



PMR3402 - Sistemas Embarcados

Manual Técnico do Usuário - Lâmpada Inteligente

Nome	NUSP
Eduardo da Silva Bauer Guimarães	16942585
Luís Eduardo Dorneles Fauth	13679436
Mateus Matzkin Gurza	6010281
Vinícius Barile Lora Franco	13679930

São Paulo

2025

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	3
2 COMPONENTES FÍSICOS.....	4
2.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO.....	4
2.2 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO.....	4
3 MONTAGEM DO SISTEMA.....	6
3.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO.....	6
3.2 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO.....	7
3.3 CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO ESP-NOW.....	9
4 MODO DE FUNCIONAMENTO.....	10
4.1 INÍCIO E MODO MANUAL.....	10
4.2 MODO AUTOMÁTICO (ESP-NOW).....	10
4.3 TRANSIÇÕES DE MODO.....	11
5 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS.....	13
5.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO.....	13
5.2 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO.....	14
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	17

Repositório com os códigos do projeto:

https://github.com/MatzkinGurza/SistemaEmbarcado_LampadaInteligente

1 INTRODUÇÃO

Este manual detalha o funcionamento e a operação de um **Sistema de Iluminação Inteligente**, uma solução inovadora para a automação da luminosidade em diversos ambientes. O projeto visa proporcionar uma experiência de iluminação otimizada, onde a intensidade da luz artificial é ajustada dinamicamente para complementar e harmonizar-se com as condições de luz natural do ambiente. O usuário tem a capacidade de definir um setpoint de luminosidade desejado, e o sistema se encarrega de manter esse nível de conforto visual de forma autônoma.

O principal objetivo deste sistema é aprimorar o conforto visual dos ocupantes do ambiente e, simultaneamente, promover a eficiência energética. Ao evitar o uso desnecessário de luz artificial em momentos de maior incidência de luz natural e ao aumentar a iluminação apenas quando estritamente necessário, o sistema contribui para a redução do consumo de energia elétrica.

A arquitetura do sistema é modular, composta por dois componentes principais interconectados sem fio. Esta abordagem modular não apenas simplifica a instalação e a manutenção, mas também garante flexibilidade na distribuição dos componentes no espaço. A comunicação entre os módulos é realizada utilizando a tecnologia **ESP-NOW**, um protocolo de comunicação rápido e eficiente, ideal para aplicações de IoT (Internet das Coisas) de baixo consumo de energia e baixa latência.

- **Módulo de Sensoriamento:** Atua como o "olho" do sistema, medindo continuamente a intensidade luminosa do ambiente.
- **Módulo de Iluminação:** Funciona como o "cérebro" e o "músculo" do sistema, recebendo os dados do módulo de sensoriamento, processando-os de acordo com o setpoint definido e controlando o brilho da lâmpada.

Este manual guiará o usuário desde a lista de componentes e a montagem passo a passo até a compreensão dos modos de funcionamento e a resolução de possíveis problemas, garantindo uma instalação e operação bem-sucedidas.

2 COMPONENTES FÍSICOS

O sistema de iluminação inteligente é concebido como uma solução modular, subdividida em dois módulos distintos, cada um com uma função específica e um conjunto de hardware dedicado.

2.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO

Este módulo é a unidade de entrada de dados do ambiente, responsável por quantificar a luminosidade e transmitir essa informação.

- **Placa de Desenvolvimento ESP32 DevKitC:** Corresponde ao microcontrolador principal deste módulo. O ESP32 é uma placa versátil com Wi-Fi e Bluetooth integrados, ideal para aplicações de IoT devido ao seu baixo consumo de energia e alta capacidade de processamento. Nesta aplicação, ele é o responsável por ler os dados do sensor de luminosidade, processá-los e transmiti-los via ESP-NOW.
- **Sensor de Luminosidade BH1750:** Este é um sensor de luz ambiente digital de alta precisão que mede a intensidade da luz em unidades de Lux (lx). Ele utiliza o protocolo de comunicação I2C, o que simplifica a fiação com o ESP32. O BH1750 é capaz de fornecer leituras precisas em uma ampla faixa de luminosidade, sendo fundamental para o funcionamento autônomo do sistema.
- **Cabos Jumper:** Essenciais para estabelecer as conexões elétricas entre o ESP32 e o sensor BH1750, garantindo o fluxo de energia e dados. Recomenda-se o uso de cabos jumper macho-fêmea ou macho-macho, dependendo dos pinos de sua placa ESP32 e do módulo BH1750.
- **Protoboard:** Uma placa de ensaio que facilita a montagem dos componentes eletrônicos sem a necessidade de soldagem. É altamente recomendada para a fase de prototipagem, permitindo rearranjos e testes de conexões de forma ágil e segura.

