

Sistema de control centralizado de máquinas CNC en paralelo

Introducción

Este documento presenta la arquitectura de referencia del sistema IoT propuesto para controlar local y remotamente una serie de máquinas CNC desde un nodo centralizado, utilizando el protocolo MQTT. El sistema permite a un administrador subir sus diseños de forma remota, programar la máquina y monitorear su operación en tiempo real; esto mientras el operario configura físicamente las máquinas para su correcto funcionamiento.

Planteamiento del problema

En un escenario en el que se realiza **producción de PCB mediante varias ruteadoras CNC**, el proceso de control de cada una de las máquinas se realiza de manera **individual** por medio de dos métodos principales:

1. **Inserción manual de una tarjeta SD** que contiene el archivo de ruteado (G-code) previamente cargado desde un computador externo.
2. **Conexión serial directa** entre la máquina y un PC, donde un programa “G-code sender” envía en tiempo real las instrucciones de movimiento y mecanizado.

En cualquiera de los dos casos, el proceso requiere una **intervención humana directa o la dependencia de un PC dedicado por máquina**, lo cual **limita la escalabilidad y eficiencia del sistema**.

Esta arquitectura descentralizada implica una **mayor cantidad de recursos humanos y equipos de cómputo** dedicados al control de las máquinas, incrementando los **costos operativos, el consumo energético y los tiempos de preparación** por lote de producción. Además, la intervención humana repetitiva introduce un **mayor riesgo de error** tanto en la carga de archivos como en la ejecución del proceso, pudiendo causar **fallos de mecanizado, pérdida de material o inconsistencias entre placas**.

Por otra parte, el **seguimiento del proceso productivo** presenta limitaciones significativas: el tiempo de ejecución de cada trabajo, los estados de las máquinas (en operación, en espera, en error) y la trazabilidad de cada PCB fabricada **no se registran automáticamente**, sino de forma manual o parcial, lo cual **dificulta la obtención de métricas de desempeño**, la planificación de la producción y la detección temprana de fallas.

En consecuencia, la ausencia de un sistema centralizado de control y monitoreo impide coordinar eficientemente el conjunto de ruteadoras CNC, y obstaculiza la integración con plataformas de análisis de datos o de gestión de producción.

Ante esta problemática, surge la necesidad de **diseñar e implementar una arquitectura de control distribuido con gestión centralizada**, que permita la **coordinación, supervisión y registro automatizado del estado de múltiples máquinas CNC**, reduciendo la intervención humana, el número de equipos intermedios, y mejorando la eficiencia operativa y trazabilidad del proceso.

Planificación/Objetivo:

Diseñar e implementar una arquitectura de control distribuido (local y remoto) con gestión centralizada, que permita la **coordinación, supervisión y registro automatizado del estado de múltiples máquinas CNC**, reduciendo la intervención humana, el número de equipos intermedios, y mejorando la eficiencia operativa y trazabilidad del proceso.

