Liga Acadêmica de Sistemas Embarcados
Centro de Informática · UFPE

FORMAÇÃO EM ESP32 · MÓDULO 1

Conhecendo a **família ESP32**

Do silício à bancada: como esses microcontroladores funcionam por dentro, o que cada uma das doze séries faz e não faz, onde eles superam Arduino e STM32, e como escolher o chip certo antes de fechar um projeto.

Lucas Rayan Guerra
Ciência Embarcada · ESPDocs linkedin.com/in/lucasrguerra

Material de apoio
Formação presencial · uso livre para fins educacionais

Apresentação

Sobre a formação, sobre a liga, e como aproveitar esta apostila.

A **LASER**, Liga Acadêmica de Sistemas Embarcados do Centro de Informática da UFPE tem como propósito fortalecer a área de sistemas embarcados na universidade, promovendo estudo, pesquisa e aplicação de tecnologias que envolvem tanto hardware quanto software. Suas frentes vão de automação e Internet das Coisas a IA na borda, robótica, sistemas críticos, tecnologias veiculares e engenharia biomédica.

Esta apostila acompanha a formação em ESP32 da liga. A escolha da plataforma não é acidental: o ESP32 atravessa quase todas as frentes da LASER. Ele é o nó de IoT, é a placa de automação, roda inferência na borda, e é barato o bastante para que cada pessoa tenha o seu.

O que você vai levar deste módulo

- Entender o que existe dentro de um ESP32 e por que ele é diferente de um Arduino.
- Saber navegar as doze séries da família sem se perder na nomenclatura.
- Ter um método objetivo para escolher a série de um projeto novo.
- Reconhecer as limitações reais da plataforma antes de esbarrar nelas.
- Sair com um sensor real lendo temperatura e umidade na sua bancada.

Pré-requisitos

Espera-se que você já tenha ligado um LED em algum microcontrolador e saiba o que é uma porta digital. Programação em C ou C++ em nível básico ajuda, mas o código da prática é curto e comentado. **Não é preciso** saber nada de Wi-Fi, RTOS, RISC-V ou criptografia. Tudo isso aparece explicado no caminho.

Material para a prática

Uma placa **ESP32-S3-DevKitC-1**, um sensor **DHT11**, um resistor de **10 kΩ**, jumpers, protoboard e um cabo USB de dados. A lista completa e o esquema de ligação estão no capítulo 9.

Como esta apostila está organizada

Os capítulos 1 a 3 constroem o entendimento do hardware. Os capítulos 4 a 6 apresentam a família e comparam com alternativas. Os capítulos 7 e 8 são de decisão: como escolher série e ferramenta. O capítulo 9 é a prática, e o 10 fecha com glossário e caminhos de estudo.

Ao longo do texto você encontra quatro tipos de caixa:

DICA

Atalho, boa prática ou recomendação que economiza tempo.

ATENÇÃO

Ponto que costuma causar problema se passar despercebido.

ERRO COMUM

Armadilha concreta, com o sintoma que ela produz e como escapar.

CURIOSIDADE

Contexto ou detalhe técnico que ajuda a fixar o conceito.

Sumário

Dez capítulos, do conceito à bancada.

1 O que é o ESP32 5

2 Anatomia: o que existe dentro do chip 8

3 Como o chip acorda: boot e execução 15

4 A família completa: as 12 séries 17

5 Segurança em hardware 21

6 ESP32, ESP8266, Arduino e STM32 23

7 Pontos fortes e limitações reais 25

8 Como escolher a série do seu projeto 27

9 Prática: lendo um DHT11 com o ESP32-S3 30

10 Glossário e próximos passos 36

· Créditos 38

1 O que é o ESP32

De onde ele veio e por que virou padrão de fato em projetos conectados.

O ESP32 é uma linha de microcontroladores da **Espressif Systems**, empresa fundada em 2008 e sediada em Xangai. A história que interessa começa em 2014, com o ESP8266: um chip barato de Wi-Fi vendido como "módulo serial para internet", que a comunidade descobriu ser, na verdade, um microcontrolador completo por poucos dólares.

Em 2016 veio o ESP32 original, já projetado como plataforma: dois núcleos, Wi-Fi, Bluetooth e um conjunto grande de periféricos. A partir de 2020 a linha se ramificou, e hoje são **doze séries**, cada uma otimizada para um recorte diferente de custo, consumo, conectividade e desempenho.

Linha do tempo

ANO	LANÇAMENTO	O QUE MUDOU
2014	ESP8266	Wi-Fi barato ao alcance de qualquer projeto. Ainda muito usado.
2016	ESP32	Dois núcleos, Bluetooth e periféricos de verdade. O marco da plataforma.
2019	ESP32-S2	Foco em segurança e USB nativo; abre mão do Bluetooth.
2020	ESP32-C3	Primeira série RISC-V. Marca a virada de arquitetura da empresa.
2021	ESP32-S3	Dois núcleos com instruções vetoriais para IA. Vira o carro-chefe.
2022	ESP32-C6, H2	Chega o rádio 802.15.4: Zigbee, Thread e Matter entram na família.
2023	ESP32-P4	Alto desempenho sem rádio, com MIPI para câmera e display.
2024 e 2025	C5, C61, H4, S31	Wi-Fi 6, dual-band de 5 GHz e a geração seguinte de malha.

Datas de anúncio. A disponibilidade comercial e o suporte nas ferramentas costumam vir meses depois.

O que explica a adoção

Antes do ESP8266, colocar um projeto na internet significava comprar um microcontrolador *e* um módulo de rede, ligá-los por serial ou SPI, e gastar boa parte da memória disponível com a pilha de comunicação. O ESP32 traz **o rádio dentro do mesmo encapsulamento do processador**, com as pilhas de Wi-Fi e Bluetooth prontas, testadas em campo por centenas de milhões de dispositivos.

Some a isso o preço, já que um módulo custa menos que muitos microcontroladores sem rádio, e uma documentação pública completa, com datasheets, manuais de referência e código-fonte abertos. Essa combinação é rara no mercado de semicondutores.

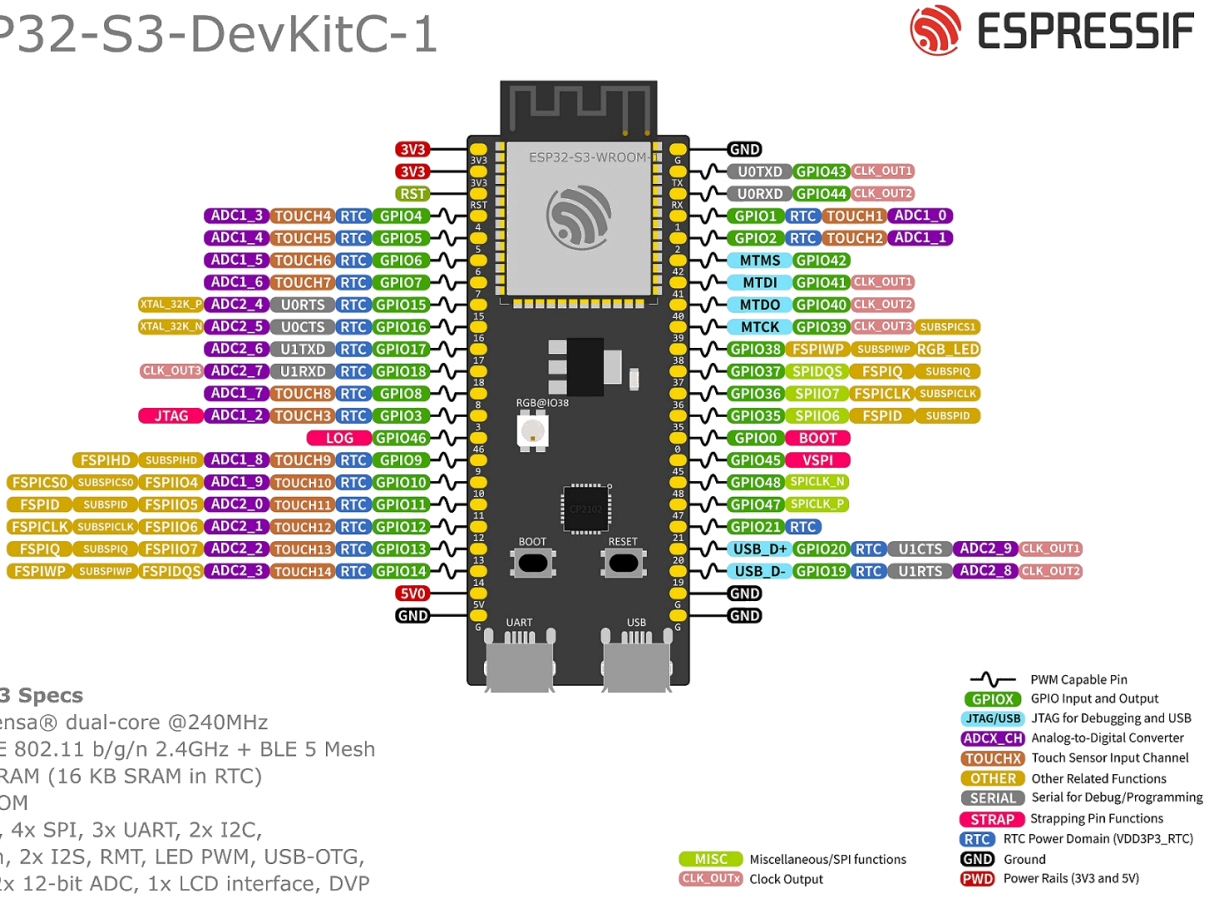
SoC, módulo, placa e série: quatro coisas diferentes

Muita confusão nasce de usar "ESP32" para quatro coisas distintas. Vale separar desde já, porque isso muda o que você compra, quanto custa e como projeta:

TERMO	O QUE É	EXEMPLO
Chip (SoC)	O silício nu, num encapsulamento QFN de poucos milímetros. Precisa de antena, cristal e memória flash externos para funcionar. É o que a Espressif vende em bobina para fábricas.	`ESP32-S3`
Módulo	O chip montado numa plaquinha com flash, cristal, antena, blindagem e, o mais importante, **homologação de rádio**. É o que vai dentro de um produto comercial.	`ESP32-S3-WROOM-1`
Placa de desenvolvimento	O módulo numa placa com regulador de tensão, conector USB, botões de boot e reset e pinos em barra. É o que usamos para aprender e prototipar.	`ESP32-S3-DevKitC-1`
Série	A família daquele silício: define a arquitetura do processador, quais rádios existem e quais periféricos estão presentes.	`Série S3`

HOMOLOGAÇÃO PERTENCE AO MÓDULO, NÃO AO CHIP

Se um dia você levar um projeto a produto, lembre que as certificações de rádio (Anatel no Brasil, FCC nos Estados Unidos, CE na Europa) são emitidas para o **módulo**. Usar um módulo já homologado evita um processo de certificação caro e demorado. Projetar com o chip nu significa homologar o seu produto do zero.