2.2 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO

Este módulo atua como a unidade de controle e saída do sistema, recebendo os dados de luminosidade e ajustando a intensidade da lâmpada.

- **Placa de Desenvolvimento ESP32 DevKitC:** Assim como no módulo de sensoriamento, um ESP32 é o microcontrolador central. Neste módulo, ele atua como receptor dos dados ESP-NOW, executa a lógica da máquina de estados para o controle da lâmpada e interage com os dispositivos de entrada (potenciômetro e botão) e saída (módulo dimmer).
- **Módulo Dimmer AC com Detecção de Zero-Crossing (TRIAC):** Este é o coração do controle de luminosidade da lâmpada. Ele permite o controle preciso da potência da corrente alternada (AC) que

chega à lâmpada, habilitando a dimerização por corte de fase. A funcionalidade de detecção de zero-crossing é vital para sincronizar o disparo do TRIAC com as passagens da onda AC pelo zero, garantindo uma dimerização suave e livre de flicker.

- **Lâmpada Dimerizável (LED):** A lâmpada a ser controlada pelo sistema. É de suma importância utilizar uma lâmpada compatível com a tecnologia de dimerização por corte de fase. Lâmpadas incandescentes e halógenas são geralmente dimerizáveis. Para lâmpadas LED, é imprescindível que elas sejam explicitamente rotuladas como "dimerizáveis", pois lâmpadas LED comuns podem apresentar flicker, ruído ou até mesmo serem danificadas quando submetidas a um dimmer de corte de fase.
- **Rotary Switch (Potenciômetro):** Um componente de entrada analógica que permite ao usuário ajustar manualmente a luminosidade da lâmpada no modo manual, bem como definir o setpoint de luminosidade ambiente desejado para o modo automático. A resistência variável do potenciômetro converte a posição angular em um sinal elétrico lido pelo ESP32.
- **Botão de Pressão:** Um simples interruptor momentâneo que serve como interface para o usuário alternar entre o Modo Manual e o Modo Automático de operação do sistema.
- **Cabos Jumper:** Utilizados para todas as conexões de baixa tensão entre o ESP32 e os demais componentes (potenciômetro, botão, e os pinos de controle do dimmer).
- **Protoboard (Opcional):** Assim como no módulo de sensoramento, é uma ferramenta útil para a montagem e testes iniciais, proporcionando flexibilidade na organização dos componentes.

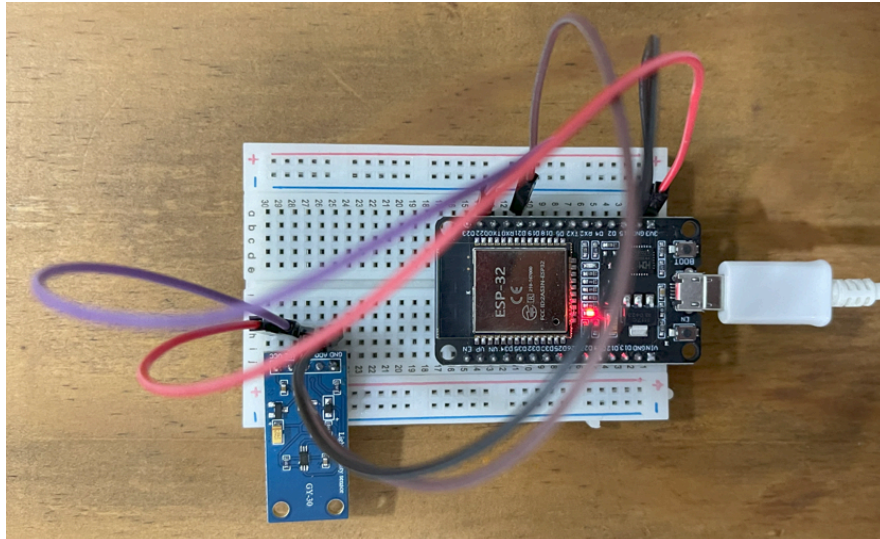
3 MONTAGEM DO SISTEMA

A fase de montagem é crucial para o correto funcionamento do sistema. É fundamental seguir as instruções detalhadas de conexão dos pinos e tomar as devidas precauções, especialmente ao lidar com tensões AC.

