

Dispositivo embebido flexible e interoperable para la automatización y supervisión de procesos

Sector tecnológico

La presente solicitud de modelo de utilidad se relaciona con el campo de los sistemas de control industrial y automatización, comunicaciones de red para sistemas distribuidos) y servicios para redes de comunicación inalámbrica. Particularmente se relaciona con controladores lógicos programables (PLCs) modulares y flexibles, pasarelas de Internet Industrial de las Cosas (IIoT), plataformas de Edge Computing para automatización y sistemas ciber-físicos para la Industria 4.0 y 5.0.

Tecnología anterior

Los sistemas de control industrial existentes –principalmente basados en Controladores Lógicos Programables (PLCs) tradicionales— presentan arquitecturas cerradas y rígidas que dependen de cableado extenso y protocolos propietarios. Estos sistemas carecen de flexibilidad para adaptarse a las necesidades cambiantes de los procesos productivos modernos y no soportan de manera nativa las tecnologías emergentes de Industria 4.0 como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), la Inteligencia Artificial en el Borde (Edge AI) o la interoperabilidad multitecnología.

El documento EP2210153B1, describe un sistema de control industrial con procesador multinúcleo ejecutando sistemas operativos diferentes en cada núcleo. El primer procesador ejecuta un sistema operativo propietario de control industrial para lógica de control en tiempo real, mientras el segundo ejecuta un sistema operativo de propósito general. Sin embargo, este documento no contempla la integración de múltiples protocolos de comunicación inalámbrica ni capacidades de inteligencia artificial en el borde. El documento CN110119369B presenta un

sistema PLC modular con arquitectura de portador de módulo y módulos de entrada/salida enchufables mediante tecnología de bus con configuración de conexión en cadena. Cada portador incorpora una unidad de control con intercambio en caliente («hot-swap») que automáticamente puentea la cadena cuando un módulo es extraído. No obstante, este sistema carece de conectividad inalámbrica integrada y no soporta inteligencia artificial en borde («*Edge AI*»). El documento US10379842B2 describe una plataforma de computación en el borde («edge computing») para IoT Industrial con motor de Procesamiento de Eventos Complejos y soporte para protocolos industriales como MQTT, OPC-UA y Modbus. Sin embargo, la arquitectura propuesta se enfoca en software y no define una arquitectura de hardware modular con múltiples protocolos inalámbricos. El documento US11388023B2 presenta una puerta de enlace («*Gateway*») LPWAN con transceptor inalámbrico que opera en múltiples protocolos incluyendo LoRaWAN y SigFox. Sin embargo, este dispositivo está diseñado como puerta de enlace de comunicaciones y no como controlador industrial con capacidades de control de procesos. US7656846B2 describe un sistema de comunicación inalámbrica integrado en la CPU del PLC con soporte para Bluetooth, IEEE 802.11 y redes celulares. Este documento establece la arquitectura básica de integración inalámbrica directa en CPU de PLC, pero no cubre los protocolos modernos como Wi-Fi 6, Bluetooth 5.3, LoRaWAN, NB-IoT ni Li-Fi. US8892699B2 presenta un sistema para actualización automática de firmware en dispositivos electrónicos inteligentes conectados en red, incluyendo PLCs. El sistema incorpora un servidor remoto con archivos de firmware y metadatos de actualización. No obstante, no contempla la combinación con programación IEC 61131-3 ni validación mediante autenticación criptográfica. US8885311B2 describe un circuito con intercambio en caliente («*hot-swap*») con rango de entrada de 18 V a 60 V. la presente invención extiende este rango hasta 9 V, habilitando operación con baterías y paneles solares de bajo voltaje que no están contemplados en el arte previo.

En la literatura científica, el artículo «*The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems*» (Langmann y Stiller, Applied Sciences, 2019) presenta el concepto de *Smart Industrial Control Services* con ejecución de programas IEC 61131-3 en entornos en la nube, alcanzando tiempos de respuesta de 80-100 ms. El sistema objeto de la presente solicitud prioriza procesamiento en el borde local

(«*edge local*») con tiempos de respuesta inferiores a 10 ms para aplicaciones de tiempo real crítico.