Os três primeiros níveis numa imagem só. O retângulo prateado no centro é o **módulo** ESP32-S3-WROOM, com a antena impressa numa ponta e a blindagem metálica cobrindo o resto; dentro dele, sem aparecer, está o **chip**. Todo o resto (regulador de tensão, conversor USB-serial, botões e as barras de pinos) é a **placa de desenvolvimento**. Num produto seu, só o módulo iria para a PCB.

O que a Espressif entrega junto com o silício

Boa parte do valor do ESP32 não está no chip, e sim no software que vem junto. O **ESP-IDF** (Espressif IoT Development Framework) é o ambiente oficial: baseado em FreeRTOS, traz as pilhas de Wi-Fi, Bluetooth, TCP/IP, TLS, atualização remota de firmware (OTA), sistemas de arquivos, provisionamento e ferramentas de depuração. É software que levaria anos para uma equipe escrever do zero.

Existe também o **core Arduino para ESP32**, que traduz esse ambiente para as funções que você já conhece. É a porta de entrada, e é o que usaremos na prática, mas por baixo continua sendo o ESP-IDF rodando. Entender isso ajuda quando algo não funciona: muitas respostas estão na documentação do IDF, não na do Arduino.

2 Anatomia: o que existe dentro do chip

Os blocos que aparecem em qualquer série, e por que cada um importa.

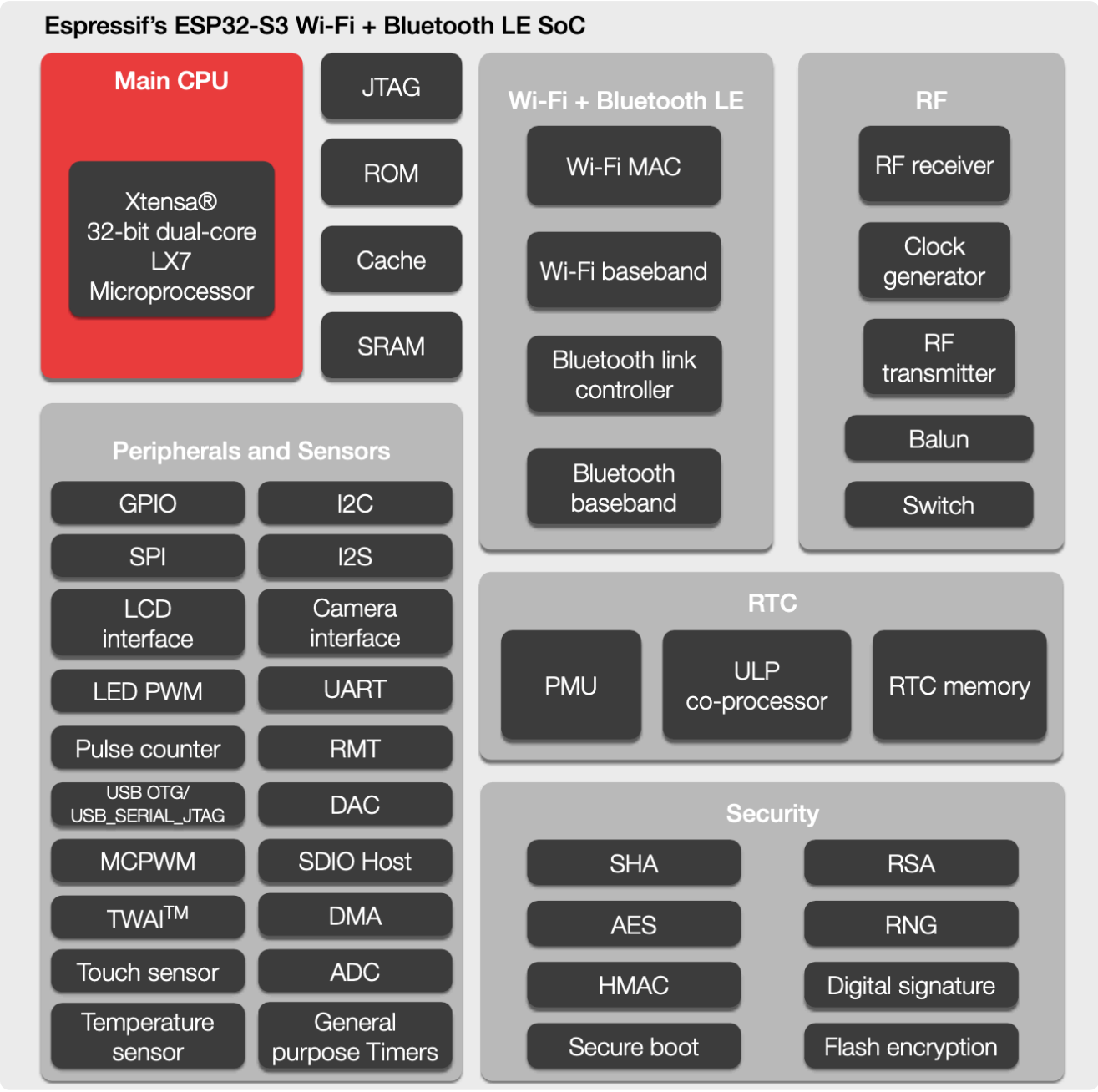


Diagrama de blocos do ESP32-S3, publicado pela Espressif. Vale voltar a ele ao longo da apostila: o **Main CPU** com os dois núcleos Xtensa e, ao lado, as memórias internas (ROM, SRAM e o *cache* que discutimos adiante). O bloco **RF** é a parte analógica do rádio, que fala com a antena. Em **RTC** mora o coprocessador ULP, que continua acordado com o resto do chip dormindo. E o bloco **Security** é exatamente o assunto do capítulo 5: SHA, AES, RSA, RNG, HMAC, assinatura digital, Secure Boot e criptografia de flash, tudo em silício.

Cada série tem o seu diagrama equivalente, com blocos a mais ou a menos. Imagem da Espressif Systems, reproduzida para fins didáticos.

Processador: Xtensa ou RISC-V

As séries mais antigas (ESP32, S2, S3) usam núcleos **Xtensa**, arquitetura licenciada da Cadence. As séries novas (C2, C3, C5, C6, C61, H2, H4, P4, S31) migraram para **RISC-V**, um conjunto de instruções aberto e livre de royalties.

Para quem programa em C, a diferença é quase invisível, porque o compilador cuida disso. Ela aparece quando você precisa de *assembly*, de ferramentas de análise de baixo nível, ou quando uma biblioteca pré-compilada existe só para uma das arquiteturas. A tendência é clara: todo lançamento recente é RISC-V.

UM OU DOIS NÚCLEOS, E O QUE FAZER COM ELES

Séries como ESP32, S3, P4, H4 e S31 têm dois núcleos. No ESP-IDF eles recebem nomes: `PRO_CPU` (núcleo 0) e `APP_CPU` (núcleo 1). Por convenção, as tarefas do Wi-Fi e do Bluetooth rodam no núcleo 0, deixando o 1 mais livre para o seu código. É possível fixar uma tarefa em um núcleo específico, recurso valioso quando você precisa de um laço com temporização mais previsível.

O COPROCESSADOR DE BAIXO CONSUMO

Algumas séries trazem um **segundo processador de baixíssimo consumo**, o ULP ou LP core. Ele continua acordado enquanto o processador principal dorme, lendo um sensor de tempos em tempos e só acordando o resto do chip quando algo interessa. É o que permite um projeto a bateria durar meses em vez de dias.

Memória: quatro tipos, quatro papéis

MEMÓRIA	PARA QUE SERVE	ORDEM DE GRANDEZA
SRAM	Memória de trabalho: variáveis, pilha, buffers. Rápida e volátil. É o recurso que acaba primeiro em projetos com Wi-Fi: a pilha de rede sozinha consome dezenas de kilobytes.	272 KB a 768 KB
ROM	Gravada de fábrica pela Espressif. Contém o bootloader inicial e rotinas básicas. Você não altera, e é por isso que um ESP32 é praticamente impossível de "brickar" de forma permanente.	128 KB a 576 KB
Flash externa	Onde mora o *seu* programa. Fica fora do núcleo do chip, num segundo componente ou dentro do mesmo encapsulamento, e conversa por SPI.	2 MB a 16 MB típico
PSRAM	RAM extra externa, opcional, para quando a SRAM não basta: buffer de câmera, tela gráfica, áudio, modelo de rede neural.	2 MB a 32 MB

O DETALHE QUE PEGA TODO MUNDO

A flash é **externa ao núcleo**. Isso significa que alguns pinos do chip já estão ocupados conversando com ela o tempo todo. No ESP32 original, são os GPIO 6 a 11. Se você usar esses pinos para um LED, o chip trava, porque você está interferindo no barramento de onde o programa está sendo lido. Todo ESP32 tem um conjunto assim; o número e a posição mudam conforme a série.



O que o diagrama de blocos não deixa evidente: a flash fica **fora** do chip. O cache e a MMU escondem isso do seu código, mas os seis pinos desse barramento ficam ocupados de forma permanente, mesmo com o seu programa rodando. É daí que sai o primeiro grupo de pinos com restrição, mais adiante neste capítulo. A barra diagonal com o número é a notação usual de esquemático para um feixe de condutores.

