

Desenvolvimento de Dispositivo IoT para Medição de Temperatura e Umidade em Ambientes Remotos

1st Igor José Marinho Vieira
IESTI

Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, Brasil
igorjmv2000@gmail.com

2nd Thales Augusto Rodrigues de Campos
IESTI

Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, Brasil
thales-augusto10@hotmail.com

3rd José Alberto Ferreira Filho
IESTI – Orientador

Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, Brasil
jose.alb@unifei.edu.br

Abstract— The present article deals with the design and implementation of a solution for environmental monitoring in the Ruah Valley. To ensure the continuous and real-time transmission of temperature and humidity data to the server, a hybrid communication strategy was employed: LoRa P2P technology connects devices across the mountainous barrier, while LoRaWAN is used for the final transmission to the gateway.

Keywords—Ruah, LoRa P2P, LoRaWAN, gateway.

Resumo— O presente artigo trata do projeto e implementação de uma solução para monitoramento ambiental no Vale do Ruah. Para garantir a transmissão contínua e em tempo real dos dados de temperatura e umidade até o servidor, foi empregada uma estratégia de comunicação híbrida: a tecnologia LoRa P2P conecta dispositivos através da barreira montanhosa, enquanto a LoRaWAN é utilizada para o envio final ao gateway.

Palavras-chave – Ruah, LoRa P2P, LoRaWAN, gateway.

I. INTRODUÇÃO

No cenário global de crescente conectividade, o monitoramento remoto de variáveis ambientais tornou-se crucial para diversos campos, como agricultura, meteorologia e preservação [1]. Contudo, a instalação de tecnologias para coletar e transmitir dados em regiões isoladas ainda enfrenta desafios importantes, especialmente no que diz respeito à infraestrutura de comunicação. A dificuldade de realizar visitas de rotina para testes e manutenção em dispositivos nesses locais gera a necessidade de desenvolver equipamentos autônomos para tais aplicações. Em resposta a esses obstáculos, tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo —

como o Long Range (LoRa [3]) — juntamente com sistemas de gerenciamento de energia renovável, apresentam-se como soluções promissoras. Elas possibilitam que os dispositivos funcionem de modo independente, utilizando recursos ambientais, como a energia solar, para garantir a operação ininterrupta onde a rede elétrica é inexistente.

II. PROPOSTA

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de monitorar e transmitir dados de temperatura e umidade do ar em uma área de difícil acesso: o Vale do Ruah. Esta região, localizada na divisa entre São Paulo e Minas Gerais, é geograficamente notável [4] – trata-se de um vale próximo ao pico local (conforme Figura 1) e é suspeito de registrar as temperaturas mais baixas do Brasil devido à sua topografia. No entanto, a geografia complexa do Vale do Ruah impede a linha de visada direta com as torres de telecomunicações mais próxima. Consequentemente, o uso de redes convencionais, como LoRaWAN direto e o sinal de celular é inviável (detalhe ilustrado na Figura 2).

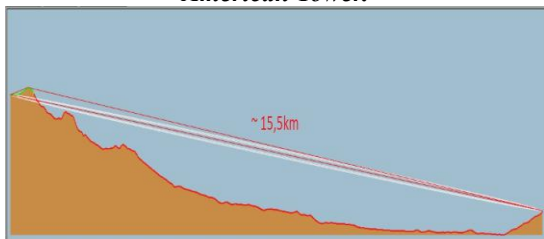
Figura 1. Topografia do Vale do Ruah.



A antena LoRa tem sensibilidade de -139dBm o que garante um alcance de pelo menos 15km [5]. Entretanto, as perdas na transmissão devido as barreiras de montanhas podem causar uma queda de 88,33dB, junto as perdas provenientes da transmissão pelo ar de 115,46dB e perdas aleatórias estimadas em 6,61dB, totalizando 210,29dB.

Devido ao difícil acesso ao local de instalação e ao requisito de manutenção mínima, o sistema foi meticulosamente projetado com foco em alta eficiência energética e autonomia. Para tal, a arquitetura de hardware incorpora uma unidade de armazenamento híbrida: um supercapacitor 150F atua como principal fonte de armazenamento, complementado por uma bateria de íon de lítio de backup para períodos de baixa irradiação (dias chuvosos ou nublados). O gerenciamento eficiente da energia captada pela célula fotovoltaica é realizado por um Controlador AEM (Ambient Energy Manager) [6]. Estima-se que essa combinação assegura a operação autônoma e contínua do sistema por até 1 ano, sem a necessidade de trocas frequentes de componentes ou recargas manuais. Este trabalho não apenas aborda as dificuldades técnicas de implementação, de sistemas de coleta de dados em áreas remotas, como também contribui para o avanço de soluções sustentáveis e de longa duração para o monitoramento ambiental.

