

Projeto Final

Interruptor inteligente com detecção de presença humana com mmWave

Sonofree Mini

Andre de Oliveira Melo
Pedro Sampaio

2025-09-19

Introdução

O SonoFree Mini é um sistema inteligente de detecção de presença humana que utiliza tecnologia mmWave (ondas milimétricas) para criar interruptores mais inteligentes e eficientes. O projeto foi desenvolvido como trabalho final do programa EmbarcaTech, implementando uma solução IoT completa para automação residencial.

O sistema se diferencia de sensores convencionais por sua capacidade de detectar presença humana mesmo quando a pessoa está completamente imóvel, utilizando tecnologia de radar de 24GHz para identificar micromovimentos como respiração e batimentos cardíacos.

Objetivos do Projeto

- Desenvolver um dispositivo que se integra facilmente a interruptores convencionais
- Implementar detecção de presença precisa utilizando tecnologia mmWave
- Criar conectividade IoT via WiFi e protocolo MQTT
- Fornecer interface de controle através de aplicação web/mobile
- Demonstrar integração com sistemas de automação residencial (Home Assistant)

Motivação

Sistemas tradicionais de detecção de presença baseados em PIR (Passive Infrared) apresentam limitações significativas, especialmente na detecção de pessoas estáticas. O SonoFree Mini resolve essa limitação utilizando tecnologia mmWave, oferecendo:

- Detecção através de materiais (não necessita linha de visão direta)
- Capacidade de detectar pessoas completamente imóveis
- Maior precisão espacial e temporal
- Operação “invisível” ao usuário final

Tecnologia mmWave

Princípios de Funcionamento

A tecnologia mmWave (millimeter wave) utiliza ondas eletromagnéticas na faixa de 24GHz para detecção de presença e movimento. O funcionamento baseia-se nos seguintes princípios:

Detecção de Distância

O sensor transmite um **chirp** (sinal que aumenta linearmente em frequência ao longo do tempo). Quando este sinal atinge um objeto, ele é refletido de volta para o sensor. O sistema:

1. Combina os sinais transmitidos e recebidos
2. Gera uma Frequência Intermediária (IF)
3. Calcula a distância baseada na fórmula: $IF = (Slope \times 2 \times Distância) / c$

Onde:

- Slope: taxa de variação da frequência do chirp
- c: velocidade da luz
- IF: frequência intermediária resultante

Detecção de Movimento e Presença

Para detectar movimento, o sensor:

1. Transmite múltiplos chirps separados no tempo
2. Analisa mudanças de fase entre os chirps

3. Utiliza **Range-FFT** para determinar distância
4. Aplica **Doppler-FFT** para detecção de velocidade

A capacidade de detectar micromovimentos permite identificar pessoas estáticas através da respiração e outros movimentos corporais mínimos.

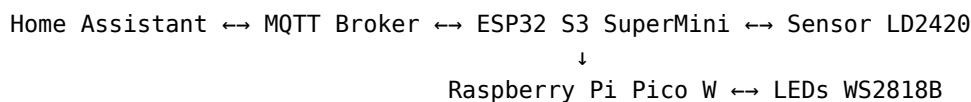
Vantagens da Tecnologia mmWave

- **Detecção através de superfícies:** Funciona mesmo com obstáculos físicos
- **Alta precisão:** Detecta movimentos na ordem de milímetros
- **Operação ubíqua:** Não emite luz visível ou sons audíveis
- **Eficiência espacial:** Melhor resolução espacial que sensores PIR
- **Detecção de pessoas estáticas:** Principal diferencial da tecnologia

Arquitetura do Sistema

Visão Geral

O SonoFree Mini implementa uma arquitetura IoT distribuída composta pelos seguintes elementos:



Componentes Principais

ESP32 S3 SuperMini

- **Função:** Microcontrolador principal do sistema
- **Responsabilidades:**
 - Comunicação WiFi
 - Cliente MQTT
 - Processamento de sinais do sensor mmWave
 - Gerenciamento dos modos de operação
 - Interface com sistema de automação

