

Sistema de Control Autónomo Distribuido con ESP8266

Aplicación de Lenguajes de Alto Nivel en Sistemas Embebidos

Pablo Navarro

Lenguajes de Alto Nivel para Aplicaciones Industriales

Diciembre 2025

Contenido

1 Introducción

2 Arquitectura del Sistema

3 Implementación

4 Resultados

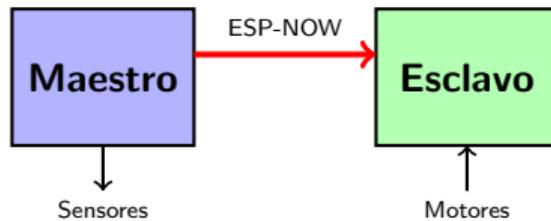
Contexto del Proyecto

Objetivo:

- Sistema de control distribuido
- Vehículos robot autónomos
- Comunicación inalámbrica
- Tiempo real (<30ms)

Lenguaje:

- C++ con framework Arduino
- Programación orientada a objetos
- Abstracciones de alto nivel



¿Por qué Lenguajes de Alto Nivel?

Ventajas Tradicionales

- Mayor productividad del desarrollador
- Código más mantenible y legible
- Menos errores de programación
- Portabilidad entre plataformas

Motivación

Los sistemas embebidos tradicionalmente requieren **C/ensamblador** por restricciones de recursos y tiempo.

Hipótesis

C++ con Arduino puede lograr latencias <30ms en control de vehículos autónomos

Plataforma Hardware

ESP8266 LOLIN D1:

- CPU: 32-bit @ 80/160 MHz
- RAM: 80 KB usuario
- Flash: 4 MB
- WiFi: 802.11 b/g/n
- GPIO: 17 pines

Sensores/Actuadores:

- HC-SR04: Sensor ultrasónico
- LM393: Sensor de luz
- L9110S: Driver de motores
- LEDs de iluminación

Conexiones

| Pin | Función |
|--------|-----------|
| D1, D2 | Motor Izq |
| D3, D4 | Motor Der |
| D5 | TRIG |
| D6 | ECHO |
| D7 | LM393 |
| D8 | LEDs |

Arquitectura Distribuida



Flujo de Control

Medición → Decisión → Transmisión → Validación → Actuación

Diseño Orientado a Objetos

```
class Coche {  
private:  
    int motorIzqA, motorIzqB;  
    int motorDerA, motorDerB;  
    int trigPin, echoPin;  
    int lightPin, lucesPin;  
    float distMin, distMax;  
    int luzActual;  
  
public:  
    void configurar(...);  
    void inicializarESPNOW();  
    void moverMotores(int vel);  
    void controlarDistancia();  
    void controlarLuces();  
    float leerDistancia();  
    int leerLuzAmbiente();  
    void enviarComando(...);  
    void ejecutarComando(...);  
};
```

Ventajas OOP:

- **Encapsulación:** Estado protegido
- **Reutilización:** Misma clase para ambos
- **Abstracción:** Interfaz simple
- **Mantenibilidad:** Cambios localizados

Código Compartido

Maestro y esclavo usan la misma clase Coche, solo difieren en que partes de la clase se utilizan

Algoritmo de Control y Seguridad

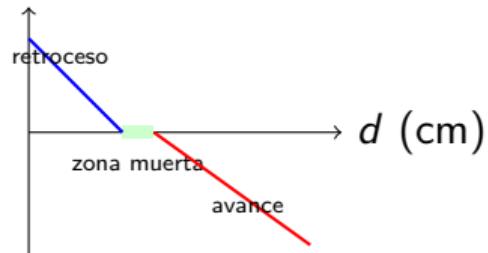
```
1 void Coche::controlarDistancia() {
2     float d = leerDistancia();
3
4     // Zona muerta: 15-20 cm
5     if (d > distMin && d < distMax) {
6         detenerMotores();
7         return;
8     }
9
10    int vel = 0;
11
12    // Retroceso: d < 15 cm
13    if (d <= distMin) {
14        vel = 80 + (distMin - d) * 10;
15        vel = constrain(vel, 80, 180);
16    }
17    // Avance: d > 20 cm
18    else {
19        vel = -(100 + (d - distMax) * 7.75);
20        vel = constrain(vel, -255, -100);
21    }
22
23    moverMotores(vel);
24 }
```