Figura 2. Visada da pedra da mina para a American Tower.



III. DESENVOLVIMENTO

A. Circuito de Alimentação

1) Funcionamento do AEM10941: O circuito de alimentação do projeto é concentrado no gerenciador de energia ambiental AEM10941-QFN [6], um dispositivo projetado para capturar e otimizar a energia gerada por células fotovoltaicas e armazená-las em um supercapacitor ou uma bateria. Esse módulo pode operar junto a uma bateria de lítio ou um supercapacitor, sendo ativados apenas em uma situação de baixa luminosidade prolongada, garantindo a continuidade do funcionamento do sistema. O chip AEM10941-QFN é configurado para ajustar automaticamente seu ponto de operação, utilizando um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) que permite a captação otimizada da energia solar ajustando continuamente a relação de tensão e corrente da carga de saída para se adequar às variações de luminosidade e temperatura [6].

O circuito de controle MPPT, mostrado na figura 3, periodicamente desconecta a fonte ligada ao pino SRC do pino BUFSRC através do transistor M1 para medir a tensão em circuito aberto da fonte no pino SRC, denominada VSRC, e definir a tensão de regulação ideal de SRC. O capacitor CSRC, conectado ao BUFSRC, suaviza a tensão contra os pulsos de corrente causados pelo conversor boost. No projeto o pino SRC é conectado ao painel fotovoltaico e um capacitor de 10uF é utilizado como CSRC, valor típico indicado na documentação do módulo [6]. Um supercapacitor de 150F ou uma bateria de lítio é conectado(a) ao pino BATT, ou seja, pode ser preciso recarregar o elemento de armazenamento a partir de 0V, neste caso, o conversor boost carrega o supercapacitor ou bateria modulando a condutância de M1 e M2 até que sua tensão, denominada VBATT, atinja a

mesma tensão de VCHRDY do pino SET CHRDY, mostrado na figura 4. Neste momento o AEM entra em seu modo de operação normal, onde os valores de threshold que definem se o supercapacitor será carregado ou descarregado são definidos previamente de acordo com a configuração utilizada nos pinos CFG[0:2].

Figura 3. Esquemático simplificado no sistema MPPT

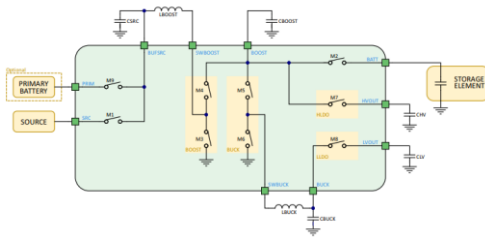
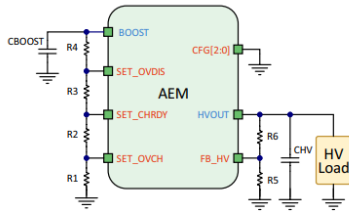


Figura 4. AEM10941-QFN na configuração de modo customizável



No modo customizável os valores de threshold mínimo e máximo são definidos pelos pinos SET OVDIS e SET OVCH, respectivamente. As tensões nestes pinos são denominadas VOVDIS e VOVCH. Caso o painel fotovoltaico não seja suficiente para manter a tensão de VBATT acima de VOVDIS o AEM entra no modo de bateria primária, onde o transistor M9 se fecha e o M1 se abre, conectando a bateria de íon de lítio, ligada ao pino PRIM, ao pino BUFSRC e desconectando o pino SRC, assim carregando o supercapacitor ou a bateria.

A bateria é utilizada até que VBATT chegue novamente ao mesmo nível de VCHRDY, levando o AEM novamente ao modo customizável. Quando VBATT

atinge VOVCH a carga da bateria é finalizada. O AEM mantém VBATT em torno de VOVCH com uma pequena histerese para evitar danos ao elemento de armazenamento e ao circuito interno. Nesta configuração o conversor boost é ativado periodicamente para manter a tensão em VBATT, enquanto as saídas HVOUT e LVOUT dos LDOs ficam disponíveis. Quando o conversor boost não está ativo, o transistor M1 é aberto para evitar que a corrente flua da fonte para o elemento de armazenamento caso VSRC esteja maior que VOVCH.