Sensor LD2420 mmWave

- **Frequência de operação:** 24GHz
- **Interface de comunicação:** UART e GPIO
- **Alimentação:** 3.3V
- **Faixa de detecção:** Configurável via software proprietário
- **Características especiais:**
 - Noise gates configuráveis
 - Threshold ajustável
 - Detecção de micromovimentos

Raspberry Pi Pico W (Simulação de Carga)

- **Função:** Simulação de lâmpada inteligente
- **Componentes controlados:** 25 LEDs WS2818B
- **Interface:** GPIO digital (pino 18)
- **Implementação:** PIO (Programmable I/O) para timing preciso

Comunicação e Protocolos

MQTT Topics

O sistema utiliza os seguintes tópicos MQTT para comunicação:

- home/sensor/cmd: Controle de modo de operação
- home/sensor/luz/cmd/presenca: Controle de luz no modo presença
- home/sensor/luz/cmd/manual: Controle de luz no modo manual
- home/sensor/luz/cmd/hora: Controle de luz no modo horário
- home/sensor/presenca/state: Estado de detecção de presença
- home/sensor/presenca/tempo_s/set: Configuração de temporizador
- home/sensor/presenca/tempo_s/state: Estado do temporizador

WiFi e Conectividade

- Padrão: 802.11 b/g/n
- Reconexão automática em caso de perda de sinal
- Configuração via código fonte (SSID e senha)

Implementação de Hardware

Especificações de Alimentação

Sistema de Alimentação:

- Fonte: USB-C via ESP32 S3 SuperMini
- Tensão do sistema: 5V (USB) / 3.3V (lógica)
- Alimentação do sensor: 3.3V derivado da ESP32
- Consumo estimado: < 500mA

Conexões Físicas

ESP32 S3 SuperMini

Pino 4 → LD2420 (Sinal UART)
3V3 → LD2420 (VCC)
GND → LD2420 (GND)
Pino 1 → Saída para relé (não implementado)

Raspberry Pi Pico W

Pino 18 → Entrada digital (sinal de presença)
Pino 7 → Saída para LEDs WS2818B
3V3 → Alimentação LEDs
GND → Terra comum

Limitações de Hardware Identificadas

Relé não implementado: Durante os testes, identificou-se que o uso de relé causava reinicializações na ESP32, provavelmente devido a:

- Picos de corrente durante acionamento
- Interferência eletromagnética
- Insuficiência de alimentação

Solução adotada: Implementação de simulação via LEDs WS2818B controlados pelo Pico W.

Encapsulamento

Dimensões físicas: 32,6mm × 27,6mm × 22mm

Material: PLA (impressão 3D)

Características do encapsulamento:

- Proteção dos componentes eletrônicos
- Acesso para conexão USB-C
- Aberturas para propagação do sinal mmWave
- Design compacto para instalação em caixas de interruptor

Nota sobre experiência: Este foi o primeiro projeto de impressão 3D para ambos os membros da equipe, representando um aprendizado adicional em prototipagem física.

Implementação de Software

ESP32 - Firmware Principal

Estrutura do Código

O firmware da ESP32 implementa uma máquina de estados com três modos principais de operação:

```
enum Modo { MOD0_PRESENCA, MOD0_MANUAL, MOD0_HORA };
```

Modo Presença

No modo presença, o sistema opera com as seguintes características:

Debounce e Qualificação:

- Debounce hardware: 5ms
- Qualificação de sinal: 50ms
- Prevenção contra falsos positivos

Algoritmo de Detecção:

1. Borda de subida: Inicia qualificação de 50ms
2. Manutenção do sinal alto: Confirma presença
3. Borda de descida: Inicia contagem de timeout
4. Timeout configurável: Desliga após período sem presença

Parâmetros Configuráveis:

- Tempo ativo: 1 a 600 segundos (padrão: 10s)
- Persistência em memória não-volátil
- Configuração via MQTT

