

# **Tecnologia Social em Campo**

**Gabriela Carregari Verza, Hiure Queiroz, João Paulo Paixão Rocha, Manoel Augusto de Souza  
Serafim, Yuri Valverde Lauriano**

## **1. Introdução**

A exclusão digital ainda é um problema em muitas áreas rurais do Brasil, dificultando o acesso à informação e a adoção de soluções inovadoras que contribuam para o desenvolvimento sustentável. Entre os desafios enfrentados por pequenos produtores, destaca-se a vulnerabilidade das propriedades à invasão de animais exóticos, como os javalis, que colocam em risco as lavouras, o meio ambiente e a segurança alimentar. Diante disso, esta pesquisa propõe uma solução tecnológica de baixo custo e baixo consumo de energia, voltada a fortalecer comunidades rurais por meio da conectividade, em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7, 10, 11 e 12.

### **1.1 Motivação**

A motivação central deste projeto está na necessidade de enfrentar lacunas reais de infraestrutura tecnológica nas zonas rurais, onde pequenos agricultores frequentemente não dispõem de meios eficientes para monitorar e proteger suas áreas cultivadas. Ao buscar uma alternativa viável para o monitoramento automático de invasões – especialmente de javalis – o projeto reconhece a importância de democratizar o acesso à tecnologia, tornando-a compatível com a realidade do campo.

A proposta se destaca pela integração de princípios de sustentabilidade, inclusão e inovação: ao apostar no uso de energia limpa (ODS 7), reduzir disparidades tecnológicas (ODS 10), criar meios mais eficazes para proteger e tornar as comunidades mais resilientes (ODS 11) e promover práticas alinhadas ao consumo e produção responsáveis (ODS 12). Assim, a iniciativa não só atende a uma demanda prática, mas também reforça o papel estratégico da tecnologia social na promoção da autonomia rural e da equidade.

### **1.2 Objetivo**

O objetivo deste projeto é desenvolver e validar um protótipo de sistema de monitoramento para detecção de animais invasores em cercas elétricas, utilizando microcontroladores de baixo custo e tecnologias de comunicação com baixo consumo de energia. A proposta busca facilitar o envio de alertas e a coleta de dados em tempo real, mesmo em áreas rurais isoladas, contribuindo para a segurança de propriedades voltadas à agricultura familiar. Além disso, o sistema será pensado de forma modular, permitindo adaptações para diferentes contextos e necessidades, o que amplia seu potencial de aplicação em outras situações de monitoramento ambiental ou rural.

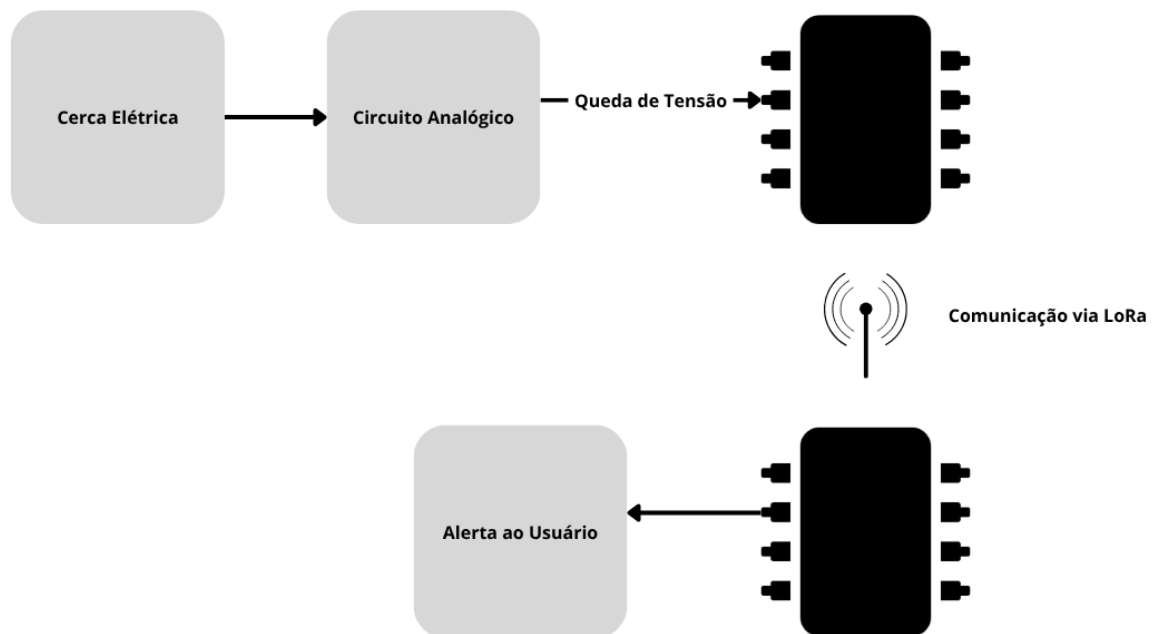
### **1.3 Descrição do MVP:**

O MVP (Produto Mínimo Viável) tem como foco a detecção de quedas ou variações abruptas de tensão em cercas elétricas, indicando possíveis invasões por javalis. Para isso, foi desenvolvido um circuito analógico composto por resistor, capacitor e retificador, conectado diretamente à cerca. Quando há uma queda significativa na tensão, o circuito aciona uma interrupção em uma porta do microcontrolador, que então envia um alerta via protocolo LoRa para outro microcontrolador.