2) Valores Utilizados: O supercapacitor utilizado possui uma tensão DC de saída de até 3,8V e a bateria de 3,6V, portanto VOVCH deve ter este mesmo valor. Segundo as restrições de segurança do AEM descritas em (1), (2) e (3), fornecidas pela folha de dados do fabricante [6], VCHRDY deve estar abaixo de 3,3V. Foi escolhido então utilizar uma tensão de saída para o HVOUT, denominada VHV, de 3,3V, permitindo utilizar uma tensão de 3,5V para VOVDIS, 3,6V para VCHRDY e 4,12V para VOVCH quando utilizado bateria de lítio, e 1,8V para VOVDIS, 2V para VCHRDY e 3,8V para VOVCH quando utilizado supercapacitor, enquadrando o projeto em todas as restrições.

$$VOVDIS + 0,05V \leq VCHRDY \leq VOVCH - 0,5V \quad (1)$$

$$2,2V \leq VOVDIS \quad (2)$$

$$VHV \leq VOVDIS - 0,3V \quad (3)$$

A configuração de VHV é feita através dos resistores R5 e R6 mostrados na figura 4. Seguindo (4), (5), (6) e (7), fornecidas pela documentação do AEM. Os valores de R5 e R6 utilizados são 15MΩ e 18MΩ. Para a configuração dos limites de carga e descarga do supercapacitor é utilizado o divisor de tensão definido por R1, R2, R3 e R4. Seguindo os limites definidos por (8) e (9) os valores de R1 a R4 são,

respectivamente, $36\text{M}\Omega$, $392\text{k}\Omega$, $1,74\text{M}\Omega$ e $12\text{M}\Omega$ para utilização de uma bateria, e $25\text{M}\Omega$, $2,74\text{M}\Omega$, $12\text{M}\Omega$ e $13\text{M}\Omega$ para utilização de um supercapacitor.

$$R_v = R_5 + R_6 \quad (4)$$

$$1\text{M}\Omega \leq R_v \leq 40\text{M}\Omega \quad (5)$$

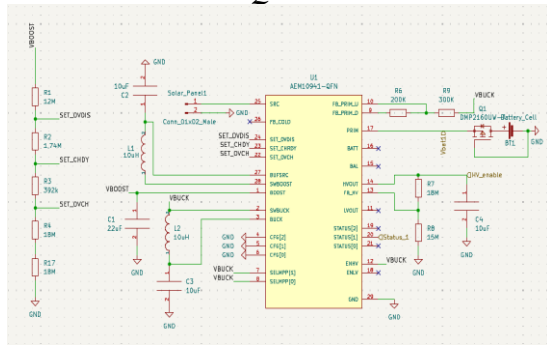
$$R_5 = R_v \cdot \frac{1V}{V_{hv}} \quad (6)$$

$$R_6 = R_v \cdot \left(1 - \frac{1V}{V_{hv}}\right) \quad (7)$$

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (8)$$

$$1\text{M}\Omega \leq R_t \leq 100\text{M}\Omega \quad (9)$$

Figura 5. Ligações utilizadas no AEM10941-QFN



3) Seleção e regulagem das fontes utilizadas: Os módulos e sensores utilizados neste projeto operam a uma tensão de 3,3V. Para isso foi incluído no projeto um multiplexador de energia TPS2116, seguido do conversor Buck-Boost TPS631000. Capaz de alternar entre duas fontes de alimentação em uma faixa de 1,6V a 5,5V e suportando até 2,5A.

O TPS631000 [9] é um conversor Buck-Boost de alta eficiência, ideal para aplicações que requerem uma saída de tensão constante, independentemente de variações na tensão de entrada gerados por fontes de alimentação instáveis, como baterias e painéis solares. Esse dispositivo é projetado para manter a regulação da tensão de saída automaticamente, alternando entre modos de operação Buck e Boost através de um controlador Pulse

Width Modulation (PWM) conforme a tensão de entrada varia acima ou abaixo do nível desejado de saída. Operando com um intervalo de entrada entre 1,6V e 5,5V, ele garante uma saída estável de 3,3V, compatível com os requisitos dos módulos e sensores conectados.

Figura 6. Ligações utilizadas no TPS2116

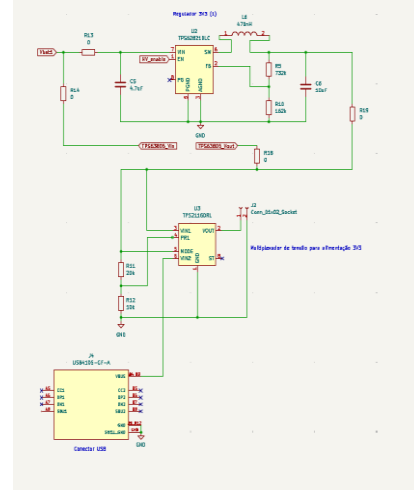
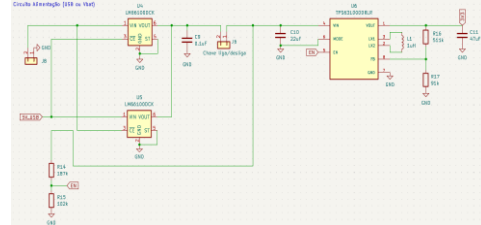


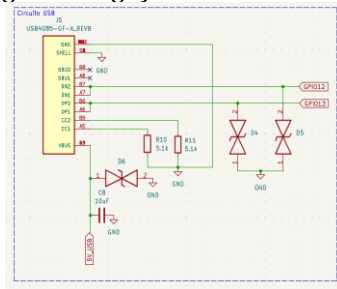
Figura 7. Ligações utilizadas no TPS631000



B. Circuito de processamento

4) Gravação do firmware no microcontrolador: O projeto conta com um conector USB tipo micro B, responsável por permitir a gravação do firmware na memória flash do microcontrolador, além de possibilitar a alimentação e comunicação com o computador durante o processo de desenvolvimento e teste. A ligação do conector USB pode ser vista na figura 8.