3.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO

A montagem do Módulo de Sensoriamento envolve a conexão do sensor de luminosidade BH1750 ao ESP32.

1. **Conexão do Sensor BH1750 ao ESP32:** O sensor BH1750 se comunica via I2C, necessitando de quatro conexões principais:
 - Conecte o pino **VCC** (alimentação) do sensor BH1750 ao pino **3.3V** da sua placa ESP32. Esta é a fonte de energia para o sensor.
 - Conecte o pino **GND** (terra) do sensor BH1750 ao pino **GND** da sua placa ESP32. Este é o ponto de referência comum para o circuito.
 - Conecte o pino **SDA** (Data I2C) do sensor BH1750 ao pino **GPIO 21** do ESP32. Este pino é o padrão para a linha de dados I2C (Serial Data).
 - Conecte o pino **SCL** (Clock I2C) do sensor BH1750 ao pino **GPIO 22** do ESP32. Este pino é o padrão para a linha de clock I2C (Serial Clock).
 - *Dica:* Certifique-se de que as conexões estejam firmes para evitar mau contato que possa levar a leituras inconsistentes ou falha na detecção do sensor.
2. **Alimentação do Módulo:** Após todas as conexões estarem seguras, conecte o ESP32 a uma fonte de alimentação. Isso pode ser feito através de uma porta USB do seu computador (que fornecerá 5V) ou de um adaptador de energia USB (como um carregador de celular) também de 5V. O próprio ESP32 possui um regulador interno que converte os 5V da USB para os 3.3V necessários para o funcionamento da placa e do sensor BH1750.



Vista superior do módulo de sensoriamento montado

3.2 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO

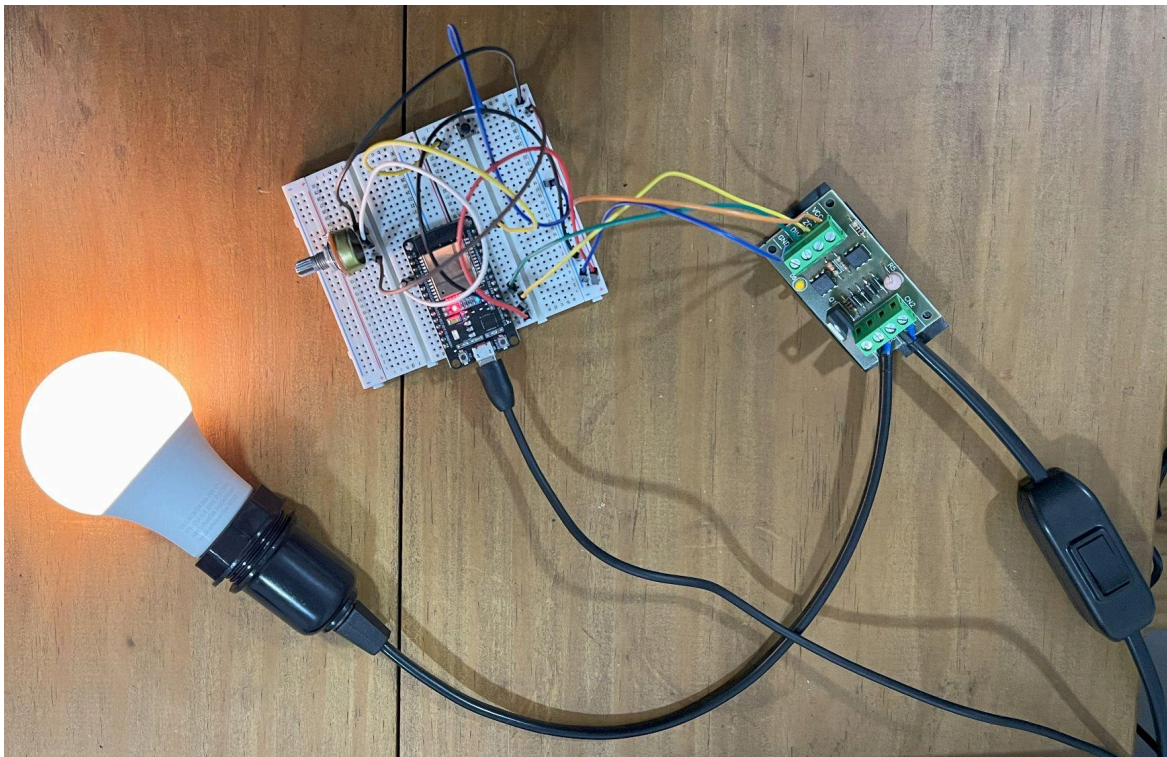
A montagem do Módulo de Iluminação requer maior atenção devido à manipulação de tensões AC.

