

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMIR MICHEL EMANUEL DA SILVEIRA

SISTEMA DE SENSORES COM TRANSMISSÃO DE DADOS UTILIZANDO
TECNOLOGIA DE RADIOFREQUÊNCIA LORA

CURITIBA

2018

SAMIR MICHEL EMANUEL DA SILVEIRA

SISTEMA DE SENSORES COM TRANSMISSÃO DE DADOS UTILIZANDO
TECNOLOGIA DE RADIOFREQUÊNCIA LORA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. André Bellin Mariano, D.Sc.

CURITIBA

2018

“Não entre em pânico.”

(O Guia do Mochileiro das Galáxias)

RESUMO

Neste trabalho é implementada a tecnologia de transmissão por radiofrequência LoRa em um sistema de sensores, de forma a realizar o envio dos dados obtidos para um dispositivo receptor capaz de ligação em rede e à nuvem da internet. Com a constante evolução tecnológica nos campos de eletrônica e telecomunicações, aplicações de sensoriamento já consolidadas em diversas atividades tendem a ser inseridas dentro de novas premissas – como a Internet das Coisas – nas quais as tecnologias de transmissão de dados desempenham um papel fundamental. Seja em situações de comunicação ponto a ponto ou de interligação em rede, entretanto, nem todas as características desejáveis e necessárias nestes novos cenários são alcançadas pelas tecnologias de transmissão tradicionalmente utilizadas – como é o caso do monitoramento remoto de parâmetros climáticos, onde fatores determinantes como alcance da transmissão e custo da infraestrutura constituem desafios que podem ser respondidos através da tecnologia LoRa.

Palavras-chave: LoRa; Sensoriamento, Monitoramento Climático; Transmissão de Dados Sem Fio;

ABSTRACT

In this work, LoRa radiofrequency transmission technology is implemented in a sensor system, in order to send the obtained data to a receiving device capable of networking and connecting the Internet cloud. With constant technological evolution in the fields of electronics and telecommunications, sensing applications already consolidated in various activities tend to be inserted within new premises - such as the Internet of Things – in which data transmission technologies play a fundamental role. Whether in point-to-point communication or network interconnection situations, however, not all the desirable and necessary features in these new scenarios are achieved by the traditionally used transmission technologies – such as remote monitoring of climatic parameters, where determinants such as transmission reach and cost of infrastructure are challenges that can be addressed through LoRa technology.

Keywords: LoRa; Sensing; Climatic Monitoring; Wireless Data Transmission

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | CONTEXTO..... | 8 |
| 1.1 | TRANSMISSÃO DE DADOS DE SENSORES..... | 8 |
| 1.1.1 | Wireless Sensor Network..... | 9 |
| 1.1.2 | Internet of Things..... | 11 |
| 1.1.3 | LPWAN..... | 12 |
| 1.2 | OBTENÇÃO E MONITORAMENTO DE DADOS CLIMÁTICOS..... | 15 |
| 1.3 | MOTIVAÇÃO..... | 18 |
| 1.4 | OBJETIVOS GERAIS..... | 20 |
| 1.5 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 21 |
| 2.1 | PLATAFORMAS DE DESENVOLVIMENTO MODULAR..... | 21 |
| 2.2 | COMUNICAÇÃO..... | 22 |
| 2.2.1 | UART..... | 23 |
| 2.2.2 | SPI..... | 23 |
| 2.2.3 | I2C..... | 24 |
| 2.3 | SENSORIAMENTO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS..... | 25 |
| 2.3.1 | Temperatura..... | 25 |
| 2.3.2 | Umidade Relativa Do Ar..... | 26 |
| 2.3.3 | Pressão Atmosférica..... | 26 |
| 2.4 | GEORREFERENCIAMENTO..... | 27 |
| 2.5 | TRANSMISSÃO DE DADOS..... | 28 |
| 2.5.1 | Modulação Por Espalhamento Espectral CSS..... | 31 |
| 2.5.2 | Parâmetros Da Comunicação..... | 33 |
| 2.5.3 | Tecnologia LoRa..... | 34 |
| 2.6 | LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON..... | 38 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 39 |
| 3.1 | CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA..... | 39 |
| 3.1.1 | Plataformas Raspberry Pi..... | 40 |
| 3.1.2 | DHT22..... | 42 |
| 3.1.3 | BMP180..... | 44 |
| 3.1.4 | Módulo GY-NEO6MV2..... | 45 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.5 | Armazenamento Dos Dados..... | 46 |
| 3.1.6 | RFM95W..... | 47 |
| 3.2 | DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA..... | 48 |
| 3.2.1 | Montagem E Testes Em Laboratório..... | 49 |
| 3.2.2 | Testes Em Campo..... | 55 |
| 4 | RESULTADOS..... | 57 |
| 4.1 | FUNCIONALIDADE DO SISTEMA..... | 57 |
| 4.2 | COMPORTAMENTO COM A DISTÂNCIA..... | 58 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 60 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 61 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA..... | 62 |
| | ANEXO A: IMAGENS DOS TESTES EM LABORATÓRIO..... | 66 |
| | ANEXO B: REGISTRO DOS TESTES EM CAMPO..... | 69 |

1 CONTEXTO

A constante evolução tecnológica torna a necessidade de conhecimentos agregados em diferentes áreas um requisito imprescindível ao profissional da engenharia elétrica. Atualmente não basta dominar um único campo do conhecimento; é preciso saber integrar minimamente recursos de apoio, sejam eles de informática ou de outras engenharias [1]. A obtenção e monitoramento de dados obtidos através de sensores é um exemplo desta realidade: sendo aplicada nas mais diversas atividades, encontra no contínuo avanço das tecnologias de eletrônica e telecomunicações um cenário de estímulo e necessidade de interligação destes conhecimentos.

Aplicações já consolidadas que se apoiam na utilização de sensores (presentes em setores como industrial, médico, militar, de ensino e agrícola), tanto em âmbito local quanto com monitoramento remoto, usam cada vez mais premissas de sistemas embarcados que solucionam questões como miniaturização e consumo de energia) e tendem a ser inseridas em cenários disruptivos como IoT¹ [2].

O aumento na gama de dispositivos que se utilizam da transmissão via rádio para suas aplicações faz com que esse forma de comunicação tenha impacto cada vez maior nas atividades cotidianas, de empresas e pessoas. Notadamente, cenários nos quais medições devem ser feitas em ambientes inóspitos, ou de difícil acesso, constituem exemplos nos quais a coleta de dados, transmissão e armazenamento remoto se torna uma necessidade.

1.1 TRANSMISSÃO DE DADOS DE SENSORES

O uso da interligação de dispositivos através de radiofrequência traz vantagens como a flexibilidade de instalação e de disposição dos equipamentos, assim como a possibilidade de movimentação durante o uso e a comunicação; entretanto, características como o custo relacionado a desse tipo de aplicação e

1 *Internet of Things – Internet das Coisas*

complexidade da infraestrutura constituem pontos críticos – ou mesmo limitações – para comunicação Machine to Machine (M2M) ou aplicações que necessitam de menos recursos.

Tecnologias voltadas especificamente para comunicação entre sensores, possibilitadas pelo desenvolvimento da tecnologia das áreas relacionadas (como eletrônica e telecomunicações) permitiram o atendimento às diversas características dessas aplicações – mas, como será visto, nem todas as características desejáveis e necessárias são possíveis de ser alcançadas ao mesmo tempo pelas tecnologias tradicionalmente utilizadas. A seguir será feito um breve panorama desta situação.

1.1.1 Wireless Sensor Network

Uma WSN (Wireless Sensor Network – Rede de Sensores sem Fio) consiste de dispositivos autônomos distribuídos para monitorar condições físicas ou ambientais [3]. Os sensores de uma WSN enviam os dados a partir de um ou mais nós (que, por sua vez, podem ser compostos por um ou vários dispositivos) para uma localização central, permitindo a coleta coordenada dos dados [4]. Atualmente algumas tecnologias estão bem consolidadas neste campo, sendo ZigBee, Bluetooth e WiFi algumas das mais representativas.

A tecnologia ZigBee opera sobre as faixas de frequência de 2,4 GHz, 915 MHz e 868 MHz. As taxas de transferência de dados são de 250 kbps em 2,4 GHz, 40 kbps em 915 MHz e 20 kbps em 868 MHz. O alcance de transmissão varia entre 10 m e 100 m, (eventualmente podendo ser maior, dependendo diretamente da potência dos equipamentos e de características como obstáculos físicos e interferência eletromagnética). A especificação ZigBee define as camadas de rede, segurança e aplicação – a definição das camadas física e de acesso ao meio é definida na especificação IEEE 802.15.4. Com baixo consumo de potência e implementação simples, permite um grande número de dispositivos e elevada densidade de nós por rede [5].

O Bluetooth é outra tecnologia utilizada na comunicação sem fio de sensores. Lançado em 1999 pelo Bluetooth SIG (Bluetooth Special Interest Group), foi adotado pelo IEEE como padrão 802.15.1. Operando na faixa de frequência de 2,4 GHz, o alcance do sinal fica entre 1 m e 100 m, a uma taxa de transferência de aproximadamente 1 Mbps na versão 1.2 e a 3 Mbps na versão 2.0 [6].

Tabela 1: comparativo entre Bluetooth e ZigBee

| | Bluetooth | ZigBee |
|----------------------------|-----------------|---------------------|
| Taxa de Transferência | 1 Mbps a 3 Mbps | 250 kbps |
| Corrente de Transmissão | 40 mA | 30 mA |
| Corrente em <i>Standby</i> | 200 μ A | 3 μ A |
| Tempo de Acesso a Rede | 3 s | 30 ms |
| Tempo de Acesso ao Canal | 2 ms | 15 ms |
| Alcance | até 100 m | pouco mais de 100 m |
| Número de Dispositivos | 8 | 65.535 |
| Consumo de bateria | dias | anos |

Fonte: COSTA, Rafael A. A.; MENDES, Luis A. M. Evolução das redes sem fio: um estudo comparativo entre Bluetooth e ZigBee

Costuma-se utilizar também o WiFi (cujo nome designa o conjunto de protocolos definidos pelo padrão IEEE 802.11) – uma tecnologia já consolidada no âmbito das redes pessoais locais e usualmente presente na comunicação entre equipamentos de redes de computadores. Dentre as suas vantagens estão [6]:

- protocolos no nível de aplicação consolidados (por exemplo, Ethernet/IP Industrial);
- dispositivos de fácil aquisição;
- mão de obra abundante;
- fácil configuração;
- alta taxa de dados;
- fácil integração à infraestrutura de TI.

Como desvantagem, no entanto, possui um alto consumo de energia e o alcance da comunicação. Ainda, dependendo do tamanho da rede e da forma do gerenciamento de tráfego de dados, a quantidade de colisões pode inviabilizar a utilização deste tipo de rede em determinados sistemas e aplicações. O padrão IEEE 802.11a alcança taxas de transmissão de 54 Mbps, opera na banda de 5GHz e pode ter até 64 pontos por AP (*Acess Point*). O padrão IEEE 802.11b alcança taxas de transmissão de 11 Mbps, opera na banda de 2,4GHz e pode ter até 32 pontos por AP. O padrão IEEE 802.11g alcança taxas de transmissão de 54 Mbps, opera na banda de 2,4GHz e pode ter até 32 pontos por AP [7].

1.1.2 Internet of Things

A comunicação sem fio de sensores vêm encontrando crescimento em um campo de aplicação recente – a Internet das Coisas, que permite ao mundo físico conectar-se ao digital por meio da comunicação de dispositivos (ou objetos) com datacenters na nuvem [2]. Conforme Carlos Botelho, da Embratel, a Internet das Coisas já é uma realidade e diferentes serviços começam a ser prestados sob a forma de soluções para demandas específicas [8].

Conforme o IEEE, a Internet das Coisas visa a uma rede autoconfigurável, adaptável que interconecta “coisas” à internet através do uso de protocolos padrão de comunicação. As coisas interconectadas possuem representação no mundo digital, capacidade de sensoreamento e / ou atuação, programabilidade e são unicamente identificáveis. A representação contém dados como identificação, status, localização ou outra informação que seja relevante no âmbito pessoal, social ou de negócio. As coisas tornam possíveis serviços, com ou sem intervenção humana, através de características como identificação exclusiva, captura de dados, comunicação e capacidade de atuação. Os serviços são providos pelo uso de interfaces inteligentes e são tornados disponíveis em qualquer lugar, a qualquer tempo, e para qualquer outro dispositivo, levando a segurança em consideração [9].

Ainda segundo o IEEE, a Internet das Coisas é aplicável em contextos que vão de sistemas pequenos, limitados a uma única localização, até grandes sistemas globais que são distribuídos compostos por complexos subsistemas. Em um sistema IoT uma única “coisa” é identificada globalmente; o nível de informação obtido através do acesso a cada “coisa” pode ser simples como dados estáticos (ex.: armazenamento de *tags* RFID e indicadores de estado ligado/desligado) ou ser proveniente de sensores e sua diversidade de informações. Por fim, para um sistema ser considerado IoT as “coisas” obrigatoriamente devem estar conectadas à Internet (ressaltando que esta é uma rede de nível acima ao de uma intranet ou extranet).

Diversos estudos apontam que o número de objetos conectados no mundo passará de 20 bilhões em 2020 [10]; no âmbito local o Governo Federal lançou seu plano de ações para IoT, que contempla 4 áreas prioritárias: *agrobusiness*, saúde, indústria e cidades inteligentes [11].

1.1.3 LPWAN

Nos sistemas IoT as redes desempenham um papel fundamental, possibilitando que os objetos sensorizados distribuídos ao longo de uma área se conectem às aplicações (COSSINI, 2016). As tecnologias de comunicação mais utilizadas atualmente para implementação destes sistemas são legadas das redes WSN – como visto, WiFi, Bluetooth, ZigBee – acrescidas das redes celulares. Entretanto, essas tecnologias não conseguem contemplar ao mesmo tempo cada uma das necessidades específicas das diversas aplicações da Internet das Coisas. São, dentre outras, características como: custo de implantação, facilidade de manutenção, segurança, alcance, frequência de coleta de dados e quantidade de dados transmitidos. Redes não-celulares não são ideais para conectar dispositivos em uma larga área – a faixa de cobertura destas tecnologias é limitada a algumas centenas de metros (que pode ser estendida, porém ao custo do uso de mais

gateways e utilizando técnicas de roteamento como *mesh*, o que aumenta cada vez mais o custo de infraestrutura). Redes WiFi são caracterizadas por um consumo elevado de potência (além da limitação do alcance), enquanto que as redes celulares, se por um lado possuem longo alcance, por outro possuem uma infraestrutura complexa, cara (inviabilizam a construção de redes de sensores de baixo custo) e podem não estar disponíveis em locais remotos.

Para aplicações que se inserem num contexto de pouco uso de banda, longo alcance e baixa quantidade de dados uma nova premissa foi desenvolvida: a LPWAN (Low Power Wide Area Network). Esta tecnologia de comunicação de sensores tem como características principais:

- alcance na faixa de quilômetros;
- consumo de energia que permite funcionamento com alimentação individual por longos períodos;
- taxa de transmissão máxima na faixa das centenas de bits.

Tais características permitem a instalação em locais remotos, uso tanto em áreas urbanas como rurais, abertas ou fechadas, e um baixo número de estações base – uma ressalva importante, entretanto, é que aplicações utilizando-se de LPWANs não podem ter baixa latência na transmissão dos dados como um de seus requisitos. Assim, nas cidades inteligentes, por exemplo, o status de uma lâmpada de um poste que não acendeu pode ser definido por um único byte, enviado uma única vez por ciclo de utilização; na agricultura, a identificação de variáveis como a umidade do solo pode ser realizada poucas vezes ao dia, com poucos dados transmitidos, e a mesma premissa permearia a aplicação em uma planta industrial. Uma LPWAN atende requisitos específicos das atividades mencionadas com um custo menor do que as redes sem fio legadas [10].

Sistemas que utilizam LPWAN, em geral, fazem uso da banda sub-GigaHertz (à exceção de algumas poucas implementações), o que possibilita comunicação robusta e confiável mesmo com baixas potências. Por exemplo, em

comparação com a banda de 2,4 GHz os sinais de frequência mais baixa sofrem menos efeitos de atenuação causados por obstáculos e superfícies densas e de multicaminhos. Além disso a faixa sub-GigaHertz é menos congestionada que a faixa de 2,4 GHz (utilizada extensivamente por tecnologias de comunicação populares como Wi-Fi, Bluetooth, ou mesmo em aplicações domésticas como fornos de micro-ondas). Essa maior confiabilidade é um dos fatores que possibilita longo alcance com baixo consumo.