## 2. Arquitetura do Sistema

### 2.1 Diagrama de Arquitetura

Figura 1 - Arquitetura do Sistema



Fonte: Os Autores

A arquitetura do sistema é composta por dois módulos principais conectados por comunicação LoRa. No lado da cerca elétrica, um circuito analógico monitora a tensão da cerca em tempo real. Esse circuito é responsável por detectar quedas abruptas de tensão, que podem indicar uma possível invasão (por exemplo, por javalis). Quando essa queda é identificada, o circuito aciona uma interrupção em um microcontrolador, que processa o evento e envia um alerta via comunicação LoRa.

No outro extremo, um segundo microcontrolador recebe essa informação e aciona um mecanismo de alerta ao usuário, que pode ser visual (como um LED ou display de sete segmentos), sonoro (buzzer) ou até mesmo uma interface com dados registrados. A comunicação via LoRa permite que o sistema funcione de forma eficiente em áreas rurais isoladas, com baixo consumo de energia e longo alcance.

### 2.2 Tecnologias e Componentes Utilizados

Para viabilizar a proposta de um sistema acessível, eficiente e adaptável ao contexto rural, foram utilizadas tecnologias de baixo custo, fácil implementação e compatíveis com ambientes de difícil acesso. A seguir, estão listadas as principais ferramentas e componentes empregados no desenvolvimento do MVP:

- Microcontrolador: RP2040 (Raspberry Pi Pico) ou equivalente, escolhido por sua boa relação custo-benefício e flexibilidade para aplicações embarcadas.

- Transmissão: Módulo LoRa SX1262 integrado, utilizado para comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo energético entre os módulos do sistema.
- Software: Desenvolvimento realizado em C/C++, com foco em desempenho e controle direto sobre hardware.
- Gerenciamento: Organização e controle do projeto por meio do GitHub (versão de código) e Trello (tarefas e cronograma).
- Outras ferramentas: Suporte à colaboração e documentação com ferramentas Google e WhatsApp para comunicação rápida entre os membros da equipe.

### **3. Desenvolvimento e Implementação**

#### **3.1 Monitoramento da Tensão da Cerca**

A primeira abordagem investigada para captar os pulsos de alta tensão da cerca foi baseada na indução eletromagnética. A proposta consistia em utilizar uma bobina posicionada próxima ao fio condutor da cerca elétrica, com o objetivo de induzir uma tensão proporcional aos pulsos emitidos, permitindo sua detecção por um microcontrolador. Os testes foram realizados com uma cerca elétrica doméstica voltada ao confinamento de animais de estimação, que gera pulsos de aproximadamente 8000 V.

Inicialmente, foi utilizada uma bobina de 8 voltas com núcleo de ar, através da qual o fio da cerca passava diretamente. Nessa configuração, o sistema registrou picos de aproximadamente 25 V em um osciloscópio, sugerindo a captação - ainda não ideal - dos pulsos. A Figura 2 mostra a montagem desta configuração, e o Apêndice A contém um vídeo do sinal visualizado com osciloscópio. Em uma segunda tentativa, foi utilizada uma bobina de apenas 2 voltas conectada a um circuito retificador de onda completa, composto por quatro diodos, visando estabilizar o sinal captado e facilitar sua interpretação. A montagem está presente na Figura 3. Nessa nova configuração, foram observados picos de cerca de 8 V, conforme Figura 4.

No entanto, análises subsequentes demonstraram que os sinais registrados em ambas as abordagens com bobinas apresentavam inconsistência e eram fortemente influenciados por ruídos de terra. A topologia adotada — especialmente o compartilhamento do mesmo plano de referência (GND) entre a bobina e a cerca — gerou interferências que comprometeram a precisão da leitura. Além disso, identificou-se que a medição de sinais em circuito aberto não era eficaz, sendo necessário o fechamento do circuito entre a cerca e o aterramento para a obtenção de leituras válidas. Diante desses fatores, concluiu-se que a abordagem por indução não oferecia confiabilidade suficiente para a detecção dos pulsos, o que motivou a equipe a explorar alternativas mais diretas de captação do sinal.

Após os insucessos na tentativa de captação por indução, a equipe optou por investigar uma abordagem de detecção direta da tensão da cerca. A inspiração veio de voltímetros analógicos comerciais utilizados para diagnóstico de cercas elétricas, que funcionam com duas ponteiros: uma conectada diretamente ao fio condutor da cerca e a outra ao aterramento. Esses dispositivos são capazes de indicar visualmente a faixa de tensão presente por meio da ativação sequencial de LEDs.