Diagrama de bloques de hardware

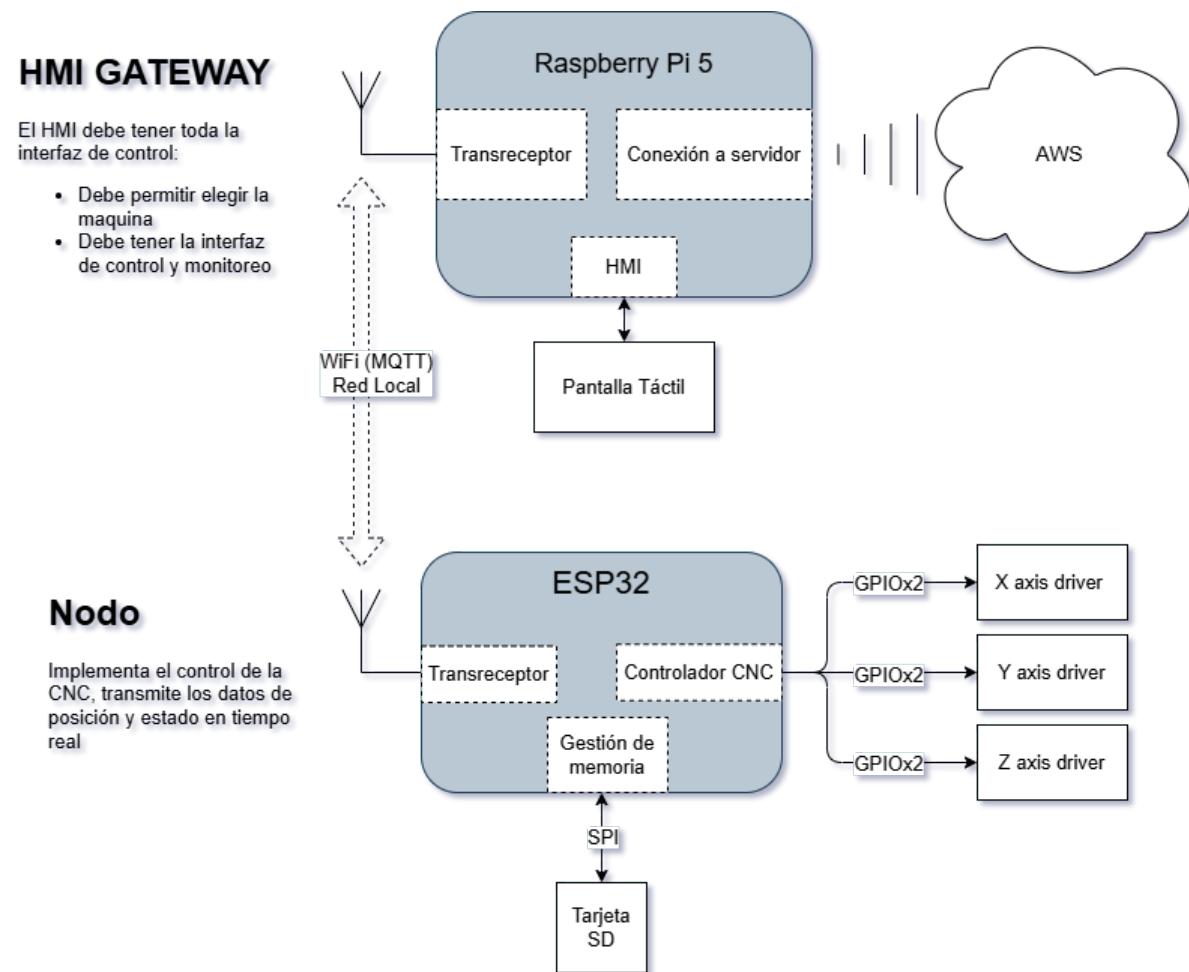
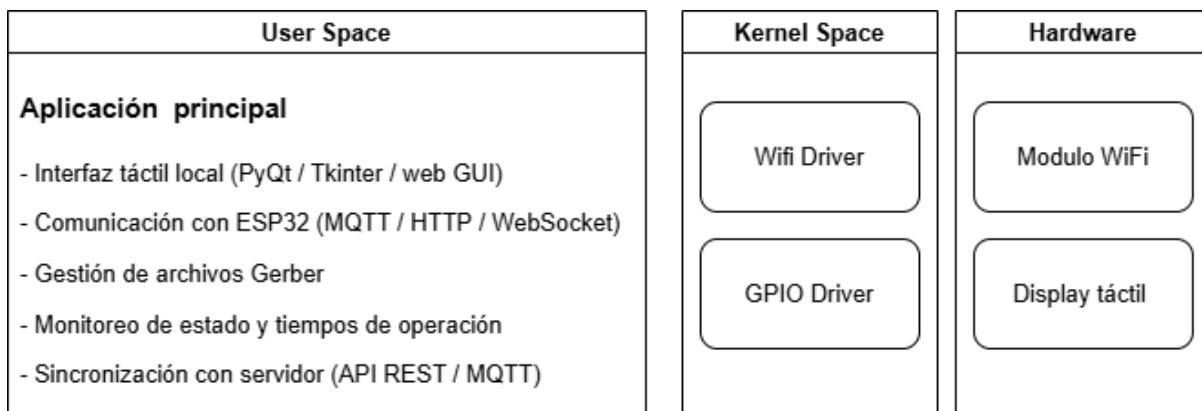


Diagrama de bloques de software (nivel Linux)



Requerimientos funcionales y no funcionales

1. FUNCIONALES:

- El sistema deberá permitir al usuario remoto y local enviar comandos de control (Iniciar, Pausar, Detener, Reanudar) a cualquier máquina CNC conectada.
- El sistema deberá permitir al operario cargar de forma local un archivo de mecanizado (G-code) a través del panel de control, y enviarlo al nodo de la máquina CNC seleccionada, notificando a esta mediante MQTT, para después transferir el archivo por protocolo FTP.
- El sistema deberá permitir al administrador cargar de forma remota un archivo de mecanizado (G-code) y seleccionar una máquina de destino a través de una interfaz web, luego, enviar la instrucción al gateway HMI para que este asigne la tarea a dicha máquina.
- El sistema deberá permitir la asignación dinámica de trabajos a cualquiera de las máquinas CNC disponibles desde la interfaz central.
- El sistema deberá actualizar y mostrar en tiempo real el estado operativo de cada máquina CNC (En Operación, En Espera, Error, Finalizado, Fuera de Línea).
- El sistema deberá registrar en una base de datos o archivo local los eventos relevantes de cada máquina CNC (inicio/finalización de trabajo, errores, alertas, desconexiones, alarmas).