Para atingir suas características chave, as tecnologias LPWAN utilizam-se principalmente das técnicas de modulação de espalhamento espectral e de (ultra) banda estreita e atuam geralmente em faixas de frequência abaixo de 1 Giga Hertz. Ainda, os circuitos visam à premissa de baixo consumo de energia, e o baixo custo é alcançado pela redução na complexidade do hardware e de infraestrutura, além do uso de faixa de frequência (conhecida também como ISM²) que, atendendo à especificidade de cada legislação local, dispensa a necessidade de licenciamento. Algumas tecnologias que têm se destacado neste segmento são LoRa (Long Range), Sigfox e Ingenu [12].

SIGFOX é uma tecnologia que utiliza modulação “ultra banda estreita” (Ultra Narrow Band – UNB) na faixa de frequências de 868 a 902 MHz e todo o protocolo de rede é proprietário (de forma que o fabricante também atua como o operador de todas as etapas do sistema). Destaca-se pela área de cobertura, na faixa de 30 a 50 km em áreas rurais e 3 a 10 km em áreas urbanas.

O conjunto de protocolos denominado Ingenu utiliza-se de modulação proprietária Random Phase Multiple Access (RPMA). Ao contrário do normalmente encontrado em LPWANs, utiliza a faixa de frequência de 2,4 GHz, e o alcance é na ordem de 15 km.

LoRa é uma tecnologia de transmissão que se baseia na técnica de modulação de espalhamento de frequência; essa variação é proprietária da empresa Semtech. Funciona em frequências de 169 MHz a 915 MHz – dentro da faixa ISM. A camada que implementa uma rede de comunicação, conhecida por LoRaWAN é aberta (desenvolvida e mantida pela LoRAWAN Alliance). Permite, através da utilização de *gateways*, interligação dos dispositivos remotos (nós) à internet.

2 Industrial, Científica e Médica

Visando ainda a otimização quando da implementação de sistemas IoT, possui neste cenário a divisão dos dispositivos componentes da rede em classes (A, B e C), especificando regras de comunicação (unidirecional ou bidirecional) e tempo de atividade (consumo de energia e uso do canal de transmissão) para cada classe.

Além das características de longo alcance e baixo consumo, diversos testes têm sido realizados em cenários críticos – como ambientes muito ruidosos (grandes centros urbanos) ou com diversas barreiras (interior de prédios) – e demonstrado com sucesso a aplicabilidade da tecnologia LoRa dentro e fora de sistemas IoT.

Tabela 2: comparativo de tecnologias LPWAN sendo implementadas atualmente

| | SIGFOX | Ingenu | LoRa |
|------------------------|----------------------------------|-----------|---------------------------------|
| Área de cobertura (km) | Rural: 30 a 50 Urbano: 3 a 10 | Aprox. 15 | Rural: 10 a 15 Urbano: 3 a 5 |
| Frequência (MHz) | 868 ou 902 | 2.400 | várias sub-GHz |
| Faixa ISM | sim | sim | sim |
| Link bi-direcional | sim | não | sim |
| Taxa de dados (kbps) | 0,1 | 0,01 a 8 | até 37,5 |
| Nós por estação base | 10^6 | 10^4 | 10^4 |

Fonte: CENTENARO, M. et al. Long-Range Communications In Unlicensed Bands: The Rising Stars In The IoT And Smart City Scenarios. Tradução do autor.

1.2 OBTENÇÃO E MONITORAMENTO DE DADOS CLIMÁTICOS

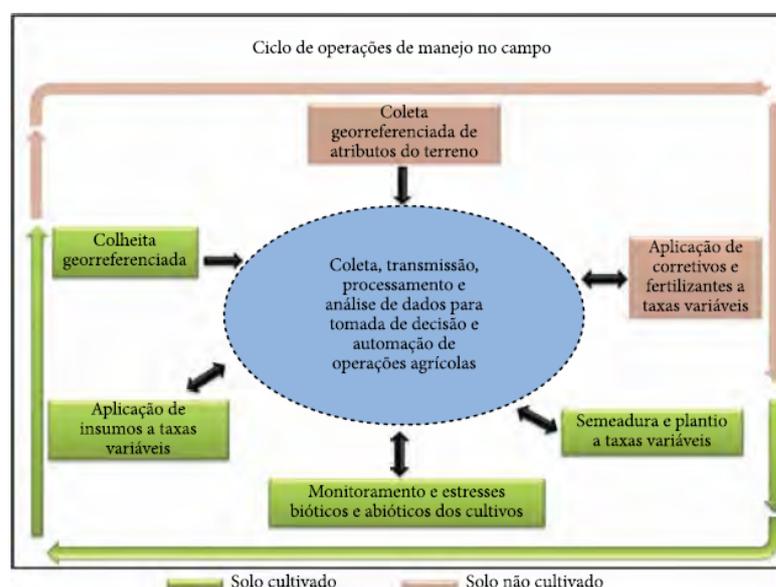
Nas últimas décadas observou-se um crescimento vertiginoso das aglomerações urbanas, que atualmente abrigam mais de 50% da população mundial. Tanto no aspecto de avaliação dos parâmetros de qualidade ambiental como no gerenciamento de riscos, os sistemas de monitoramento climáticos e ambientais tornam-se cada vez mais imprescindíveis. A coleta e registro desses valores costuma ser feita por estações meteorológicas institucionais, as quais, por

estarem esparsamente distribuídas ou não serem dotadas de comunicação, são incapazes de realizar medições em microclimas (como um bairro, por exemplo) [14].

A relevância de fatores climáticos e ambientais é verificada também no contexto agrícola, atividade altamente dependente e influenciada pelas condições climáticas – independentemente do tamanho da exploração. O uso de sensores sem fio nestas atividades permite realizar o monitoramento e controle de condições ambientais, contribuindo na tomada de decisões, aumento de produtividade e uso racional de água e demais insumos (como fertilizantes, pesticidas), trazendo ganhos econômicos e ambientais. Traz como ganhos ainda maior agilidade na instalação, modificação e acréscimo de sensores [15].

Ainda no âmbito agrícola, a agricultura de precisão tem como objetivo o gerenciamento dos sistemas de produção desde a aplicação de insumos até a utilização de mapeamentos em todos os processos envolvidos na produção, e por este motivo vem se utilizando das novas soluções de instrumentação e transmissão. Atualmente demanda um volume de investimentos considerável, sendo normalmente empregada em grandes extensões de terra. A escolha das tecnologias utilizadas tem, então, impacto direto nos custos envolvidos – do consumo de energia à infraestrutura necessária [16].

Figura 1: papel central da tecnologia no novo cenário da produção rural [16]



Fonte: BERNARDI, Alberto C. C. et al. Agricultura De Precisão.

A obtenção de dados climáticos e ambientais é também utilizada no contexto educacional. Sendo realizada por estações climáticas e meteorológicas, os sistemas de coleta de dados são imprescindíveis a essas atividades. Um exemplo é o projeto LABOCLIMA, da Universidade Federal do Paraná (www.laboclima.ufpr.br) que desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão relacionados às interações entre o clima e as atividades humanas. Entre as atividades desenvolvidas estão linhas de pesquisa como:

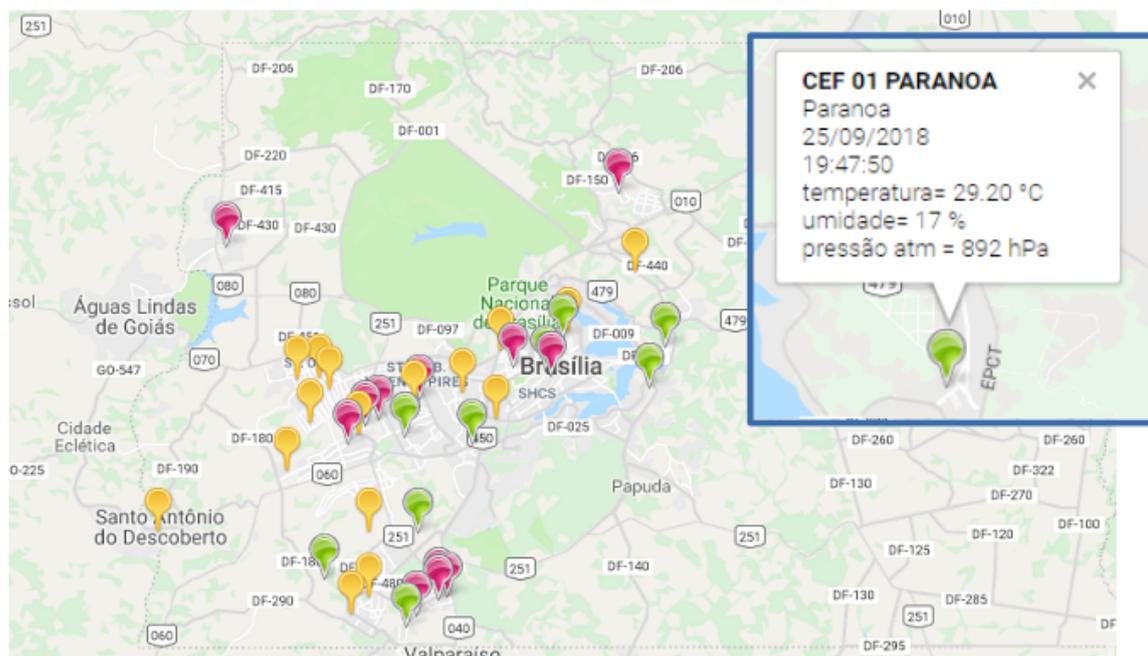
- Teorias e métodos em climatologia;
- Variabilidade climática;
- Clima urbano;
- Clima e saúde;
- Eventos extremos, riscos e vulnerabilidades associados ao clima;
- Geotecnologias e modelagem no campo da Climatologia Geográfica.

Também neste contexto está o Laboratório Móvel de Educação Científica da UFPR Litoral (LabMóvel – www.labmovel.ufpr.br), um programa de divulgação científica que desde 2006 trabalha principalmente com professores e estudantes das escolas públicas do litoral do Paraná. O LabMóvel atua sobre a premissa de que, dada a realidade local, os processos de ensino devem caminhar pela sensibilização e pela educação científica e ambiental com o objetivo de conscientizar a população para preservar o ambiente natural da região, inserida em um local de grande pressão antrópica e desenvolvimentista. O objetivo do LabMóvel é aproximar o conhecimento científico da comunidade da região, trabalhando pela sensibilização e pela educação científica e ambiental.

Nestes projetos os dados são recuperados localmente, junto às estações de coleta. Existem aplicações, entretanto, nas quais o monitoramento dos dados é feito de maneira remota – como é o caso da Rede Meteorológica nas Escolas – REMADE (www.climaescola.com.br). O monitoramento remoto, aliado ao georreferenciamento das estações através de GPS, permite a utilização dos dados em mapas como mostrado na figura 2. A importância e relevância deste tipo de utilização é

demonstrada pelas entidades que recebem os dados para tratamento, dentre as quais estão o Projeto Globe, da NASA, e a Agência Espacial Brasileira (AEB).

Figura 2: exemplo de monitoramento remoto e com georreferenciamento



Fonte: www.climaescola.com.br

Nestes cenários de aplicação estão presentes os seguintes desafios comuns: a) quantidade de estações de monitoramento; b) alcance da transmissão dos dados; c) custo da infraestrutura.

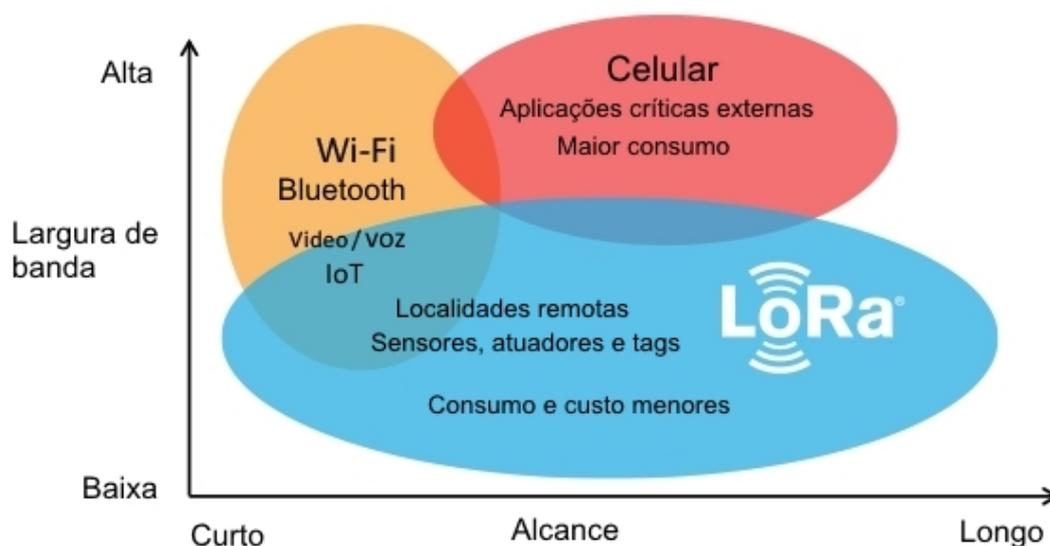
1.3 MOTIVAÇÃO

A comunicação remota é um ponto chave para diversas aplicações de sensoriamento e IoT [13]. Como visto na contextualização, os desafios na obtenção e monitoramento de dados climáticos, em suas diversas aplicações, possuem características que são atendidas pelas tecnologias LPWAN:

- ambientes distantes ou de difícil acesso;
- baixa taxa de dados;
- baixo consumo.

A utilização da tecnologia LoRa, inserida em um espaço não atendido pelas tecnologias Bluetooth, ZigBee, WiFi e redes celulares, permite atender a estas características – e acrescenta a esta lista, ainda, baixo custo a possibilidade de inserção em sistemas IoT (através da implementação da camada de rede LoraWAN).

Figura 3: espaço ocupado pela tecnologia LoRa



Fonte: <https://www.semtech.com/lora/why-lora> (adaptado pelo autor)

Assim, propõe-se a utilização da tecnologia LoRA aplicada a um dispositivo responsável pela captação e transmissão dos dados climáticos, buscando-se atender às características acima mencionadas, bem como a implementação do sistema de maneira modular de forma a demonstrar a viabilidade do uso de outros tipos sensores para diferentes aplicações.

1.4 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho consistiu em construir um sistema de sensores e realizar, através de comunicação sem fio utilizando a tecnologia LoRa, a transmissão dos dados obtidos para um dispositivo remoto capaz de ligação em rede e à nuvem da internet.

Os sensores utilizados são associados à obtenção de variáveis climáticas – temperatura, umidade e pressão atmosférica; além disso o sistema conta com armazenamento dos dados em dispositivo removível e georreferenciamento através de módulo GPS. Todos os sensores, módulos e periféricos serão implementados sobre plataforma modular para desenvolvimento de hardware.

O trabalho inclui a fundamentação teórica dos tópicos relacionados com as principais características do sistema.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

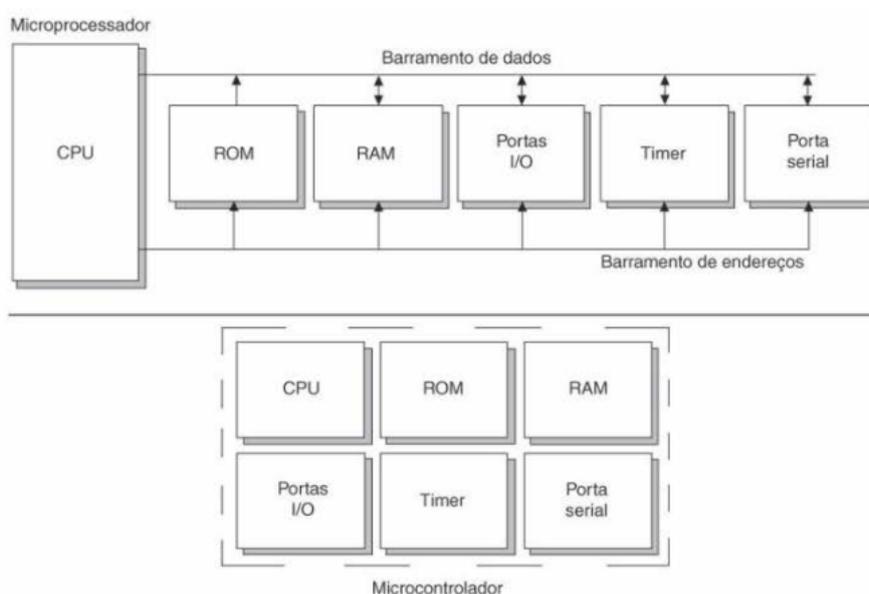
- I) Descrição do sistema de maneira holística e especificação dos componentes.
- II) Obtenção dos dados dos sensores e módulos e avaliação individual.
- III) Integração dos sensores e módulos.
- IV) Automatização da rotina de obtenção e gravação dos dados (função *datalogger*).
- V) Transmissão e recepção dos dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PLATAFORMAS DE DESENVOLVIMENTO MODULAR

As plataformas de desenvolvimento modular de hardware – ou de prototipagem eletrônica – são sistemas que contam com microprocessador e demais periféricos necessários para seu funcionamento (memórias RAM, ROM, e entrada/saída) em uma única placa [1]. Dentre as plataformas mais utilizadas atualmente estão Intel Galileo e Arduino (que possuem software e hardware *open-source* e foram desenvolvidas sobre o conceito de microcontroladores – contando, assim, com recursos limitados) e as plataformas Beaglebone e Raspberry Pi, as quais não apenas comportam o microprocessador e sistemas de apoio em uma única placa, mas sim existem como microcomputadores completos (permitindo a instalação de um sistema operacional com todas as suas funcionalidades) [17]. A figura abaixo ilustra a caracterização clássica de sistemas microprocessados e microcontrolados.