Las soluciones comerciales propietarias existentes de fabricantes como *Siemens (MindConnect)*, *Rockwell Automation (Stratix)* y *Bosch (IoT Gateway)* buscan crear ecosistemas cerrados, obligando al usuario a depender de un único proveedor y sus respectivas licencias. Por otro lado, las plataformas de desarrollo genéricas como Arduino y Raspberry Pi carecen de la industrialización necesaria para entornos productivos reales: no cuentan con componentes de grado industrial, conectores robustos y blindados, rangos de temperatura extendidos de menos cuarenta grados centígrados a más ochenta y cinco grados centígrados, ni inmunidad electromagnética requerida en ambientes industriales hostiles.

Del análisis del estado de la técnica se concluye que existe una necesidad no satisfecha de un sistema embebido que integre de manera cohesiva: una arquitectura de hardware heterogénea con procesadores dedicados a tiempo real y aplicaciones, múltiples protocolos de comunicación inalámbrica de última generación, capacidades de inteligencia artificial en el borde, módulos de entrada/salida intercambiables en caliente, programación según estándar IEC 61131-3 con actualizaciones remotas y gestión de energía de amplio rango. La combinación única de estas características no está anticipada en ningún documento del arte previo identificado.

Descripción detallada de la invención

La presente invención busca resolver los siguientes problemas técnicos asociados con los sistemas de control industrial existentes:

- arquitecturas rígidas y cerradas que impiden la adaptación a nuevos requerimientos;
- dependencia de cableado extenso que incrementa costos de instalación y mantenimiento;
- falta de soporte nativo para múltiples protocolos de comunicación inalámbrica en una misma plataforma;
- ausencia de capacidades de inteligencia artificial integrada para procesamiento analítico en el borde;

- dificultad para realizar actualizaciones remotas de firmware y programas de control;
- rango de alimentación limitado que impide operación con fuentes alternativas de energía; y
- alta dependencia de proveedores específicos con ecosistemas cerrados.

La solución técnica propuesta consiste en un Dispositivo Embebido Flexible e Interoperable para la Automatización y Supervisión de Procesos que comprende:

- una Unidad Central de Computación (1) de arquitectura heterogénea,
- al menos un módulo de comunicación inalámbrica (2),
- al menos un módulo de entrada/salida (3),
- un sistema de gestión de energía (4), y
- una capa de software y firmware (5).

Estos componentes se interconectan a través de una interfaz de expansión de alta densidad (6) que expone buses de comunicación, señales de control y temporización, y distribución de alimentación.

La Unidad Central de Computación (1) emplea un Sistema en Chip (SoC) de arquitectura heterogénea y multi-núcleo que integra un clúster de núcleos ARM Cortex-M (1a) dedicados a la ejecución de tareas de control en tiempo real crítico con latencias garantizadas en el rango de los microsegundos y un núcleo ARM Cortex-A (1b) que funciona como subsistema de aplicaciones gestionando la pila de comunicaciones, el servidor web, los protocolos industriales y los motores de análisis de datos e inteligencia artificial. Esta segregación arquitectónica garantiza que una sobrecarga en las comunicaciones no comprometa la estabilidad del lazo de control.

El subsistema de memoria (1c) implementa una estrategia jerárquica, redundante y con protección integrada que incluye:

- Memoria Flash NOR con capacidad de ocho a treinta y dos megabytes para alojar el bootloader de arranque seguro y la imagen primaria del firmware con capacidad de ejecución directa;
- Memoria Flash NAND con capacidad de doscientos cincuenta y seis megabytes a dos gigabytes para almacenamiento masivo de datos

históricos, logs de sistema, imágenes de actualización OTA y modelos pre-compilados de machine learning;

- Memoria SRAM On-Chip de uno a cuatro megabytes dedicada a la memoria de trabajo del sistema operativo en tiempo real y las pilas de ejecución de tareas críticas; y Memoria PSRAM Externa de ocho a treinta y dos megabytes para las pilas de protocolos de comunicación y el marco de trabajo («*framework*») del servidor web.