Comunicação MQTT

Características da implementação:

- Buffer de 256 bytes
- Reconexão automática
- Mensagens com retenção
- Cliente ID único baseado em hardware

Tratamento de Comandos:

- Parsing robusto de payloads JSON
- Validação de comandos

- Feedback via tópicos de estado

Gestão de Energia e Conectividade

WiFi:

- Modo Station (STA)
- Timeout de conexão: 60 segundos
- Reinicialização automática em caso de falha

Watchdog:

- Monitoramento contínuo de conectividade
- Recovery automático de falhas de rede

Raspberry Pi Pico W - Controle de LEDs

Implementação PIO

O controle dos LEDs WS2818B utiliza o sistema PIO (Programmable I/O) do RP2040:

```
.program ws2818b
.side_set 1
.wrap_target
    out x, 1        side 0 [2]
    jmp !x, 3        side 1 [1]
    jmp 0            side 1 [4]
    nop              side 0 [4]
.wrap
```

Características técnicas:

- Frequência de operação: 800kHz
- Protocolo WS2818B nativo
- Timing preciso via hardware
- 25 LEDs em configuração matricial

Processamento de Entrada

Debounce implementado:

- Duas leituras com intervalo de 10ms
- Validação por consenso
- Atualização apenas em mudanças de estado

Loop principal:

- Polling a cada 5ms
- Resposta imediata a mudanças
- Controle de cor sólida (branco/apagado)

Interface de Usuário

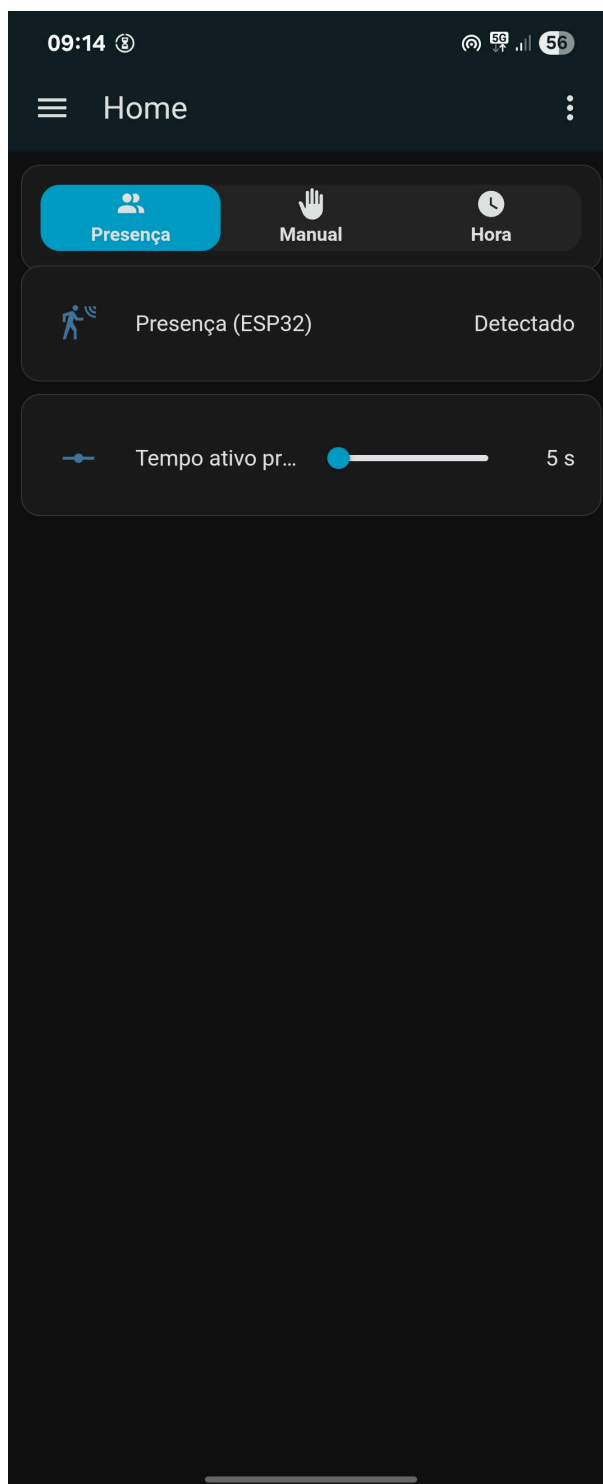
Home Assistant - Integração

O sistema integra-se ao Home Assistant através do addon MQTT, criando as seguintes entidades:

Modo Presença

Interface para controle automático baseado em detecção:

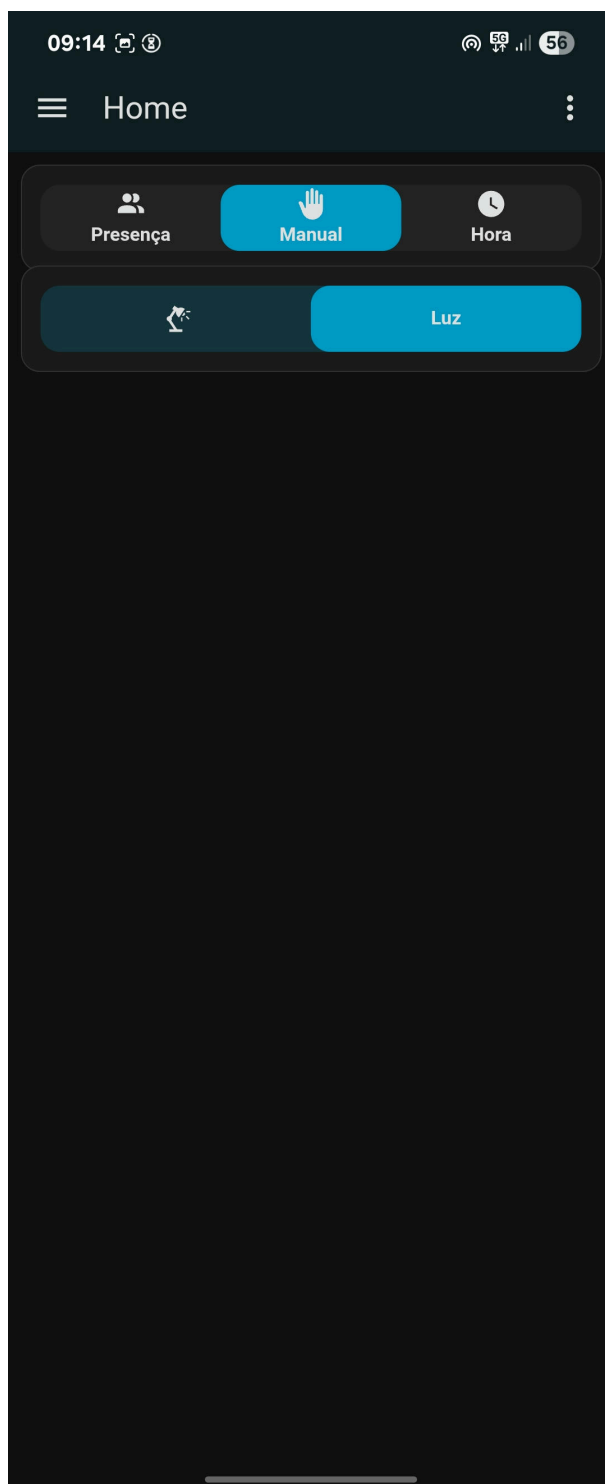
- Status de presença em tempo real
- Configuração de tempo ativo
- Histórico de detecções



Modo Manual

Controle direto pelo usuário:

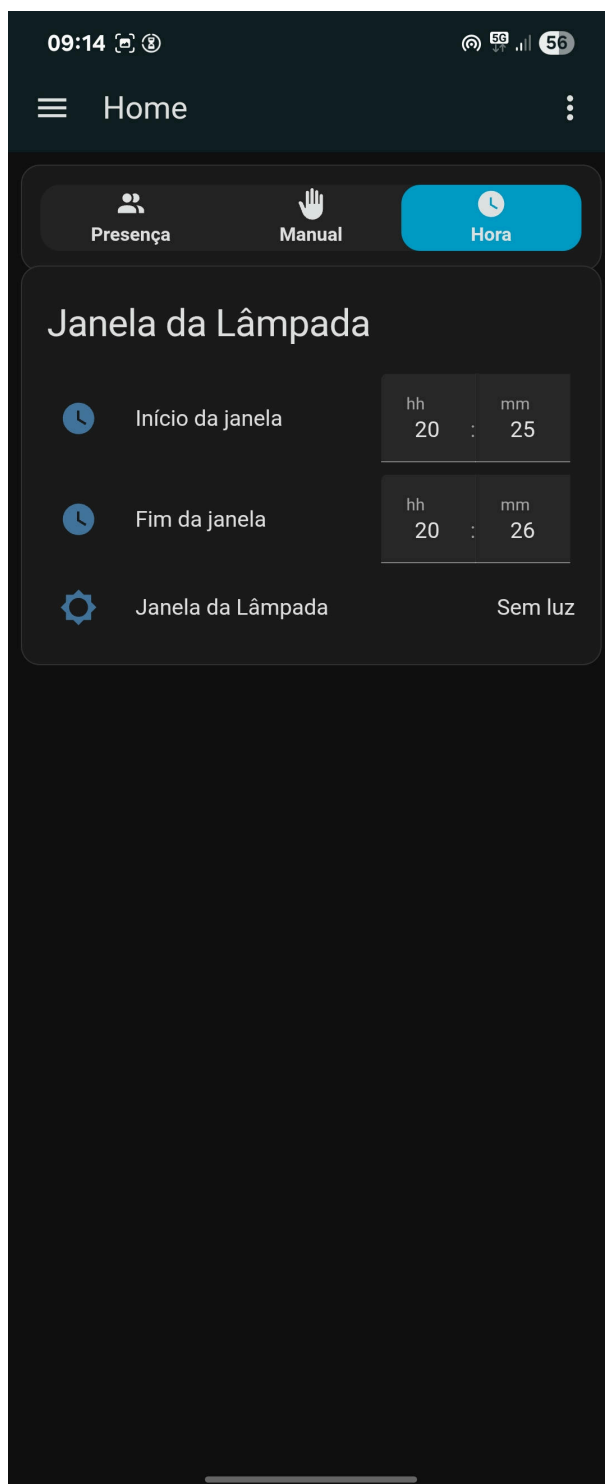
- Switch ON/OFF simples
- Override manual da detecção automática
- Status de conexão do dispositivo



Modo Horário

Programação temporal:

- Configuração de horários de início/fim
- Programação semanal
- Integração com automações



Aplicação Mobile/Web

O sistema é acessível através da interface web do Home Assistant, proporcionando:

- Controle remoto via internet
- Notificações push
- Integração com outros dispositivos IoT
- Dashboards personalizáveis

Calibração e Configuração

Sensor LD2420

Software de calibração:

- Aplicação proprietária (Windows only)
- Comunicação via UART TTL
- Interface gráfica para ajustes

Parâmetros configuráveis:

- Noise gates: Filtros de ruído ambiental
- Threshold: Sensibilidade de detecção
- Zonas de detecção: Áreas específicas de monitoramento

Processo de calibração:

1. Conexão direta UART com o sensor
2. Mapeamento do ambiente
3. Ajuste de sensibilidade
4. Teste de falsos positivos/negativos
5. Salvamento de configuração no sensor

Sistema MQTT

Configuração de broker:

- Servidor local ou na nuvem
- Autenticação por usuário/senha
- QoS configurável por tópico

Descoberta automática:

- Integration via Home Assistant MQTT Discovery
- Criação automática de entidades
- Configuração zero para usuário final

Desafios e Limitações

Desafios Técnicos Enfrentados

Rede Mesh

Desafio original: Implementação de comunicação mesh entre múltiplos dispositivos.