Figura 4: sistemas microprocessados e microcontrolados.



Graças ao avanço da microeletrônica e da tecnologia de sistemas embarcados houve uma grande popularização dessas plataformas nos últimos anos. Além disso, sua versatilidade fica evidente na fase de desenvolvimento dos produtos, quando os conceitos e testes necessários visando a usabilidade do produto e suas interfaces com o usuário necessitam ser realizados com agilidade – situação típicos de aplicações móveis e / ou com utilização na web.

A utilização destas plataformas permite ainda a desvinculação de um hardware específico: isto é muito útil em um contexto no qual a engenharia reversa de hardware é comum e o valor de determinado produto passa cada vez mais para os serviços e aplicações – e permite, ainda alteração para circuitos customizados visando ganho de performance, ou mesmo soluções proprietárias [18].

2.2 COMUNICAÇÃO

A troca de dados entre as placas controladoras e os dispositivos a ela conectados é realizada através de protocolos de comunicação padronizados. Uma das formas de caracterizar esta comunicação é a maneira como os dados são transmitidos, podendo ser serial (bits enviados em sequência) ou paralela (várias vias para transmissão dos bits de dados). Apesar de utilizar mais vias, a transmissão em paralelo não atinge as maiores velocidades pois, quando a velocidade de transmissão dos bits aumenta, passam a aparecer diferenças de tempo de recepção entre os bits paralelos, e a solução para evitar o problema é retorno à transmissão serial – com a qual então, obtém-se velocidades maiores.

Também é possível caracterizar as interfaces como síncronas ou assíncronas: na comunicação síncrona utiliza-se uma linha própria de comunicação para envio dos pulsos de clock; já na comunicação assíncrona a base de tempo é obtida através da estrutura dos pacotes recebidos.

2.2.1 UART

UART (*Universal Asynchronous Receiver / Transmitter*) é uma interface assíncrona que realiza a comunicação a partir de dados de uma fonte em paralelo (a forma com a qual os processadores trabalham com os dados) sobre um meio de transmissão serial.

Sendo a interface UART assíncrona, é necessário o envio de sinalizações para informar o clock e permitir a comunicação: Geralmente um bit de start é enviado antes dos bits referentes ao dado útil, um bit de stop é inserido ao final para informar o término do envio e é comum haver um bit de paridade para checar por eventuais erros na transmissão. Parâmetros devem ser configurados e acordados entre receptor e transmissor, como o tamanho da palavra de dados a ser recebida/transmitida, a velocidade da transmissão, a presença e o tipo de paridade e o comprimento do stop bit.

A interface UART transmite dados a uma taxa de até 115200 bps; a distância depende da velocidade especificada e do uso ou não de fios adicionais de controle (por exemplo, o padrão RS-232C atinge uma distância máxima de até 15,24 m (50 pés) a 9600 bps. Para comunicação dentro de uma mesma placa, 9600 bps é um valor tipicamente utilizado. Sem a utilização de vias adicionais de controle permite a comunicação de apenas um dispositivo em cada ponta [19].

2.2.2 SPI

O protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) também é serial. Ao contrário do UART, entretanto, é síncrono. Este protocolo permite a utilização de até diversos dispositivos em um barramento; como apenas uma comunicação é permitida a um dado momento, o periférico que se deseja comunicar é acionado através do pino CS

(chip select). A comunicação é bi-direcional, suportando até 8 dispositivos a uma distância máxima de 3 metros e com taxa máxima de transmissão de 2,1 Mbps [1].

Utiliza 4 fios para comunicação, sendo eles:

- MOSI – master output / slave input: envio das informações a partir do controlador para o periférico;
- MISO – master input / slave output: envio das informações a partir do periférico para o controlador;
- SCK – pulsos de clock;
- CS – chip select;

2.2.3 I2C

A interface I2C (*Inter-Integrated Circuit*) define uma comunicação serial, síncrona, e que usa apenas 2 fios para transmissão dos dados: SDA (dados) e SCL (clock), além da alimentação. Isto simplifica a ligação dos periféricos – entretanto como não há a seleção de dispositivos (como no SPI) deve-se ter o cuidado de atribuição única de endereçamento. A interface I2C alcança até 5,5 metros, suportando até 40 periféricos e atinge taxas de até 400 kbps [1].

Tabela 3: comparativo das interfaces seriais síncronas

| | I2C | SPI |
|--------------------------|----------|----------|
| Tipo | Síncrono | Síncrono |
| Velocidade | 400 kbps | 2,1 Mbps |
| Nº. de Fios | 2 | 4 |
| Nº. máx. de dispositivos | 40 | 8 |
| Distância máxima | 5,5 m | 3,0 m |

2.3 SENSORIAMENTO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

2.3.1 Temperatura

Um das formas de sensoriamento de temperatura é através de termistores – semicondutores cerâmicos que têm sua resistência alterada como efeito direto da temperatura (assim como os RTDs³, mas que geralmente possuem um coeficiente de variação maior que estes). Termistores são formados pela mistura de óxidos metálicos prensados e sintetizados em diversas formas ou sob filmes finos podendo ser encapsulados em vidro ou em epóxi.

Os termistores baseiam-se na dependência da temperatura de uma resistência semicondutora, que varia o número de cargas portadoras disponíveis e suas mobilidades. São designados como NTC (Negative Temperature Coefficient) quando apresentam um coeficiente de temperatura negativo e como PTC (Positive Temperature Coefficient) quando apresentam um coeficiente de temperatura positivo.

Os termistores do tipo NTC consistem em óxidos metálicos tais como cromo, níquel, cobre, ferro, manganês e titânio, que têm sua resistência elétrica diminuída com o aumento da temperatura. Esses dispositivos não são lineares e apresentam uma sensibilidade elevada (em geral 3% a 5% por °C) com faixa de operação típica de -100 °C a 300 °C. A sua faixa de tolerância também varia (geralmente de 5% a 20%) [1].

3 *Resistance Temperature Detector*

2.3.2 Umidade Relativa Do Ar

A obtenção da umidade reativa do ar pode ser feita através de sensores do tipo resistivo ou capacitivo, sendo que este último tipo o mais comum de se encontrar no mercado. Nos sensores do tipo capacitivo a constante dielétrica é diretamente proporcional à umidade do meio (tipicamente há uma variação de 0,2 pF a 0,5 pF para alteração de 1% da umidade relativa). Costumam apresentar baixo coeficiente de temperatura, favorecendo a utilização em temperaturas elevadas.

Estando à temperatura ambiente, a saturação relativa do sensor capacitivo reflete a umidade relativa do ar. Uma vantagem deste tipo de sensor é sua tensão de saída aproximadamente linear [20].

2.3.3 Pressão Atmosférica

A pressão atmosférica pode ser obtida através de sensores que utilizam-se do efeito piezo-resistivo, no qual elementos sensores (geralmente extensômeros) variam sua resistência elétrica quando submetidos a uma força conseqüente deformação. Os extensômeros podem ser fixados sobre um diafragma ou ser integrados na própria pastilha de silício (o que torna possível construir sensores menores, mais uniformes e com características mais repetitivas)

Os elementos piezo resistivos, o diafragma e a estrutura dos sensores são construídos na mesma partilha de silício. Através de uma cavidade no bloco semiconductor uma membrana funciona como diafragma, a deflexão mecânica causa variações nas resistências dos piezo-resistores, as quais por sua vez são convertidas em variação de diferença de potencial elétrico.

Estes tipos de sensores tem por característica alta sensibilidade a variações de temperatura e incidência direta de luminosidade. Além disso geram sinais relativamente pequenos, de maneira que são necessários cuidados especiais no condicionamento do sinal e implementação dos sensores

2.4 GEORREFERENCIAMENTO

As formas modernas de georreferenciamento utilizam-se de sistema de navegação por satélite, que é capaz de indicar a localização geoespacial de determinado ponto no globo terrestre por meio de satélites que estão em órbita ao redor do planeta. Na prática, são necessários ao menos quatro satélites dispostos em diferentes lugares, que realizam um processo chamado de trilateração e enviam informações que possibilitam a determinação de coordenadas do ponto rastreado [21]. O sistema mais utilizado é o GPS (Global Positioning System), inicialmente colocado em operação pelos Estados Unidos com fins militares, e posteriormente sendo liberado o uso civil (com limitações) - atualmente existem outros sistemas operados por diferentes países.

O sistema GPS é composto pelo Segmento de Controle (cinco estações terrestres para monitoramento e *uplink* com os satélites em órbita); Segmento Espacial (constelação de 24 satélites ativos + reservas); Segmento dos Usuários (unidade receptora dos sinais de rádio GPS, não demanda pagamento por sua utilização – basta dispor do equipamento receptor).

Os sistemas de GPS utilizam-se do protocolo NMEA (atualmente na versão 0183) para comunicação. Neste protocolo os dados são codificados no formato ASCII, de maneira que é necessário decodificá-los para utilização dos dados. A transmissão através deste protocolo é composta por diversas sub-mensagens, cada qual informando um parâmetro relacionado com o sistema (como número de satélites visíveis, latitude, longitude e velocidade de deslocamento) [22].

2.5 TRANSMISSÃO DE DADOS

Uma onda eletromagnética proveniente de uma fonte puntual no espaço livre se propaga uniformemente em todas as direções, e a radiação apresenta a forma de uma frente de onda esférica. É possível definir as regiões de campo como termos de contribuições distintas em função da distância [23]:

- Região do Campo Próximo ou Zona de Fresnel:

Nessa região os termos de campo predominante estão associados à energia armazenada e representam uma parcela reativa da impedância da antena. Sendo r a distância de separação entre as antenas transmissora e receptora e λ o comprimento de onda, a condição para a região próxima é $r \ll \lambda$.

- Região Intermediária:

Nessa região todos os termos dos campos tem igual peso. O Campo Próximo e o Campo de Radiação coexistem, produzindo uma região de alta interferência. A condição para definir esta região próxima é $r \sim \lambda$.

- Campo Distante ou Campo de Radiação (Zona de Fraunhofer):

Nessa região os campos de radiação, que representam a potência radiada e convertida pela fonte em ondas eletromagnéticas, são predominantes. Uma das condições possíveis para definir esta região é $r \gg \lambda$. São características desta região:

- I) os campos dependem da distância na forma $1/r$;
- II) cessada a fonte, esse campo não desaparece, pois é energia radiada para o infinito (energia perdida pela fonte);
- III) para um observador distante a onda radiada terá todas as características de uma onda plana, localmente;
- IV) como consequência, os campos de radiação estão sujeitos à reflexão, refração, difração e demais fenômenos ondulatórios.

O modelo de propagação no espaço livre (modelo de espaço livre de Friis) é utilizado para prever a intensidade do sinal recebido quando as antenas do transmissor e do receptor possuem um caminho de linha de visão sem obstruções severas entre elas, para valores de distância de separação que estão no campo distante. Assim como a maioria dos modelos de propagação de onda de rádio em grande escala, o modelo no espaço livre prevê que a potência recebida diminui como uma função da distância de separação transmissor-receptor elevada a alguma potência, a qual depende do meio e das características da propagação (como reflexões) [24]. Considerando que os lóbulos principais das antenas transmissoras e receptoras estão devidamente alinhados, a densidade de potência na antena de recepção é dada por [23]:

$$S_{rad} = \frac{P_{EIRP}}{4\pi r^2} = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (1)$$

onde:

S_{rad} = densidade de potência na antena de recepção;

P_{EIRP} = Potência irradiada efetiva referenciada a uma antena isotrópica;

G_T = Ganho da antena de transmissão;

P_T = Potência transmitida;

r = distância entre as antenas.

A área efetiva da antena receptora relaciona-se com seu ganho na forma

$$A_{ef}^R = \frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

onde:

A_{ef}^R = Área efetiva da antena;

G_R = ganho da antena de recepção;

λ = comprimento de onda.

Assim, a fórmula de Friis relaciona a potência transmitida em um ponto à potência recebida em outro, em função dos parâmetros do link de comunicação:

$$P_R = S_{rad} A_{ef}^R = P_T \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi r)^2} \quad (3)$$

O termo $\frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2}$ é chamado ganho do espaço livre. O seu inverso, a atenuação do espaço livre, representa a perda de densidade de potência devido ao fator $\frac{1}{r^2}$ – na prática existem ainda outras perdas, como absorção, desalinhamento das antenas, e descasamento de polarização. A atenuação do espaço livre pode ser representada em decibéis:

$$A_{FS}(dB) = 10 \log\left(\frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2}\right) \quad (4)$$

A fórmula de Friis pode ser utilizada através de sua forma em decibel (também uma maneira simplificada de lidar com a equação) [25]:

$$P_R(dBm) = P_T(dBm) + G_T(dBi) + G_R(dBi) - A_{FS}(dB) \quad (5)$$

Um fator importante a se considerar nos sistemas de rádio são as antenas utilizadas. Uma antena é um elemento capaz de radiar potência eletromagnética para o espaço externo de modo eficiente (quanto atuando como transmissora) ou de capturar a energia do espaço livre que adentra sua região de abrangência (atuando

como receptora). Define-se o ganho de uma antena como a razão entre a densidade de potência gerada por uma antena (a partir de uma potência de entrada P_{in}) e a densidade de potência que seria gerada por uma antena isotrópica ideal no mesmo ponto (sendo portanto dada em dBi); este aumento refere-se não a um ganho de potência, mas sim ao aumento na densidade de potência em uma determinada direção, relativo a uma antena isotrópica ideal com a mesma potência de alimentação [23].

Dentre as implementações possíveis estão as antenas helicoidais, que são construídas na forma espiral ou hélice a partir de um ou múltiplos condutores. Esse tipo de antena produz radiação ou polarização de forma circular (a polarização de uma antena é a orientação do campo elétrico – E_{RAD} – em relação a algum sistema de coordenadas); operam de forma a gerar uma onda que se desloca na forma de uma espiral e apresentam outras características úteis, tais como uma impedância de entrada quase real e uma ampla largura de banda.

A espiral pode radiar em vários modos diferentes. Destes, o modo axial é amplamente usado em comunicações ponto a ponto, proporcionando radiação focada ao longo do eixo z. Esse modo ocorre quando a circunferência da espiral é cerca de um comprimento de onda. Quando a circunferência da espiral é pequena em relação ao comprimento de onda do sinal, ocorre o modo normal de radiação. Modos tipo cônicos ocorrem quando a circunferência da espiral é maior que um comprimento de onda [27].

2.5.1 Modulação Por Espalhamento Espectral CSS

A modulação por espalhamento espectral é uma técnica de modulação digital em que o sinal transmitido se espalha por uma faixa de frequência muito mais ampla do que a largura de banda mínima necessária para transmitir a informação enviada. Nas comunicações digitais busca-se a utilização eficiente da largura de

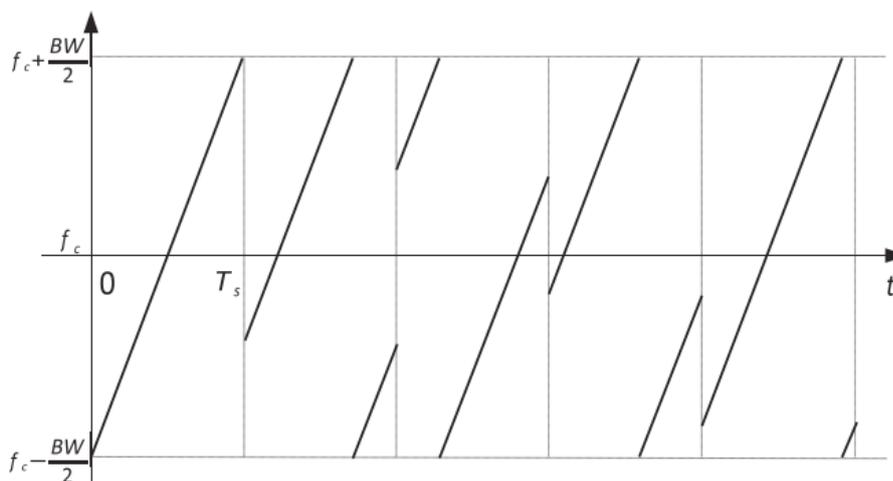
banda e potência; entretanto, há situações em que é necessário sacrificar esta eficiência em favor de outros objetivos do projeto – como, por exemplo, garantir a comunicação em um ambiente hostil [28].