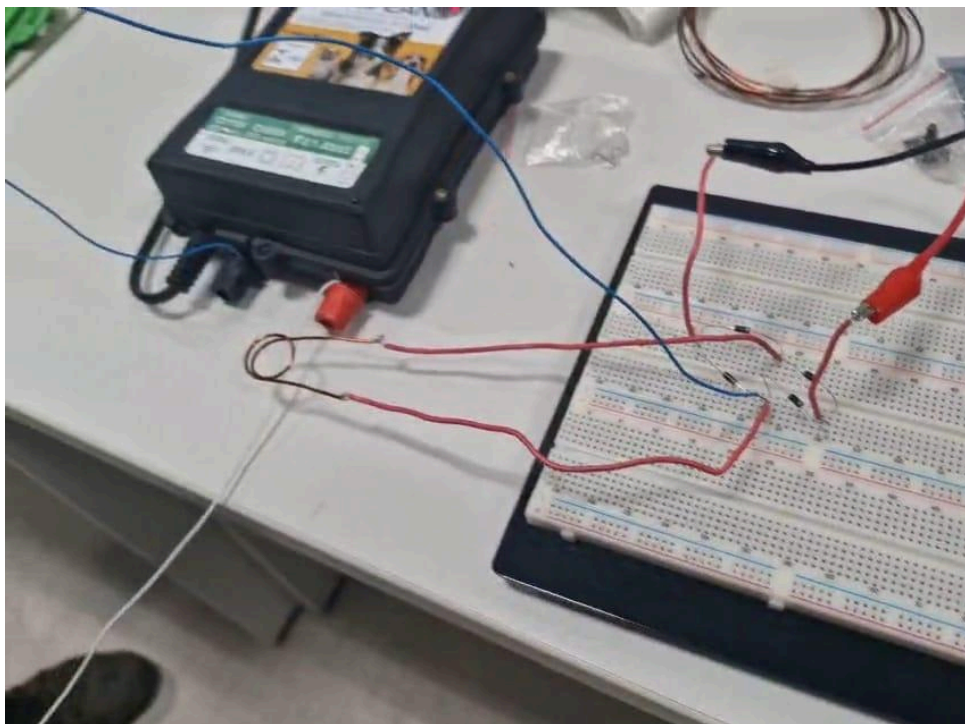
Partindo do princípio de que tais equipamentos conseguem operar com a alta tensão da cerca sem comprometer a integridade de seus componentes eletrônicos, foi realizada uma engenharia reversa desses voltímetros com o objetivo de adaptar a lógica de funcionamento para uso no sistema com microcontrolador.

Figura 2 - Montagem do circuito da bobina de 8 voltas



Fonte: Os Autores

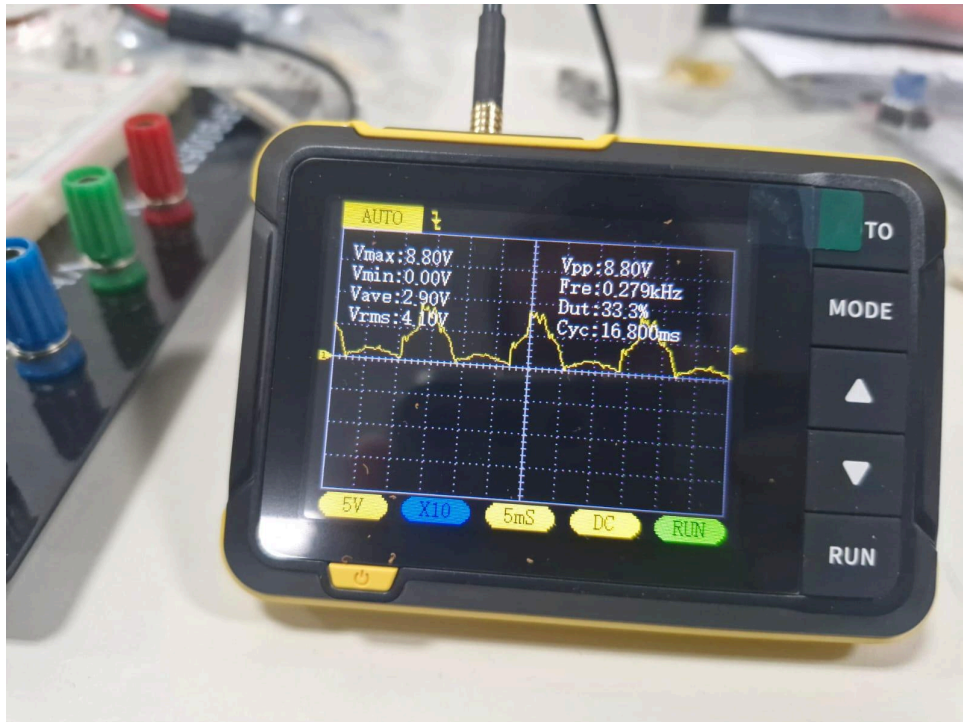
Figura 3 - Montagem do circuito da bobina de 2 voltas



Fonte: Os Autores



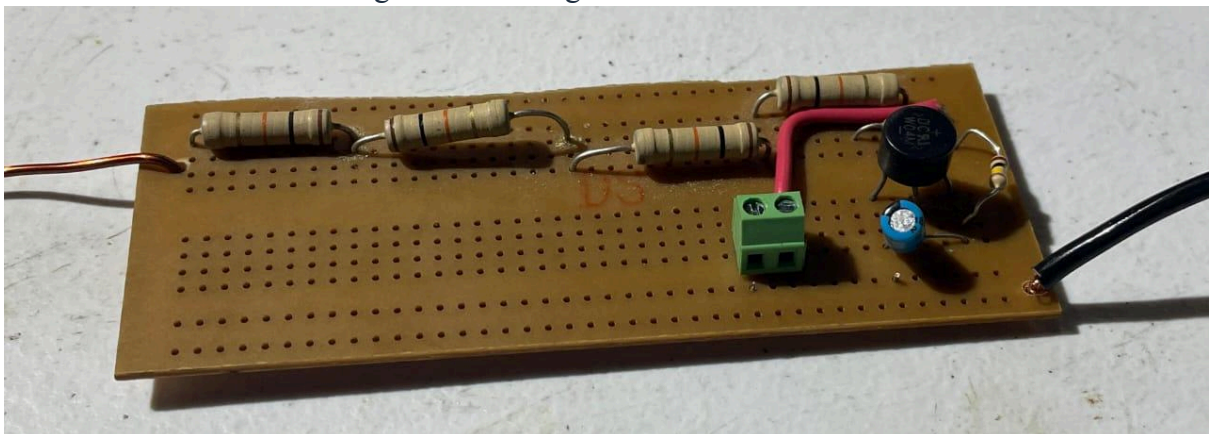
Figura 4 - Sinal visualizado no osciloscópio



Fonte: Os Autores

A ideia era utilizar o mesmo princípio para gerar um sinal elétrico suficiente para acionar uma interrupção em uma porta digital do microcontrolador com segurança para os componentes. Com base nisso, foi desenvolvido um circuito analógico simples, composto por um resistor de alto valor resistivo, um capacitor e um retificador de onda completa. O resistor tem a função de limitar a corrente proveniente da cerca, enquanto o retificador converte o sinal de alta tensão pulsada em uma forma mais estável. O capacitor atua como filtro temporário, armazenando carga durante os pulsos. O ponto-chave da detecção está na descarga do capacitor: quando a tensão da cerca deixa de ser aplicada, o capacitor se descarrega e gera uma transição de nível lógico (queda de tensão) que é então capturada como uma interrupção externa pelo microcontrolador. A montagem do circuito descrito está na Figura 5.

