Exemplos são: sensor de som, pluviômetro, barômetro, etc;
- Modificar a lei de controle para utilizar a energia solar captada em excesso durante o dia para regulação térmica na colmeia reduzindo o gasto energético das abelhas e aumentando a produção melífera;
- Avaliar as consequências da adição de novas colmeias no sistema, no tamanho da janela de recepção necessária no *gateway*, e distribuir randomicamente os tempos

da transmissão de cada colmeia de modo a evitar que alguma colmeia fique mais que uma transmissão fora da janela;

- Implementar uma configuração de modularidade via TTN, que informe as colmeias presentes o tamanho da comunidade, ajustando o momento de transmissão dos dados;
- Utilizar o segundo alarme do módulo RTC para acordar a colmeia de acordo com o nascer e por do sol estimado para a latitude de instalação da colmeia, ou através da medição acumulada dos horários de início de carregamento do painel solar. Isso permitiria que o sistema possa registrar os momentos mais importantes no ciclo diário da colmeia que são a saída e retorno ao colmeia.

5.2 Considerações finais

Esse trabalho apresentou um sistema minimamente invasivo e de baixo custo que utiliza de tecnologias como redes de sensores, sistemas embarcados, Internet das Coisas e computação em nuvem, transmissão de dados via GPRS e rádio LoRa para prover uma ferramenta de monitoramento em tempo real de grandezas consideradas importantes na apicultura e para a saúde das colmeias de abelhas. Um sistema inicial em protótipo já estava em funcionamento quando do início deste trabalho, mas não podia ser instalado ainda em campo. A redução do consumo obtida com esse trabalho permite agora a instalação dos módulos em locais distantes da rede elétrica, e a adoção da conexão via GPRS com a internet tornou o sistema RFabelhas totalmente independente de cabos elétricos ou internet, passando a ser portátil e robusto para variações climáticas. Conseguiu-se a autonomia de 5 dias sem sol conforme desejado com baterias de pequeno tamanho. Ademais destas considerações, esse projeto atingiu seus objetivos possibilitando que em breve o apicultor tenha uma opção que lhe permita um auxílio no cuidado do apiário e nas tomadas de decisões, evitando perdas nas colmeias e gerando um aumento na produtividade das abelhas.

Referências

- ANATEL. *Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017*. 2019. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2017/1139-ato-14448>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 44.
- AOSONG. *DataSheet DHT22-AM2302*. 2008. Disponível em: <https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT22_AM2302.pdf>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 56.
- ARCHLINUX. *Systemd - Systemctl*. 2019. Disponível em: <[https://wiki.archlinux.org/index.php/Systemd_\(Português\)](https://wiki.archlinux.org/index.php/Systemd_(Português))>. Acesso em: 4 jul 2019. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.
- ARDUINO. *Ethernet Library*. 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/Ethernet>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 64.
- ARDUINO. *SPI Library*. 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 64.
- ARDUINO. *Wire Library*. 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 63.
- ARDUINO. *Diagrama esquemático do MEGA2560 Rev3e*. 2019. Disponível em: <https://content.arduino.cc/assets/MEGA2560_Rev3e_sch.pdf>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado 2 vezes nas páginas 81 e 82.
- ATMEL. *AT45DB161B*. 2004. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2224.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 46.
- CRESESB. *Manual de Engenharia Foto Voltaica*. 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 41.
- CYPRESS. *AN50987 - Getting Started with I2C in PSoC® 1*. 2019. Disponível em: <<https://www.cypress.com/documentation/application-notes/an50987-getting-started-i2c-psoc-1>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 48.
- EPAGRI. *Epagri desenvolve sistema inédito para apoiar apicultura*. 2018. Disponível em: <<http://revista.epagri.sc.gov.br/>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 25.
- EPAGRI. *Revista Apis online*. 2019. Disponível em: <<http://circam.epagri.sc.gov.br/apicultura/>>. Acesso em: 4 jul 2019. Citado na página 25.
- EPSOLAR. *Epsolar LS-E-EU-SMS-EL-V2.0 Manual*. 2015. Disponível em: <<https://www.epsolarpv.com/upload/file/1811/LS-E-EU-SMS-EL-V2.0.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 40.

- FILIFELOP. *Modulo GPRS SIM800L*. 2012. Disponível em: <<https://www.flife flop.com/produto/modulo-gsm-gprs-sim800l-antena-sma/>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 53.
- GLOBO, R. Globoplay reportagem aquecimento abelhas sem ferrão. In *Proceedings of the 14th International Scientific Conference Engineering for Rural Development (ERDev)*, v. 2, p. 171–191, 2012. Citado na página 29.
- HOPERF. *Modulo RFM95P*. 2015. Disponível em: <<https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95P.html>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 55.
- INSTRUMENTS, T. *KeyStone Architecture: Serial Peripheral Interface (SPI)*. 2012. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 46.
- INSTRUMENTS, T. *DataSheet INA219*. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado 3 vezes nas páginas 35, 57 e 66.
- INTEGRATED, M. *DataSheet RTC-DS3231*. 2015. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 104.
- KANDEPI, M. Termorregulação colonial e energética individual em abelhas sem ferrão melipona quadrifasciata lepeletier (hymenoptera, apidae, meliponini). *Dissertação (Mestrado) — Graduate school of Cornell University*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- KRONENBERG F.; HELLER, H. C. Colonial thermoregulation in honey bees (*apis mellifera*). *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, Springer, v. 148, n. 1, p. 65–76, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- KVIESIS A.; ZACEPINS, A. D. M. T. S. Revista embrapa apicultura. In *Proceedings of the 14th International Scientific Conference Engineering for Rural Development (ERDev)*, v. 2, p. 171–191, 2012. Citado na página 28.
- LABREM. *Atlas Solar Brasileiro*. 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 37.
- LOLI, D. Bee hive temperature and sound monitor. *Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo*, 2008. Citado na página 29.
- LORAWAN. *Background information about LoRaWAN: LoRaWAN Overview*. 2019. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 101.
- LUQUE A.;HEGEDUS, S. Handbook of photovoltaic science and engineering. *John wiley & Sons*, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 38, 40 e 41.
- MCT. *SPI - Serial Peripheral Interface*. 2019. Disponível em: <<https://www.mct.net/faq/spi.html>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 46.