Figura 8. Ligações do circuito USB

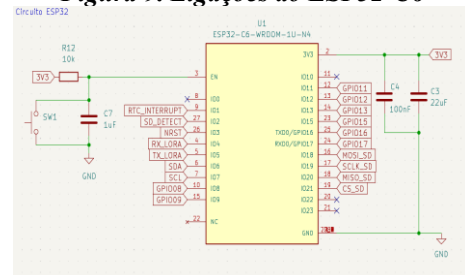


5) *Circuito de controle:* O circuito de controle coordena todos os periféricos do projeto, como sensores, LEDs e botões, além de gerenciar a comunicação e transmissão de dados. Seu principal componente neste projeto é o módulo MCU ESP32-C6-WROOM-1U-N4 [11].

Microcontrolador: O MCU ESP32-C6 é um módulo de alto desempenho que combina um conjunto de periféricos em um encapsulamento compacto. Baseado em um processador de núcleo único RISC-V de 32 bits operando a até 160MHz, o ESP32-C6 possui 320KB de SRAM (Static random-access memory) e 4MB de flash integrada. Este módulo suporta uma ampla gama de interfaces, incluindo UART, I2C, SPI e PWM, além de possuir um baixo consumo de corrente em seu modo de operação normal (38mA) e em seu modo de deep-sleep (7uA) [10], tornando-o uma escolha versátil para projetos de Internet of Things (IoT) e automação. O ESP32-C6-WROOM-1U-N4 possui um cristal oscilador interno de 40 MHz adequado para sua operação normal e que garante uma frequência estável durante o processamento e comunicação. No entanto, para aplicações em que o micro controlador entra frequentemente no modo de baixo consumo (deep sleep), é recomendada a utilização de um cristal oscilador externo de 32.768kHz. Esse cristal, conhecido como cristal de relógio, proporciona um pulso de clock mais preciso para o RTC (Real-Time Clock), que continua

funcionando durante os modos de baixo consumo de energia. Além do cristal oscilador, o circuito de controle inclui um botão de reset conectado ao pino EN do ESP32-C6, que permite reinicializar o microcontrolador manualmente quando necessário. Foi utilizado um capacitor de 15pF para a operação correta do cristal de oscilação, além de capacitores de desacoplamento de 100nF e 22μF na entrada de alimentação de 3,3V.

Figura 9. Ligações do ESP32-C6

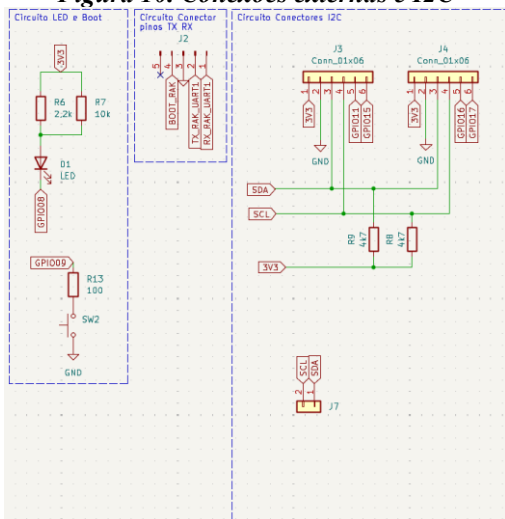


Periféricos Externos: As ligações utilizadas para conectar os periféricos externos estão mostradas na figura 10. O circuito do botão boot é conectado a GPIO9 do MCU, na função de pull-down, levando o nível lógico de 0 para 1 quando pressionado. Está disponível, também, um barramento de conectores com alguns pinos de interesse do usuário, como pino de BOOT, TX e RX do RAK.

Conectado a GPIO8, há um LED de propósito geral para ser utilizado de acordo com a necessidade do usuário.

Na figura 10, temos 2 conectores I2C reservas disponíveis para uso do sistema, além dos conectores onde será conectado o sensor SHT40.