Figura 5 - Montagem do circuito sensor



Fonte: Os Autores

### 3.2 Programação dos Microcontroladores e Comunicação LoRa

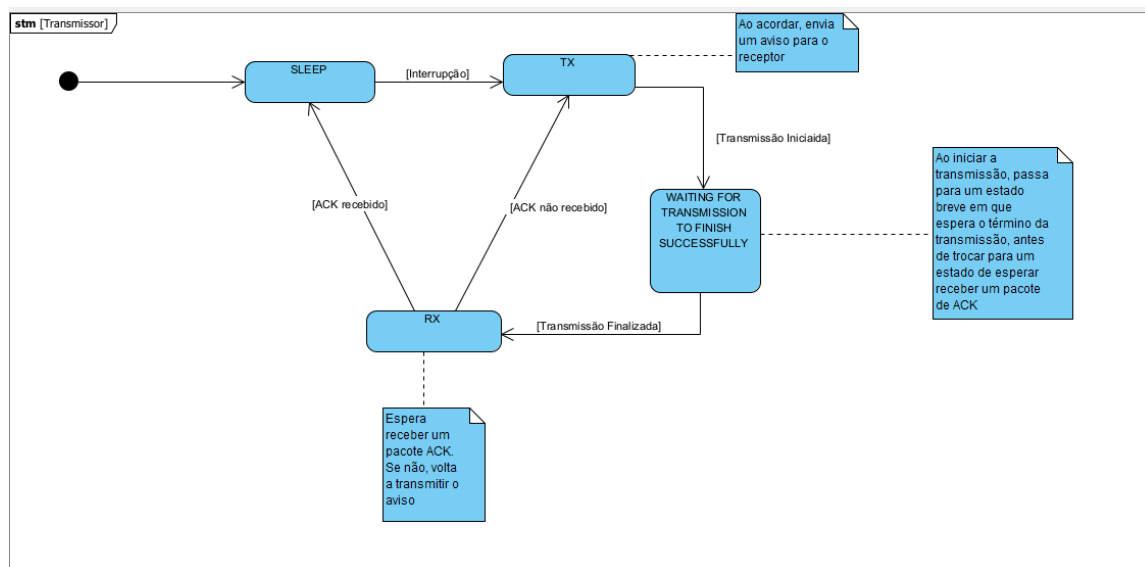
Para o sensoramento da cerca e recepção do sinal, como já comentado anteriormente, foram usados 2 microcontroladores RP2040-LoRa da Waveshare. Um deles fica responsável pela leitura da tensão vinda da cerca e enviar um pacote para o outro microcontrolador, enquanto o segundo serve apenas como um aviso para o usuário, recebendo esse sinal e informando por meio de LEDs que algo está errado com a cerca.

Dessa forma, a saída do circuito sensor mostrado na Figura 5 é utilizado como a entrada analógica para o transmissor, que vai processar essa tensão e decidir se enviará um aviso ou continuará esperando pela queda na tensão.

#### 3.2.1 Modelagem do protocolo de confirmação

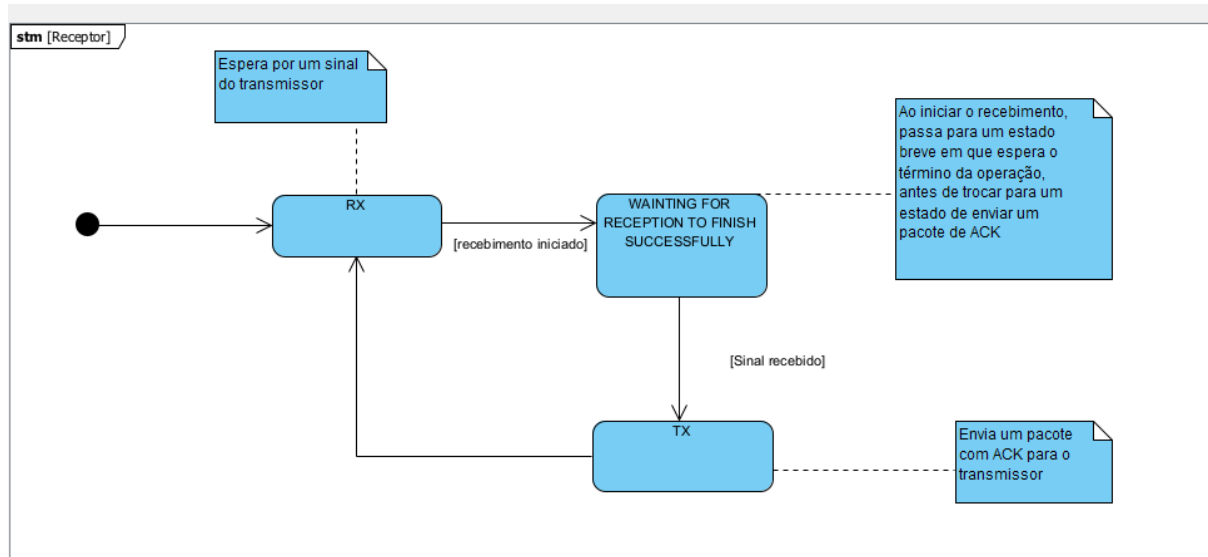
Como a tecnologia LoRa se trata de uma tecnologia de transmissão de dados, utilizando modulação de espectro [1], ela não garante uma transmissão confiável de dados, sendo que está é uma tarefa deixada para camadas mais acima da pilha de protocolos. Assim, para garantir que o usuário não perca um aviso caso seu receptor esteja desligado ou por grandes interferências na transmissão, um pequeno protocolo de comunicação foi implementado.