Limitação encontrada: Complexidade de implementação e debugging em prazo limitado.

Solução adotada: Migração para arquitetura WiFi + MQTT, mais robusta e bem documentada.

Interferência Eletromagnética

Problema: Reinicializações da ESP32 ao acionar relé.

Causa provável: Picos de corrente e EMI do relé.

Solução: Simulação via LEDs WS2818B no Pico W.

Calibração do Sensor

Desafio: Dependência de software proprietário Windows para calibração.

Limitação: Impossibilidade de calibração automática via firmware.

Impacto: Necessidade de calibração manual prévia à instalação.

Limitações Atuais

Hardware

- Ausência de relé para controle direto de cargas AC
- Dependência de alimentação USB
- Sensor não configurável via firmware

Software

- Configuração WiFi hardcoded
- Ausência de interface web própria para configuração
- Dependência de Home Assistant para interface gráfica

Integração

- Protocolo de comunicação ESP32 ↔ Pico W limitado a GPIO digital
- Ausência de feedback de status do Pico W

Melhorias Futuras

Propostas de Evolução

Hardware

- Implementação de fonte chaveada 12V/3.3V
- Relé de estado sólido para controle AC
- PCB customizada para redução de tamanho
- Proteções contra surtos e EMI

Software

- Interface web embarcada para configuração
- Protocolo de comunicação bidirecional via UART/I2C
- OTA (Over-The-Air) updates
- Configuração WiFi via portal captivo

Funcionalidades

- Múltiplas zonas de detecção
- Aprendizado de padrões de ocupação
- Integração com outros sensores (temperatura, umidade, luminosidade)
- API REST para integração com outros sistemas

Conectividade

- Implementação de rede mesh (ESP-NOW ou Thread)
- Suporte a múltiplos protocolos (Zigbee, Matter)

- Modo offline com sincronização posterior

Resultados e Conclusões

Funcionalidades Implementadas

O projeto SonoFree Mini alcançou os seguintes objetivos:

- ✓ **Detecção de presença mmWave:** Implementação bem-sucedida com sensor LD2420
- ✓ **Conectividade IoT:** Comunicação estável via WiFi e MQTT
- ✓ **Múltiplos modos de operação:** Presença, Manual e Horário funcionais
- ✓ **Interface gráfica:** Integração completa com Home Assistant
- ✓ **Encapsulamento físico:** Protótipo funcional em PLA

Aprendizados

Tecnologia mmWave: Compreensão profunda dos princípios de radar e processamento de sinais.

Sistemas embarcados: Experiência prática com ESP32 e Raspberry Pi Pico W.

Protocolos IoT: Implementação robusta de comunicação MQTT.

Prototipagem: Primeira experiência com impressão 3D e design mecânico.

Integração de sistemas: Orquestração de múltiplos componentes em solução única.

Impacto e Aplicabilidade

O SonoFree Mini demonstra viabilidade técnica e comercial como solução de automação residencial. As principais contribuições incluem:

- Prova de conceito de detecção mmWave em ambientes residenciais
- Arquitetura escalável para múltiplos dispositivos
- Base sólida para desenvolvimento de produto comercial
- Documentação técnica completa para replicação

Considerações Finais

O projeto SonoFree Mini representa um marco importante no desenvolvimento de soluções IoT acessíveis e eficientes. Apesar das limitações identificadas, a implementação atual fornece uma base sólida para evolução futura.

A experiência adquirida durante o desenvolvimento, especialmente na integração de tecnologias mmWave com sistemas embarcados convencionais, contribui significativamente para o estado da arte em automação residencial no contexto brasileiro.

As melhorias propostas indicam um caminho claro para transformação do protótipo atual em produto comercialmente viável, atendendo às demandas crescentes por soluções de casa inteligente no mercado nacional.

Fotos do Protótipo