Figura 10. Conexões externas e I2C

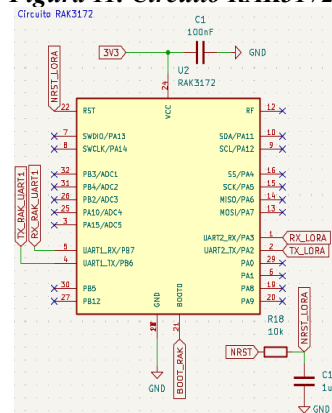


Sensor de Temperatura e Umidade: O sensor utilizado é o SHT40 [12], um sensor de temperatura e umidade que oferece uma faixa de medição de temperatura entre -40°C e 125°C , com uma precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, e uma faixa de umidade relativa de 0% a 100%, com precisão de $\pm 1,5\%$. O SHT40 opera utilizando o protocolo de comunicação I2C (Inter-Integrated Circuit), o que permite a integração simples com microcontroladores e sistemas embarcados. O protocolo I2C é um padrão de comunicação serial que utiliza duas linhas principais: SCL (linha de clock) e SDA (linha de dados). A comunicação I2C é baseada em endereços de 7 ou 10 bits que identificam os dispositivos no barramento, permitindo a conexão de múltiplos dispositivos usando apenas essas duas linhas compartilhadas. No projeto o dispositivo mestre é o ESP32-C6 enquanto o escravo é o sensor SHT40, seu conector é apresentado na figura 12, com resistores pull-up de $2,2\text{k}\Omega$ nas linhas SDA e SCL.

Transmissor LoRa: Após a coleta dos dados de temperatura e umidade esses valores são transmitidos para a plataforma de monitoramento remoto. Para isso, o módulo RAK3172 é integrado ao projeto. O módulo utiliza comandos AT para sua

configuração e operação, recebidos por protocolo UART. É necessário então conectar o pino RX do RAK3172 ao TX do ESP32-C6, e o pino TX do RAK3172 ao RX do ESP32-C6, de forma a garantir a troca bidirecional de dados. Uma vantagem adicional do RAK3172 é a inclusão de um circuito de antena RF integrado, o que simplifica a implementação e otimiza a performance de transmissão, dispensando a necessidade de projetar um circuito de antena separado.

Figura 11. Circuito RAK31725



Desenho da Placa de Circuito Impresso: Foram projetadas 2 placas independentes para o projeto. Uma placa destinada ao circuito de energia e uma placa destinada ao circuito de processamento de dados e transmissão. A ideia é de separar os circuitos e utilizar cabos para conectá-los.

As figuras 12 e 13 mostram, respectivamente, os circuitos projetados para ambas as placas.

Figura 12. Placa de processamento

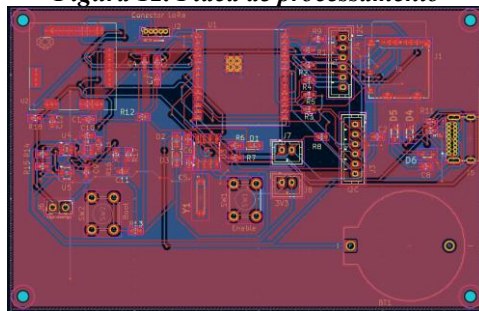
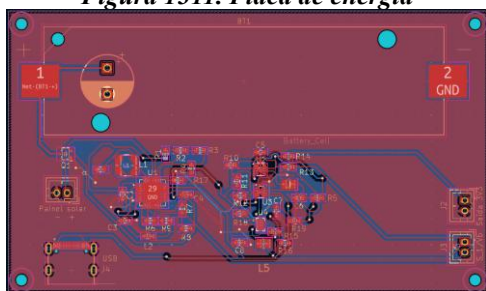


Figura 1311. Placa de energia



IV. Dispositivo LoRaWAN e Modos de Operação

A tecnologia LoRa (Long Range) é um protocolo de comunicação sem fio de baixa potência e longo alcance, projetado para aplicações em redes de sensores distribuídos e sistemas de Internet das Coisas (IoT). Essa tecnologia utiliza modulação Chirp Spread Spectrum (CSS), que garante alta sensibilidade e robustez contra ruídos, possibilitando transmissões em ambientes urbanos e rurais com alcance de vários quilômetros e consumo energético extremamente reduzido [14].

Os dispositivos baseados em LoRa podem operar de duas formas principais: LoRa P2P (ponto a ponto) e LoRaWAN (LoRa Wide Area Network).

Modo LoRa P2P

O modo LoRa P2P (Peer-to-Peer) consiste em uma comunicação direta entre dois ou mais dispositivos, sem a necessidade de uma infraestrutura de rede, como gateways ou servidores de rede. Nesse modo, os módulos LoRa atuam como transmissores e receptores autônomos, configurados com os mesmos parâmetros de comunicação como frequência, fator de espalhamento (Spreading Factor), largura de banda (Bandwidth) e taxa de codificação (Coding Rate) [15].