1. Conexão do Módulo Dimmer ao ESP32:

- Conecte o pino de **Zero-Crossing (ZC)** do seu módulo dimmer ao pino **GPIO 2** do ESP32. Este pino é crucial para que o ESP32 possa sincronizar os pulsos de disparo com as passagens da onda AC pelo zero, garantindo uma dimerização sem flicker.
- Conecte o pino de **Gate (GT) do TRIAC** (às vezes rotulado como DIM ou PWM) do módulo dimmer ao pino **GPIO 4** do ESP32. Este pino será utilizado para enviar o pulso de disparo para o TRIAC, controlando quando a corrente será liberada para a lâmpada.
- Conecte os pinos de alimentação **VCC** e **GND** do módulo dimmer aos respectivos pinos de alimentação no ESP32. A tensão necessária para o dimmer (geralmente 3.3V ou 5V) deve ser verificada nas especificações do seu módulo dimmer.
- **Conexão da Lâmpada e Alimentação AC:** Esta é a etapa mais crítica e potencialmente perigosa. Primeiramente, **DESLIGUE COMPLETAMENTE A ENERGIA DA TOMADA** onde a lâmpada será conectada. Siga rigorosamente o diagrama elétrico fornecido pelo fabricante do seu módulo dimmer para conectar a lâmpada e a fonte de alimentação AC (110V no caso deste projeto) aos terminais do dimmer. O dimmer é conectado em série com a lâmpada na linha viva (fase). Se tiver dúvidas, procure a ajuda de um eletricista qualificado.

2. Conexão do Rotary Switch (Potenciômetro):

- Conecte um dos terminais fixos do potenciômetro ao pino **3.3V** do ESP32.
 - Conecte o outro terminal fixo do potenciômetro ao pino **GND** do ESP32.
 - Conecte o terminal central (wiper) do potenciômetro ao pino **GPIO 34** do ESP32. Este é um pino de entrada analógica do ESP32, ideal para ler a posição do potenciômetro.
 - *Dica:* O valor lido pelo ESP32 varia de 0 a 4095, correspondendo à posição do potenciômetro.
3. **Conexão do Botão de Pressão:**
- Conecte um terminal do botão de pressão ao pino **GND** do ESP32.
 - Conecte o outro terminal do botão de pressão ao pino **GPIO 23** do ESP32. O código está configurado para usar o resistor de pull-up interno do ESP32 (INPUT_PULLUP), o que significa que o pino estará "alto" (3.3V) por padrão e "baixo" (0V) quando o botão for pressionado. Isso elimina a necessidade de um resistor externo na maioria dos casos.
4. **Alimentação do Módulo:** Assim como o Módulo de Sensoriamento, o Módulo de Iluminação deve ser alimentado através de uma porta USB do seu computador ou de um adaptador de energia USB (5V).



Vista superior do módulo de iluminação montado

3.3 CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO ESP-NOW

A comunicação sem fio entre os dois módulos é fundamental para o sistema autônomo. Para que o Módulo de Sensoriamento (emissor) possa direcionar os dados corretamente, ele precisa do endereço MAC (Media Access Control) exclusivo do Módulo de Iluminação (receptor).

1. Obtenção do Endereço MAC do Módulo de Iluminação:

- O primeiro passo é obter o identificador único do seu ESP32 que será o Módulo de Iluminação. Carregue o código do Módulo de Iluminação para a placa ESP32 designada para essa função.
- Abra o **Serial Monitor** na IDE do Arduino (Ferramentas > Serial Monitor).
- Na inicialização do programa, o ESP32 exibirá seu endereço MAC no formato "XX:XX:XX:XX:XX:XX" (por exemplo, 1C:69:20:A4:88:94). Anote este endereço com precisão.