COMO O CÓDIGO RODA SE ELE ESTÁ FORA DO CHIP?

Existe um bloco chamado **MMU com cache** entre o processador e a flash. Ele traz para dentro do chip os pedaços de código que estão sendo executados, mantendo os mais usados em cache. O efeito é que a flash externa "parece" memória interna, com a ressalva de que um acesso fora do cache custa bem mais caro. Esse é um dos motivos pelos quais o desempenho de um ESP32 varia mais que o de um microcontrolador com flash interna.

Rádio

É o bloco que distingue o ESP32 da maioria dos microcontroladores. Dependendo da série você encontra:

TECNOLOGIA	PARA QUÊ
Wi-Fi 4 (802.11 b/g/n)	Conexão direta à internet pela rede local. Presente na maioria das séries.
Wi-Fi 6 (802.11ax)	Melhor desempenho em redes congestionadas e menor consumo com o recurso Target Wake Time.
Bluetooth LE	Comunicação com celular, sensores de baixo consumo, provisionamento de rede.
Bluetooth Clássico	Áudio (A2DP) e porta serial sem fio (SPP). Só no ESP32 e no S31.
IEEE 802.15.4	Base do Zigbee e do Thread, redes em malha de baixo consumo, e portanto do Matter.

O rádio não é de graça: transmitir custa corrente, com picos que passam de 300 mA, ocupa memória e consome tempo de processamento. Voltaremos a isso no capítulo 7.

Periféricos e a matriz de roteamento

GPIO, UART, SPI, I²C, I²S, PWM, ADC, sensor de temperatura interno, USB, controlador CAN (que a Espressif chama de TWAI), contador de pulsos, transceptor de infravermelho. O conjunto varia por série.

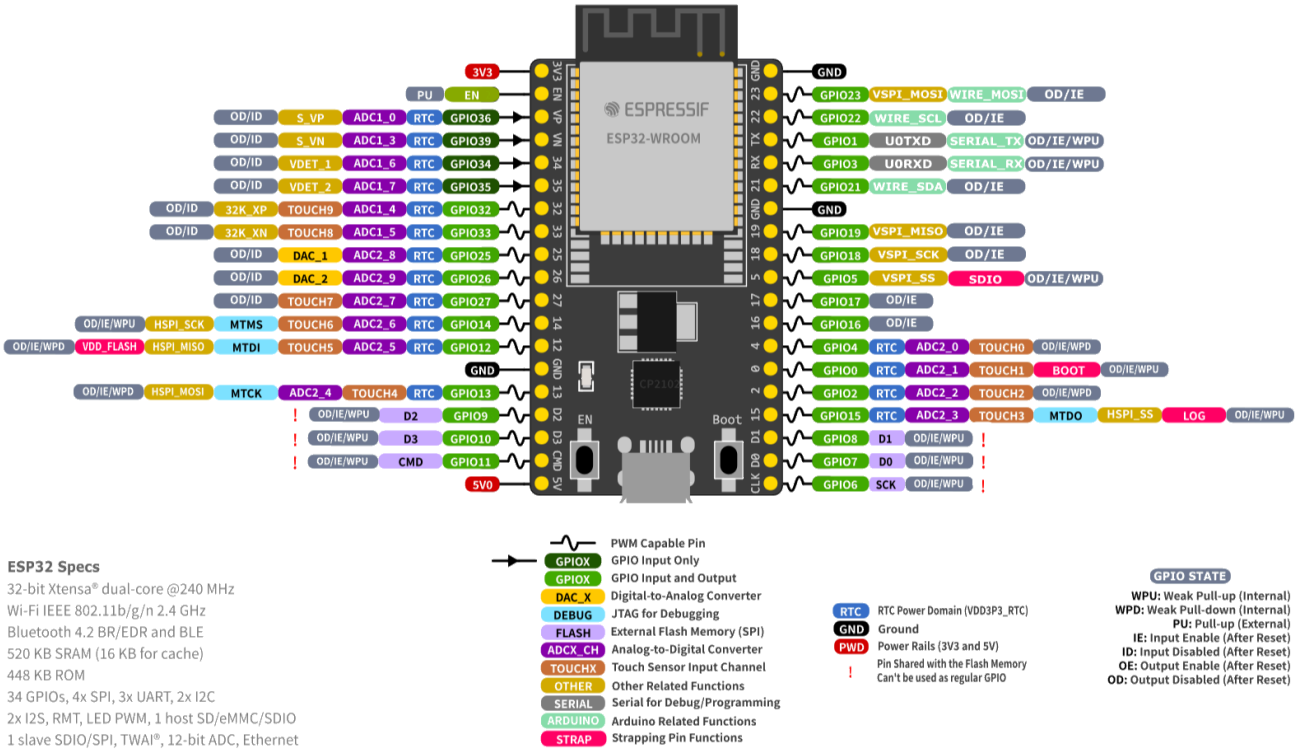
Uma característica facilita muito a vida: na maioria das séries existe uma **matriz de roteamento** (*GPIO matrix*) que permite mapear quase qualquer função para quase qualquer pino, por software. Em um microcontrolador tradicional, a UART2 só existe nos pinos que o fabricante escolheu; aqui, você decide na hora de programar. Na prática do projeto de placa isso é ouro: você desenha o traçado da forma mais limpa e depois adapta o firmware.

> **A MATRIZ TEM LIMITE**
>
> Sinais de alta velocidade (o SPI da flash, o USB, o cristal, algumas linhas de I²S e LCD) não passam pela matriz: eles usam *IO_MUX*, um caminho direto e mais rápido, disponível apenas em pinos específicos. Se você rotear um SPI rápido por um pino qualquer, ele funciona, mas a frequência máxima cai.

Pinos com restrição, e o estrago que eles causam

Aqui está a diferença mais concreta entre ler o datasheet e não ler. Num Arduino UNO, os vinte pinos são praticamente equivalentes. Num ESP32, uma parte deles já tem dono, e usar o pino errado não produz um erro de compilação: produz uma placa que não liga, um firmware que trava, ou pior, um protótipo que funciona na bancada e falha em campo.

São cinco grupos, e cada um quebra o projeto de um jeito diferente.



A pinagem do ESP32 clássico já traz as restrições marcadas, se você souber o que procurar. As **barras vermelhas** à esquerda dos GPIO 6 a 11 significam "compartilhado com a memória flash, não pode ser usado como GPIO comum". As etiquetas rosa **STRAP** marcam os pinos de boot. As setas simples (em vez de duplas) nos GPIO 34 a 39 indicam **somente entrada**. E as etiquetas **DEBUG** em azul são as linhas de JTAG.

1. LIGADOS À MEMÓRIA FLASH OU PSRAM

Estes pinos conversam com a memória de onde o firmware está sendo lido, o tempo todo, enquanto o chip funciona. Escrever neles interrompe essa conversa no meio.

Como falha: o chip reinicia em laço, ou trava no boot com uma mensagem de erro de leitura da flash. Não é intermitente e não tem contorno em software.

Como evitar: no ESP32-S3 são os GPIO 26 a 32; no ESP32 clássico, os GPIO 6 a 11 (mais o 16 e o 17 em módulos WROVER, que têm PSRAM). Boa notícia: em muitos módulos esses pinos nem chegam à barra de pinos, justamente para você não ter como errar.

2. STRAPPING (SELEÇÃO DO MODO DE BOOT)

O chip lê o nível destes pinos no instante do reset para decidir como inicializar. Depois do boot eles voltam a ser GPIO normais, e é aí que mora a armadilha: o pino funciona perfeitamente enquanto a placa está ligada, mas o que você pendurou nele atrapalha o próximo reset.

Como falha: a placa para de iniciar quando o circuito externo puxa o pino para o nível errado. Um exemplo comum: você liga um LED com resistor no GPIO0 do ESP32. O LED funciona. Na próxima energização, o resistor mantém o pino em nível baixo, o chip entende que deve entrar em modo de gravação e fica esperando um firmware que nunca chega. A placa parece morta.

Como evitar: reserve os pinos de strapping para saídas que ficam em alta impedância no boot, ou use-os para entradas com o resistor de pull no sentido que o chip espera. Se puder, simplesmente não use.

3. SOMENTE ENTRADA

Alguns pinos são fisicamente incapazes de acionar uma saída, e não têm resistores de pull-up nem pull-down internos.

Como falha: silenciosamente. O `pinMode(pino, OUTPUT)` não reclama, o `digitalWrite` não reclama, e o pino simplesmente não muda de nível. Você passa a tarde procurando o problema no código.

Como evitar: no ESP32 clássico são os GPIO 34, 35, 36, 37, 38 e 39. Use-os para leitura, e lembre de colocar o resistor de pull no circuito, já que não existe um interno para ativar. As séries RISC-V mais novas não têm pinos assim.

4. GRAVAÇÃO E DEPURAÇÃO

São a UART0 (por onde o firmware é gravado e as mensagens de `Serial` saem) e as quatro linhas de JTAG.

Como falha: você não perde o projeto, perde a capacidade de trabalhar nele. Se um sensor ocupa os pinos da UART0, cada gravação exige desconectar o sensor. Se algo escreve nesses pinos durante a execução, o monitor serial enche de lixo.

Como evitar: deixe a UART0 livre até o projeto estar fechado. Se precisar de mais uma serial, use a UART1 ou a UART2, que a matriz de roteamento leva para quase qualquer pino.

5. USB NATIVO

Nas séries com USB no próprio chip, dois pinos saem de fábrica ligados ao periférico USB Serial/JTAG.

Como falha: ao usá-los como GPIO comum, a porta USB de gravação some do computador. Recuperar exige o modo de gravação manual pelos botões BOOT e RESET.

Como evitar: no ESP32-S3 são o GPIO19 e o GPIO20. Trate-os como indisponíveis, a não ser que você tenha certeza de que não vai precisar do USB nativo.