Los módulos de comunicación inalámbrica (2) son entidades autónomas con firmware especializado, abstractas para el usuario mediante un controlador de dispositivo unificado dentro de la Capa de Abstracción de Hardware. Estos módulos incluyen: un módulo Wi-Fi Dual-Band (2a) de dos punto cuatro y cinco gigahertz conforme al estándar IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) con soporte para modo cliente, punto de acceso y Wi-Fi Mesh, implementando seguridad WPA3-Enterprise con autenticación 802.1X; un módulo LoRaWAN (2b) de Clase A, B y C basado en un transceptor («*transceiver*») de largo alcance con una pila («*stack*») certificada que soporta activación OTAA y ABP; un módulo celular NB-IoT/LTE-M (2c) categorías Cat-M1 y NB2 con soporte para fallback a redes 2G/E-GPRS, incorporando eSIM multi-operador y ranura para tarjeta SIM física; un módulo Bluetooth 5.3 (2d) con Mesh y dirección de alto alcance optimizado para redes de sensores de ultra baja potencia; y opcionalmente un módulo de comunicación óptica Li-Fi (2e) que utiliza fotodiodo de alta velocidad y array de LEDs para transmisión full-duplex de datos a velocidades superiores a cien megabits por segundo.

Los módulos de entrada/salida (3) están diseñados y certificados para cumplir con las normas de inmunidad y emisión electromagnética IEC 61000-6-2/4 y los estándares de señales de la IEC 61131, comprendiendo: módulo de entradas digitales aisladas (3a) de dieciséis a treinta y dos canales que acepta señales de doce a veinticuatro voltios de corriente continua o alterna, con optoacopladores de alta velocidad, filtros digitales programables para anti-rebote y supresión de ruido; módulo de entradas analógicas de alta precisión (3b) de ocho a dieciséis canales multiplexados a un convertidor analógico-digital de veinticuatro bits de bajo ruido que soporta configuración por software para señales de cero a diez voltios, cuatro a veinte miliamperios, y sensores de temperatura tipo PT100 y termopares; módulo de salidas de relevador de estado sólido y electromecánico (3c) de doce

canales para conmutación de cargas resistivas e inductivas de hasta cinco amperios; y módulo de salidas analógicas y modulación por ancho de pulso (3d) de cuatro a ocho canales con convertidores digital-analógico de dieciséis bits para generar señales de voltaje de cero a diez voltios o corriente de cuatro a veinte miliamperios.

El sistema de gestión de energía (4) es un circuito integrado avanzado tipo PMIC que soporta un rango de voltaje de entrada ultra amplio de nueve a sesenta voltios de corriente continua, absorbiendo y disipando transitorios de alta energía típicos de entornos industriales. Incorpora protecciones activas contra inversión de polaridad, sobretensión, subtensión y sobrecorriente y gestiona de forma inteligente los modos de bajo consumo incluyendo modo de reposo (*sleep*) con consumo inferior a cien microamperios, modo de reposo profundo (*deep sleep*) inferior a diez microamperios e hibernación inferior a un microamperio, permitiendo el funcionamiento con baterías de respaldo o en aplicaciones completamente autónomas alimentadas por energía solar o células de combustible.

La capa de software y firmware (5) es una pila modular y bien definida que comprende: un Sistema Operativo en Tiempo Real (5a) tipo FreeRTOS o Zephyr RTOS con soporte para multi-núcleo y procesamiento simétrico; una Capa de Abstracción de Hardware y Drivers que presenta una API consistente para interactuar con cualquier módulo; un Motor de Ejecución de Lógica de Control (5b) conforme a la norma IEC 61131-3 que soporta programación mediante Diagrama de Escalera, Diagrama de Bloques Funcionales, Texto Estructurado, Lista de Instrucciones y Diagrama de Funciones Secuenciales; una Pila de Protocolos de Comunicación Industrial e IoT incluyendo MQTT con Sparkplug B, OPC UA PubSub, Modbus TCP/RTU, PROFINET IO-Device Clase B, EtherNet/IP Adapter, y CANopen; un Servidor Web Embebido Avanzado (5c) que sirve una interfaz gráfica de usuario responsiva para configuración y visualización tipo HMI/SCADA local; y un Sistema de Gestión de Actualizaciones OTA (5d) robusto y seguro para despliegue remoto de actualizaciones de firmware y programas de control.