2. NO FUNCIONALES:

- El tiempo de transmisión de mensajes MQTT (de publicación a recepción) no deberá exceder los 300 ms bajo condiciones de red local estable.

- El sistema deberá implementar autenticación básica de ingreso para el acceso al panel de control.
- La arquitectura deberá soportar la incorporación de nuevas máquinas CNC sin necesidad de modificar el código base del servidor central.

Requerimientos Testeables

- **Monitoreo de estado en tiempo real**

El sistema deberá actualizar y mostrar en tiempo real el estado operativo de cada máquina CNC (En Operación, En Espera, Error, Finalizado, Fuera de Línea).

Criterio de aceptación: Las actualizaciones de estado deberán tener una latencia menor a 2 s entre el evento local y su visualización en el panel central.

- **TEST :**

1. Conectar la máquina CNC al broker MQTT.
2. Cambiar manualmente el estado local (ejemplo: “En Espera” → “En Operación”).
3. Registrar los timestamps de publicación y recepción.
4. Calcular latencia.
5. Repetir 5 veces.

- **Envío remoto de archivos G-code**

El sistema deberá permitir al administrador cargar y enviar de forma remota un archivo de mecanizado (G-code) al nodo correspondiente de una máquina CNC, mediante el protocolo MQTT.

- **TEST :**

1. Seleccionar una máquina CNC activa desde el panel central.
2. Cargar un archivo G-code de prueba.
3. Enviar el archivo.
4. Verificar en los logs del nodo la recepción..
5. Comparar el archivo original con el recibido.

- **Control remoto de operación**

El sistema deberá permitir al usuario enviar comandos de control remoto (Iniciar, Pausar, Detener) a las máquinas CNC conectadas, y recibir confirmación inmediata de ejecución.

- **TEST :**

1. Desde el panel central, seleccionar una máquina en estado “Disponible”.
2. Enviar comando “Iniciar”.
3. Verificar que el estado cambie a “En Operación”.
4. Enviar comando “Pausar” y verificar cambio a “Pausada”.
5. Enviar comando “Detener” y confirmar cambio a “Finalizado”.

- **Selección dinámica de máquina destino**

El sistema deberá permitir seleccionar dinámicamente una máquina CNC disponible para asignarle un archivo de trabajo desde la interfaz central.

- **TEST :**

1. Encender al menos tres máquinas CNC conectadas al broker MQTT.
2. Abrir el panel central y verificar que aparezcan todas las máquinas activas.
3. Seleccionar una máquina y asignarle un archivo G-code.
4. Confirmar que el estado de esa máquina cambie a “Ocupada”.

- **Registro de eventos y alertas**

El sistema deberá registrar automáticamente los eventos y alertas de cada máquina CNC (inicio, fin, error, desconexión, alarma) en una base de datos o archivo local.

- **TEST :**

1. Simular eventos en una máquina CNC (inicio, error, reconexión).
2. Consultar el registro de eventos en el panel o archivo de logs.
3. Verificar que los eventos están almacenados con hora, tipo e ID de máquina.
4. Comparar con hora real del suceso.

- **Generación de notificaciones de alerta inmediata**

El sistema deberá enviar notificaciones instantáneas al panel central en caso de error, fallo de comunicación o finalización de trabajo.

- **TEST :**

1. Provocar manualmente una desconexión o error de sensor en una máquina CNC.
2. Observar si el panel central muestra la alerta.
3. Medir el tiempo entre el evento y la notificación visible.

- **Autenticación y autorización de usuarios**

El sistema deberá solicitar autenticación al operario antes de acceder al panel central y restringir acciones.

- **TEST :**

1. Intentar acceder al panel sin usuario válido.
2. Repetir 10 veces
3. Intentar acceder al panel con un usuario válido

- **Escalabilidad del sistema**

La arquitectura deberá soportar la conexión de nuevas máquinas CNC sin reconfiguración del sistema central.

- **TEST :**

1. Encender un nuevo nodo CNC con ID no registrado.
2. Esperar publicación inicial de estado.
3. Verificar que el panel lo muestre automáticamente en la lista.