MEZQUIDA D. A.; MARTÍNEZ, J. L. Platform for bee-hives monitoring based on sound analysis. a perpetual warehouse for swarm apos; s daily activity. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v. 7, n. 4, p. 824–828, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

MICROCHIP. *AN1199: 1-Wire Communication with PIC Microcontroller*. 2008. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 65.

MORNINGSTAR. *Morningstar Manual*. 2015. Disponível em: <<https://www.batterystuff.com/files/425-morningstar-sunsaver-ss-10l-24v-manual.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 72.

MOSAIC. *I2C Bus Electrical Specifications*. 2019. Disponível em: <<http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/sbc-single-board-computers/freescale-hcs12-9s12-c-language/instrument-control/i2c-bus-specifications>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 47.

RADIOSHACK. *42RangeMultimeter*. 2015. Disponível em: <<https://www.radioshack.com/collections/multimeters/products/radioshack-42-range-auto-manual-multimeter-with-efd?variant=20332482117>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 66.

RAMOS J. M.; CARVALHO, N. d. Estudo morfológico e biológico das fases de desenvolvimento de apis mellifera. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, v. 6, n. 10, p. 1–21, 2007. Citado na página 27.

RASPBIAN. *Raspberry Pi Datasheet*. 2017. Disponível em: <<https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 39.

RODAN. *RTC DS3231 Library*. 2018. Disponível em: <<https://github.com/rodan/ds3231>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 65.

ROHM. *DataSheet BH1750FVI*. 2010. Disponível em: <<https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet-bh1750fvi.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 56.

SEMICONDUCTO, P. *The I2C-Bus Specification, Version 2.1*. 2000. Disponível em: <http://www.nxp.com/documents/user/_manual/UM10204.pdf>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 47.

SEMICONDUCTO, P. *Background information about LoRaWAN: LoRaWAN Overview - End Devices*. 2019. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 46.

SEMICONDUCTOR, A. *DataSheet HX711*. 2008. Disponível em: <https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_HX711.pdf>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 56.

SEMICONDUCTORS, N. *MPC5121e Serial Peripheral Interface (SPI)*. 2019. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3904.pdf>>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 47.

- SEMTECH. *DS01603: RHF0M301 Datasheet - V1.3*. 2017. Disponível em: www.risinghf.com/#/product-details?product_id=6&lang=en. Acesso em: 4 jul 2019. Citado na página 54.
- SIMCOM. *SIM800 Series AT Command Manual V1.10*. 2012. Disponível em: https://simcom.ee/documents/SIM800/SIM800_Series_AT_Command_Manual_V1.10.pdf. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 53.
- SIMCOM. *SIM800L (MT6261) Hardware Design V1.01*. 2016. Disponível em: <https://simcom.ee/documents/?dir=SIM800L>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 53.
- SINOSOLA. *SA90-64P*. 2012. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 57.
- SRD. *DataSheet SRD-05VDC-SL-C*. 2008. Disponível em: https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_Rele_5V.pdf. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 57.
- STA. *Curva descarga*. 2015. Disponível em: <http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-chumbo/como-descarregar-uma-bateria-selada-de-chumbo-acido>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 74.
- TEKTRONIX. *Current Probe A662 Datasheet*. 2012. Disponível em: <https://download.tek.com/datasheet/A621-A622-Current-Probes-Datasheet-60W150813.pdf>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 66.
- TEKTRONIX. *DPO2000B Manual*. 2012. Disponível em: https://www.tek.com/sites/default/files/media/media/resources/MSO2000B-DPO2000B-Mixed-Signal-Oscilloscope-Datasheet_3GW-28413-0.pdf. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 66.
- UNICOBA. *Unipower Baterias*. 2017. Disponível em: <https://unicoba.com.br/portfolio-item/unipower/>. Acesso em: 4 jul 2019. Citado na página 75.
- UNIPOWER. *Manual técnico Bateria Unipower*. 2015. Disponível em: https://fccid.io/ANATEL/02112-13-04220/Manual_Tecnico_UNIPOWER_UPMF_-140114/3CEBA7AF-A703-433D-A299-C04D5A51F243/PDF. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 57.
- WIZNET. *biblioteca EthernetMod*. 2008. Disponível em: <https://github.com/per1234/EthernetMod>. Acesso em: 22 jun 2019. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 66.
- WIZNET. *Datasheet módulo w5100*. 2008. Disponível em: https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Arduino/W5100_Datasheet_v1_1_6.pdf. Acesso em: 22 jun 2019. Citado na página 56.