A vantagem principal de um sistema de comunicação por espalhamento espectral é sua capacidade de rejeitar interferências. Como características principais da modulação por espalhamento espectral estão:

- a sequência de dados ocupa uma largura de banda que excede a necessária para enviá-la;
- o espalhamento no espectro é realizado antes da transmissão por meio de um código que independe da sequência de dados; o mesmo código é utilizado no transmissor e no receptor.

Uma das variações da modulação por espalhamento espectral é denominada CSS (*Chirp Spread Spectrum*). Neste tipo de modulação digital os bits são codificados em símbolos; cada símbolo é representado por múltiplos “chips”, que são variações na fase do sinal. A quantidade de chips por símbolo é equivalente à largura de banda, visto que a modulação CSS toda a largura de banda do canal é utilizada na modulação. A transmissão dos símbolos ocorre através da subida ou descida da frequência de um sinal senoidal em torno de uma frequência base, denominadas “*up chirp*” ($f_c + Bw/2$) e “*down chirp*” ($f_c - Bw/2$).

Figura 5: variação da frequência em função do tempo na modulação CSS



Essa técnica traz benefícios como baixo requerimento de potência e robustez do canal frente a degradações do sinal decorrentes de efeitos como perdas por multicaminhos, atenuação, efeito doppler e interferências na mesma faixa de frequências [29].

2.5.2 Parâmetros Da Comunicação

A transmissão de dados sem fio pode ser avaliada através de dois parâmetros: a intensidade de sinal recebida (RSSI⁴) e a relação sinal-ruído (SNR⁵).

O valor do RSSI, sendo a potência recebida, responde de forma inversamente proporcional ao quadrado da variação da distância, como resultado das relações de propagação vistas anteriormente. Sua utilização é importante na associação com o valor mínimo que deve ser recebido para que seja possível demodular o sinal (sensibilidade do receptor), geralmente fornecido em dBm. Assim, considerando-se a potência P_r (em Watts) que chega ao receptor, o RSSI (em dBm) é definido como:

$$RSSI(dBm) = 10 * \log\left(\frac{P_r}{1mW}\right) \quad (6)$$

A relação sinal-ruído relaciona a potência do sinal de interesse recebido com a intensidade do ruído presente na demodulação:

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} \quad (7)$$

Onde:

P_s = nível do sinal de interesse;

P_N = nível do ruído presente.

4 *Received Signal Strength Indicator*

5 *Signal to Noise Ratio*

O *link budget* (orçamento de potência) de um enlace de rádio é o balanço das perdas e ganhos causados pelos elementos do sistema do ponto de transmissão até o ponto de recepção. As perdas ocorrem nas conexões e no meio de transmissão, e os ganhos são providos pelas antenas [26]. Considerando estes aspectos, a fórmula de *link budget* constitui-se da fórmula de Friis em decibel (5) incluídos os demais fatores de perda, conforme a equação (8).

$$P_R(dBm) = P_T(dBm) - L_T(dBm) + G_T(dBi) + G_R(dBi) - L_R(dBm) - A_{FS}(dB) \quad (8)$$

Sendo:

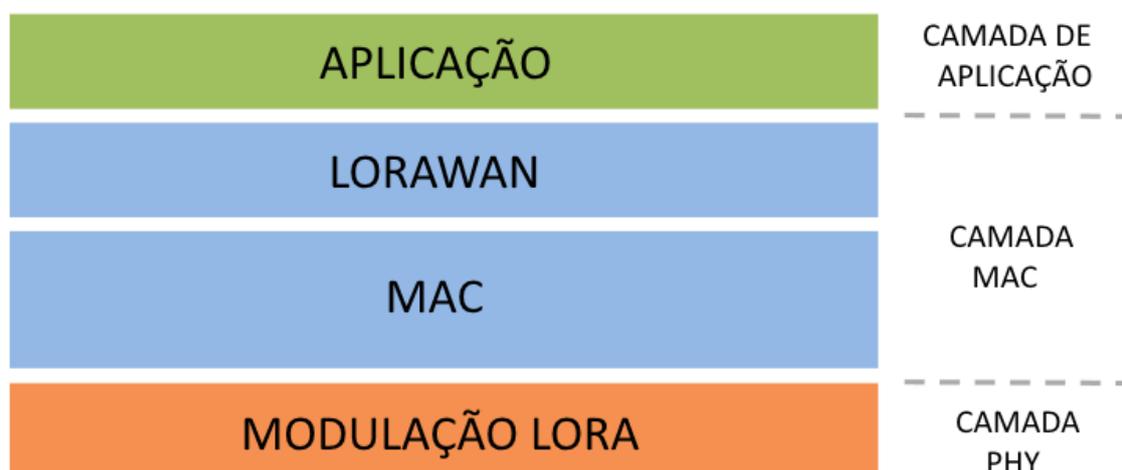
L_T = perdas no transmissor (cabos, conectores, descasamento de impedância);

L_R = perdas no receptor (cabos, conectores, descasamento de impedância).

2.5.3 Tecnologia LoRa

Inicialmente é necessário diferenciar as terminologias LoRa e LoRaWAN: enquanto a primeira designa a camada física de transmissão (modulação) e é proprietária, a segunda responde pelas camadas de protocolos que possibilitam a interligação em rede e é aberta, mantida pelo consórcio nomeado LoRaWAN Alliance, composto por um número crescente de empresas como Semtech, IBM e Microchip. A distribuição das camadas dentro da pilha de protocolos pode ser vista na figura 6.

Figura 6: pilha de protocolos LoRa e LoRaWAN



Fonte: SANCHEZ-IBORRA, Ramon et al. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions.

A tecnologia de transmissão por radiofrequência LoRa é realizada através de uma variação proprietária da modulação tipo CSS (*Chirp Spread Spectrum*). O modem LoRa aplica sobre este tipo de modulação a técnica de correção antecipada de erros FEC (*Forward Error Correction*) para aumentar o alcance e robustez dos links em comparação ao esquema de modulação FSK.

A taxa à qual a informação é enviada é denominada R_s (taxa de símbolos); o fator de espalhamento (SF – *Spread Factor*) representa o número de símbolos enviados por bit de informação. O fator de espalhamento e a taxa de codificação (CR) são variáveis de projeto que permitem ao engenheiro otimizar as trocas entre largura de banda ocupada, taxa de dados, *link budget* e imunidade à interferência. Os fatores de espalhamento, que podem ser escolhidos entre 6 e 12, são ortogonais entre si – assim múltiplos sinais transmitidos podem ocupar o mesmo canal sem interferência [29]. A relação entre taxa de símbolos (R_s), largura de banda (BW) e fator de espalhamento (SF) pode ser obtida através da equação (9):

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (9)$$

A taxa de bits nominal (R_b) é obtida através da relação:

$$R_b = SF \times \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (10)$$

O fator de espalhamento impacta no valor limite da relação sinal-ruído que permite a demodulação, como mostrado na tabela 4:

Tabela 4: relação entre fator de espalhamento e SNR necessário para demodulação

| Fator de Espalhamento (SF) | “Chips” por Símbolo | Limite de SNR para demodulação |
|----------------------------|---------------------|--------------------------------|
| 6 | 64 | -5 dB |
| 7 | 128 | -7.5 dB |
| 8 | 256 | -10 dB |
| 9 | 512 | -12.5 dB |
| 10 | 1024 | -15 dB |
| 11 | 2048 | -17.5 dB |
| 12 | 4096 | -20 dB |

Fonte: HOPERF. RFM95W *datasheet*. Tradução do autor.

A utilização da técnica direta de correção de erros acarreta no acréscimo de uma carga extra de bits (*overhead*) ao pacote, a qual é proporcional ao número de bits informado na taxa de codificação (CR): 4/5 significa a adição de 1 bit extra a cada 4 bits de carga útil, até 4/8 que significa a adição de 4 bits extras:

Tabela 5: carga extra de dados resultante da taxa de codificação

| CR | Taxa de Codificação | Relação de <i>overhead</i> |
|----|---------------------|----------------------------|
| 1 | 4/5 | 1,25 |
| 2 | 4/6 | 1,5 |
| 3 | 4/7 | 1,75 |
| 4 | 4/8 | 2 |

Fonte: HOPERF. RFM95W *datasheet*. Tradução do autor.

Assim, pode-se reescrever a equação que determina a taxa de bits nominal como:

$$R_b = SF \times \frac{4}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (11)$$

Um aumento na largura de banda do sinal permite a transferência de uma maior taxa efetiva de dados, como mostra a tabela 6:

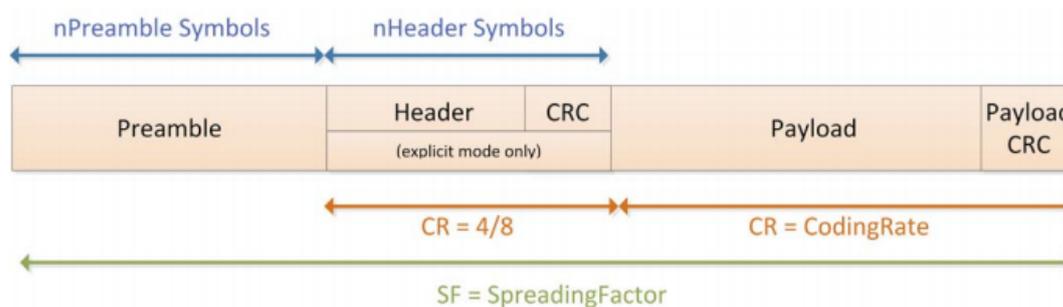
Tabela 6: alguns dos valores possíveis para taxa efetiva de dados

| Largura de Banda (BW) (kHz) | Fator de Espalhamento (SF) | Taxa de Codificação (CR) | Taxa de bits nominal (Rb) (bps) |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 7,8 | 12 | 4/5 | 18 |
| 10,4 | 12 | 4/5 | 24 |
| 15,6 | 12 | 4/5 | 37 |
| 20,8 | 12 | 4/5 | 49 |
| 31,2 | 12 | 4/5 | 73 |
| 41,7 | 12 | 4/5 | 98 |
| 62,5 | 12 | 4/5 | 146 |
| 125 | 12 | 4/5 | 293 |
| 250 | 12 | 4/5 | 586 |
| 500 | 12 | 4/5 | 1172 |

Fonte: HOPERF. RFM95W *datasheet*. Tradução do autor.

O modem LoRa permite a transmissão de pacotes completos (modo explícito, buscando maior confiabilidade na transmissão) ou com informações omitidas (modo implícito, buscando maior taxa de transmissão; o fator de espalhamento 6 apenas está disponível para utilização com cabeçalho implícito). O pacote completo inclui o preâmbulo, cabeçalho (*header*), CRC (verificação cíclica de redundância) do cabeçalho, carga útil (*payload*) e CRC da carga útil. O cabeçalho contém informação sobre o número de bytes, taxa de codificação (CR) e do uso de CRC. O formato deste pacote é mostrado na figura 7.

Figura 7 : estrutura do pacote da transmissão LoRa



Fonte: HOPERF. RFM95W *datasheet*.

2.6 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

Python é uma linguagem orientada a objetos, interpretada e capaz de tratar interrupções; controla os blocos por *indentação*, sem a necessidade de símbolos delimitadores – o que torna os códigos bastante legíveis, outra premissa da linguagem. O interpretador Python está disponível para muitos sistemas, sendo este um atrativo da linguagem (que é, portanto, bastante portátil). Além disso é extensível para C/C++ (em caso de acessos a bibliotecas construídas nessas linguagens).

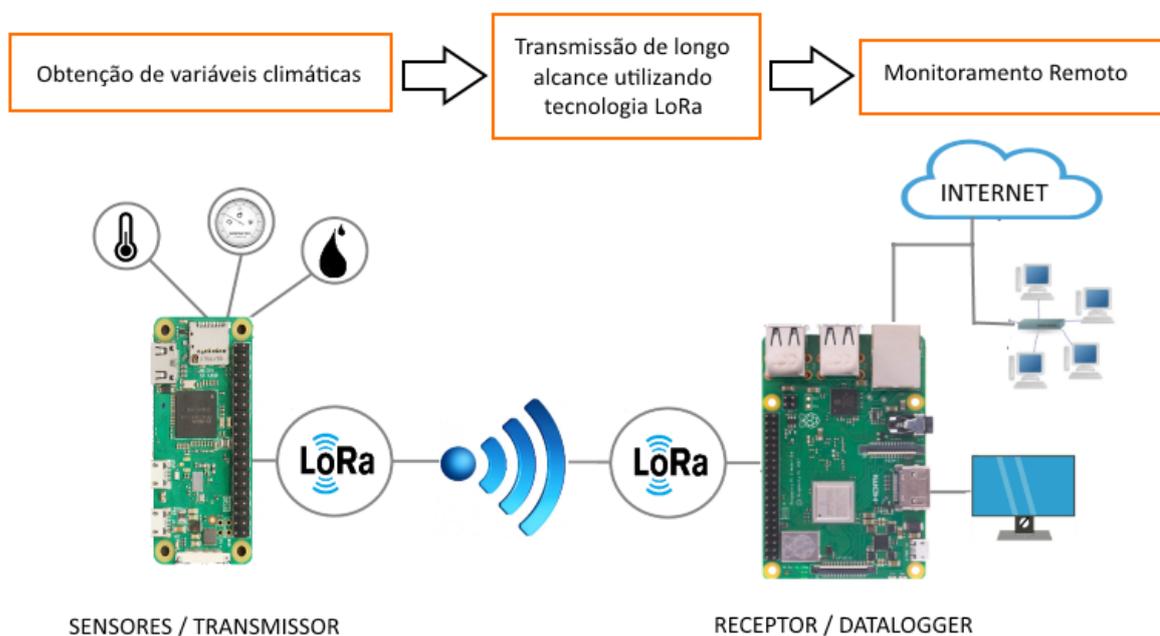
Em Python não há uma função *main()* - ao contrário de linguagens estruturadas e compiladas, como C: o interpretador inicia pelo topo do código e segue a sequência diretamente. Por outro lado, diferentemente de Java, entretanto, a máquina virtual não roda um arquivo compilado intermediariamente – mas sim executa o código (script) Python em tempo real [32].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

O sistema implementado neste trabalho efetua a obtenção dos dados dos sensores e realiza a transmissão para um dispositivo remoto através de comunicação sem fio utilizando a tecnologia LoRa. Permite modificação ou adição de componentes através dos barramentos de comunicação I2C e SPI, provendo a modularidade do sistema para atender a finalidades diversas. Os sensores e módulos necessários para obtenção das informações definidas: (temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica local) - acrescidos de georreferenciamento e com armazenamento dos dados, utilizando tecnologia de radiofrequência LoRa para transmissão dos dados. O dispositivo receptor possui interface para conectividade com a internet.

Figura 8: caracterização e aplicação do sistema



A linguagem de programação Python foi utilizada por ter como um de seus pontos fortes a modularidade; além disso, é suportada de forma nativa pelo Raspberry Pi.

A escolha dos componentes e sensores ambientais e demais módulos se deu por sua disponibilidade no mercado e por seu baixo custo. Todos os materiais foram disponibilizados pelo NPDEAS – Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Auto Sustentável da UFPR.

3.1.1 Plataformas Raspberry Pi

As plataformas Raspberry Pi são computadores em uma única placa; utilizam o sistema operacional Raspbian, derivado da distribuição Linux Debian. Dentre os recursos do sistema operacional Raspbian que são importantes para este projeto estão o gerenciamento otimizado de energia e o fato de trabalhar nativamente com a linguagem de programação Python.

Existem diferentes versões das plataformas Raspberry, de maneira que foram utilizados os dispositivos com os recursos apropriados para cada parte do sistema (transmissor e receptor).

O Raspberry Pi 3 B conta com processador ARM Cortex-A53 (ARMv8-A) com 4 núcleos de 64 bits, opera à frequência de 1,2 GHz e possui 1 GB de RAM. Como conectividade conta com 4 portas USB e conexão Ethernet (100 Mb/s) por cabo (através do conector RJ-45) e Wi-Fi (padrões b/g/n), além de 40 pinos GPIO (*General Purpose Input Output*) que dão acesso aos barramentos de comunicação I2C, SPI e à interface UART. Também possui saída de vídeo HDMI e conta com cartão microSD para execução do sistema e armazenamento dos dados, dispensando a instalação de um módulo externo. Suas dimensões são de 85,6 mm x 56 mm. A alimentação se dá através de conector micro USB (tensão de 5 V) [33].