Os pinos com restrição do ESP32-S3

Como a prática do capítulo 9 usa um ESP32-S3, vale ter esta lista à mão. Dos 45 GPIOs da série, 18 têm alguma condição:

GRUPO	PINOS
Flash e PSRAM	GPIO26, 27, 28, 29, 30, 31 e 32
Strapping	GPIO0, GPIO45 e GPIO46
Gravação e JTAG	GPIO39, 40, 41, 42 (JTAG) e GPIO43, 44 (UART0)
USB nativo	GPIO19 e GPIO20
Somente entrada	Nenhum nesta série

Sobram 27 pinos totalmente livres, incluindo o GPIO12 que usaremos na prática.

O ERRO QUE MAIS CUSTA CARO

Fechar o esquemático de uma placa própria distribuindo os sinais pelos pinos "que sobraram no traçado", sem conferir a lista. O protótipo chega da fábrica, a placa não liga, e a correção passa por cortar trilha ou mandar refazer o lote.

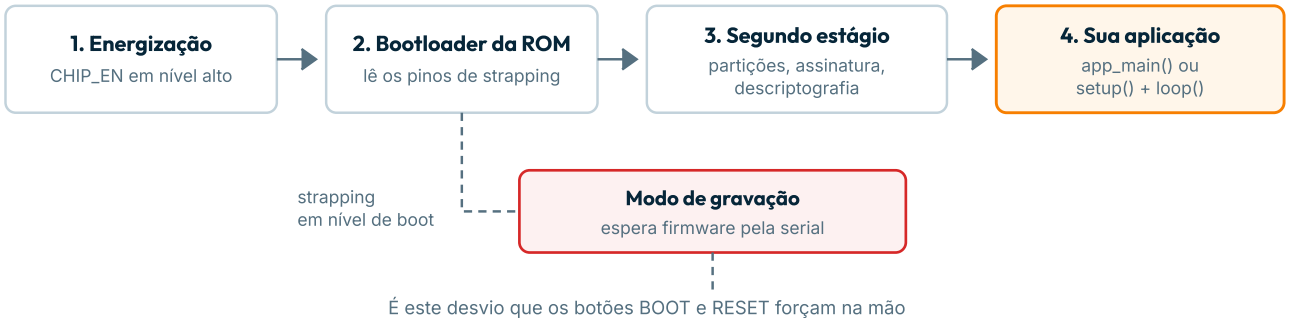
Cinco minutos de conferência antes do envio valem semanas de prazo. E como a matriz de roteamento deixa quase toda função ir para quase todo pino, quase sempre dá para reorganizar o traçado sem perder nada.

ONDE CONSULTAR

A página de cada série no **ESPDocs** traz uma seção de pinos com restrição, com os grupos acima listados pino a pino para aquela série específica, mais o diagrama de conexões completo com todas as funções de cada pino. Em espdocs.cienciaembarcada.com.br.

3 Como o chip acorda: boot e execução

Entender esta sequência economiza horas de depuração.



Quando a gravação falha com *timeout*, é a etapa 2 que não chegou ao desvio. Segurar BOOT e pressionar RESET força o caminho pontilhado.

A sequência de partida

1 Energização e reset

Ao receber energia, o chip mantém o processador parado até as tensões estabilizarem. O pino de habilitação (`CHIP_EN` ou `CHIP_PU`) precisa estar em nível alto, e é por isso que ele nunca pode ficar flutuando.

2 Bootloader da ROM

O processador começa a executar código gravado de fábrica na ROM. Esse código lê o nível dos **pinos de strapping** para decidir o que fazer: iniciar normalmente a partir da flash, ou entrar em **modo de gravação** e esperar um firmware chegar pela serial.

3 Bootloader de segundo estágio

Se o boot for normal, a ROM carrega da flash um segundo bootloader, este sim gravado por você junto com o firmware. Ele lê a tabela de partições, escolhe qual imagem executar (importante para OTA, onde há duas), verifica assinatura se o Secure Boot estiver ativo, e descriptografa se a flash estiver cifrada.

4 Sua aplicação

Só então o seu programa começa. No ESP-IDF, o ponto de entrada é `app_main()`. No Arduino, o core cria uma tarefa que chama `setup()` e depois `loop()` repetidamente. Ou seja: o `loop()` que você conhece é, por baixo, uma tarefa do FreeRTOS.

OS BOTÕES BOOT E RESET

É por causa do passo 2 que as placas têm esses dois botões. Segurar **BOOT** enquanto pressiona e solta **RESET** força o modo de gravação. A maioria das placas modernas faz isso automaticamente pelo conversor USB, mas quando a gravação falha com *timeout*, esse é o truque manual que resolve.

FreeRTOS: seu código não está sozinho

Diferente de um Arduino UNO, onde o seu `loop()` é literalmente a única coisa executando, no ESP32 há um **sistema operacional de tempo real** gerenciando várias tarefas ao mesmo tempo: a sua, as do Wi-Fi, as do Bluetooth, o temporizador de sistema, o coletor de estatísticas.

O escalonador distribui o processador entre elas por prioridade. Isso traz dois efeitos práticos que surpreendem quem vem do Arduino:

Primeiro: um `delay()` no ESP32 não trava o chip: ele cede o processador para outras tarefas. É por isso que o Wi-Fi continua funcionando enquanto o seu código "espera".

Segundo: um laço que nunca cede o processador causa problema. Se você escrever um `while(true)` sem `delay()` nem espera, o *watchdog* vai reiniciar o chip, reclamando que a tarefa não alimentou o cão de guarda. Não é bug: é o sistema protegendo as tarefas do rádio.

"TASK WATCHDOG GOT TRIGGERED"

Esta mensagem no monitor serial quase sempre significa laço apertado sem ceder tempo. A correção costuma ser um `delay(1)` ou um `vTaskDelay()` dentro do laço. Parece contraintuitivo colocar espera para o programa funcionar, mas em um sistema com RTOS é exatamente o que se faz.

Partições: a flash não é um bloco só

A memória flash é dividida segundo uma **tabela de partições**. Um layout típico tem: o bootloader, a tabela em si, uma área `nvs` para guardar configurações (como a senha do Wi-Fi), uma ou duas partições de aplicação e, às vezes, um sistema de arquivos.

Duas partições de aplicação existem para permitir **OTA**: o firmware novo é gravado na partição inativa, e só depois de validado o chip passa a iniciar por ela. Se a imagem nova falhar, ele volta sozinho para a anterior. É por isso que um projeto com atualização remota precisa de mais que o dobro do espaço do firmware.

4 A família completa: as 12 séries

Cada uma nasceu para resolver um problema diferente.

A nomenclatura ajuda mais do que parece. A letra indica a vocação da série: **S** de *sensing*, desempenho e USB; **C** de custo reduzido em RISC-V; **H** de malha 802.15.4 sem Wi-Fi; **P** de processamento bruto sem rádio.

ESP32
O CLÁSSICO

O original de 2016. Dois núcleos, Bluetooth Clássico (raro na família), Ethernet e dois DACs. Ainda é o mais barato e o de maior base instalada.

Núcleo	**Xtensa LX6 ×2, 240 MHz**
SRAM	**520 KB**
GPIO	**34**

ESP32-S2
USB E SEGURANÇA

Um núcleo e sem Bluetooth, mas trouxe USB OTG nativo e muitos GPIOs. Bom quando o projeto precisa se comportar como dispositivo USB.

Núcleo	**Xtensa LX7, 240 MHz**
SRAM	**320 KB**
GPIO	**43**

ESP32-S3
O CAVALO DE BATALHA

Dois núcleos, BLE 5, USB nativo, muita RAM e instruções vetoriais para IA. A série mais usada em projetos novos, e a da nossa prática.

Núcleo	**Xtensa LX7 ×2, 240 MHz**
SRAM	**512 KB**
GPIO	**45**

ESP32-C2
O MÍNIMO VIÁVEL

Também vendido como ESP8684. Feito para custo: poucos pinos, sem I²S e sem acelerador AES. Para dispositivos simples em altíssimo volume.

Núcleo	**RISC-V, 120 MHz**
SRAM	**272 KB**
GPIO	**14**

ESP32-C3
O SUBSTITUTO DO CLÁSSICO

O primeiro RISC-V da casa. Wi-Fi, BLE 5 e USB para depuração num chip barato. Escolha natural para trocar um ESP8266 antigo.

Núcleo	**RISC-V, 160 MHz**
SRAM	**400 KB**
GPIO	**22**

ESP32-C6
MATTER E MALHA

Wi-Fi 6, BLE 6 e 802.15.4 no mesmo chip: fala Zigbee, Thread e Matter. A porta de entrada para automação residencial moderna.

Núcleo	**RISC-V + LP, 160 MHz**
SRAM	**512 KB**
GPIO	**30**

ESP32-C5
WI-FI DE DUAS FAIXAS

O primeiro da família com Wi-Fi 6 em 2,4 GHz *e* 5 GHz. Útil onde a faixa de 2,4 GHz está congestionada.

Núcleo	**RISC-V + LP, 240 MHz**
SRAM	**384 KB**
GPIO	**29**

ESP32-C61
WI-FI 6 ECONÔMICO

Wi-Fi 6 com foco em custo, com flash e PSRAM já no encapsulamento. Sem 802.15.4 e sem acelerador AES.

Núcleo	**RISC-V, 160 MHz**
SRAM	**320 KB**
GPIO	**30**

ESP32-H2
MALHA A BATERIA

Sem Wi-Fi de propósito: só BLE 6 e 802.15.4. Sem o rádio mais faminto, o consumo despenca. Ideal para sensor Zigbee/Thread alimentado por pilha.

Núcleo **RISC-V, 96 MHz**
SRAM **320 KB**
GPIO **19**

ESP32-H4
MALHA, SEGUNDA GERAÇÃO

Sucessor do H2, com dois núcleos e BLE 5.4 com LE Audio. Ainda em documentação preliminar, sem datasheet publicado e sem suporte estável.