Esse modo é amplamente utilizado em aplicações descentralizadas ou isoladas da internet, como sistemas de telemetria local, comunicação entre nós em regiões

sem cobertura LoRaWAN, ou ainda em projetos experimentais e de pesquisa. Sua principal vantagem é a simplicidade e baixa latência, pois elimina intermediários na comunicação. Por outro lado, não há gerenciamento de rede, controle de colisão ou autenticação de dispositivos, o que limita sua escalabilidade e segurança.

Modo LoRaWAN

O LoRaWAN é uma camada de protocolo de rede que opera sobre a modulação LoRa, definida pela LoRa Alliance, responsável por padronizar e gerenciar o ecossistema global dessa tecnologia. Nesse modo, a comunicação entre os dispositivos finais (sensores) e o servidor de aplicação é intermediada por gateways, que atuam como pontes entre a rede LoRa e a Internet.

Diferentemente do modo P2P, o LoRaWAN possui uma arquitetura composta por três camadas: End devices, Gateways e Network server.

Essa arquitetura possibilita o gerenciamento centralizado da comunicação, o controle de acessos, retransmissões, e o balanceamento de carga entre dispositivos, oferecendo maior segurança e confiabilidade.

Métodos de Ativação: ABP e OTAA

O LoRaWAN define dois métodos principais para o processo de ativação ou registro de um nó na rede: ABP (Activation by Personalization) e OTAA (Over-The-Air Activation).

ABP (Activation by Personalization):

Nesse método, as chaves de autenticação e o endereço do dispositivo (Device Address) são pré-configurados manualmente no nó. Assim, ele se conecta diretamente à rede sem necessidade de troca de mensagens de ativação. O ABP é mais simples e rápido, porém menos

seguro, pois as chaves permanecem fixas e não são renovadas dinamicamente, o que o torna mais vulnerável a ataques de interceptação e clonagem.

OTAA (Over-The-Air Activation):

No método OTAA, o dispositivo realiza um processo dinâmico de registro, enviando uma solicitação de join request ao servidor de rede, contendo seu identificador único (DevEUI) e outras credenciais. Em resposta, o servidor envia uma mensagem join accept com as chaves de sessão geradas no momento da ativação. Essa abordagem é mais segura e flexível, permitindo a troca periódica de chaves e a reconfiguração remota dos dispositivos.

Devido à sua robustez e adequação a ambientes distribuídos, o OTAA é o método recomendado para aplicações comerciais e de pesquisa que envolvem dispositivos de longo prazo, como projetos de harvesting energy com sensores autônomos.

Considerações sobre a Aplicação no Projeto

No contexto do projeto de colheita de energia (harvesting energy) com comunicação LoRaWAN, o modo de operação adotado deve equilibrar autonomia energética e confiabilidade da transmissão. Por esse motivo, a Classe A e o método OTAA são as escolhas ideais, garantindo segurança, baixo consumo e independência da rede elétrica, características fundamentais para aplicações sustentáveis e de longa duração em ambientes remotos.

Operação do Firmware

O firmware desenvolvido [16] para os dispositivos de coleta de temperatura e umidade foi projetado com foco em eficiência energética, confiabilidade de comunicação e autonomia operacional. Ele

combina estratégias de baixo consumo de energia com o uso do protocolo LoRaWAN, empregando o método de ativação OTAA (Over-The-Air Activation) para garantir segurança e flexibilidade na autenticação dos dispositivos na rede.

Dispositivo Transmissor

Durante a inicialização, o transmissor executa uma rotina de configuração do módulo RAK3272-SiP por meio de comandos AT.

Após a configuração do módulo em P2P, o firmware entra em um ciclo autônomo e sincronizado com o tempo do RTC [17]. Diferentemente de um temporizador fixo, o sistema utiliza o relógio em tempo real para determinar os minutos múltiplos de 10 (por exemplo, 00, 10, 20, 30, 40 e 50).

A cada instante em que o relógio se aproxima de um desses marcadores, o firmware calcula o tempo restante até o próximo múltiplo de 10 minutos, configura o período de deep sleep correspondente e coloca o microcontrolador em repouso até o momento exato da próxima transmissão.

Essa abordagem elimina desvios acumulados de temporização e mantém os dispositivos perfeitamente sincronizados entre si, mesmo após longos períodos de operação.

Quando o sistema desperta no instante programado, o sensor SHT40 é acionado para realizar as medições de temperatura e umidade. Os dados são processados e convertidos em formato hexadecimal, ideal para transmissões curtas e de baixo overhead. Em seguida, o transmissor envia o payload P2P para a placa receptora.

Além da transmissão, o firmware mantém um registro local de todas as amostras coletadas. Cada envio é documentado em um arquivo de log no cartão SD, armazenado no formato .txt, contendo

data, hora e valores medidos de temperatura e umidade.