Figura 9: Raspberry Pi 3 B (esquerda) e Raspberry Pi Zero W (direita)

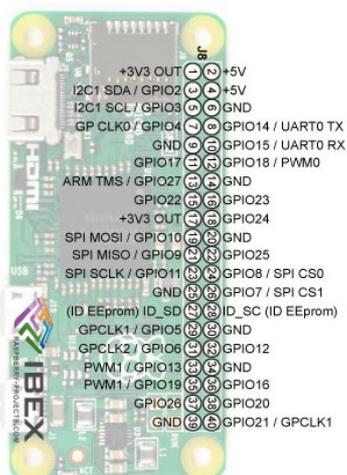


Fonte: Raspberry Pi Foundation.

A versão Raspberry Pi Zero W é menor em tamanho: 65 mm x 30 mm. Também possui menos memória (512 MB) e seu processador é um ARM1176JZF-S (ARMv6) de apenas um núcleo operando à frequência de 1 GHz. Não possui porta RJ-45, mas conta com conectividade por WiFi (padrões b/g/n) e Bluetooth. Possui os mesmos 40 pinos de GPIO que a versão 3 a alimentação se dá também por conector micro USB (5 V) [34].

Devido estas características, foi utilizado o Raspberry Pi Zero W como o dispositivo de medição e o Raspberry Pi 3 B como o dispositivo receptor. A figura 10 mostra a identificação dos pinos das plataformas Raspberry Pi (a pinagem é a mesma para ambos):

Figura 10: Pinagem das plataformas Raspberry Pi



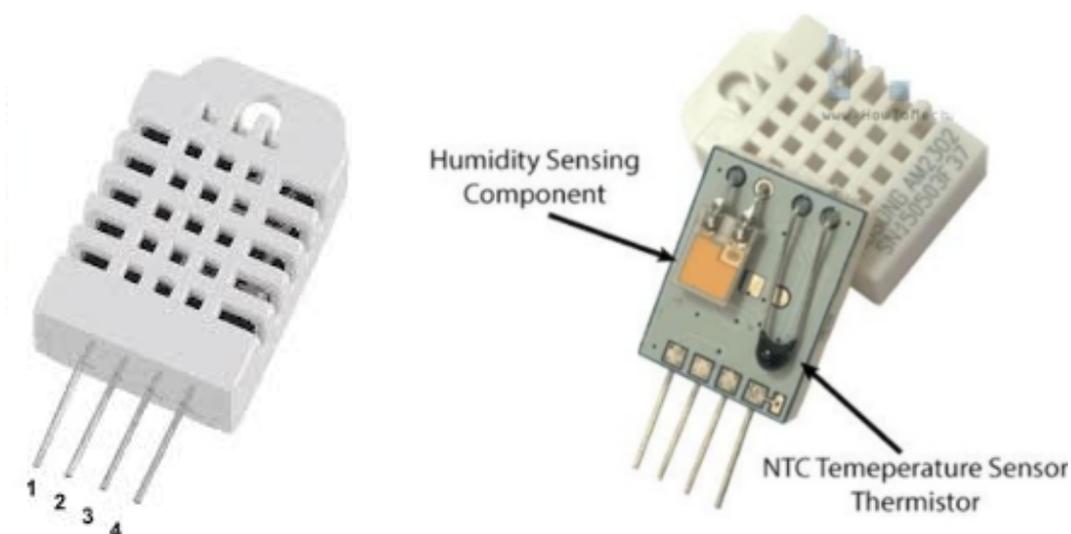
Fonte: Raspberry-projects

3.1.2 DHT22

Módulo sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT22, do fabricante AOSONG foi utilizado porque, mesmo sendo de baixo custo, suas características atendem ao requisitado para a aplicação – além disso já vem calibrado no processo de fabricação. O sensor DHT22 possui 4 pinos – dos quais VCC (1), DATA (2) e GND (4) são utilizados, e o pino 3 não é conectado. O DHT22 consiste de:

- elemento sensor de umidade do tipo capacitivo;
- sensor de temperatura do tipo NTC;
- circuito integrado para tratamento e envio dos sinais.

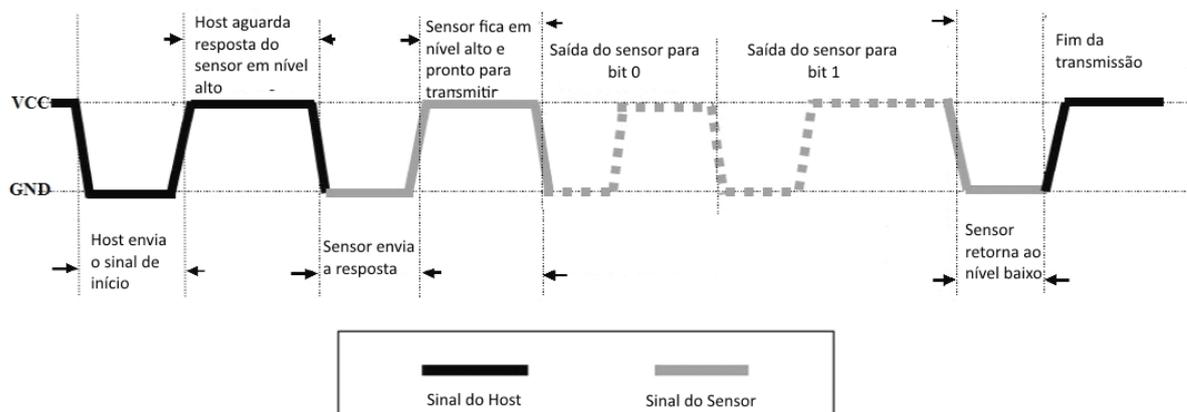
Figura 11: módulo sensor DHT22: pinagem (esquerda) e componentes internos (direita)



Fonte: AOSONG – *datasheet* do DHT22 e Howtomechanics

O trem de pulsos enviado pelo DHT22 para o pino de I/O do Raspberry segue um padrão proprietário, mas com as informações do *datasheet* é possível escrever o código de leitura para recebimento do sinal já digitalizado.

Figura 12: trem de pulsos gerado na comunicação com o DHT22



Fonte: AOSONG - *datasheet* do DHT22. Tradução do autor.

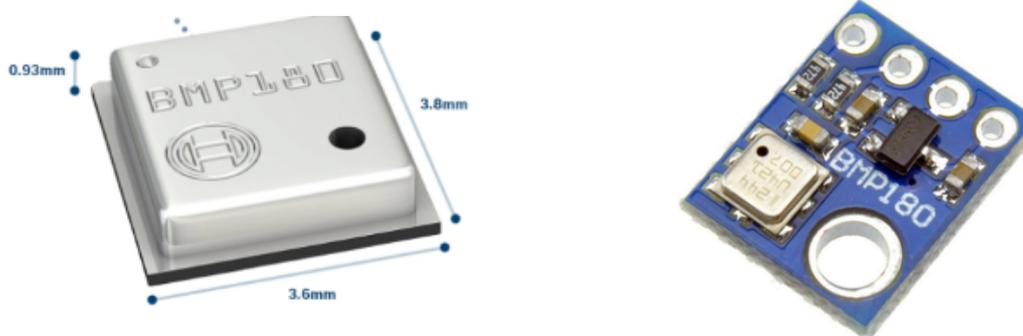
As demais especificações são as seguintes [37]:

- Já vem calibrado de fábrica;
- Faixa de medição de umidade: 0 a 100% UR;
- Faixa de medição de temperatura: -40 °C a +80 °C;
- Corrente: até 2,5mA durante uso, de 100 μ A a 150 μ A em *stand by*;
- Precisão da medição de umidade: $\pm 2,0\%$;
- Precisão da medição de temperatura: $\pm 0,5$ °C;
- Resolução: 0,1;
- Frequência máxima de medição: 1 medição a cada 2 segundos;
- Dimensões: 25 mm x 15,7 mm (sem os terminais).

3.1.3 BMP180

O módulo sensor BMP180 do fabricante Bosch Sensortec permite realizar medições barométricas. O elemento sensor é do tipo piezo-resistivo; é montado sobre uma placa que contém um circuito condicionador de sinais e que disponibiliza esses sinais digitalizados em 4 pinos: alimentação (VCC, GND) e dois pinos para comunicação (SDA e SCL) através do barramento I2C.

Figura 13: módulo sensor BMP180



Fonte: Bosh Sensortec - *datasheet* BMP180

Abaixo são listadas as demais características do sensor [38]:

- Já vem calibrado de fábrica (os valores são acessíveis através dos registradores internos);
- Faixa de leitura de pressão: 300 a 1100 hPa;
- Consumo de corrente: 5 μ A em uso, 0,1 μ A em *stand by*;
- Conexão através de interface I2C.

3.1.4 Módulo GY-NEO6MV2

O módulo GY-NEO6MV2 obtém os dados do sistema GPS e os disponibiliza na interface serial UART utilizando o protocolo padrão NMEA 0183. Seu tempo de obtenção dos dados depende das condições de recebimento dos sinais dos satélites, podendo levar vários minutos para estabelecer as condições necessárias. Apesar disso, possui um registro e bateria interna de forma a armazenar a última localização estabelecida, o que ajuda a diminuir o tempo de busca por satélites.

Figura 14: módulo GPS GY-NEO6MV2



Fonte: *datasheet* do módulo GY-NEO6MV2

Abaixo as demais características do componente [39]:

- Alimentação: 2,7 a 5 V DC;
- Corrente de operação: 37 mA (47 mA quando localizando satélites);
- Comunicação serial UART TTL;
- Bateria para backup de dados;
- Nível de sinal compatível 3,3 e 5 V;
- Velocidade da comunicação: 9600 Bauds;
- Raio de precisão: 2,5 m.

3.1.5 Armazenamento Dos Dados

O armazenamento dos dados é realizado em memória não volátil do tipo flash, através de cartão microSD removível.

A memória flash usa a tecnologia EEPROM – um tipo de memória não-volátil, que dispensa o uso de baterias ou outra fonte externa alimentação para manter os dados [1].

O cartão microSD, que contém a memória flash, é fabricado pela empresa SecureDigital. Este tipo de mídia é facilmente encontrado a preços acessíveis e muito prática devido ao seu diminuto tamanho e facilidade de inserção e remoção.

A capacidade do cartão é de 8 GB, dos quais aproximadamente 1 GB são utilizados pelo sistema operacional do dispositivo local.

Figura 15: cartão de memória flash micro SD



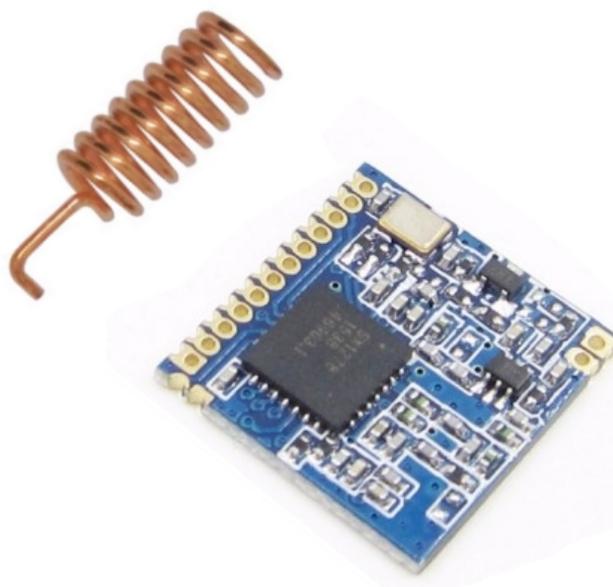
Fonte: SanDisk

3.1.6 RFM95W

A transmissão Lora é realizada pelo módulo RFM95W do fabricante Hope Microelectronics. Trata-se de uma placa cujo chip principal é baseado no SX1276 da empresa Semtech. A sensibilidade máxima do módulo LoRa RFM95W é de -148 dBm; assim, a potência de transmissão de até 20 dBm leva a um orçamento de potência de 168 dB para o enlace ponto a ponto. Ao módulo RFM95W foi acrescentada uma antena helicoidal de ganho 2,15 dBi, impedância de 50 Ω e altura da parte helicoidal de 12 mm.

O módulo utiliza a interface SPI para comunicação, e possui pinos para interrupção.

Figura 16: Módulo LoRa FRM95 e antena helicoidal



Fonte: datasheet do módulo LoRa FRM95

Abaixo estão listadas algumas das características do RFM95W:

- Modulação LoRa e FSK;
- Frequência de operação: 915 MHz;
- 168 dB de orçamento de potência do enlace de comunicação;
- até 20 dBm de potência de saída;
- Sensibilidade de até -148 dBm;
- Corrente de 120 mA transmitindo na potência máxima e de 1,8 mA em *stand by*.

Devido à potência transmitida ficar abaixo de 1 W, segundo a Lei Geral das Telecomunicações e o Plano De Atribuição, Distribuição E Destinação De Radiofrequências o módulo pode ser utilizado na faixa de frequências que dispensa a necessidade de homologação junto à ANATEL [41] [42].

3.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O sistema de sensores foi montado e testado nos laboratórios do Núcleo de Pesquisa em Energia Auto Sustentável da UFPR – NPDEAS. A primeira etapa consistiu da montagem individual dos módulos e sensores e da obtenção e avaliação dos dados; posteriormente os componentes foram integrados em uma mesma placa e interligados em conjunto ao RaspberryPi Zero W. As primeiras transmissões foram realizadas para o Raspberry Pi 3 e após esta verificação local procedeu-se com os testes em campo. Os próximos tópicos dessa seção descrevem os pontos principais dessas montagens e testes; no ANEXO A são mostradas as

imagens dos circuitos montados e dos dados obtidos durante os testes em laboratório.

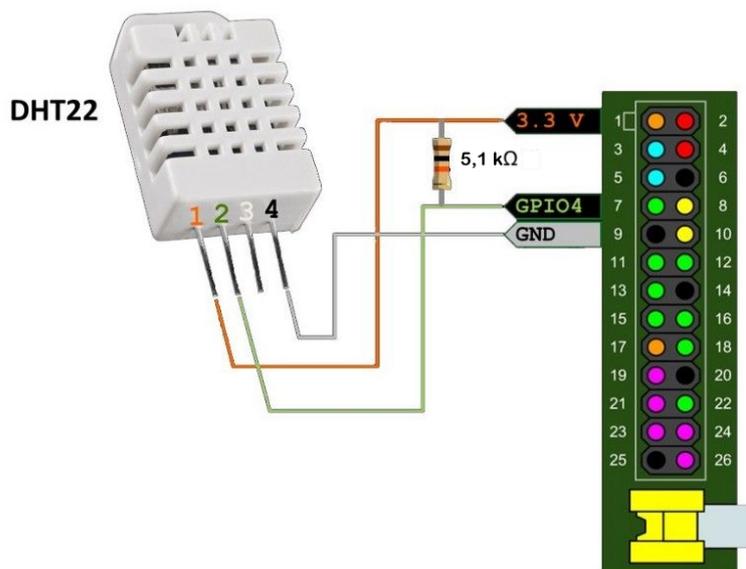
3.2.1 Montagem E Testes Em Laboratório

A montagem do sistema em laboratório consistiu na implementação física dos módulos e sensores; neste aspecto foi dada atenção especial à tensão de alimentação dos dispositivos, que utilizam 3,3 V (CMOS TTL) ao invés dos 5 V da lógica TTL tradicional. Ocorreu nesta etapa também a programação, primeiramente de maneira individual e na segunda etapa integrando todos os dados e visualizações – para isso foi utilizada a linguagem Python, cujas características e vantagens já foram mencionadas.

O Módulo DHT possui um tipo de comunicação serial cujo formato do trem de pulsos é proprietário e exclusivo e utiliza-se de apenas 1 porta GPIO do Raspberry Pi Zero W para envio dos dados – uma comunicação prática e que consome poucos recursos de hardware. Um resistor de pull-up é inserido na linha de dados de forma a não deixar o sinal lógico “flutuando”, garantindo assim maior estabilidade nas leituras do DHT22. As conexões com o barramento GPIO do Raspberry são mostradas na figura 18.

Para obtenção dos dados do módulo DHT22 foi utilizada a biblioteca do componente, escrita em Python, disponibilizada pelo fabricante Adafruit no repositório Github (https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_DHT). Esta biblioteca faz uma interface entre o módulo e o Raspberry, obtendo os dados do trem de pulsos na temporização correta e disponibilizando 2 variáveis do tipo *float* para devida manipulação do programador.