Núcleo **RISC-V ×2, 96 MHz**
SRAM **384 KB**
GPIO **40**

ESP32-P4
FORÇA BRUTA, SEM RÁDIO

400 MHz, dois núcleos, MIPI para câmera e display, Ethernet. Não tem Wi-Fi nem Bluetooth: é para interface gráfica e processamento pesado.

Núcleo **RISC-V ×2 + LP, 400 MHz**
SRAM **768 KB**
GPIO **55**

ESP32-S31
O TOPO DE LINHA

320 MHz, Wi-Fi 6, Bluetooth Clássico, 802.15.4, CAN FD e aceleração de IA. Ainda sem versão estável do ESP-IDF nem suporte no Arduino.

Núcleo **RISC-V ×2 + LP, 320 MHz**
SRAM **512 KB**
GPIO **60**

Tabelas comparativas

PROCESSAMENTO E MEMÓRIA

SÉRIE	NÚCLEO	CLOCK	SRAM	GPIO	ESP-IDF MÍNIMO
ESP32	Xtensa LX6 ×2	240 MHz	520 KB	34	v3.x
ESP32-S2	Xtensa LX7 ×1	240 MHz	320 KB	43	v4.2
ESP32-S3	Xtensa LX7 ×2	240 MHz	512 KB	45	v4.4
ESP32-S31	RISC-V ×2	320 MHz	512 KB	60	master
ESP32-C2	RISC-V ×1	120 MHz	272 KB	14	v5.0
ESP32-C3	RISC-V ×1	160 MHz	400 KB	22	v4.3
ESP32-C5	RISC-V ×1	240 MHz	384 KB	29	v5.5.2
ESP32-C6	RISC-V ×1	160 MHz	512 KB	30	v5.1
ESP32-C61	RISC-V ×1	160 MHz	320 KB	30	v5.5.2
ESP32-P4	RISC-V ×2	400 MHz	768 KB	55	v5.3
ESP32-H2	RISC-V ×1	96 MHz	320 KB	19	v5.1
ESP32-H4	RISC-V ×2	96 MHz	384 KB	40	master

"master" indica série que ainda não entrou em versão estável do ESP-IDF.

RÁDIOS

SÉRIE	WI-FI	BLUETOOTH	802.15.4	MATTER
ESP32	Wi-Fi 4	BLE + Clássico	Não	Não
ESP32-S2	Wi-Fi 4	Não	Não	Não
ESP32-S3	Wi-Fi 4	BLE 5.4	Não	Não
ESP32-S31	Wi-Fi 6	BLE + Clássico	**Sim**	**Sim**
ESP32-C2	Wi-Fi 4	BLE 5.3	Não	Não
ESP32-C3	Wi-Fi 4	BLE 5.4	Não	Não
ESP32-C5	Wi-Fi 6 · 2,4 e 5 GHz	BLE 6.0	**Sim**	**Sim**
ESP32-C6	Wi-Fi 6	BLE 6.0	**Sim**	**Sim**
ESP32-C61	Wi-Fi 6	BLE 6.0	Não	Via Wi-Fi
ESP32-P4	Não	Não	Não	Não
ESP32-H2	Não	BLE 6.0	**Sim**	**Sim**
ESP32-H4	Não	BLE 5.4	**Sim**	**Sim**

FERRAMENTAS E ENCAPSULAMENTO

SÉRIE	CORE ARDUINO	DEPURAÇÃO	ENCAPSULAMENTO
ESP32	**147 placas**	Sonda externa	QFN48 (6×6 e 5×5 mm)
ESP32-S2	**26 placas**	Sonda externa	QFN56 (7×7 mm)
ESP32-S3	**158 placas**	USB integrado	QFN56 (7×7 mm)
ESP32-S31	Não	USB integrado	QFN80 (8×8 mm)
ESP32-C2	1 placa	Sonda externa	QFN24 (4×4 mm)
ESP32-C3	**29 placas**	USB integrado	QFN32 (5×5) e QFN28 (4×4 mm)
ESP32-C5	10 placas	USB integrado	QFN48 (6×6 mm)
ESP32-C6	**21 placas**	USB integrado	QFN40 e QFN32 (5×5 mm)
ESP32-C61	1 placa	USB integrado	QFN40 (5×5 mm)
ESP32-P4	7 placas	USB integrado	QFN104 (10×10 mm)

ESP32-H2	3 placas	USB integrado	QFN32 (4×4 mm)
ESP32-H4	Não	USB integrado	Não divulgado

Número de definições de placa no core oficial arduino-esp32, um bom termômetro da maturidade do ecossistema.

LANÇADO NÃO É O MESMO QUE UTILIZÁVEL

Um chip anunciado pode levar meses até ter suporte estável nas ferramentas. O **S31** e o **H4** hoje só existem no branch de desenvolvimento do ESP-IDF e não têm suporte no core Arduino. Antes de escolher uma série recente para um projeto com prazo, verifique em qual versão do ESP-IDF ela entrou e se ela já tem módulo à venda.

5 Segurança em hardware

O que existe no silício, para que serve, e por que isso separa as séries.

Segurança costuma ser tratada como assunto de software, mas boa parte dela depende de blocos de hardware. Executar criptografia em hardware é dezenas de vezes mais rápido e mais econômico que na CPU. E alguns recursos, como esconder uma chave privada do próprio firmware, são *impossíveis* sem apoio do silício.

Este é também o assunto em que as séries mais divergem, o que faz dele um bom critério de escolha.

Os blocos e o que cada um resolve

BLOCO	PARA QUE SERVE
AES	Cifra simétrica: é o que protege o tráfego depois que uma conexão TLS é estabelecida.
SHA	Funções de resumo (*hash*). Base de assinaturas, verificação de integridade e HMAC.
RSA / MPI	Aritmética de números grandes, usada em chave pública clássica. É o que acelera o handshake TLS.
ECC	Criptografia de curvas elípticas: mesma segurança do RSA com chaves muito menores, o que importa bastante em microcontrolador.
ECDSA	Assinatura digital sobre curvas elípticas. É o que o Matter exige para o atestado de dispositivo.
HMAC	Autenticação de mensagem com chave secreta.
Digital Signature	Assina usando uma chave RSA guardada em eFuse, sem que o firmware chegue a vê-la.
Key Manager	Provisiona e usa chaves sem que elas fiquem legíveis para o firmware, nem se alguém extrair a imagem.
RNG	Gerador de números verdadeiramente aleatórios. Sem ele, toda a criptografia fica previsível.
Criptografia de flash	Cifra o conteúdo da flash, impedindo que alguém leia o firmware soldando um gravador na memória.
Secure Boot	O chip se recusa a executar firmware que não esteja assinado pela sua chave.
Proteção DPA	Defesa contra ataque que deduz a chave medindo variações no consumo de energia durante a operação.

O que cada série tem

SÉRIE	AES	ECC	ECDSA	KEY MANAGER	SECURE BOOT
ESP32	128/192/256	Não	Não	Não	V1 (legado)
ESP32-S2	128/192/256 + GCM	Não	Não	Não	V2 · RSA-3072
ESP32-S3	128/256	Não	Não	Não	V2 · RSA-3072
ESP32-S31	128/256 + GCM	**P-192/256/384**	**Sim**	**Sim**	V2 · RSA-3072
ESP32-C2	Não	P-192/256	Não	Não	V2 · ECDSA
ESP32-C3	128/256	Não	Não	Não	V2 · RSA-3072
ESP32-C5	128/256	**P-192/256/384**	**Sim**	**Sim**	V2 · RSA/ECDSA
ESP32-C6	128/256	P-192/256	Não	Não	V2 · RSA/ECDSA
ESP32-C61	Não	P-192/256	**Sim**	Não	V2 · ECDSA
ESP32-P4	128/256 + GCM	**P-192/256/384**	**Sim**	**Sim**	V2 · RSA/ECDSA
ESP32-H2	128/256	P-192/256	**Sim**	Não	V2 · RSA/ECDSA
ESP32-H4	128/256	**P-192/256/384**	**Sim**	Não	Pendente

Dados extraídos das definições de hardware (`soc_caps.h`) do ESP-IDF.

Três leituras que essa tabela permite

Nem toda série tem acelerador AES. O C2 e o C61 não têm. Eles conseguem fazer TLS, mas a cifra do tráfego roda na CPU, o que pesa se o dispositivo transmitir muito dado.

ECC é um divisor claro. As séries mais antigas (ESP32, S2, S3 e C3) não têm curvas elípticas em hardware. Como o mundo caminha para ECC (chaves menores, menos memória), essa é uma diferença que tende a pesar mais com o tempo.

Key Manager é raro. Só S31, C5 e P4. Se o seu produto precisa que a chave privada seja inacessível mesmo para quem tem o firmware em mãos, a lista de candidatos é bem curta.

> **EFUSE: MEMÓRIA QUE SÓ GRAVA UMA VEZ**
>
> Os segredos ficam em **eFuses**, bits que podem ser queimados uma única vez e nunca mais voltam. É assim que se grava a chave do Secure Boot e da criptografia de flash, e é por isso que essas operações são irreversíveis: uma vez ativado o Secure Boot, aquela placa só executa firmware assinado por você. Para sempre. Em bancada, é uma ótima forma de inutilizar uma placa por engano. Ative apenas quando souber exatamente o que está fazendo.

6 ESP32, ESP8266, Arduino e STM32

Quatro mundos diferentes, e por que "qual é o melhor" não tem resposta.

Comparar plataformas exige cuidado: "Arduino" é uma marca de placas e um ambiente de programação, e "STM32" é uma família enorme da STMicroelectronics que vai de chips de centavos a processadores de 480 MHz. Para a comparação fazer sentido, usaremos representantes concretos.

	ARDUINO UNO R3	ESP8266	ESP32-S3	STM32F103
Núcleo	AVR 8 bits	Xtensa L106	Xtensa LX7 ×2	Cortex-M3
Clock	16 MHz	80 a 160 MHz	240 MHz	72 MHz
SRAM	2 KB	~50 KB úteis	512 KB	20 KB
Flash	32 KB	Externa, 1 a 4 MB	Externa, 4 a 16 MB	64 a 128 KB
Wi-Fi	Não	**Sim**	**Sim**	Não
Bluetooth	Não	Não	**BLE 5**	Não
Tensão de E/S	5 V	3,3 V	3,3 V	3,3 V (alguns 5 V)
ADC	10 bits, linear	1 canal, 10 bits	12 bits, calibrar	12 bits, bom
GPIO úteis	20	~9	45	37
Dormindo	~35 µA	~20 µA	~7 µA	~2 µA

Valores típicos para ordem de grandeza. Confira sempre o datasheet da peça exata.