La interfaz de expansión de alta densidad (6) emplea un conector industrial tipo placa a placa (*board-to-board*) con blindaje electromagnético que expone de forma completa y redundante: buses de comunicación incluyendo múltiples UART a alta velocidad hasta diez megabits por segundo, buses SPI con velocidades de reloj

hasta ochenta megahertz, I2C, Ethernet Gigabit con PHY integrado, y USB 2.0 OTG; señales de control y temporización incluyendo bancos de GPIO de alta velocidad, entradas de captura para encoders, salidas PWM de alta resolución para control preciso de motores y actuadores, y reloj de tiempo real con batería de respaldo independiente; y distribución de alimentación proporcionando rieles de cinco y tres punto tres voltios regulados y filtrados a cada módulo conectado, con monitoreo individual de consumo y limitación de corriente programable para cada slot.

En comparación con la técnica anterior, los efectos beneficiosos de la presente invención son:

- Frente a los PLCs tradicionales, el sistema trasciende la rigidez arquitectónica inherente y la dependencia del cableado punto-a-punto mediante conectividad inalámbrica nativa;
- Frente a las soluciones IIoT propietarias, ofrece interoperabilidad permitiendo al usuario seleccionar sensores, actuadores, servicios cloud y aplicaciones de análisis del mercado abierto; frente a los gateways IoT genéricos, es un controlador híbrido que ejecuta lógica de control crítica de misión, análisis y toma de decisiones autónomas en tiempo real; y
- Frente a las plataformas de desarrollo genéricas, proporciona una plataforma industrializada con hardware de grado industrial y software pre-integrado, probado y optimizado para temperaturas de menos cuarenta grados centígrados a más ochenta y cinco grados centígrados.

Resumen de las figuras

La figura 1 es un diagrama de bloques general del Sistema Embebido Flexible e Interoperable, que muestra la disposición de la Unidad Central de Computación (1) en posición central, rodeada por los módulos de comunicación inalámbrica (2) a la izquierda, los módulos de entrada/salida (3) a la derecha, el sistema de gestión de energía (4) en la parte inferior central, la capa de software y firmware (5) en la parte inferior izquierda y la supervisión de procesos IIoT/AIoT/NB-IoT/Agri-IoT en la parte inferior derecha. La interfaz de expansión de alta densidad (6) se representa como el bus central que interconecta todos los componentes.

La figura 2 es una arquitectura detallada de la Unidad Central de Computación (UCC), que muestra el Sistema en Chip (SoC) con el clúster de núcleos ARM Cortex-M (1a) dedicado a tareas de tiempo real en el lado izquierdo, el núcleo ARM Cortex-A (1b) para aplicaciones en el lado derecho, la memoria compartida y el bloque de comunicación inter-procesador (IPC) en el centro, y los buses internos AHB/APB/AXI en la parte inferior. El subsistema de memoria (1c), los periféricos de comunicación, y el módulo de temporización y sincronización se muestran en la parte inferior del diagrama.

La figura 3 es un diagrama de los módulos de comunicación inalámbrica (2), que muestra la Capa de Abstracción de Hardware (HAL) en la parte superior como elemento unificador, y los cinco módulos de comunicación en la parte media: Wi-Fi 6 (2a), LoRaWAN (2b), NB-IoT/LTE-M (2c), Bluetooth 5.3 (2d), y Li-Fi (2e). El bus de expansión de alta densidad (6) se representa en la parte inferior, junto con la pila de protocolos industriales e IoT que incluye MQTT, OPC UA, Modbus, PROFINET, EtherNet/IP, CANopen y HTTP/S.