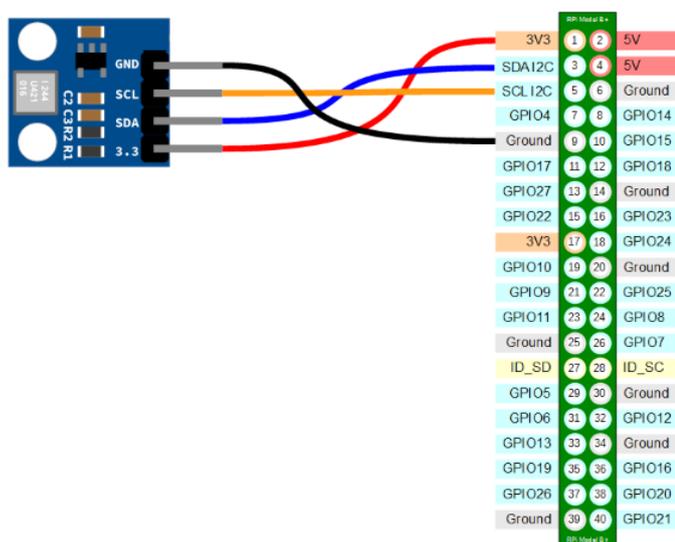
Figura 17: ligação do DHT à GPIO do Raspberry Pi Zero W



Fonte: Instructables

O módulo sensor BMP180 utiliza a interface de comunicação I2C, e por isso é conectado aos pinos SDA e SCL no Raspberry Pi. Para leitura dos dados foi utilizada a biblioteca Adafruit_Python_BMP (que pode ser obtida no endereço web: https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_BMP). Ela realiza a leitura dos dados através do barramento I2C e torna disponível em variável do tipo *float*.

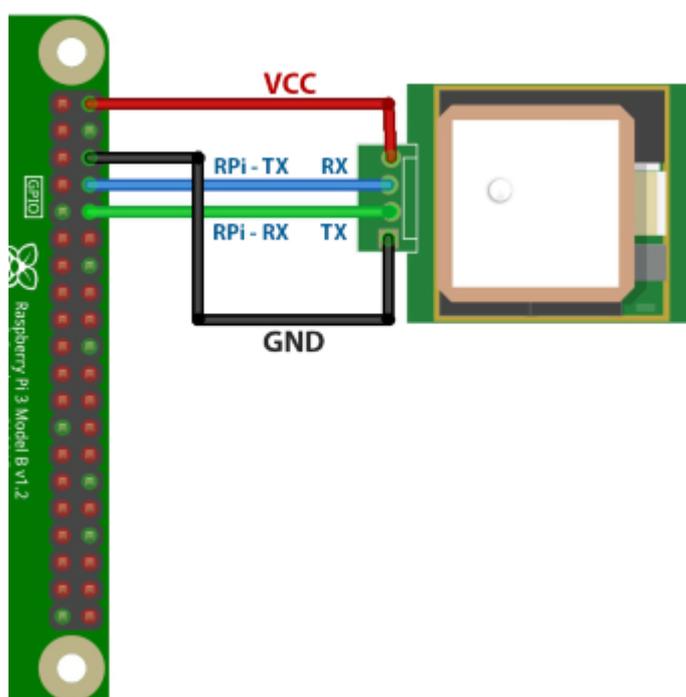
Figura 18: ligação do BMP180 à interface I2C do Raspberry Pi Zero W



Fonte: Leanpub

O módulo GPS envia as informações de forma sequencial no formato NMEA 0183; desta forma, foi utilizada a biblioteca GPSD, escrita em Python, para realizar a decodificação dos dados. Trata-se de um *daemon* (programa residente que roda em segundo plano no sistema operacional) que continuamente monitora os dados recebidos através da porta serial UART e disponibiliza os dados devidamente segmentados para uso. Cabe ao programador, então, através da documentação da biblioteca, implementar o código que trata as informações recebidas. Como utiliza a interface UART, o módulo GPS comunica-se através dos pinos TX e RX (ligados em forma de conexão cruzada)

Figura 19: ligação do módulo GPS à interface UART do Raspberry Pi Zero W

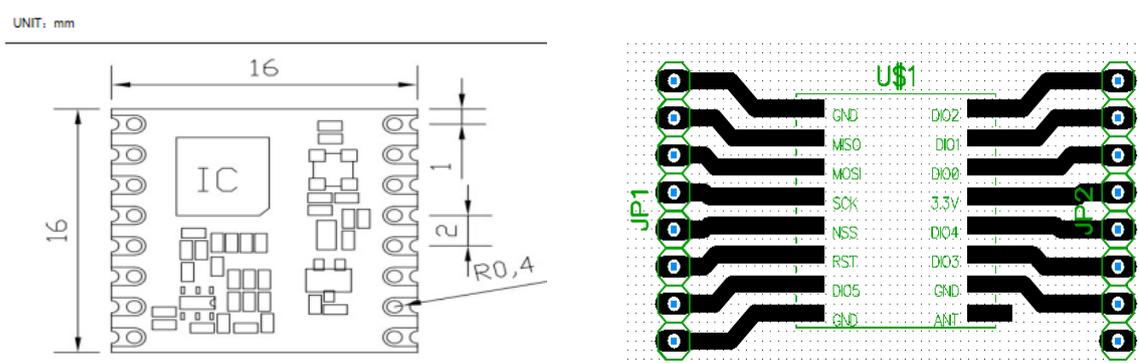


Fonte: Solo Eletronicos

A biblioteca Python para o *daemon* de leitura do GPS pode ser obtida no seguinte endereço web: <http://www.catb.org/gpsd/> .

Para utilização do módulo LoRa RFM95 foi necessária a confecção de uma placa de suporte de forma permitir a inserção no sistema e substituição em caso de necessidade. Seguindo a disposição dos pinos de alimentação e comunicação já mostrados, na placa foi feita a transição do espaçamento em milímetros para décimos de polegadas (padrão de espaçamento de furos das placas perfuradas como a utilizada na base de interligação do dispositivo de medição e transmissão).

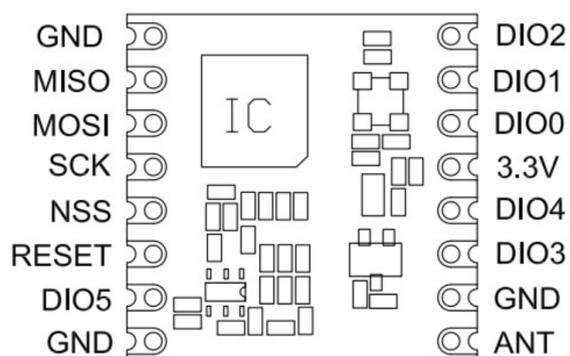
Figura 20: espaçamento do chip (esquerda)] e esquemático da placa de suporte (direita)



Fontes: espaçamento do chip – *datasheet* do módulo LoRa RFM95
diagrama esquemático da placa de suporte – o autor

O módulo é conectado à interface SPI do Raspberry Pi Zero W. Para comunicação através da interface SPI foi utilizada a biblioteca do fabricante Adafruit, disponível no website https://github.com/adafruit/Adafruit_CircuitPython_RFM9x. A figura 22 mostra a identificação dos pinos do chip usados para esta conexão:

Figura 21: disposição dos pinos do chip LoRa



Fonte: *datasheet* do módulo LoRa RFM95

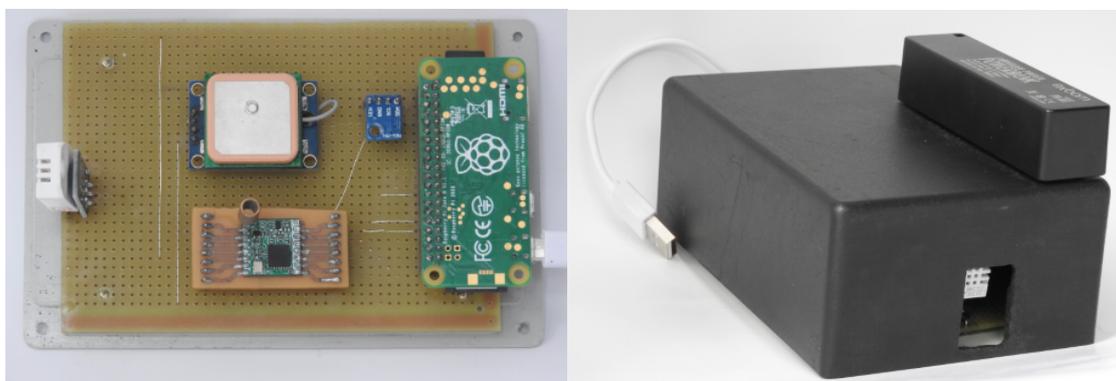
A integração dos componentes do sistema foi feita sobre placa já perfurada, o que permitiu flexibilidade no posicionamento e montagem. O Raspberry Pi foi instalado de maneira a permitir a conexão de alimentação externa (individual, através de bateria / powerbank, ou proveniente da rede de eletricidade se disponível). Foi necessário também disponibilizar abertura no case para permitir o contato do o DHT22 com o ar.

O módulo sensor BMP180 não pode estar enclausurado, pois precisa estar em contato com o fluido do qual está medindo a pressão, por outro lado o diafragma responsável pelo sensoramento é sensível à luminosidade incidindo diretamente sobre ele, alterando as medições. Por este motivo o sensor foi posicionado afastado da abertura existente para leitura do DHT22.

O consumo de corrente do dispositivo de medição e transmissão (que tende a ser alimentado por fonte independente) é de 140 mA em *stand by* e 262,5 mA quando em operação contínua.

Por fim, nas imagens abaixo pode ser visualizado o sistema com os sensores integrados e a tampa de proteção com suporte da alimentação independente

Figura 22: dispositivo de coleta e transmissão dos dados



Fonte: o autor

No dispositivo receptor (Raspberry Pi 3) foi conectada a placa de suporte confeccionada para o módulo LoRa, como mostra a imagem abaixo:

Figura 23: dispositivo receptor com *datalogger*



Fonte: o autor

Para realização da função de *datalogger* os dados recebidos são salvos em arquivo no formato de valores separados por vírgulas (.CSV), o que permite sua utilização para geração de gráficos ou em armazenamento na forma de banco de dados. O exemplo abaixo mostra a forma de armazenamento de um arquivo de registro .CSV gerado no recebimento de 10 medições:

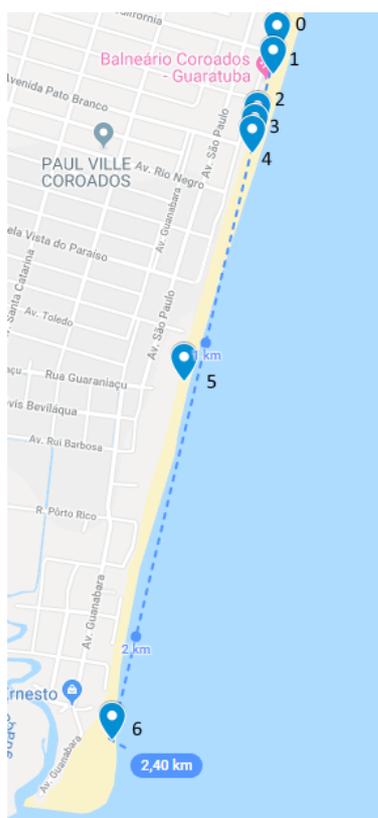
```
pacote,dia,mes,ano,hora,minuto,segundo,temperatura,umidade,pressao,latitude,longitude,rssi,snr
1,17,11,2018,16,57,28,24.5,85.10,101729,-25.972848641,-48.595213976,-87,-17.0
2,17,11,2018,16,57,30,24.4,85.60,101731,-25.972848228,-48.595213698,-88,-17.0
3,17,11,2018,16,57,41,24.3,84.90,101735,-25.972848118,-48.595211584,-89,-17.0
4,17,11,2018,16,57,49,24.2,85.10,101742,-25.9728478,-48.595211694,-88,-15.0
5,17,11,2018,16,57,59,24.2,84.60,101732,-25.972847543,-48.595210971,-89,-15.5
6,17,11,2018,16,58,6,24.5,85.60,101729,-25.972846704,-48.595212099,-88,-15.5
7,17,11,2018,16,58,13,24.7,85.10,101729,-25.972847714,-48.595212787,-89,-15.5
8,17,11,2018,16,58,20,24.3,86.40,101727,-25.972846343,-48.595210743,-89,-15.5
9,17,11,2018,16,58,27,24.3,85.60,101732,-25.972847049,-48.595210359,-88,-14.0
10,17,11,2018,16,58,37,24.4,85.10,101732,-25.972845868,-48.595211298,-88,-16.25
```

3.2.2 Testes Em Campo

Para verificar a funcionalidade do sistema de sensores com transmissão por radiofrequência LoRa foram realizados testes em campo com diferentes posicionamentos do módulo transmissor em relação ao receptor, com a efetiva coleta e transmissão dos dados e o sucesso da comunicação podendo ser avaliados a partir dos dados recebidos e dos parâmetros de RSSI e SNR.

Buscando longo alcance de transmissão e mínima taxa de erro de pacotes foram utilizados como configuração os seguintes parâmetros: potência de transmissão de 22,15 dBm (20 dBm do módulo transmissor mais 2,15 dBi da antena), fator de espalhamento SF 12, taxa de codificação CR 4/8 e largura de banda de 500 kHz. Foram realizadas 6 medições em pontos diferentes nessas condições; a imagem abaixo mostra os pontos de marcados no mapa com as respectivas distâncias:

Figura 24: mapa com a marcação dos pontos de medição



Fonte: o autor

Para realização dos testes, os programas (scripts Python) foram iniciados tanto no *datalogger* (dispositivo receptor sobre a plataforma RaspberryPi 3 B) quanto no dispositivo de captação e transmissão (sistema de sensores sobre a plataforma RaspberryPi Zero W). Estas operações foram realizadas no local através de conexão SSH através de equipamentos portáteis, aproveitando-se da capacidade de conectividade local das plataformas Raspberry.

O dispositivo receptor foi posicionado a 1,70 m de altura, no ponto 0 marcado no mapa. A partir deste ponto foi realizado o deslocamento do sistema de sensores por 6 posições, com afastamento crescente (conforme marcação no mapa); em cada uma destas posições foram realizadas 10 amostras de captação das condições climáticas e transmissão dos dados, com o transmissor a aproximadamente 1 metro de altura.

Figura 25: transmissor posicionado a 1 m de altura



Fonte: o autor

4 RESULTADOS

4.1 FUNCIONALIDADE DO SISTEMA

A obtenção e transmissão dos dados foi realizada com sucesso em todas as amostras; a recepção com sucesso das informações foi registrada no *datalogger*, cujos dados constam no anexo B. A figura 26 mostra como os dados são visualizados no local das medições em um terminal conectado ao dispositivo de coleta e transmissão:

Figura 26: imagem de tela com medições realizadas em campo

```
-----  
Leitura 9:  
  
obtendo leitura do GPS  
obtendo leitura do DHT22  
obtendo leitura do BMP180  
gps UTC:                2018-11-16T12:41:42.000Z  
temperatura:            26.8*  
umidade relativa do ar: 86.6%  
pressão atmosférica:    101830.00 Pa  
latITUDE:               -25.967810362  
longITUDE:              -48.594453384  
  
Iniciando transmissão  
dados enviados!  
-----  
  
Leitura 10:  
  
obtendo leitura do GPS  
obtendo leitura do DHT22  
obtendo leitura do BMP180  
gps UTC:                2018-11-16T12:41:49.000Z  
temperatura:            26.9*  
umidade relativa do ar: 87.4%  
pressão atmosférica:    101827.00 Pa  
latITUDE:               -25.96780977  
longITUDE:              -48.594452666  
  
Iniciando transmissão  
dados enviados!  
-----  
pi@raspberrypi:~ $ █
```

Fonte: o autor

4.2 COMPORTAMENTO COM A DISTÂNCIA

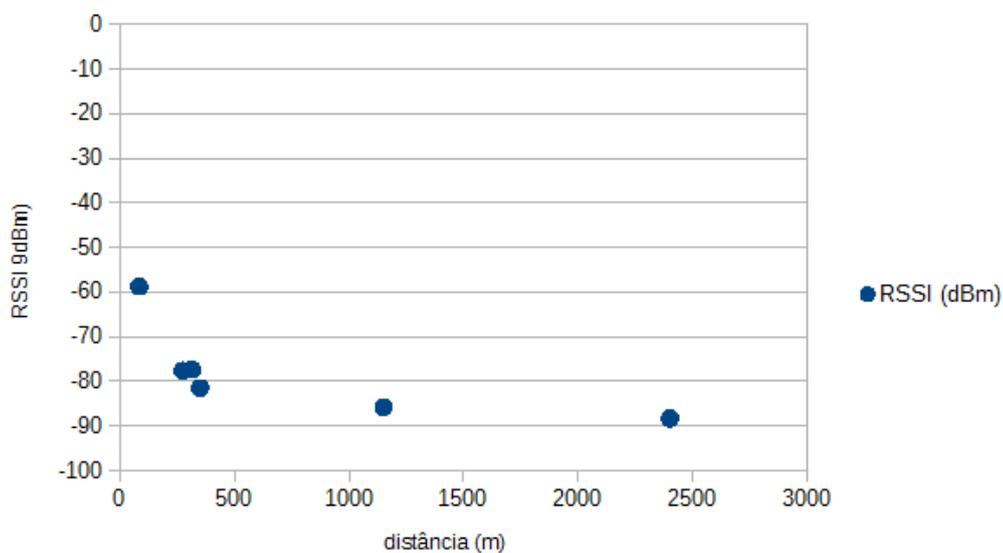
Através das informações recebidas e registradas no *datalogger* é possível observar, com o aumento da distância, a diminuição da intensidade de sinal recebido RSSI e da relação sinal-ruído. Os dados do RSSI, que condizem com a fundamentação teórica sobre a propagação de sinais abordada no capítulo 2, estão dispostos no gráfico 1.