Figura 6 - Protocolo de Envio



Fonte: Os Autores

Figura 7 - Protocolo de Recebimento



Fonte: Os Autores

Com o protocolo, após o transmissor enviar um pacote de aviso, ele passará a esperar um pacote de confirmação de recebimento (ACK). Quem fará o envio desse ACK é o receptor, após receber um aviso. Assim, com a certeza de que o seu pacote foi recebido corretamente, o transmissor pode voltar à tarefa de sensoriar a cerca. Nas Figuras 6 e 7, estão a modelagem do protocolo, tanto para o transmissor quanto para o receptor, no formato de máquinas de estado. Nesse contexto, os estados de TX e RX significam respectivamente transmitindo e recebendo. Além disso, há um estado intermediário, em que os microcontroladores esperam pela finalização correta da operação de TX ou de RX.

### 3.2.2 Sensoriamento da tensão obtida da cerca

A parte principal do sensoriamento da tensão se baseia em ler a tensão por meio do conversor analógico digital presente no microcontrolador, convertê-lo para Volts e com essa informação decidir se deve disparar um aviso, ou continuar medindo a tensão. Essa tarefa é realizada pelo seguinte código, presente na Figura 8. Nesse caso, a tensão é medida por meio do ADC (Conversor Analógico Digital) pela função *average\_voltage\_sampling*. Após isso, caso a leitura desça de um determinado patamar, ele passará a transmitir. Caso permaneça acima, continuará medindo. Nos testes realizados, o limite mínimo de tensão antes da troca de estados foi de 0.5V.

Como dito anteriormente, a função *average\_voltage\_sampling* tem o código que realiza a leitura e retorna o valor de tensão. O código está presente na Figura 9. Como o sinal obtido pelo circuito da Figura 5 ainda possui muito ruído, devido a diversos fatores como ruído da rede elétrica e ruídos do próprio eletrificador, a função realiza 10 amostragens a cada 10ms e então calcula a média desse valor, sendo esta média a utilizada para a leitura da tensão. Assim, é possível minimizar os efeitos da variação da tensão obtida do circuito sensor e evitar que muitos falsos positivos ocorressem.

Ainda assim é possível que a tensão fique abaixo do limite de tolerância, por essa razão, para os próximos experimentos, outras abordagens, como uso de médias móveis e outras formas de suavização serão implementadas e testadas.

Figura 8 - Código responsável pela escolha entre sensoriar ou transmitir

```
float reading = average_voltage_sampling();
printf("Tensão: %f V", reading);
if(reading < 0.5f){
    printf("\nmenor que 0.5\n");
    gpio_put(25, 1);
    state = TX;
}else{
    printf("\nmaior que 0.5\n");
    gpio_put(25, 0);
    state = SLEEP;
}
sleep_ms(100);
```

Fonte: Os Autores

Figura 9 - Função Responsável por Suavizar a Leitura com uma Média

```
float average_voltage_sampling( void ){
    float average = .0f;
    for(int i=0; i<10; i++){
        average += adc_read() * (3.3f / (1 << 12));
        sleep_ms(100);
    }

    return average / 10;
}
```

Fonte: Os Autores

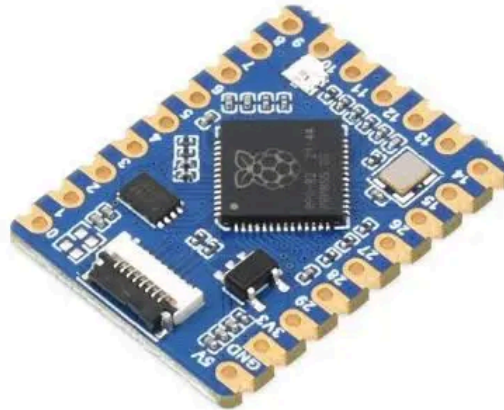
### 3.3 O bootloader

Para estudar a ativação do microcontrolador e seus periféricos, desenvolvemos um inicializador bare-metal voltado a núcleos ARM Cortex-M0+, responsável pelo gerenciamento da sequência de *boot* do sistema e pelo tratamento de exceções. O *bootloader* foi implementado utilizando a linguagem C11 combinada com código em assembly ARMv6-M, por meio dos quais foram definidos a configuração do registrador de pilha (*stack pointer*), a inicialização das regiões de memória interna e externa, além da ativação do oscilador externo com posterior configuração do PLL.



Para prototipagem do bootloader, foi utilizado um microcontrolador sem periféricos conectados diretamente a um módulo de depuração SWDIO.

Figura 10 - Microcontrolador sem periféricos



Fonte: [1]

Disponibilizamos o código mínimo de inicialização em um repositório público sob o nome *radix*, disponibilizado no Capítulo 6 deste relatório. Nesse, foram aplicadas soluções de documentação automática tanto para os trechos em linguagem C quanto para os trechos em assembly, visando facilitar a manutenção, análise e reutilização do código por outros desenvolvedores.