2. Configuração do Endereço MAC no Código do Módulo de Sensoriamento:

- Abra o código do Módulo de Sensoriamento na IDE do Arduino.
- Localize a linha que define o endereço MAC do escravo:
`uint8_t macAddressEscravo[] = {0x1C, 0x69, 0x20, 0xA4, 0x88, 0x94};`
- Substitua os valores hexadecimais padrão pelos bytes do endereço MAC que você anotou, um por um. É crucial que cada par de dígitos seja convertido para hexadecimal e precedido por 0x. Por exemplo, se o MAC anotado foi A1:B2:C3:D4:E5:F6, a linha deve ser alterada para:
`uint8_t macAddressEscravo[] = {0xA1, 0xB2, 0xC3, 0xD4, 0xE5, 0xF6};`
- *Importante:* Garanta que o tipo de dado na estrutura `struct_message` (`int luminosityPercent;`) seja **idêntico** em ambos os códigos para que a comunicação ESP-NOW ocorra sem erros de interpretação de dados.

3. Carregamento dos Códigos:

- Após configurar o MAC Address no código do Módulo de Sensoriamento, carregue este código atualizado para o ESP32 correspondente.
- Certifique-se de que o código mais recente do Módulo de Iluminação (com as correções de suavidade) esteja carregado no ESP32 dele.

4 MODO DE FUNCIONAMENTO

O Sistema de Iluminação Inteligente é governado por uma máquina de estados no Módulo de Iluminação, que permite operar em dois modos distintos: Manual e Automático, com transições fluidas e lógicas bem definidas.

4.1 INÍCIO E MODO MANUAL

Ao ser ligado, o Módulo de Iluminação entra automaticamente no **Modo Manual (Estado LAMP_IND)**. Este é o estado padrão e primário de controle.

- Neste modo, o controle da luminosidade da lâmpada é feito diretamente pelo usuário através do **Rotary Switch (Potenciômetro)**. Ao girar o potenciômetro, o valor de sua resistência é lido pelo ESP32, que o mapeia para o atraso de disparo do TRIAC no módulo dimmer.
- A lâmpada pode ser ajustada desde o brilho mínimo até o máximo. É importante notar que um pequeno giro inicial do potenciômetro pode ser necessário para a lâmpada acender, pois o código foi projetado para interpretar valores muito baixos do potenciômetro como um comando para "desligar" a lâmpada, utilizando o IDLE_STATE (8333µs de atraso, equivalente a um semiciclo completo, que impede o disparo do TRIAC).
- Enquanto estiver no Modo Manual, o Módulo de Iluminação continua atento aos sinais do botão de pressão e aos dados de luminosidade recebidos via ESP-NOW, mas não os utiliza para controlar a lâmpada.

```
-----  
TRANSICAO: [LAMP_IND (Controle Manual)] + [AJUST_SWITCH (Potenciometro)] -> [LAMP_IND (Controle Manual)]  
-> ACAO: A01: Ajustar brilho via potenciometro  
-----
```

Exemplo do monitor serial no modo de controle manual

4.2 MODO AUTOMÁTICO (ESP-NOW)

O Modo Automático é a funcionalidade central do sistema, onde a lâmpada ajusta seu brilho de forma autônoma.

1. **Ativação:** Para iniciar o Modo Automático, pressione o **Botão de Pressão** no Módulo de Iluminação. Esta ação sinaliza ao sistema a intenção do usuário de alternar para o controle automatizado.
2. **Estado PROC_WIFI (Processando Wi-Fi / Aguardando Dados):** Após pressionar o botão, o sistema entra neste estado intermediário. Durante este período, o Módulo de Iluminação está ativo e aguardando a recepção do **primeiro pacote de dados de luminosidade** vindo do Módulo de

Sensoriamento através da comunicação ESP-NOW. É uma fase de inicialização da comunicação automática. Se o ESP32 do módulo de iluminação não estiver conectado ao Wi-Fi (necessário para o ESP-NOW), ele tentará se reconectar.