Esse histórico possibilita auditoria e análise detalhada do comportamento do sistema, mesmo em períodos sem conectividade com a rede, servindo também como redundância de dados em aplicações críticas.

Após concluir a transmissão e o registro no cartão SD, o microcontrolador retorna ao modo deep sleep, permanecendo nesse estado até o próximo minuto múltiplo de 10. Essa estratégia, aliada à alimentação por colheita de energia (energy harvesting), permite um funcionamento de longa duração com mínima necessidade de manutenção.

Paralelamente à execução principal, o firmware mantém uma task independente para comunicação serial, que permite o envio de comandos para ajuste de data e hora do RTC. Essa rotina facilita a calibração e manutenção dos dispositivos em campo, assegurando precisão temporal sem a necessidade de regravar o firmware.

Dispositivo Receptor

O receptor tem como função receber os dados transmitidos pelo transmissor e retransmiti-los para a rede LoRaWAN. Ele realiza a configuração inicial do módulo RAK3272-SiP em modo OTAA, autenticando-se de forma segura na TTN e armazenando as chaves de sessão temporárias geradas durante o processo de join.

Durante a operação, o receptor permanece em estado de espera sincronizado com o RTC, acordando instantes antes dos múltiplos de 10 minutos para receber o pacote transmitido. Após receber e validar o payload, o firmware realiza o envio uplink LoRaWAN para o gateway localizado na torre da American Tower, em Queluz-SP, garantindo que os dados sejam entregues ao servidor de rede da TTN.

Esse servidor, por sua vez, processa, armazena e disponibiliza as informações na plataforma de monitoramento.

Concluído o envio, o receptor configura o deep sleep para acordar no próximo minuto múltiplo de 10. Essa sincronização temporal precisa, aliada ao uso eficiente de energia, assegura que ambos os dispositivos operem de forma coordenada, minimizando o consumo e evitando perda de pacotes.

O firmware foi projetado para garantir autonomia, robustez e precisão temporal, aproveitando os recursos do RAK3272-SiP e do protocolo LoRaWAN OTAA. A integração entre RTC, deep sleep, cartão SD e tarefa serial paralela cria um sistema confiável, ideal para aplicações remotas de monitoramento ambiental alimentadas por energia colhida.

Diagrama do firmware

Todo esse processo descrito do firmware pode ser mais bem visualizado no diagrama apresentado na figura 14 e na figura 15.

Figura 14. Funcionamento do Transmissor

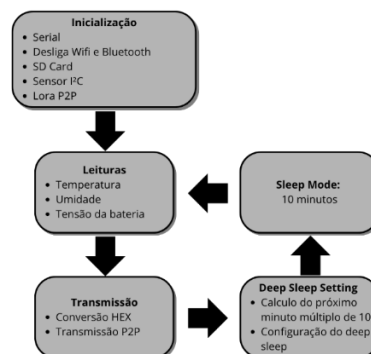
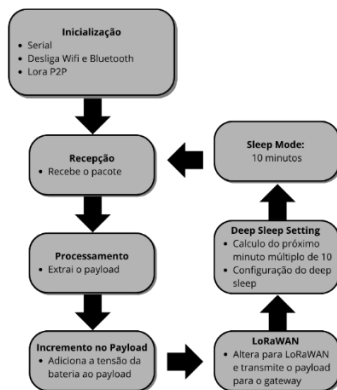


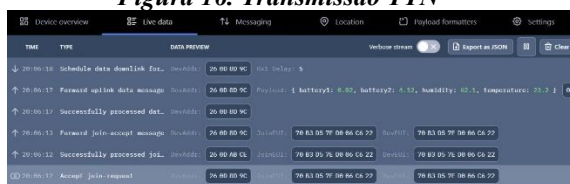
Figura 15. Funcionamento do Receptor



V. RESULTADOS

O sistema desenvolvido demonstrou operação estável no fluxo completo de comunicação entre as duas placas. A placa transmissora coletou temperatura, umidade e nível de bateria, enviando os dados via LoRa P2P para a placa receptora, que processou o payload, adicionou seu próprio nível de bateria e retransmitiu as informações para o gateway LoRaWAN utilizando OTAA. A sincronização entre os dispositivos, viabilizada pelo RTC externo, garantiu que ambos acordassem em intervalos fixos de 10 minutos, permitindo transmissões coordenadas e evitando colisões. A estratégia de deep sleep, aliada ao agendamento temporal preciso, reduziu o consumo energético e tornou o sistema compatível com aplicações de harvest energy, permitindo operação prolongada com recursos energéticos limitados. Além disso, o registro de logs em arquivo .txt no cartão SD funcionou adequadamente, fornecendo suporte à validação do comportamento e ao acompanhamento das transmissões