Onde cada um ganha

ARDUINO UNO

Ganha em **simplicidade e previsibilidade**. Sem sistema operacional, sem pilha de rede: o que você escreve é exatamente o que executa, na ordem que escreveu. Trabalha em 5 V, o que dispensa conversão de nível com muitos sensores e módulos antigos. É insuperável como primeiro contato e para ensinar eletrônica. Perde feio em memória, porque 2 KB de SRAM acabam rápido, e não tem qualquer conectividade.

ESP8266

Ganha em **preço puro**. Ainda é o jeito mais barato de colocar algo simples no Wi-Fi, e tem uma base gigante de tutoriais. Perde em quase todo o resto: poucos GPIOs utilizáveis, um único canal de ADC, sem Bluetooth, e uma arquitetura que a Espressif já não desenvolve. Para projeto novo, o C3 costuma custar quase o mesmo e é melhor em tudo.

ESP32

Ganha em **conectividade e relação recurso/preço**. Você recebe centenas de kilobytes de RAM, dois núcleos, Wi-Fi, Bluetooth e criptografia por hardware pelo preço de um microcontrolador simples. Para qualquer coisa que precise falar com a rede, é difícil justificar outra escolha. Perde em determinismo de tempo real rígido e na qualidade do conversor analógico.

STM32

Ganha em **controle fino e diversidade**. A família cobre desde encapsulamentos de 8 pinos até chips com centenas, com variantes especializadas em consumo ultrabaixo (série L), desempenho (H7) ou segurança. Os periféricos de temporização são muito superiores para controle de motor e conversão de potência, e o ecossistema é padrão industrial, com ferramentas de certificação e suporte de longo prazo. Perde na curva de aprendizado, já que a HAL da ST é bem mais verbosa, e não tem rádio integrado, salvo nas séries WB e WL.

> **REGRA PRÁTICA PARA DECIDIR**
>
> **Precisa falar com a internet ou com um celular?** ESP32, quase sempre.
> **É controle de tempo real crítico, como motor, inversor ou malha rápida?** STM32.
> **É para ensinar eletrônica ou um protótipo simples em 5 V?** Arduino.
> **É produto comercial com certificação e vida longa?** Avalie STM32 e ESP32 juntos, olhando módulos homologados e compromisso de fornecimento.

> **"PROGRAMAR EM ARDUINO" NÃO É O MESMO QUE "USAR UM ARDUINO"**
>
> O ambiente Arduino é só uma camada de software. Você pode programar um ESP32 ou um STM32 usando a IDE do Arduino, e é exatamente o que faremos no capítulo 9. Placa e linguagem são escolhas independentes.

7 Pontos fortes e limitações reais

O que ninguém conta no vídeo de unboxing.

Onde o ESP32 é muito bom

Conectividade sem dor. Subir um cliente MQTT com TLS, um servidor HTTP ou uma conexão BLE são tarefas de dezenas de linhas, com pilhas maduras.

Recursos por real gasto. Nenhuma outra plataforma entrega tanta memória, clock e rádio nessa faixa de preço.

Segurança de verdade. Boot seguro, criptografia de flash e aceleradores criptográficos estão presentes até nas séries baratas, recursos que em outras famílias aparecem só nas linhas premium.

Flexibilidade de pinos. A matriz de roteamento simplifica muito o traçado da placa: você adapta o firmware ao layout, não o contrário.

Atualização remota. OTA com partição dupla e reversão automática vem pronto no framework.

Documentação aberta. Datasheets, manuais de referência, erratas e o código-fonte do framework são públicos e versionados.

Onde ele decepciona

O CONVERSOR ANALÓGICO É FRACO

É a queixa mais comum e mais justa. O ADC do ESP32 tem não-linearidade perceptível, ruído e variação entre unidades; precisa de calibração para medidas sérias. Pior: em várias séries, o bloco **ADC2** fica indisponível enquanto o Wi-Fi está ligado, porque ambos compartilham recursos internos. Se o seu projeto depende de medida analógica precisa, use um ADC externo por I²C ou SPI.

O RÁDIO CONSOME MUITO

Picos de transmissão passam de 300 mA. Um regulador subdimensionado ou uma bateria com resistência interna alta provoca reinicializações aparentemente aleatórias, que parecem bug de software e não são.

TEMPO REAL É APROXIMADO

O firmware roda sobre FreeRTOS, e o rádio tem tarefas de alta prioridade que precisam ser atendidas. Isso introduz variação de alguns microssegundos a milissegundos no seu laço. Existem soluções, como fixar tarefa em um núcleo, usar o periférico RMT ou delegar a hardware dedicado, mas todas exigem planejamento.

SÓ 3,3 V

Os pinos não toleram 5 V. Sensor ou display antigo em 5 V exige conversor de nível; ligar direto degrada ou destrói a entrada.

DOCUMENTAÇÃO VIVA DEMAIS

A família cresce rápido, e com ela erratas, diferenças entre revisões de silício e funcionalidades que mudam de comportamento entre versões do IDF. Ler a errata do seu chip antes de fechar o projeto é hábito recomendado.

CONSUMO EM REPOUSO NÃO É MÁGICO

Os 7 µA de *deep sleep* que aparecem no datasheet valem para o chip nu, em condições ideais. Numa placa de desenvolvimento, o regulador, o LED de energia e o conversor USB-serial costumam consumir muito mais que o próprio ESP32. Medir consumo em DevKit leva a conclusões erradas.

> **ERRO CLÁSSICO DE BANCADA**
>
> Alimentar a placa pela USB do notebook e ligar nela um motor, uma fita de LED ou um display grande. Na hora em que o Wi-Fi transmite, a corrente ultrapassa o que a porta fornece, a tensão cai e o chip reinicia. O sintoma parece software travando; a causa é alimentação. Use fonte externa adequada para as cargas.

8 Como escolher a série do seu projeto

Um método em cinco perguntas, na ordem que elimina mais opções primeiro.

A escolha fica muito mais simples quando feita na ordem certa. Comece pelo que é impossível contornar depois, que é o rádio, e só no fim olhe para o que é ajustável.

PERGUNTA 1: COMO ELE SE COMUNICA?

Esta pergunta sozinha elimina a maior parte da família, porque rádio não se acrescenta depois.

NECESSIDADE	SÉRIES QUE ATENDEM
Wi-Fi + Bluetooth LE	ESP32, S3, C3, C6, C5, C61, S31
Bluetooth Clássico (áudio, SPP)	ESP32, S31
Zigbee / Thread / Matter em malha	C6, C5, H2, H4, S31
Wi-Fi 5 GHz	C5
Ethernet cabeada	ESP32, P4
Sem rádio, só processamento	P4

PERGUNTA 2: DE ONDE VEM A ENERGIA?

Se o projeto vive de bateria ou painel solar, o consumo em repouso passa a mandar em tudo. Séries com processador de baixo consumo (C5, C6, P4, S31) mantêm uma tarefa simples rodando com o resto do chip dormindo. E se você não precisa de Wi-Fi, o H2 e o H4 economizam justamente por não carregarem o rádio mais faminto.

PERGUNTA 3: O QUE VAI LIGADO NELE?

Conte os pinos de que precisa e verifique as interfaces especiais. Display gráfico grande ou câmera pedem S3 ou P4 (que tem MIPI). Muitos atuadores pedem uma série com bastante GPIO, lembrando de descontar os pinos com restrição. USB nativo, para o dispositivo se apresentar como teclado ou pen-drive, existe do S2 em diante e nas séries C recentes.

PERGUNTA 4: QUE EXIGÊNCIA DE SEGURANÇA EXISTE?

Para um protótipo, qualquer série serve. Para produto, o requisito define o chip: atestado de dispositivo Matter pede ECDSA em hardware; chave privada que o firmware nunca pode ler pede Key Manager. Consulte a tabela do capítulo 5.

PERGUNTA 5: QUANDO PRECISA ESTAR PRONTO?

Esta é a pergunta esquecida. Uma série recém-anunciada pode não ter suporte estável no ESP-IDF, não ter core Arduino, não ter módulo à venda e não ter placa de desenvolvimento acessível. Para trabalho com prazo, prefira séries com pelo menos um ano de estrada.

Atalhos por perfil de projeto

SE O SEU PROJETO É...	COMECE POR	POR QUÊ
Primeiro projeto, aprendendo	**ESP32-S3**	Muita RAM, USB nativo para depurar e o maior ecossistema de exemplos
Sensor Wi-Fi simples e barato	**ESP32-C3**	Faz o essencial pelo menor preço, com boa maturidade
Automação residencial / Matter	**ESP32-C6**	Único caminho maduro com Wi-Fi 6 e 802.15.4 juntos
Sensor a pilha, sem Wi-Fi	**ESP32-H2**	Sem o rádio mais custoso, a autonomia muda de patamar
Tela, câmera ou interface gráfica	**ESP32-P4 ou S3**	MIPI e RAM suficiente para buffer de vídeo
Áudio por Bluetooth Clássico	**ESP32**	Praticamente a única série com BR/EDR
Visão computacional na borda	**ESP32-S3**	Instruções vetoriais e PSRAM para o buffer da câmera
Produto em altíssimo volume	**ESP32-C2**	O menor custo da família, se os requisitos couberem nele

ESP-IDF ou Arduino?

Escolhida a série, falta escolher a ferramenta. As duas são oficiais e mantidas pela Espressif; a diferença é o nível de controle.