3. **Estado RECEBENDO (Controle Automático Ativo):** Assim que o Módulo de Iluminação recebe o primeiro pacote de dados de luminosidade do Módulo de Sensoriamento, ocorre uma transição para o estado RECEBENDO.
 - O valor de luminosidade (em Lux) contido nesse primeiro pacote é crucial, pois ele é automaticamente estabelecido como o **setpointLuminosidade**. Este setpoint representa a luminosidade ambiente ideal desejada pelo usuário naquele momento.
 - **Ajuste Contínuo do Brilho:** Uma vez no estado RECEBENDO, o sistema monitora continuamente as leituras de luminosidade ambiente que chegam do Módulo de Sensoriamento e as compara com o setpointLuminosidade.
 - **Compensação por Excesso de Luz Ambiente (LUM_ACIMA):** Se a luminosidade ambiente medida for **MAIOR** que o setpointLuminosidade (indicando que há mais luz natural do que o desejado), o sistema interpretará que a lâmpada deve contribuir menos. Consequentemente, o brilho da lâmpada diminuirá gradualmente (Ação A04_DIMINUIR_BRILHO), o que é alcançado aumentando o atraso de disparo do TRIAC no dimmer.
 - **Compensação por Falta de Luz Ambiente (LUM_ABAIXO):** Por outro lado, se a luminosidade ambiente medida for **MENOR** que o setpointLuminosidade (indicando que há menos luz natural do que o desejado), o sistema entenderá que a lâmpada precisa complementar mais. O brilho da lâmpada aumentará gradualmente (Ação A05_AUMENTAR_BRILHO), diminuindo o atraso de disparo do TRIAC.
 - As mudanças de brilho são implementadas por um **controle proporcional** que utiliza as variáveis KP_dim e KP_aum. Este método permite que os ajustes sejam realizados em pequenos incrementos, garantindo uma transição suave e gradual da luminosidade, evitando saltos bruscos ou flicker perceptível na iluminação.

```
-----  
TRANSICAO: [RECEBENDO (Controle Automatico)] + [LUM_ABAIXO (Luz Ambiente Baixa)] -> [RECEBENDO (Controle Automatico)]  
-> ACAO: A05: Aumentar brilho da lampada  
[Acao] Ambiente escuro, aumentando brilho...  
[ESP-NOW] Dado recebido: 124%  
-----
```

Exemplo do monitor serial no modo de controle automático

4.3 TRANSIÇÕES DE MODO

As transições entre os modos de operação são projetadas para serem intuitivas e robustas.

- **Retorno ao Modo Manual:** A qualquer momento, independentemente do estado em que o Módulo de Iluminação se encontre (seja PROC_WIFI ou RECEBENDO), se o **Rotary Switch (Potenciômetro)** for girado e uma mudança significativa no seu valor for detectada, o sistema interpretará isso como uma intervenção manual do usuário. Imediatamente, o sistema retornará ao **Modo Manual (Estado LAMP_IND)**. A lâmpada passará a ser controlada exclusivamente pelo potenciômetro.
- **Timeout de Comunicação (Modo Automático - TIMEOUT_WIFI):** Se o Módulo de Iluminação estiver no estado RECEBENDO (controle automático ativo) e **não receber nenhum pacote de dados do Módulo de Sensoriamento por um período de 10 segundos (WIFI_TIMEOUT_MS)**, o sistema assume que houve uma perda de comunicação. Para indicar isso e tentar restabelecer a operação autônoma, o sistema transitará de volta para o estado PROC_WIFI (aguardando dados). Nesse momento, ele deixará de controlar a lâmpada automaticamente e aguardará o restabelecimento da comunicação para retomar o ajuste automático.
- **Comportamento em PROC_WIFI:** Enquanto no estado PROC_WIFI, o sistema continua tentando se reconectar ao Wi-Fi (se necessário) e esperando por novos dados de luminosidade do Módulo de Sensoriamento. Ele permanecerá neste estado até receber o primeiro pacote de dados (transitando para RECEBENDO) ou até o usuário intervir girando o potenciômetro (transitando para LAMP_IND).

5 RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

O design do sistema, baseado em máquinas de estados, visa facilitar a identificação e resolução de problemas comuns. As mensagens no Serial Monitor são ferramentas valiosas para depuração.