Figura 16. Transmissão TTN



VI. CONCLUSÃO

O projeto está em processo de desenvolvimento, mas já foram realizados testes cruciais em bancada durante a elaboração do firmware. Adicionalmente, conduzimos testes de conexão a curtas distâncias, suficientes para simular a transmissão do bairro Pinheirinho até a UNIFEI. Nesses ensaios, foi possível estabelecer uma comunicação **LoRa P2P** bem-sucedida entre os dispositivos transmissor e receptor. Além disso, a capacidade do receptor de transmitir dados ao gateway **LoRaWAN** da UNIFEI foi validada, confirmando o funcionamento fundamental do projeto. Esses resultados preliminares comprovam a **viabilidade** da solução proposta e indicam que o sistema estará totalmente apto para operação em condições reais assim que a montagem da placa for concluída.

VII. REFERÊNCIAS

- [1]. Jiang, H., Wang, Y., & Zhang, Q. *IoT-Based Smart Monitoring of Environmental Parameters for Sustainable Agriculture and Conservation*. *Sensors*, 21(15), 5023, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21155023>.
- [2]. Kumar, S., Liyanage, M., & Ylianttila, M. *Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities for IoT Applications in Remote Areas*. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2021.
- [3]. Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). *A Study of LoRa: Long Range and Low Power Networks for the Internet of Things*. *Sensors*, 16(9), 1466. doi:10.3390/s16091466
- [4]. Trilhas Serra Fina. *Pedra da Mina e o Vale do Ruah: A região mais fria da Serra da Mantiqueira*. Disponível em: <https://trilhaserrafina.com.br>.
- [5]. RAKWIRELESS. *RAK3272-SiP Breakout Board Datasheet*. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wisduo/rak3272-sip-breakout-board/datasheet/#hardware>.

- [6]. E-PEAS (Louvain-La-Neuve). **Highly Efficient, Regulated DualOutput, Ambient Energy Manager for Up To 7-cell Solar Panels with Optional Primary Battery**. [S. l.]: E-peas S.A., 2023. 40 p. v. 2.1. Disponível em: <https://e-peas.com/product/aem10941/>
- [7]. RADIO Mobile Online. [S. l.], [201-?]. Disponível em: <https://www.ve2dbe.com/rmonlinelogin.asp>
- [8]. TEXAS INSTRUMENTS (Estados Unidos da América). **TPS2116 1.6 V to 5.5 V, 2.5-A Low IQ Power Mux with Manual and Priority Switchover**. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2021. 25 p. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2116.pdf>
- [9]. RENESAS ELECTRONICS (Japão). **High Efficiency BuckBoost Regulator with 4.5A Switches**. 1.01. ed. rev. TOYOSU FORESLA, 3-2-24 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 1350061, Japan: Renesas Electronics, 2022. 13 p. Disponível em: <https://www.renesas.com/en/document/dst/isl91127ir-datasheet?srsItd=AfmBOOpUqZtFR003mE1QYZq8gGtNzWby7rWfguy6ZeAkORDr21EjI7sn>
- [10]. ESPRESSIF SYSTEMS (Shanghai). ESP32-C6 Series Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32-c6_datasheet_en.pdf
- [11]. TEXAS INSTRUMENTS (EUA). **AUTOSWITCHING POWER MUX**. Dallas, Texas: [s. n.], 2004. 27 p. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2111a.pdf?ts=1731317344599&ref_url=https%253A%252F%252Fbr.mouser.com%252F
- [12]. SENSIRION (Suíça). **Datasheet SHT3x-DIS: Humidity and Temperature Sensor**. 7. ed. atual. [S. l.: s. n.], 2022. 22 p. Disponível em: https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DIS.pdf
- [13]. JOHNSON, Howard W.; GRAHAM, Martin. **Ground Planes and Layer Stacking**. In: JOHNSON, Howard W.; GRAHAM, Martin. **High Speed Digital Design: A handbook of Black Magic**. [S. l.: s. n.], 1993. cap. 5, p. 189-221.
- [14]. Semtech Corporation. **LoRa and LoRaWAN: Low Power Wide Area Network Protocols for Internet of Things**, 2019.
- [15]. Petäjäjärvi, J., Mikhaylov, K., Hämäläinen, M., Pettissalo, M., Janhunen, J., & Iinatti, J. **Performance of LoRaWAN technology for IoT**. In 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 1-6, 2017.
- [16]. MARINHO, Igor. **esp32c6-lora-sync**. 9 nov. 2025. Disponível em: <https://github.com/IgorJMV/esp32c6-lora-sync>.
- [17]. Alldatasheet PCF8563 Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/18208/PHILIPS/PCF8563.html>

ANEXO A – Esquemático da placa