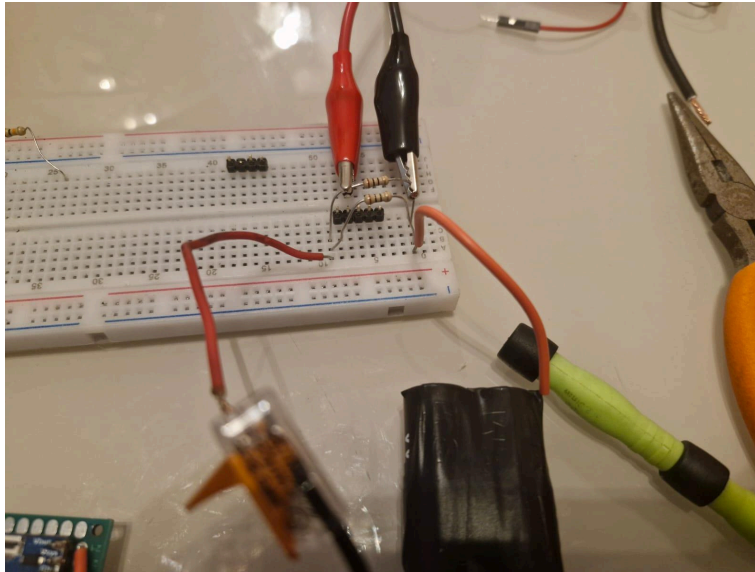
Durante essa etapa do desenvolvimento, foi possível identificar oportunidades de otimização em nível ainda mais baixo. A partir da análise da documentação oficial da arquitetura ARM, constatamos que a configuração padrão de clock aplicada na fase de *reset* — definida diretamente nos registradores do subsistema RCC — revela-se também como a mais eficiente do ponto de vista energético. Essa configuração fornece um equilíbrio ideal entre desempenho por ciclo de clock e consumo de energia, sendo portanto adequada para aplicações que exigem autonomia sem sacrificar capacidade computacional.

### 3.4 Medidas de consumo de energia

Um dos requisitos do projeto se trata do baixo consumo de energia elétrica por parte dos microcontroladores, em específico o transmissor que ficará conectado a cerca. Como esse dispositivo ficará no campo, muitas vezes de difícil acesso, é importante que possa operar por longos períodos de tempo sem necessidade de troca de baterias, por exemplo. Nesse contexto, foram avaliadas os consumos de energia elétrica do transmissor nos diferentes estados de operação.

O método utilizado para isso foi colocar uma resistência em série com a alimentação do rp2040 e medir a queda de tensão nesse resistor. Com isso, é possível calcular a corrente consumida pelo circuito e avaliar seu consumo. O circuito implementado encontra-se na Figura 11. Já o esquemático encontra-se ilustrado na Figura 12. Os dois resistores de  $10\Omega$  são utilizados em paralelo para obter uma resistência equivalente de  $5\Omega$ . Então a tensão foi medida, utilizando um osciloscópio, nessa resistência equivalente de  $5\Omega$ .

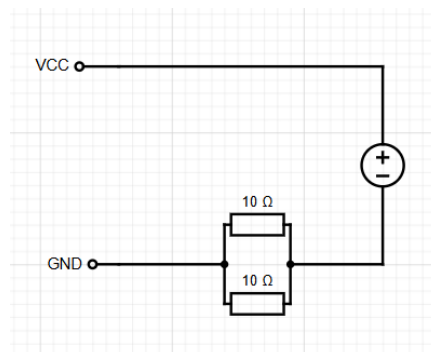
Figura 11 - Circuito Estimar a Corrente Consumida



Fonte: Os Autores

Com essa medida no osciloscópio, foi possível obter a tensão ao longo do tempo nesses resistores e calcular então a corrente utilizada pelo circuito. A Figura 13 ilustra a medida do osciloscópio. Nos picos de tensão, a tensão chega até a 0.57V, enquanto nos outros períodos, oscila entre 0.16V e 0.17V. O pico de tensão corresponde ao período em que a transmissão está ocorrendo, ou seja, uma maior corrente é necessária para efetuar a transmissão, consumindo mais energia.

Figura 12 - Esquemático do Circuito



Fonte: os autores

A partir da lei de Ohm [2] :

$$i = \frac{V}{R}$$

Assim a corrente durante a transmissão será:

$$i_t = \frac{0.57}{5} = 114mA$$

Enquanto a corrente durante outros períodos de processamento:

$$i_p = \frac{0.16}{5} = 32mA$$

Resultando assim em uma  $P_t = 65mW$  e  $P_p = 5,1mW$ . Esses valores são condizentes com os valores esperados para esse microcontrolador, estando próximos aos valores tabelados no *datasheet* [1]. Assim, considerando que em outros modos de operação do microcontrolador podemos diminuir ainda mais a corrente necessária, é possível que a corrente utilizada em períodos de processamento seja reduzida ainda mais, de forma a aumentar a economia de energia. Já a corrente necessária para a transmissão não deve se alterar, já que o processador deverá sair do modo de economia de energia.