Control Proporcional:

$$v_{ret} = 80 + (15 - d) \times 10$$

$$v_{av} = -(100 + (d - 20) \times 7,75)$$

v (PWM)



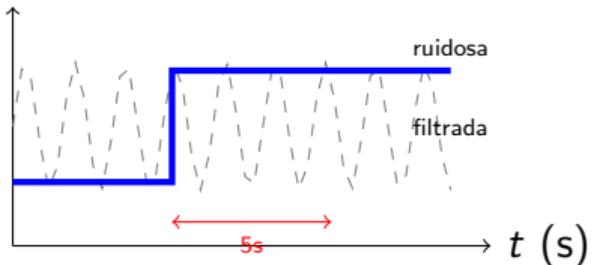
* Esclavo verifica obstáculos <5cm antes de ejecutar cualquier comando

Control de Luces con Histéresis

```
1 void Coche::controlarLucesAutomaticas(
2     int luz) {
3     if (lucesPin == -1) return;
4
5     unsigned long ahora = millis();
6
7     // Hist resis: 5 segundos minimo
8     if (ahora - ultimoCambioLuces < 5000) {
9         return; // Mantener estado
10    }
11
12    // Permitir cambio
13    if (luz != luzActual) {
14        luzActual = luz;
15        ultimoCambioLuces = ahora;
16
17        // Logica invertida
18        digitalWrite(lucesPin,
19                     luz == 1 ? HIGH : LOW);
20    }
21 }
```

Anti-Parpadeo:

Luz



Histéresis Temporal

Cambios de luz requieren 5 segundos de estabilidad

Métricas de Rendimiento

| Métrica | Valor |
|-------------------|------------|
| Latencia promedio | 28.5 ms |
| Latencia mínima | 22 ms |
| Latencia máxima | 35 ms |
| Desv. estándar | 3.2 ms |
| Mensajes perdidos | 0.4 % |
| Error seguimiento | ± 2 cm |
| Parada emergencia | <5 ms |

Desglose de Latencia:

22-35 ms total



Validación

Sistema cumple requisito de latencia <30ms en promedio

Análisis de Memoria

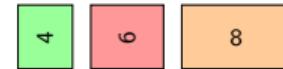
Uso de Flash:

Clase ESP-NOW Web



Uso de RAM:

Coche ESP Web



Framework Arduino

→ 310 KB Flash →

20 KB

Framework

→ 42 KB RAM →

Overhead Aceptable

Framework consume 30 % Flash y 25 % RAM, pero quedan 58 % de recursos disponibles

Lenguajes de Alto Nivel en Embebidos: Aplicaciones

Aplicaciones Industriales:

- IoT y monitorización distribuida
- Robótica colaborativa (AGVs, cobots)
- Automatización flexible y adaptativa
- Prototipado rápido de sistemas

Ventajas Clave:

- + Desarrollo 2x más rápido
- + 60 % menos bugs
- + Mantenibilidad con OOP
- +30 % recursos vs C

Viabilidad Demostrada:

Este Proyecto

Latencias 22-35ms: viable para soft real-time en IoT

Recomendado:

- Latencias <100ms
- Recursos >256KB
- Industria 4.0 y IoT

No recomendado:

- Hard real-time (<1ms)
- Safety-critical

Conclusiones Finales

- 1 **Viabilidad Demostrada:** C++ con Arduino es viable para control en tiempo real no crítico (latencias 22-35ms)
- 2 **Balance Favorable:** Overhead de 30 % en recursos compensado por productividad 2x mayor
- 3 **OOP Efectiva:** Arquitectura orientada a objetos facilita mantenimiento y escalabilidad
- 4 **Apropiado para Industria 4.0:** Ideal para sistemas IoT, monitorización y robótica colaborativa
- 5 **Limitaciones Claras:** No reemplaza C/ensamblador en aplicaciones safety-critical o hard real-time

Gracias por su atención

Sistema de Control Autónomo ESP8266

Aplicación de Lenguajes de Alto Nivel en Sistemas Embebidos

Pablo Navarro

Diciembre 2025

github.com/pnavarro3/CocheSE