5.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO

- **Problema:** O Serial Monitor do Módulo de Sensoriamento exibe a mensagem “[*SENSOR*] ERRO: Sensor BH1750 não encontrado. Verifique as conexões!” e o programa parece travar na inicialização.
 - **Causa Provável:** Este erro indica que o ESP32 não conseguiu se comunicar com o sensor BH1750 via I2C. As causas mais comuns são:
 - **Conexões físicas incorretas:** Pinos SDA e SCL trocados ou conectados a pinos GPIO errados.
 - **Fiação solta:** Mau contato nos cabos jumper.
 - **Alimentação insuficiente:** O sensor ou o ESP32 não estão recebendo energia adequada.
 - **Sensor danificado:** O componente pode ter sofrido avarias.
 - **Solução:**
 - Verifique cuidadosamente todas as conexões do sensor BH1750 (VCC, GND, SDA para GPIO 21, SCL para GPIO 22), garantindo que estejam firmes e sem curto-circuitos.
 - Certifique-se de que o ESP32 está recebendo alimentação estável (5V via USB).
 - Se as conexões estiverem comprovadamente corretas e o problema persistir, tente substituir o sensor BH1750.
- **Problema:** Mensagens como “[*ESP-NOW*] Erro ao inicializar o ESP-NOW” ou “[*ESP-NOW*] Falha ao adicionar o peer” aparecem no Serial Monitor do Módulo de Sensoriamento.
 - **Causa Provável:** Estes erros indicam problemas na configuração ou inicialização do protocolo ESP-NOW. As causas mais comuns são:
 - **Endereço MAC do Módulo de Iluminação (macAddressEscravo) incorreto:** O emissor não consegue encontrar o receptor porque o endereço MAC fornecido não corresponde.
 - **Falha na inicialização do ESP-NOW:** Raramente, o próprio serviço ESP-NOW pode não inicializar no ESP32.
 - **Solução:**
 - **Verifique o macAddressEscravo:** Este é o ponto mais crítico. Revise o endereço MAC configurado na linha `uint8_t macAddressEscravo[] = {...};` no código do Módulo de Sensoriamento. Certifique-se de que ele corresponde **EXATAMENTE** ao endereço MAC

do seu Módulo de Iluminação (obtido através do Serial Monitor do Módulo de Iluminação durante sua inicialização). Preste atenção a cada byte e ao formato hexadecimal (ex: 0xAB).

- Tente reiniciar ambos os módulos (Módulo de Sensoriamento e Módulo de Iluminação) após qualquer correção no código ou na fiação.
- Certifique-se de que não há outros dispositivos ESP-NOW com os mesmos endereços MAC próximos, o que pode causar conflitos (embora raro em cenários simples).
- **Problema:** O Serial Monitor do Módulo de Sensoriamento exibe “[ESP-NOW] Status do último envio: Falha repetidamente.”
 - **Causa Provável:** Embora o Módulo de Sensoriamento esteja tentando enviar dados, o Módulo de Iluminação não está respondendo. As causas podem ser:
 - **Módulo de Iluminação desligado ou com falha:** O receptor não está operacional.
 - **Módulos muito distantes ou com obstáculos:** O sinal ESP-NOW não consegue alcançar o receptor.
 - **MAC Address ainda incorreto:** Mesmo que o peer tenha sido "adicionado", a comunicação pode falhar se o endereço real estiver errado.
 - **Solução:**
 - Verifique se o Módulo de Iluminação está ligado, conectado e funcionando (observe o Serial Monitor dele também).
 - Aproxime os dois módulos para descartar problemas de alcance ou barreiras físicas.
 - Reconfirme o endereço MAC configurado no Módulo de Sensoriamento conforme as instruções acima.

5.2 MÓDULO DE ILUMINAÇÃO

- **Problema:** A lâmpada conectada ao Módulo de Iluminação não liga/desliga, não altera o brilho ou apresenta "flicker" (cintilação) inconsistente e visível.
 - **Causa Provável:**
 - **Conexões do módulo dimmer incorretas:** Pinos de Zero-Crossing (ZC) ou Gate (GT) trocados ou com mau contato.
 - **Lâmpada incompatível:** A lâmpada utilizada não é dimerizável (muito comum com LEDs comuns).
 - **Problema no sinal de Zero-Crossing:** O módulo dimmer pode não estar enviando um sinal de ZC limpo ou o pino de entrada (GPIO 2) não está detectando-o corretamente.