	CORE ARDUINO	ESP-IDF
Curva de entrada	Baixa, familiar	Íngreme: menuconfig, CMake, componentes
Controle do hardware	Parcial	Total
Acesso a recursos novos	Chega depois	Imediato
Bibliotecas de sensores	Enorme	Menor, mais técnica
Consumo de memória	Maior	Ajustável
Indicado para	Aprender, prototipar	Produto, otimização, recursos avançados

NÃO É ESCOLHA DEFINITIVA

Dá para usar o core Arduino *como componente* dentro de um projeto ESP-IDF, misturando os dois. Um caminho comum é começar no Arduino para validar a ideia e migrar para o IDF quando aparecer a necessidade de afinar consumo, segurança ou tempo de boot.

FERRAMENTA DE APOIO

O **ESPDocs** tem um seletor que faz exatamente estas perguntas e devolve uma recomendação justificada, além de comparar até quatro séries lado a lado, com pinagem interativa e ficha de segurança. Em espdocs.cienciaembarcada.com.br.

9 Prática: lendo um DHT11 com o ESP32-S3

Do jumper ao terminal mostrando temperatura e umidade.

Vamos montar o "olá mundo" dos sensores: ler temperatura e umidade do ambiente e imprimir no monitor serial. O DHT11 é barato, comum e usa um protocolo digital próprio de um único fio, o que já ensina algo além de acender um LED.

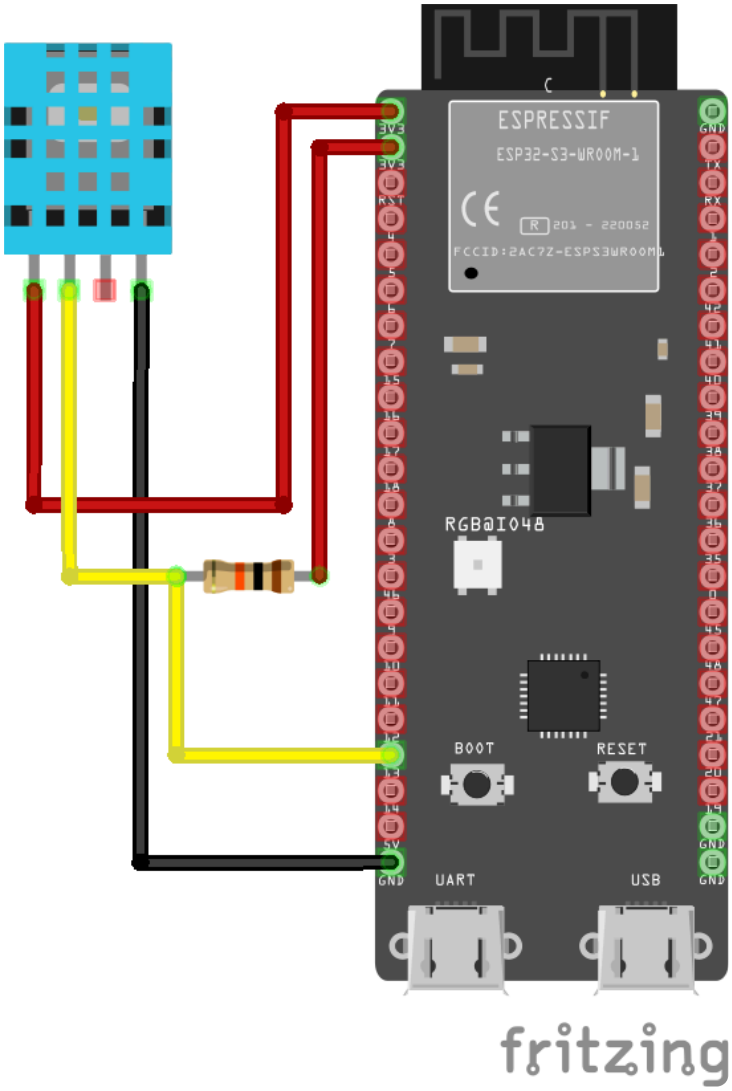
Lista de material

ITEM	QTD.	OBSERVAÇÃO
ESP32-S3-DevKitC-1	1	Qualquer variante de flash/PSRAM serve
Sensor DHT11	1	O componente azul de 4 pinos
Resistor de 10 kΩ	1	Pull-up do dado (marrom, preto, laranja)
Protoboard	1	Meia protoboard basta
Jumpers	4	Vermelho, preto e amarelo, por convenção
Cabo USB	1	**De dados**. Cabo só de carga não funciona

Montagem

LIGAÇÃO	COR NA FIGURA	FUNÇÃO
VCC do DHT11 → 3V3	Vermelho	Alimentação do sensor
DATA do DHT11 → GPIO12	Amarelo	Linha de dados bidirecional
GND do DHT11 → GND	Preto	Referência de terra
10 kΩ entre DATA e 3V3	Resistor	Mantém a linha em nível alto em repouso

O terceiro pino do DHT11 (contando da esquerda) não é usado.



Ligação completa. O fio amarelo leva o dado ao **GPIO12**; o resistor de 10 kΩ conecta essa mesma linha ao 3V3, funcionando como *pull-up*. Repare que a placa tem **duas portas USB** na borda inferior, marcadas UART e USB. A diferença entre elas importa e está explicada no passo 4.

Arquivo editável do Fritzing: baixar pratica.fzz

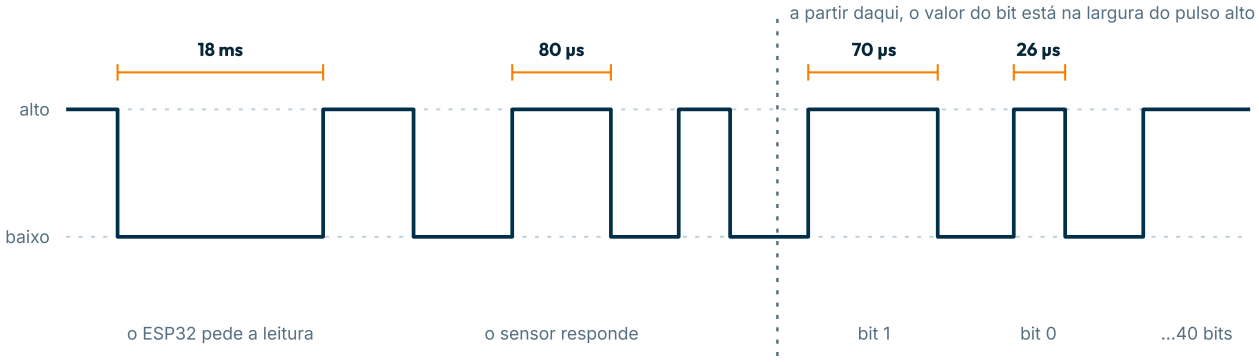
POR QUE O RESISTOR DE PULL-UP É NECESSÁRIO

A linha de dados do DHT11 é **bidirecional**: ora o ESP32 fala, ora o sensor responde. Para isso funcionar sem que os dois disputem a linha, ambos apenas "puxam para baixo" quando querem enviar um zero, e soltam a linha quando querem enviar um um. Só que uma linha solta não tem nível definido: ela flutua e capta ruído.

O resistor de 10 kΩ resolve isso mantendo a linha em nível alto em repouso, com força suficiente para definir o nível, mas fraca o bastante para que qualquer um dos dois consiga puxá-la para baixo. Módulos DHT11 já montados em plaquinha trazem esse resistor embutido; o componente azul sozinho, não.

Como o sensor conversa

Vale entender o que a biblioteca faz por você. A cada leitura acontece esta troca, toda por um único fio:



O mesmo fio serve para os dois lados conversarem, em momentos diferentes. Um zero e um um se distinguem só pela **duração** do nível alto, e é por isso que a leitura falha quando o pull-up está ausente: sem ele a linha não sobe rápido o bastante e os tempos saem errados.

1. O ESP32 puxa a linha para baixo por cerca de 18 ms, que é o "acorda" do sensor.
2. Solta a linha; o pull-up a leva para alto.
3. O DHT11 responde puxando para baixo por 80 µs e soltando por mais 80 µs.
4. Em seguida envia **40 bits**: umidade (2 bytes), temperatura (2 bytes) e um byte de verificação.
5. Cada bit é codificado pela *duração* do nível alto: cerca de 26 µs é zero, cerca de 70 µs é um.

A biblioteca mede esses tempos e confere o byte de verificação. Se a soma não bater, seja por ruído, fio solto ou falta de pull-up, ela devolve `NaN`, e é isso que o nosso código testa.

Passo a passo

1 Instale o suporte ao ESP32 na IDE

Na Arduino IDE, abra *Arquivo → Preferências* e adicione em "URLs adicionais para gerenciadores de placas":

```
https://espressif.github.io/arduino-esp32/package_esp32_index.json
```

Depois vá em *Ferramentas → Placa → Gerenciador de placas*, procure por **esp32** e instale o pacote da Espressif Systems. São alguns minutos de download.

2 Instale a biblioteca do sensor

Em *Ferramentas → Gerenciar bibliotecas*, procure por **DHT sensor library**, da Adafruit, e instale. A IDE vai perguntar se quer instalar as dependências. Aceite, porque ela precisa da **Adafruit Unified Sensor** junto.

3 Escreva o programa

```
#include <DHT.h>

#define PINO_DHT  12       // fio amarelo
#define TIPO_DHT  DHT11

DHT dht(PINO_DHT, TIPO_DHT);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(1000);              // tempo para a USB enumerar
  dht.begin();
  Serial.println("Leitor DHT11 - ESP32-S3");
}

void loop() {
  float umidade     = dht.readHumidity();
  float temperatura = dht.readTemperature();

  if (isnan(umidade) || isnan(temperatura)) {
    Serial.println("Falha na leitura do sensor");
  } else {
    Serial.printf("Temperatura: %.1f C | Umidade: %.1f %%\n",
                  temperatura, umidade);
  }

  delay(2000);              // DHT11 nao aceita leitura mais rapida
}
```

O `delay(2000)` não é enfeite: o DHT11 leva cerca de um segundo para fazer uma medição e responde com erro se for consultado antes disso.