Tabela 7: RSSI em função da distância nos testes em campo

| Posição | Distância (m) | RSSI (dBm) |
|---------|---------------|------------|
| 1 | 85 | -58,8 |
| 2 | 275 | -77,6 |
| 3 | 315 | -77,4 |
| 4 | 350 | -81,5 |
| 5 | 1150 | -85,8 |
| 6 | 2400 | -88,3 |

Fonte: o autor

Gráfico 1: RSSI em função da distância entre receptor e transmissor



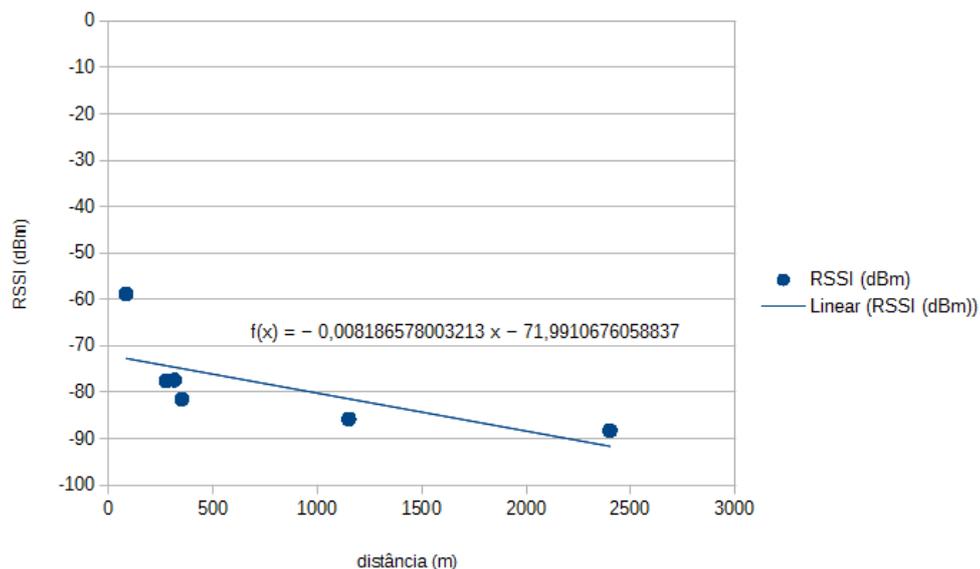
Fonte: o autor

Como visto no capítulo 2, o balanço de ganhos e perdas no sistema (*link budget*) quando da propagação de ondas de rádio no espaço livre pode ser estabelecido da seguinte maneira:

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) - L_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + G_R(\text{dBi}) - L_R(\text{dBm}) - A_{FS}(\text{dB}) \quad (8)$$

Considerando-se a máxima sensibilidade do receptor de -148 dBm, é possível aplicar em (8) a equação da regressão linear obtida no gráfico 2, de forma a estimar o alcance limite da comunicação.

Gráfico 2: Regressão linear do RSSI em função da distância entre receptor e transmissor



Fonte: o autor

Assim, desconsiderando-se as perdas no hardware de conexão:

$$-0,008186578003213 x - 71,9910676058837 = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + G_R(\text{dBi}) - A_{FS}(\text{dB})$$

$$-0,008186578003213 x - 71,9910676058837 = -148$$

$$x = 9.285 \text{ m}$$

Desta forma obtém-se que, considerando uma sensibilidade de -148 dBm no receptor, o alcance máximo da comunicação é de 9.285 m. Cabe lembrar que existem fatores de atenuação adicionais que degradam o sinal (como mencionado no capítulo 2), além da diminuição da relação sinal-ruído verificada ao longo dos testes; por outro lado, a depender da aplicação, pode-se definir limites considerados aceitáveis para as taxas de erro de bit (*Bit Error Rate*) e de pacote (*Packet Error Rate*).

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho construiu-se um sistema modular de sensores com a transmissão de dados realizada através da tecnologia de radiofrequência LoRa até um dispositivo remoto com capacidade de interligação em rede e à nuvem da internet. Utilizando sensores climáticos, módulo de georreferenciamento GPS e *datalogger* (propostos a partir dos exemplos de aplicação do sensoriamento e monitoramento climático e ambiental contextualizados) o sistema mostrou-se funcional, mesmo utilizando-se componentes de baixo custo – comprovando ser uma alternativa válida frente aos desafios e limitações inerentes ao uso das tecnologias de transmissão já consolidadas. Da mesma forma, o uso das plataformas Raspberry Pi mostrou-se adequado ao sistema e tem grande parcela de contribuição nos resultados atingidos.

Dados os resultados obtidos, a construção e utilização do sistema comprovou-se viável através da utilização dos métodos e materiais listados neste trabalho. A robustez e alcance da transmissão ficou comprovada através do teste em campo: mesmo diante da pouca altura das antenas, o resultado calculado com base nos dados das medições ficou próximo ao esperado de acordo com a literatura científica consultada.

Espera-se, desta maneira, que este trabalho e seus resultados possam contribuir como solução para as diversas aplicações que se encontram no âmbito

dos desafios listados (notadamente a necessidade de sistemas de sensoriamento de baixo custo e longo alcance de transmissão).

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Podem ser sugeridos, como continuidade do desenvolvimento deste trabalho e melhoria da solução proposta, os seguintes itens: a) otimização dos circuitos e programas, sob condições específicas de utilização, de forma a aumentar a autonomia do equipamento de medição e o alcance da transmissão; b) implementação da camada LoRaWAN, visando ao aumento do número de estações e à formação de uma rede; c) implementação de interface gráfica e recursos para o usuário (*front-end*); e por fim, mas não menos importante, d) projeto e instalação das proteções necessárias contra intempéries e descargas atmosféricas.

6 BIBLIOGRAFIA

1. BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner J. **Instrumentação E Fundamentos De Medidas – Volume 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
2. REAL, Cilene R. **Medida E Analise De Comportamento Da Rssi De Uma Rede De Sensor Sem Fio Em Ambiente Industrial**. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2015. Disponível em <<http://tede.bibliotecadigital.puc-campinas.edu.br:8080/jspui/bitstream/tede/556/1/Cilene%20Renata%20Real.pdf>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
3. NATIONAL INSTRUMENTS. **What Is a Wireless Sensor Network?** Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/7142/en/>>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.
4. MINERVA, Roberto; BIRU, Abyi; ROTONDI, Domenico. **Towards A Definition Of The Internet Of Things (IoT)**. Disponível em: <https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf>.
5. SILVA, André T. da. **Módulos De Comunicação Wireless Para Sensores**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007. Disponível em <<https://web.fe.up.pt/~ee02055/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
6. COSTA, Rafael A. A.; MENDES, Luis A. M. **Evolução das redes sem fio: um estudo comparativo entre Bluetooth e ZigBee**. Universidade Presidente Antônio Carlos, Dezembro, 2006. Disponível em <<http://ftp.unipac.br/site/bb/tcc/tcc-a010b188f93af4c28ca9af23b9e3c476.pdf>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
7. SANTOS, Jacques V. dos; LUGLI, Alexandre B. **Comparativo E Estudo Das Tecnologias Wireless Para Automação Industrial**. Instituto Nacional de Telecomunicações, 2012. Disponível em <<https://www.inatel.br/biblioteca/artigos-cientificos/2012/6167-comparativo-e-estudo-das-tecnologias-wireless-para-automacao-industrial>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
8. Telesíntese. **Tecnologia Existente Permite Que IoT Avance Para Novos Modelos, Defende Embratel**. Disponível em <<http://www.telesintese.com.br/tecnologia-existente-permite-que-iot-avance-para-novos-modelos-defende-embratel/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
9. IEEE. **Define IoT**. Disponível em <<https://iot.ieee.org/definition.html>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.

10. COSSINI, Fabio. **Lorawan: Uma Rede Alternativa Para A Internet Das Coisas**. Mini Paper Series Ano 12. Novembro, 2016 – Nº 274. Disponível em: <<https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/tlcbre/entry/mp274?lang=en>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
11. BNDES. **Internet das Coisas: um plano de ação para o Brasil**. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/269bc780-8cdb-4b9b-a297-53955103d4c5/relatorio-final-plano-de-acao-produto-8-alterado.pdf?MOD=AJPERES&CVID=m0jDUok>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
12. RAZA, Usman; KULKARNI, Parag; SOORIYBANDARA, Mahesh S. **Low Power Wide Area Networks: An Overview**.
13. CENTENARO, M. et al. **Long-Range Communications In Unlicensed Bands: The Rising Stars In The Iot And Smart City Scenarios**. IEEE Wireless Communications, Outubro 2016. Disponível em <<https://arxiv.org/pdf/1510.00620.pdf>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
14. SILVA, R.b. et al. **Estações meteorológicas de código aberto: Um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s.l.], v. 37, n. 1, p.1-8, mar. 2015. UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11173711685>.
15. ALCANTUD, Melissa Bonfim; ROSA, Paulo Roberto. **Aplicação De Redes De Sensores Sem Fio Na Agricultura De Precisão: Uma Reflexão Teórica**. Colloquium Exactarum, [s.l.], v. 9, n. , p.36-41, 23 ago. 2017. Associação Prudentina de Educação e Cultura (APEC). <http://dx.doi.org/10.5747/ce.2017.v9.nesp.000119>
16. BERNARDI, Alberto C. C. et al. **Agricultura De Precisão**. EMPBRAPA, 2014. Disponível em <<https://www.embrapa.br/agriculturadeprecisao>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
17. RAMIÃO, André L. **Sistema Ciber-Físico de Produção Modular usando Raspberry Pi**. Universidade Nova Lisboa. 2017. Disponível em <https://run.unl.pt/bitstream/10362/36905/1/Ramiao_2017.pdf>
18. IBM. **Melhores Práticas Para Desenvolvimento De Iot**. Disponível em <<https://www.ibm.com/developerworks/br/library/iot-mobile-practices-iot-success/index.html>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
19. USP EDISCIPLINAS. **Arquitetura de Sistemas Embarcados** Disponível em <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3427919/mod_resource/content/4/17%C2%AA%20Aula%20cont%2022052017.pdf>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
20. BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner J. **Instrumentação E Fundamentos De Medidas – Volume 2**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

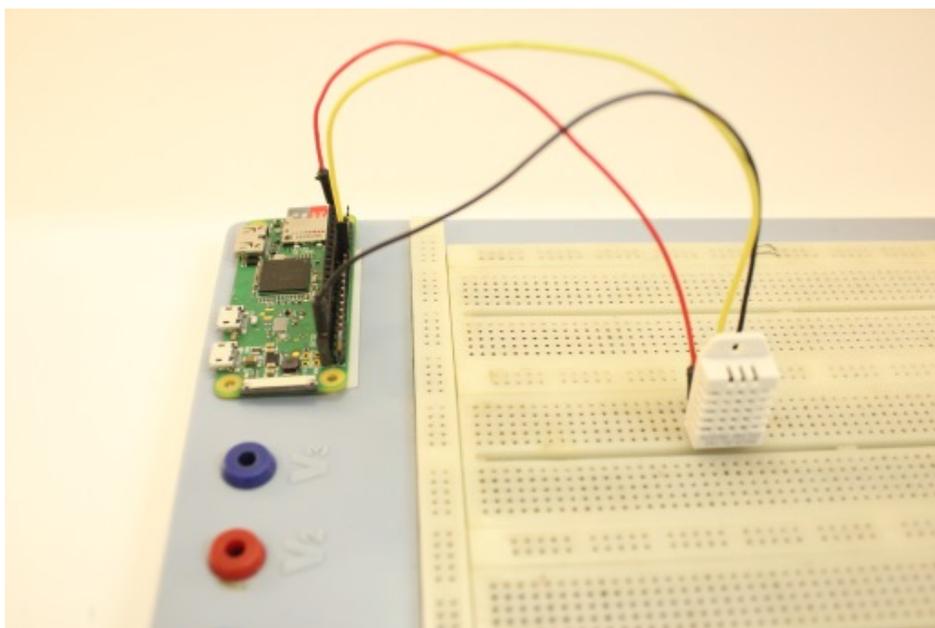
21. ZAMPERETTI, Bernardo. **Tecnologia Em Geolocalização: Ufsm Se Insere No Projeto Glonass Através De Parceria Com O Governo Russo**. Disponível em <<http://coral.ufsm.br/arco/sitenovo/?p=1394>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
22. MEHL, Ewaldo L. **TE271 – Sistemas de Geolocalização Baseados em Satélites**. Disponível em <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te271/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
23. DARTORA, César Augusto. **Teoria Do Campo Eletromagnético E Ondas**. 304 p. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/Ondas_Eletromagneticas.pdf>.
24. RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless Communications – Principles And Practices**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.
25. HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. **Sistemas De Comunicação**. 5ª ED. Porto Alegre: Bookman, 2011.
26. MEHL, Ewaldo L. **TE155 – Redes de Acesso Sem Fios**. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te155/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
27. FUSCO, Vinent F. **Teoria e Técnicas de Antenas: Princípios e Prática**. São Paulo: Bookman, 2006. 253 p.
28. HAYKIN, Simon. **Sistemas De Comunicação Analógicos E Digitais**. 4ª ED. Porto Alegre: Bookman, 2004.
29. SEMTECH. **An1200.22 Lora Modulation Basics: Application Note**. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>>. Acesso em 2 de setembro de 2018.
30. SANCHEZ-IBORRA, Ramon et al. **Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions**. Sensors: Open Access Journal, Basel, Suíça, 3 mar. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/14248220/18/3/772/pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
31. HOPERF. **RFM95W Datasheet**. Disponível em <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
32. BARRY, Paul. **Head First Python**. 2ª ED. Boston, USA: O'Reilly, 2017.
33. RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi 3 Model B Specifications**. Disponível em <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b>> Acesso em 10 de novembro de 2018.

34. RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi Zero W Specifications**. Disponível em <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
35. Raspberry-projects. Disponível em <<http://www.raspberry-projects.com/pi/pi-hardware/raspberry-pi-zero/rpi-zero-io-pins>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
36. Howtomechanics. Disponível em <<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/dht11-dht22-sensors-temperature-and-humidity-tutorial-using-arduino/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
37. AOSONG ELECTRONICS. **DHT22 Datasheet**. Disponível em <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
38. BOSCH SENSORTEC. **BMP180 Technical Data**. Disponível em <https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmp180>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
39. UBLOX. **NEO-6 u-blox 6 GPS Modules**. Disponível em <[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
40. SanDisk. Disponível em <<https://www.sandisk.com.br/home/memory-cards/microsd-cards/sandisk-microsd>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
41. BRASIL. **Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997 – Lei Geral das Telecomunicações**. Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais. Publicado: Quinta, 17 Julho 1997 17:57. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/leis/2-lei-9472>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
42. ANATEL. **Plano De Atribuição, Distribuição E Destinação De Radiofrequências**. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/setorregulado/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
43. Instructables. Disponível em <<https://www.instructables.com/id/Temperature-and-Humidity-Monitoring-Using-Raspberr/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
44. Leanpub. Disponível em <<https://leanpub.com/RpiMRE/read>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.
45. Solo Eletronicos. Disponível em <<http://soloeletronicos.com/2018/05/21/>>. Acesso em 10 de novembro de 2018.