La figura 4 es un diagrama de los módulos de entrada/salida (E/S) (3), que muestra los cuatro tipos de módulos: entradas digitales (3a) con 16/32 canales aislados y optoacopladores PC817, entradas analógicas (3b) con ADC de 24 bits y soporte para PT100/TC/RTD, salidas relé/SSR (3c) con 12 canales y relés HF49FD, y salidas analógicas/PWM (3d) con DAC de 16 bits. El bus de backplane hot-swappable se representa en la parte central, y las certificaciones EMC (IEC 61000-6-2/4, IEC 61131) junto con las especificaciones de temperatura y aislamiento se muestran en la parte inferior.

La figura 5 es un diagrama del sistema de gestión de energía PMIC (4), que muestra la entrada de alimentación de 9V a 60V DC en el lado izquierdo, el circuito integrado PMIC con reguladores buck y LDO en el centro, las salidas reguladas de 5V, 3.3V y 1.8V en el lado derecho, los modos de bajo consumo (*sleep*, *deep sleep*, *hibernation*) en la parte inferior izquierda, las fuentes alternativas (batería Li-Ion, panel solar MPPT, PoE) en la parte inferior central, y el monitoreo inteligente (corriente por slot, límite programable, telemetría) en la parte inferior derecha.

La figura 6 es un ejemplo de realización preferida basada en el microcontrolador ESP32-DEVKITC, que muestra la implementación específica con 8 entradas digitales aisladas mediante optoacopladores PC817XI, 8 salidas de relé HF49FD con aislamiento galvánico, 2 entradas analógicas con acondicionamiento LM358, 2 salidas analógicas DAC, RTC DS3231, EEPROM 24AA08, reguladores MC33269ST y NCP1117DT33, y conectividad Wi-Fi/Bluetooth integrada. Este diagrama corresponde a los esquemas electrónicos PLC_ESP32_V2 proporcionados como referencia técnica.

Formas de llevar a cabo la invención

A continuación se describen realizaciones preferidas del sistema conforme a los esquemas electrónicos desarrollados, sin que esta descripción limite el alcance de la protección solicitada.

Ejemplo 1: Implementación basada en ESP32

Se desarrolló un prototipo funcional del sistema utilizando como Unidad Central de Computación (1) un módulo ESP32-DEVKITC que integra un procesador Xtensa LX6 de doble núcleo operando a doscientos cuarenta megahertz con quinientos veinte kilobytes de SRAM y cuatro megabytes de Flash. El ESP32 incorpora de forma nativa Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2 BLE, proporcionando conectividad inalámbrica básica. El subsistema de temporización emplea un circuito integrado DS3231 como reloj de tiempo real, conectado al bus I2C del ESP32, con batería de respaldo CR2032 para mantener la hora durante cortes de alimentación. La memoria no volátil adicional se implementa mediante una EEPROM 24AA08 de ocho kilobits también conectada al bus I2C. El módulo de entradas digitales (3a) comprende ocho canales aislados galvánicamente mediante optoacopladores tipo PC817XI. Cada canal acepta señales de doce a veinticuatro voltios de corriente continua, con resistencias limitadoras de dos punto dos kiloohmios y tres punto dos kiloohmios configuradas en divisor resistivo. Cada canal incorpora un LED indicador de estado que se ilumina cuando la entrada está activa. Las señales optoacopladas se conectan a los pines GPIO del ESP32 designados como IX0.1, IX0.2, IX0.5, IX0.6, IX0.7, IX1.0, IX1.1 e IX1.2.

El módulo de salidas de relé (3c) comprende ocho canales implementados con relés electromecánicos tipo HF49FD/005-1H12T de cinco voltios con capacidad de

conmutación de cinco amperios. Cada canal incluye un transistor driver, un optoacoplador PC817XI para aislamiento galvánico de la señal de control, una resistencia limitadora de un kilohmio, una resistencia de carga de cien ohmios, y un diodo de protección flyback para supresión de transitorios inductivos. Los canales de salida se conectan a los pines GPIO del ESP32 designados como QX0.1, QX0.3, QX0.4, QX0.5, QX0.6, QX0.7, QX1.0 y QX1.1.