Figura 13 - Sinal de Tensão no Resistor Visto no Osciloscópio



Fonte: os autores

### 3.4 Componentes Utilizados

A seguir, estão listados os principais componentes eletrônicos e materiais utilizados na construção do protótipo:

- Microcontrolador com LoRa integrado: Placa baseada no RP2040 com módulo LoRa SX1262 embutido (modelo com suporte direto à antena via conector).
- Antenas LoRa: Para transmissão e recepção de dados entre os módulos.
- Display de sete segmentos: para visualização de informação por parte do usuário.
- Circuito de detecção de pulso:
  - 4× Resistores de  $9K\Omega$
  - 1x Resistor de  $100K\Omega$
  - 1x Resistor de  $40K\Omega$
  - 1× Capacitor eletrolítico de  $47\mu F$
  - 1x Módulo retificador de onda completa

- Fonte de alimentação: Pilhas / Bateria.
- Protoboard e fios jumper: Para testes e validação em bancada.
- Instrumentos e ferramentas de apoio:
  - Multímetro e osciloscópio para análise de sinais.
  - Ferro de solda, estanho, suporte de bancada e ferramentas manuais.

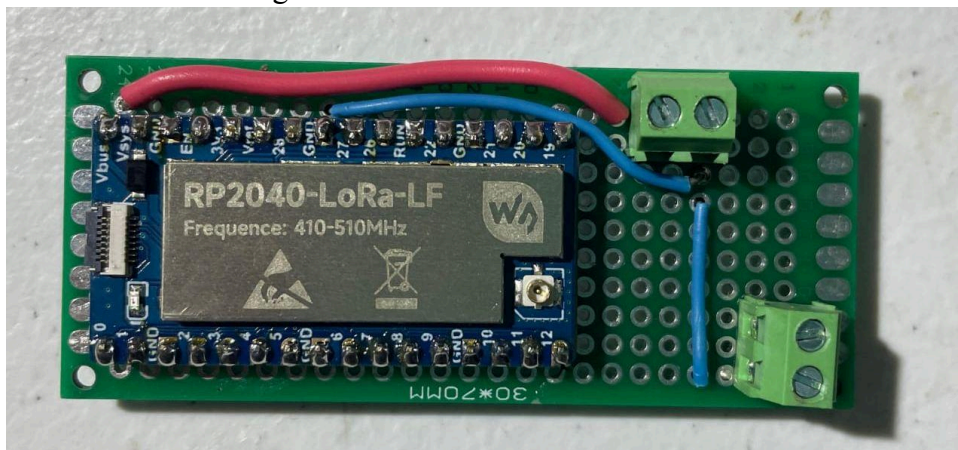
Também foi considerado o uso de um case para proteção do microcontrolador, provavelmente adaptado a partir de um modelo existente para o Raspberry Pi Pico.

### 3.5 O Sistema Completo

No Apêndice B, está presente um vídeo que demonstra o funcionamento do sistema desenvolvido. O circuito de detecção de pulso é conectado ao fio da cerca elétrica, com o terminal de aterramento do circuito ligado ao mesmo aterramento da cerca. Quando ocorre uma queda de tensão na cerca, o capacitor presente no circuito se descarrega, gerando um pulso que aciona uma interrupção em uma das portas GPIO do microcontrolador 1, que se encontrava em modo de baixo consumo (sleep). Ao acordar, ele envia uma mensagem via LoRa para o microcontrolador 2, informando a ocorrência da falha. Após a confirmação de recebimento da mensagem, o microcontrolador 1 retorna ao modo sleep para preservar energia, enquanto o microcontrolador 2 emite um alerta ao usuário indicando a queda de tensão na cerca.

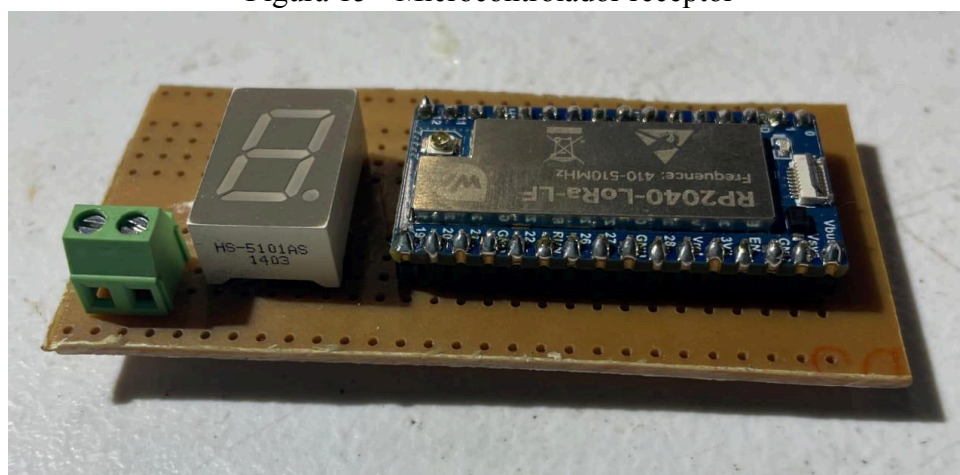
Nas Figuras 14 e 15, estão os circuitos de ambos os microcontroladores utilizados.

Figura 14 - Microcontrolador emissor



Fonte: Os Autores

Figura 15 - Microcontrolador receptor



Fonte: Os Autores

## 4. Gestão do Projeto

### 4.1 Planejamento

O planejamento do desenvolvimento do projeto se deu conforme apresentado na Tabela 1, tendo 24/07 como data programada para a entrega final. Nos dias 29/05, 26/06 e 17/07 houveram pontos de checagem, cujos objetivos definidos estão listados a seguir.