4 Configure a placa: o passo onde todo mundo tropeça

Em *Ferramentas*, selecione a placa **ESP32S3 Dev Module**. Agora, o detalhe importante: o DevKitC tem **duas portas USB**.

A porta marcada **UART** passa por um conversor USB-serial e funciona como em qualquer Arduino. A porta marcada **USB** é o USB nativo do próprio ESP32-S3.

Se você ligar o cabo na porta **USB**, precisa habilitar *USB CDC On Boot → Enabled*, senão o monitor serial fica mudo mesmo com o programa rodando. Ligando na porta **UART**, deixe essa opção como *Disabled*.

5 Grave e observe

Selecione a porta em *Ferramentas → Porta*, clique em carregar e abra o monitor serial em **115200 baud**. Depois de alguns segundos:

```
Leitor DHT11 - ESP32-S3
Temperatura: 26.0 C | Umidade: 61.0 %
Temperatura: 26.0 C | Umidade: 61.0 %
Temperatura: 26.1 C | Umidade: 62.0 %
```

Segure o sensor entre os dedos e sopre nele: a umidade sobe rápido e a temperatura acompanha devagar. Essa diferença de velocidade é real: o elemento de umidade responde muito mais rápido que o termistor.

Quando não funciona

SINTOMA	CAUSA PROVÁVEL E SOLUÇÃO
Monitor serial vazio	Cabo na porta USB nativa sem *USB CDC On Boot* habilitado. Veja o passo 4. Confira também a velocidade em 115200.
"Falha na leitura" sempre	Fio de dados no pino errado, VCC não conectado, ou resistor de pull-up ausente ou mal encaixado na protoboard.
Leitura falha às vezes	Jumper com mau contato, fio de dados muito longo, ou `delay` menor que 2 segundos.
A porta não aparece	Cabo só de carga (troque por um de dados) ou driver do conversor USB-serial faltando.
Erro ao gravar, timeout	Placa não entrou em modo de gravação: segure BOOT, pressione e solte RESET, solte BOOT e tente de novo.
Temperatura sempre inteira	Não é defeito. O DHT11 tem resolução de 1 °C. O DHT22 dá 0,1 °C.
Valores absurdos e constantes	Sensor invertido na alimentação. Confira VCC e GND antes de energizar de novo.

POR QUE O GPIO12?

No ESP32-S3, o GPIO12 é um pino comum: não participa do boot, não conversa com a flash e não é usado para depuração. Ele até tem funções alternativas de touch e ADC2, mas nenhuma delas atrapalha o uso como entrada e saída digital.

Em outras séries, cuidado: no ESP32 original o GPIO12 é **pino de strapping**: ele seleciona a tensão da flash, e um nível alto durante o reset impede a placa de iniciar. Mesmo número de pino, comportamento completamente diferente.

Se você montasse este mesmo circuito num ESP32 clássico sem trocar o pino, o resistor de pull-up de 10 kΩ que o DHT11 exige seguraria o GPIO12 em nível alto exatamente durante o reset. A placa simplesmente não iniciaria, e o sintoma não apontaria para o sensor em momento algum. É o grupo 2 do capítulo 2 acontecendo na prática.

Desafios

Se sobrar tempo na formação, ou para praticar depois:

1. Acenda o LED RGB da placa em vermelho quando a temperatura passar de 28 °C e em azul abaixo disso.
2. Calcule e imprima a média das últimas dez leituras, para suavizar o ruído.
3. Troque o `delay` por controle de tempo com `millis()`, de modo que o programa continue respondendo enquanto espera.
4. Detecte e conte quantas vezes a umidade subiu mais de 5 % entre leituras consecutivas.
5. Publique a leitura numa página web servida pelo próprio ESP32, acessível por qualquer aparelho na mesma rede.

10 Glossário e próximos passos

Os termos que aparecem o tempo todo, e para onde seguir.

Glossário

TERMO	SIGNIFICADO
SoC	*System on Chip*: um único chip reunindo processador, memória, rádio e periféricos.
GPIO	Pino de entrada e saída de uso geral.
Strapping	Pino lido no reset para definir o modo de boot.
Pull-up / pull-down	Resistor que define o nível de uma linha em repouso.
ULP / LP core	Coprocessador de baixíssimo consumo que roda com o chip principal dormindo.
PSRAM	Memória RAM externa opcional, para buffers grandes.
eFuse	Memória que só pode ser gravada uma vez, usada para chaves e configurações permanentes.
Deep sleep	Modo em que quase tudo desliga, mantendo só o mínimo para acordar depois.
OTA	*Over-The-Air*: atualização de firmware pela rede.
FreeRTOS	Sistema operacional de tempo real que gerencia as tarefas do ESP32.
Watchdog	Temporizador que reinicia o chip se uma tarefa travar.
TWAI	Nome que a Espressif dá ao controlador compatível com CAN.
Matter	Padrão de interoperabilidade para casa conectada, sobre Wi-Fi ou Thread.
Thread / Zigbee	Protocolos de rede em malha de baixo consumo sobre IEEE 802.15.4.
Secure Boot	Mecanismo que impede o chip de executar firmware não assinado.
Errata	Documento com os defeitos conhecidos de uma revisão do silício.

Onde consultar

FONTE	PARA QUÊ
ESPDocs	Especificações, pinagem, segurança e comparação das séries em português. Em `espdocs.cienciaembarcada.com.br`
Datasheet da série	Verdade final sobre limites elétricos, pinagem e encapsulamento
Technical Reference Manual	Detalhe de registradores e comportamento de cada periférico
ESP-IDF Programming Guide	API oficial, exemplos e guias de Wi-Fi, BLE, OTA e segurança
Errata do chip	Defeitos conhecidos daquela revisão. Leia antes de fechar projeto
Fórum esp32.com	Dúvidas específicas, com participação de engenheiros da Espressif
GitHub da Espressif	Código-fonte, exemplos e issues abertas

Por onde continuar

Com o sensor funcionando, o caminho natural é tirar o dado da bancada. Na ordem que costuma render mais aprendizado por hora investida:

1. **Conectar ao Wi-Fi** e servir uma página com a leitura. É o exercício que mais amarra os conceitos: rede, memória e o laço principal disputando espaço.
2. **Publicar em um broker MQTT**, que é o protocolo padrão de IoT e o que permite o dado chegar a um painel ou a outro dispositivo.
3. **Economizar energia com deep sleep**, medindo de verdade quanto tempo uma bateria aguenta.
4. **Atualizar o firmware pelo ar** com OTA, fechando o ciclo de um produto que não precisa mais de cabo depois de instalado.
5. **Migrar um projeto para o ESP-IDF**, para enxergar o que o core Arduino estava escondendo.

> **UM CONSELHO PARA LEVAR**
>
> Quando algo não funcionar, resista à vontade de trocar linhas de código no chute. Pergunte antes: o hardware está certo? A alimentação aguenta? Esse pino tem restrição? A biblioteca é a certa para esta série? A maior parte dos problemas em sistemas embarcados não está no algoritmo, e sim na fronteira entre o software e o mundo físico.

Créditos

Quem fez, para quem, e o que você pode fazer com este material.

Sobre este material

Esta apostila é **material de apoio a uma formação presencial** da LASER. Ela foi escrita para ser lida junto com o encontro, não no lugar dele: os capítulos seguem a ordem da aula, e o capítulo 9 é a prática que acontece na bancada, com o hardware em mãos e monitoria no local.

Ela também funciona sozinha, como referência para consultar depois. As tabelas comparativas, a lista de pinos com restrição e o guia de solução de problemas foram escritos pensando em quem volta ao texto meses depois, no meio de um projeto.

Realização

PAPEL	QUEM
Realização	**LASER**, Liga Acadêmica de Sistemas Embarcados Centro de Informática · Universidade Federal de Pernambuco laser.cin.ufpe.br
Conteúdo e redação	**Lucas Rayan Guerra** Ciência Embarcada · cienciaembarcada.com.br linkedin.com/in/lucasrguerra contato@lucasrguerra.dev.br
Dados técnicos	ESPDocs, plataforma de documentação do ESP32 em português espdocs.cienciaembarcada.com.br
Prática e esquemático	Montagem em Fritzing, arquivo editável disponível para download no capítulo 9

Fontes e verificação

Nenhum número desta apostila foi estimado. Cada dado tem origem rastreável:

INFORMAÇÃO	ORIGEM
Arquitetura, memória, periféricos	Datasheets oficiais da Espressif Systems
Blocos de segurança por série	Definições de hardware do ESP-IDF (`soc_caps.h`)
Versão mínima do ESP-IDF	Índice de versões publicado pela Espressif
Suporte no core Arduino	Repositório oficial `arduino-esp32`
Encapsulamento	Datasheets oficiais, capítulo de *packaging*
Pinos com restrição	Datasheets, cruzados com a base de pinagem do ESPDocs
Diagrama de blocos do ESP32-S3	Imagem da Espressif Systems, reproduzida para fins didáticos

Onde a Espressif ainda não publicou documentação, como no ESP32-H4, isso está dito no texto em vez de preenchido por estimativa.

Uso e distribuição

Este material pode ser **usado, copiado e adaptado livremente para fins educacionais**, desde que citada a origem. Se for adaptá-lo para outra formação, mantenha os créditos desta página e ajuste as partes que dependem do contexto da LASER.

INDEPENDÊNCIA

Este é um material independente, produzido pela LASER, **sem vínculo, patrocínio ou revisão da Espressif Systems**. Os nomes ESP32, ESP-IDF e demais marcas citadas pertencem aos seus respectivos titulares.

Para decisão de engenharia ou projeto industrial, a referência final é sempre o datasheet e a errata do fabricante, na revisão de silício que você tem em mãos.

DÚVIDAS, CORREÇÕES E CONTATO

Correções e sugestões são bem-vindas e ajudam as próximas turmas. Fale direto com o autor por contato@lucasrguerra.dev.br ou pelo LinkedIn, em linkedin.com/in/lucasrguerra.

LASER · Liga Acadêmica de Sistemas Embarcados · Centro de Informática · UFPE
Formação em ESP32 · Módulo 1: Conhecendo a Família