- **Solução:**
 - Verifique cuidadosamente as conexões do módulo dimmer: **GPIO 2 para ZC e GPIO 4 para TRIAC Gate**. Confirme se o VCC e GND do dimmer estão corretos.
 - **Utilize uma lâmpada apropriada:** Substitua por uma lâmpada incandescente ou uma lâmpada LED explicitamente marcada como "dimerizável".
 - **Calibração de Atrasos:** Se o flicker persistir e as conexões estiverem corretas, pode ser necessário ajustar os valores de DELAY_MIN_US (para brilho máximo) e DELAY_MAX_US (para brilho mínimo/desligado) no código. Comece com os valores padrão e ajuste-os incrementalmente para encontrar a faixa ideal que elimine o flicker e proporcione a melhor variação de brilho para a sua lâmpada e módulo dimmer específicos.
- **Problema:** O controle automático da lâmpada não inicia (o sistema permanece no modo manual ou em PROC_WIFI).
 - **Causa Provável:** O botão de pressão não está funcionando corretamente, suas conexões estão erradas, ou o Módulo de Sensoriamento não está enviando dados.
 - **Solução:**
 - Verifique as conexões do botão de pressão (GPIO 23 e GND). Certifique-se de que não há curto-circuitos e que o botão está funcionando fisicamente.
 - Confirme se o Módulo de Sensoriamento está ligado, enviando dados via ESP-NOW e que o MAC Address está corretamente configurado (veja os problemas do Módulo de Sensoriamento). O sistema só transitará para RECEBENDO após receber o primeiro dado.
- **Problema:** O sistema no Módulo de Iluminação retorna para o modo "Aguardando Dados" (Estado PROC_WIFI), ou o Serial Monitor indica TIMEOUT_WIFI repetidamente.
 - **Causa Provável:** O Módulo de Sensoriamento parou de enviar dados, está fora do alcance, ou houve uma interferência sem fio que bloqueou a comunicação ESP-NOW por mais de WIFI_TIMEOUT_MS (10 segundos).
 - **Solução:**
 - Verifique o Módulo de Sensoriamento: ele está ligado? Está enviando dados (observe o Serial Monitor dele)? Há erros no lado do sensoriamento?
 - Aproxime os dois módulos para descartar problemas de alcance ou barreiras físicas.
 - Ambos os módulos devem estar em uma área com mínima interferência de outros dispositivos Wi-Fi/Bluetooth.
 - Se a perda de comunicação for frequente, o WIFI_TIMEOUT_MS pode ser ajustado para um valor maior (ex: 20000ms ou 30000ms), mas isso fará com que o sistema demore mais

para detectar a perda de sinal.

```
Conexao Wi-Fi: Tentando Conectar...
Conexao Wi-Fi: Tentando Conectar...
Conexao Wi-Fi: Tentando Conectar...
Conexao Wi-Fi: Tentando Conectar...
```

Exemplo do monitor serial em caso de perda de conexão

- **Problema:** A alteração de luminosidade no modo automático é muito brusca (rápida demais) ou muito lenta para reagir de forma eficaz às mudanças da luminosidade ambiente.
 - **Causa Provável:** Os parâmetros de "ganho" (KP_dim e KP_aum) nas ações A04_DIMINUIR_BRILHO e A05_AUMENTAR_BRILHO (dentro da função executarAcao) controlam a sensibilidade da resposta.
 - **Solução:**
 - No código do Módulo de Iluminação, localize as linhas que definem KP_dim e KP_aum.
 - **Para mudanças mais suaves (mais lentas):** Diminua os valores de KP_dim e KP_aum (ex: de 5 para 2 ou 1). Isso fará com que a lâmpada demore mais para atingir o setpoint.
 - **Para mudanças mais responsivas (mais rápidas):** Aumente os valores de KP_dim e KP_aum (ex: de 5 para 8 ou 10). Isso fará com que a lâmpada reaja mais rapidamente às variações de luminosidade.
 - Faça pequenos ajustes incrementais e observe o comportamento da lâmpada até encontrar a resposta ideal que combine suavidade com responsividade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Sistema de Iluminação Inteligente representa uma solução robusta e versátil para o controle automatizado de iluminação. A utilização de máquinas de estados em sua arquitetura de software proporciona uma operação lógica e previsível, simplificando tanto o desenvolvimento quanto a depuração de possíveis falhas.

A chave para o desempenho ideal do sistema reside em uma **calibração cuidadosa dos parâmetros de controle** e em uma **montagem precisa** dos componentes. Recomenda-se vivamente que o usuário dedique tempo à fase de testes, observando o comportamento da lâmpada em diversas condições de luminosidade ambiente. Ajustes finos nos valores de atraso do dimmer e nos ganhos de controle permitem o usuário adaptar o sistema às características específicas da lâmpada utilizada e às preferências de conforto visual do usuário.

Com a atenção devida à montagem e calibração, este sistema não apenas otimizará o ambiente em termos de conforto e funcionalidade, mas também contribuirá significativamente para a eficiência energética, adaptando o consumo de luz artificial às necessidades reais do espaço. A flexibilidade do ESP32 e do protocolo ESP-NOW abre portas para futuras expansões e integrações, tornando este projeto uma base sólida para sistemas de automação residencial mais complexos.