Tabela 1 - Cronograma

Atividades	15/05	01/06	15/06	01/07	15/07	24/07
Pesquisa e seleção de componentes						
Design do circuito eletrônico sensor/transmissor						
Teste sistema alimentação (bateria e cerca)						
Desenvolvimento do firmware do microcontrolador						
Testes em bancada						
Integração do sistema						
Testes em campo						
Desenvolvimento da interface						
Documentação do projeto						
Preparação da apresentação final						

Fonte: Os Autores



- 29/05 - Apresentar design do circuito e seleção de componentes;
- 26/06 - Demonstrar transmissão de dados em ambiente controlado;
- 17/07 - Demonstrar integração da cerca elétrica com o sistema sensor/transmissor;
- 24/07 - Apresentar os resultados dos testes e funcionamento do sistema completo.

## **4.2 Metodologia**

Para a condução do projeto, foi adotada uma abordagem híbrida de desenvolvimento, combinando elementos do modelo tradicional Waterfall com práticas ágeis baseadas no Kanban. Essa estratégia permitiu aproveitar a previsibilidade do modelo sequencial nas fases iniciais de planejamento, ao mesmo tempo em que garantiu a flexibilidade necessária para ajustes durante a implementação e os testes.

Foi mantido um backlog priorizado para orientar as entregas incrementais e facilitar o acompanhamento do progresso. A equipe utilizou a plataforma Trello como ferramenta para implementação do quadro Kanban, o que permitiu a visualização clara do fluxo de trabalho, a organização das tarefas por estágio e a identificação de eventuais gargalos ao longo do desenvolvimento. A comunicação entre os membros foi complementada pelo uso de um grupo no WhatsApp, que facilitou o alinhamento de detalhes pontuais e o agendamento de encontros.

As atividades foram coordenadas por meio de reuniões semanais realizadas online, preferencialmente durante o horário de aula. Além disso, foram realizados diversos encontros presenciais em laboratório, fundamentais para a montagem do circuito, testes práticos, depuração e integração dos módulos.

## **4.3 Funções dos Membros**

- Hiure Queiroz: Líder do projeto, ficou responsável pelo design da arquitetura do sistema, pela seleção das tecnologias e componentes utilizados, e pela integração entre hardware e software. Também contribuiu ativamente nos encontros presenciais em laboratório, auxiliando na montagem e nos testes do protótipo, além de manter contato com a comunidade de produtores rurais.
- Manoel Serafim, João Paulo Rocha e Gabriela Verza: Foram responsáveis pela implementação do protótipo, incluindo a montagem do circuito, programação dos microcontroladores, realização de testes funcionais e validação do sistema. Também atuaram na documentação técnica do código e participaram ativamente das decisões relacionadas ao design e à evolução do sistema.
- Yuri Valverde: Foi responsável por definir e priorizar os itens do backlog, garantindo o alinhamento das entregas com os objetivos do projeto. Além disso, teve papel importante na organização das tarefas, no acompanhamento do progresso e na elaboração da documentação do relatório final, além de facilitar a comunicação entre os membros da equipe.

## **5. Conclusões e Próximos Passos**

O desenvolvimento do sistema de monitoramento de cercas elétricas proposto demonstrou-se viável tanto do ponto de vista técnico quanto funcional.

Após a exploração de diferentes abordagens para a captação do sinal de alta tensão da cerca, concluiu-se que a detecção direta por meio de um circuito retificador, aliado a um capacitor e resistor limitador, foi a alternativa mais eficaz e confiável. Essa solução permitiu uma integração segura com o microcontrolador, garantindo a detecção de falhas no fornecimento de tensão da cerca com baixo risco para os componentes eletrônicos.

A implementação da comunicação entre microcontroladores via LoRa, aliada a um protocolo de confirmação simples, possibilitou um sistema robusto para a transmissão de alertas. A escolha pelo uso de dois microcontroladores — um para sensoriamento e outro para notificação — permitiu modularidade no projeto, favorecendo tanto a economia de energia quanto a escalabilidade futura. Os testes de consumo energético mostraram resultados satisfatórios, validando a viabilidade de operação em ambientes remotos com alimentação por bateria.

Além de seu valor técnico, o projeto apresenta um importante impacto social. A proposta oferece uma solução de baixo custo e fácil manutenção voltada à realidade de pequenos e médios produtores rurais, que frequentemente enfrentam dificuldades para monitorar a integridade de suas cercas elétricas em áreas extensas. Ao possibilitar uma detecção imediata de falhas, o sistema contribui para a segurança dos rebanhos e a prevenção de prejuízos econômicos, além de promover o uso mais eficiente da mão de obra no campo. Assim, o projeto alinha inovação tecnológica com responsabilidade social, aproximando-se das reais necessidades da comunidade rural.

Os próximos passos incluem:

- Desenvolvimento de um case de proteção para o circuito, visando maior robustez e durabilidade em campo.
- Expansão da interface de notificação, com alternativas mais intuitivas e acessíveis ao usuário, como aplicativos móveis, display digital ou alertas sonoros.
- Aprimoramento do protocolo de comunicação, com controle de tempo de retransmissão, segurança dos dados e suporte à comunicação com múltiplos sensores simultâneos.
- Avaliação em condições reais de uso, com a instalação do sistema em propriedades rurais e coleta de feedback contínuo da comunidade para guiar melhorias futuras.

## **6. Documentação**

O código mínimo de inicialização está presente neste repositório público: [GitHub - radix](#). Os códigos de programação dos microcontroladores também encontram-se em um repositório público.

## 7. Referências

- 1 RP2040-LoRa - Waveshare Wiki. Disponível em: <<https://www.waveshare.com/wiki/RP2040-LoRa>>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- 2 NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 23 jul. 2025.

## 8. Apêndices

Apêndice A - [Vídeo do “sinal” no osciloscópio](#)

Apêndice B - [Vídeo do Funcionamento do Sistema Completo](#)