ANEXO A: IMAGENS DOS TESTES EM LABORATÓRIO

1 – DHT22

Figura 27: *Setup* de teste do DHT22 montado em *protoboard*:



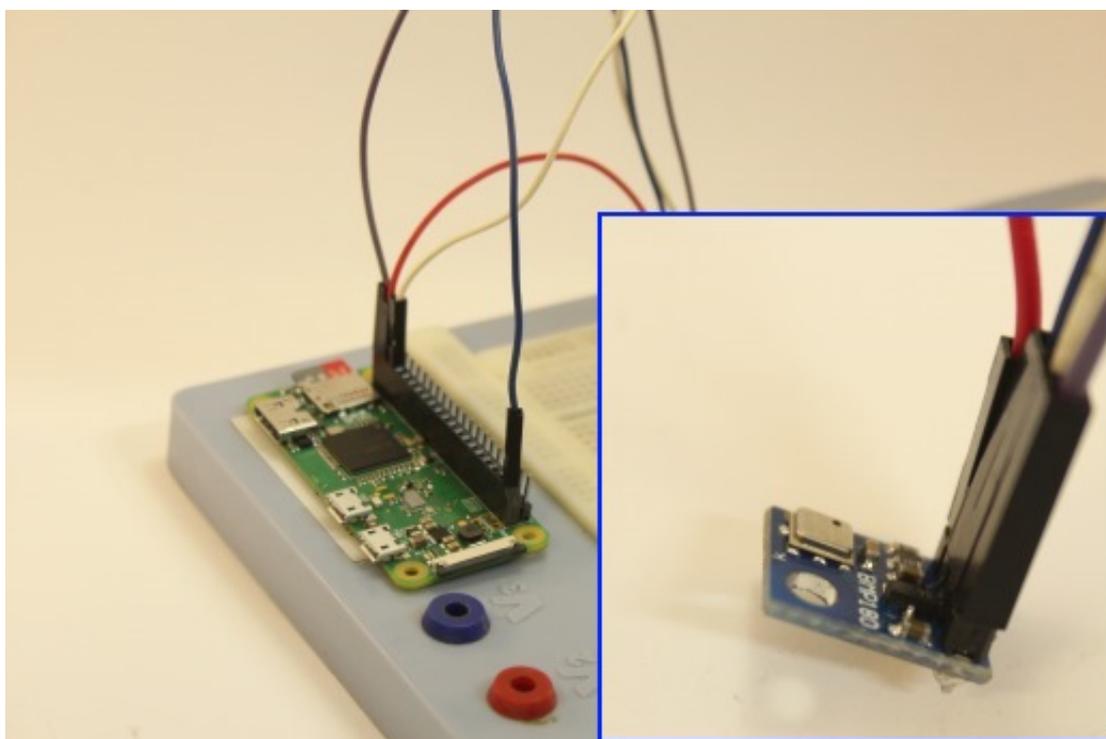
Fonte: o autor

Figura 28: imagem de tela com os dados do DHT22 obtidos no teste individual:

```
LXTerminal
Arquivo Editar Abas Ajuda
root@raspberrypi:/home/pi/Adafruit_Python_DHT/teste# python DHT22.py
Temp=20.7°C Humidity=89.4%
root@raspberrypi:/home/pi/Adafruit_Python_DHT/teste# python DHT22.py
Temp=20.6°C Humidity=89.9%
root@raspberrypi:/home/pi/Adafruit_Python_DHT/teste# python DHT22.py
Temp=20.6°C Humidity=89.9%
root@raspberrypi:/home/pi/Adafruit_Python_DHT/teste#
```

Fonte: o autor

2 – BMP180

Figura 29: *Setup* de teste do BMP180 montado em *protoboard*:

Fonte: o autor

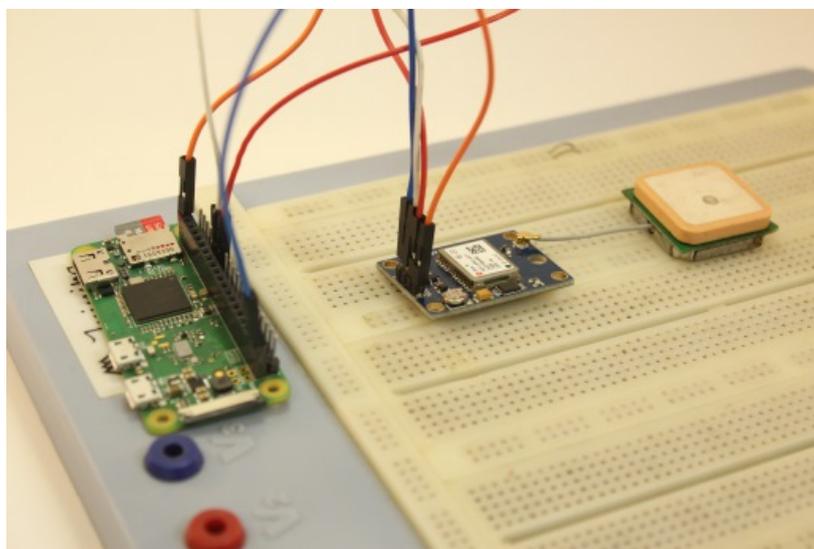
Figura 30: imagem de tela com os dados do BMP180 obtidos no teste individual:

```
LXTerminal
Arquivo Editar Abas Ajuda
root@raspberrypi:/home/pi/bmp180code/Adafruit_Python_BMP/teste# python bmp180.py
Pressao = 91781.00 Pa
root@raspberrypi:/home/pi/bmp180code/Adafruit_Python_BMP/teste# python bmp180.py
Pressao = 91776.00 Pa
root@raspberrypi:/home/pi/bmp180code/Adafruit_Python_BMP/teste# python bmp180.py
Pressao = 91778.00 Pa
root@raspberrypi:/home/pi/bmp180code/Adafruit_Python_BMP/teste#
```

Fonte: o autor

3 – GPS GY-NEO6MV2

- Figura 31: *Setup* de teste do módulo GPS montado em *protoboard*:



Fonte: o autor

Figura 32: imagem de tela com os dados do módulo GPS obtidos no teste individual

```

pi@raspberrypi: ~
lqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqkllqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqq^
x   Time:          2018-09-25T16:29:30.000Z   xxPRN:  Elev:  Azim:  SNR:  Used:  x
x   Latitude:     25.451631 S                xx  5   12   315   27   Y   x
x   Longitude:    49.235743 W                xx  6   08   024   30   Y   x
x   Altitude:     888.8 m                    xx 12   08   290   19   Y   x
x   Speed:        0.2 kph                    xx 13   69   248   13   N   x
x   Heading:      225.0 deg (true)           xx 15   27   229   26   Y   x
x   Climb:        -2.7 m/min                 xx 17   69   075   21   N   x
x   Status:       3D FIX (46 secs)           xx 19   57   012   16   Y   x
x   Longitude Err: +/- 17 m                  xx 24   07   234   26   N   x
x   Latitude Err:  +/- 17 m                  xx 28   37   148   18   N   x
x   Altitude Err: +/- 46 m                   xx 30   36   094   20   N   x
x   Course Err:   n/a                       xx                                     x
x   Speed Err:    +/- 1 kph                  xx                                     x
x   Time offset:  0.128                      xx                                     x
x   Grid Square:  GG54jn                     xx                                     x
mqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqjmqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqqj

```

Fonte: o autor

ANEXO B: REGISTRO DOS TESTES EM CAMPO

- Conjunto de dados 1: Distância = 85 m:

Tabela 8: SF = 12; BW = 500 kHz; CR = 4/8; Distância = 85 m

| pacote | dia | mes | ano | hora | minuto | segundo | temperatura | umidade | pressao | latitude | longitude | rsi | snr |
|--------|-----|-----|------|------|--------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-----|------|
| 1 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 1 | 24.5 | 81.50 | 102084 | -25.953032642 | -48.589966832 | -58 | 5.75 |
| 2 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 5 | 24.4 | 84.30 | 102095 | -25.95303309 | -48.589966286 | -60 | 4.75 |
| 3 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 11 | 24.4 | 84.90 | 102088 | -25.953032987 | -48.58996724 | -59 | 5.25 |
| 4 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 23 | 24.2 | 84.40 | 102086 | -25.953034128 | -48.589965505 | -57 | 6.0 |
| 5 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 33 | 24.2 | 84.60 | 102082 | -25.953035403 | -48.589963276 | -60 | 4.75 |
| 6 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 40 | 24.1 | 84.30 | 102085 | -25.953035127 | -48.589962673 | -58 | 6.0 |
| 7 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 45 | 24.1 | 84.40 | 102091 | -25.953036511 | -48.589963734 | -59 | 5.75 |
| 8 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 34 | 54 | 24.0 | 83.20 | 102088 | -25.953035712 | -48.589963563 | -58 | 5.75 |
| 9 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 35 | 1 | 24.0 | 83.40 | 102097 | -25.953035414 | -48.589963972 | -60 | 5.0 |
| 10 | 17 | 11 | 2018 | 9 | 35 | 3 | 24.0 | 83.70 | 102089 | -25.953035126 | -48.589964518 | -59 | 5.0 |

Fonte: o autor

- Conjunto de dados 2: Distância = 275 m:

Tabela 9: SF = 12; BW = 500 kHz; CR = 4/8; Distância = 275 m

| pacote | dia | mes | ano | hora | minuto | segundo | temperatura | umidade | pressao | latitude | longitude | rsi | snr |
|--------|-----|-----|------|------|--------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-----|------|
| 1 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 48 | 53 | 25.2 | 82.60 | 101976 | -25.954668981 | -48.59040041 | -77 | 1.75 |
| 2 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 49 | 5 | 25.8 | 81.50 | 101986 | -25.954669707 | -48.590482062 | -80 | 2.0 |
| 3 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 49 | 15 | 25.7 | 81.50 | 101994 | -25.954670016 | -48.59048179 | -80 | 1.75 |
| 4 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 49 | 21 | 25.4 | 81.80 | 101985 | -25.954670192 | -48.590479998 | -79 | 2.5 |
| 5 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 49 | 34 | 25.2 | 81.30 | 101981 | -25.954671184 | -48.590478708 | -77 | 3.25 |
| 6 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 49 | 49 | 25.2 | 81.50 | 101983 | -25.954670911 | -48.590481147 | -75 | 4.25 |
| 7 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 49 | 56 | 25.0 | 79.90 | 101988 | -25.954669823 | -48.590482582 | -77 | 4.25 |
| 8 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 50 | 0 | 25.2 | 81.00 | 101991 | -25.954669046 | -48.590482401 | -77 | 3.75 |
| 9 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 50 | 13 | 25.1 | 81.30 | 101989 | -25.9546706 | -48.590479574 | -77 | 3.5 |
| 10 | 17 | 11 | 2018 | 10 | 50 | 15 | 24.9 | 81.20 | 101987 | -25.954669647 | -48.590479062 | -77 | 2.5 |

Fonte: o autor

- Conjunto de dados 3: Distância = 315 m:

Tabela 10: SF = 12; BW = 500 kHz; CR = 4/8; Distância = 315 m

| pacote | dia | mes | ano | hora | minuto | segundo | temperatura | umidade | pressao | latitude | longitude | rsi | snr |
|--------|-----|-----|------|------|--------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-----|-------|
| 1 | 0 | 0 | 2018 | 13 | 7 | 0 | 25.7 | 84.60 | 101817 | -25.955034667 | -48.590579 | -76 | 2.25 |
| 2 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 5 | 25.7 | 81.60 | 101812 | -25.955034469 | -48.590575587 | -77 | 2.25 |
| 3 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 9 | 25.8 | 83.90 | 101814 | -25.955035266 | -48.590575173 | -77 | 2.75 |
| 4 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 15 | 25.6 | 83.60 | 101813 | -25.955036108 | -48.59057519 | -77 | 3.0 |
| 5 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 23 | 25.1 | 82.30 | 101813 | -25.955036262 | -48.590575864 | -77 | 2.75 |
| 6 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 32 | 25.2 | 84.20 | 101815 | -25.95503603 | -48.590574631 | -76 | 1.75 |
| 7 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 44 | 25.1 | 84.10 | 101817 | -25.955034999 | -48.590573645 | -77 | 2.0 |
| 8 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 48 | 25.2 | 83.60 | 101815 | -25.955034393 | -48.590573157 | -77 | 2.75 |
| 9 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 7 | 53 | 25.2 | 84.30 | 101803 | -25.955035561 | -48.590573567 | -80 | -1.25 |
| 10 | 17 | 11 | 2018 | 13 | 8 | 4 | 25.1 | 83.40 | 101806 | -25.95503656 | -48.590573365 | -80 | 1.0 |

Fonte: o autor

- Conjunto de dados 4: Distância = 350 m:

Tabela 11: SF = 12; BW = 500 kHz; CR = 4/8; Distância = 350 m

| pacote | dia | mes | ano | hora | minuto | segundo | temperatura | umidade | pressao | latitude | longitude | rss | snr |
|--------|-----|-----|------|------|--------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-----|-------|
| 1 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 32 | 18 | 24.0 | 81.30 | 101677 | -25.955364152 | -48.590612606 | -84 | 0.5 |
| 2 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 32 | 24 | 24.5 | 81.60 | 101675 | -25.955364079 | -48.590613083 | -82 | 1.75 |
| 3 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 32 | 35 | 24.3 | 81.40 | 101670 | -25.95536537 | -48.590618793 | -81 | 2.0 |
| 4 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 32 | 42 | 24.4 | 81.50 | 101668 | -25.955366373 | -48.590621358 | -79 | 2.5 |
| 5 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 32 | 54 | 24.2 | 81.70 | 101674 | -25.955365833 | -48.590624841 | -80 | 2.5 |
| 6 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 33 | 1 | 24.2 | 81.80 | 101675 | -25.955365637 | -48.590626334 | -81 | 1.25 |
| 7 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 33 | 8 | 24.2 | 81.70 | 101669 | -25.955365681 | -48.590626682 | -82 | 1.0 |
| 8 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 33 | 15 | 24.1 | 82.60 | 101663 | -25.955366266 | -48.590625476 | -80 | 2.5 |
| 9 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 33 | 20 | 24.2 | 82.60 | 101676 | -25.955365937 | -48.590625726 | -83 | -0.25 |
| 10 | 17 | 11 | 2018 | 17 | 33 | 29 | 24.4 | 82.30 | 101657 | -25.955365946 | -48.590625695 | -83 | 0.25 |

Fonte: o autor

- Conjunto de dados 5: Distância = 1.150 m:

Tabela 12: SF = 12; BW = 500 kHz; CR = 4/8; Distância = 1.150 m

| pacote | dia | mes | ano | hora | minuto | segundo | temperatura | umidade | pressao | latitude | longitude | rss | snr |
|--------|-----|-----|------|------|--------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-----|--------|
| 1 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 31 | 45 | 24.6 | 84.10 | 101933 | -25.962182953 | -48.592876539 | -85 | -11.0 |
| 2 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 31 | 53 | 25.1 | 83.10 | 101947 | -25.962180379 | -48.592874826 | -86 | -12.25 |
| 3 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 31 | 59 | 24.9 | 83.50 | 101951 | -25.962178568 | -48.592875169 | -86 | -12.0 |
| 4 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 9 | 24.9 | 83.50 | 101950 | -25.962177803 | -48.592874173 | -86 | -13.5 |
| 5 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 11 | 25.1 | 85.10 | 101947 | -25.962177859 | -48.592873706 | -86 | -14.0 |
| 6 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 21 | 25.0 | 85.60 | 101949 | -25.962177074 | -48.592873781 | -86 | -11.25 |
| 7 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 29 | 25.0 | 85.10 | 101947 | -25.962174962 | -48.592873054 | -86 | -13.0 |
| 8 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 39 | 24.9 | 84.80 | 101952 | -25.96217572 | -48.592873521 | -86 | -11.0 |
| 9 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 41 | 24.9 | 85.10 | 101948 | -25.96217497 | -48.592873975 | -85 | -12.5 |
| 10 | 17 | 11 | 2018 | 11 | 32 | 53 | 25.1 | 86.40 | 101948 | -25.962175967 | -48.592873715 | -86 | -13.25 |

Fonte: o autor

- Conjunto de dados 6: Distância = 2.400 m:

Tabela 13: SF = 12; BW = 500 kHz; CR = 4/8; Distância = 2.400

| pacote | dia | mes | ano | hora | minuto | segundo | temperatura | umidade | pressao | latitude | longitude | rss | snr |
|--------|-----|-----|------|------|--------|---------|-------------|---------|---------|---------------|---------------|-----|--------|
| 1 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 57 | 28 | 24.5 | 85.10 | 101729 | -25.972848641 | -48.595213976 | -87 | -17.0 |
| 2 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 57 | 30 | 24.4 | 85.60 | 101731 | -25.972848228 | -48.595213698 | -88 | -17.0 |
| 3 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 57 | 41 | 24.3 | 84.90 | 101735 | -25.972848118 | -48.595211584 | -89 | -17.0 |
| 4 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 57 | 49 | 24.2 | 85.10 | 101742 | -25.9728478 | -48.595211694 | -88 | -15.0 |
| 5 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 57 | 59 | 24.2 | 84.60 | 101732 | -25.972847543 | -48.595210971 | -89 | -15.5 |
| 6 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 58 | 6 | 24.5 | 85.60 | 101729 | -25.972846704 | -48.595212099 | -88 | -15.5 |
| 7 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 58 | 13 | 24.7 | 85.10 | 101729 | -25.972847714 | -48.595212787 | -89 | -15.5 |
| 8 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 58 | 20 | 24.3 | 86.40 | 101727 | -25.972846343 | -48.595210743 | -89 | -15.5 |
| 9 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 58 | 27 | 24.3 | 85.60 | 101732 | -25.972847049 | -48.595210359 | -88 | -14.0 |
| 10 | 17 | 11 | 2018 | 16 | 58 | 37 | 24.4 | 85.10 | 101732 | -25.972845868 | -48.595211298 | -88 | -16.25 |

Fonte: o autor