El módulo de entradas y salidas analógicas comprende dos canales de entrada analógica conectados al convertidor analógico-digital interno del ESP32 de doce bits de resolución, con acondicionamiento de señal mediante amplificadores operacionales LM358M/NOPB configurados como buffer y adaptador de rango. Las entradas aceptan señales de cero a diez voltios que son escaladas al rango de cero a tres punto tres voltios del ADC mediante divisor resistivo de diez kilohmios y veinte kilohmios. Las dos salidas analógicas emplean los convertidores digital-analógico internos del ESP32 de ocho bits, con acondicionamiento mediante LM358M/NOPB configurado como amplificador de ganancia para generar señales de cero a diez voltios.

El sistema de alimentación emplea dos reguladores de voltaje en configuración redundante: un MC33269ST-3.3T3 y un NCP1117DT33, ambos proporcionando tres punto tres voltios regulados a partir de una entrada de cinco voltios. Capacitores de filtrado de diez microfaradios se colocan en las entradas y salidas de los reguladores para estabilización y rechazo de ruido.

Ejemplo 2: Implementación con arquitectura ARM Cortex-M/Cortex-A

En una realización alternativa de mayores prestaciones, la Unidad Central de Computación (1) emplea un System-on-Chip tipo STM32MP1 de STMicroelectronics o i.MX 8M de NXP, que integra núcleos ARM Cortex-A53 operando a frecuencias de uno punto dos a uno punto cinco gigahertz para el subsistema de aplicaciones, y núcleos ARM Cortex-M4 o M7 operando a doscientos a cuatrocientos megahertz para el subsistema de tiempo real. Esta configuración permite ejecutar Linux embebido en los núcleos Cortex-A para la pila de comunicaciones, servidor web y motores de inteligencia artificial, mientras el firmware de control determinístico opera en los núcleos Cortex-M con latencias garantizadas inferiores a diez microsegundos.

Los módulos de comunicación inalámbrica (2) en esta realización incluyen: un módulo Wi-Fi 6 basado en chipset ESP32-C6 o Qualcomm QCA9377 con soporte para bandas de dos punto cuatro y cinco gigahertz; un módulo LoRaWAN basado en Semtech SX1262 con microcontrolador STM32L0 dedicado ejecutando el stack LoRaWAN certificado; un módulo celular NB-IoT basado en Quectel BG77 con eSIM integrado; un módulo Bluetooth 5.3 basado en Nordic nRF52840 con soporte para Mesh; y opcionalmente un módulo Li-Fi basado en fotodiodos de alta velocidad y array de LEDs. El sistema de gestión de energía (4) en esta realización emplea un PMIC de alta integración tipo TPS65910 de Texas Instruments o PCA9420 de NXP, con entrada de nueve a sesenta voltios mediante convertidor buck de primera etapa, y múltiples reguladores LDO para generar los rieles de alimentación de cinco voltios, tres punto tres voltios, uno punto ocho voltios y uno punto dos voltios requeridos por los diferentes subsistemas.

El ciclo operativo del sistema es un bucle continuo y paralelizado de percepción, procesamiento, acción y comunicación. En la fase de percepción distribuida, los datos son adquiridos de forma masiva desde los módulos de entrada (3) y desde sensores remotos conectados a través de los módulos de comunicación inalámbrica (2). En la fase de procesamiento en el borde, la Unidad Central de Computación (1) ejecuta de forma determinista la lógica de control programada en los lenguajes IEC 61131-3, mientras de forma paralela y asíncrona un motor de inferencia de machine learning ejecuta modelos de inteligencia artificial pre-entrenados para detección de anomalías, mantenimiento predictivo y optimización de procesos. En la fase de comunicación, los datos se priorizan, comprimen y enrutan de forma inteligente a través del protocolo óptimo seleccionado dinámicamente. En la fase de actuación, las salidas se activan como resultado directo de la lógica de control local, de los resultados de la inferencia de Edge AI o de comandos remotos recibidos y validados.