

# Microcontroladores: Laboratorio 1

1<sup>st</sup> Mateo Lecuna

*Ingeniería en Mecatrónica*

*Universidad Tecnológica (UTEC)*

Fray Bentos, Uruguay

[mateo.lecuna@estudiantes.utec.edu.uy](mailto:mateo.lecuna@estudiantes.utec.edu.uy)

2<sup>nd</sup> Mateo Sanchez

*Ingeniería en Mecatrónica*

*Universidad Tecnológica (UTEC)*

Maldonado, Uruguay

[mateo.sanchez@estudiantes.utec.edu.uy](mailto:mateo.sanchez@estudiantes.utec.edu.uy)

**Resumen**—Se presenta el diseño e implementación de cuatro subsistemas sobre el microcontrolador ATmega328P: (1) un plotter cartesiano programado en C, (2) un selector/detector de color que explora un círculo cromático, (3) un piano electrónico, y (4) una cerradura electrónica. Cada módulo ejerce competencias clave de sistemas embebidos: planificación de trayectorias y temporización (plotter), adquisición/filtrado analógico y mapeo a acciones (LDR→servo→LED), generación de señales y lectura confiable de entradas (piano), y control secuencial por máquina de estados con validación de credenciales (cerradura). Se verificó el funcionamiento estable de los módulos, con lecturas analógicas consistentes, posicionamiento del servo acorde a la detección, generación de tonos precisa y lógica de acceso confiable. Como líneas de mejora se identifican: perfiles de movimiento (trapezoidal/S-curve) para el plotter, calibración y normalización de la LDR frente a iluminación ambiente, antirrebote/antighosting en el teclado del piano, y mecanismos adicionales de seguridad en la cerradura (bloqueo por intentos, almacenamiento en EEPROM).

**Keywords:** ATmega328P, sistemas embebidos, lenguaje C, plotter cartesiano, detección de color, servomotor, piano electrónico, cerradura electrónica.

## I. INTRODUCCIÓN

El presente laboratorio tuvo como propósito afianzar los conocimientos adquiridos en el manejo de periféricos del microcontrolador ATmega328P, aplicando conceptos de comunicación digital, control de señales PWM, almacenamiento en memoria no volátil y desarrollo modular en lenguaje C. A través de distintos montajes experimentales, se buscó integrar la interacción entre hardware y software mediante el diseño de sistemas embebidos funcionales, optimizando tanto la organización del código como la eficiencia en el uso de recursos del microcontrolador.

Las actividades se dividieron en cuatro proyectos independientes pero complementarios entre sí: un **piano electrónico** con control por UART y reproducción de melodías programadas; una **cerradura electrónica** basada en teclado matricial, pantalla LCD y almacenamiento de PIN en EEPROM; un **plotter XY** controlado por motores paso a paso; y un **selector de color** implementado mediante un sensor LDR y un servomotor para posicionamiento angular. Cada uno de estos sistemas permitió poner en práctica diferentes aspectos del control digital, como el manejo de temporizadores,

interrupciones, protocolos de comunicación y procesamiento secuencial de señales digitales.

## II. OBJETIVOS

### II-A. Objetivo general

Diseñar, programar e implementar diversos sistemas embebidos utilizando el microcontrolador ATmega328P, integrando periféricos de entrada y salida, almacenamiento y comunicación serial, para afianzar los conocimientos de programación estructurada en lenguaje C y la comprensión del funcionamiento interno del hardware.

### II-B. Objetivos específicos

- Implementar un **piano electrónico** capaz de reproducir notas musicales y melodías predefinidas, utilizando modulación por ancho de pulso (PWM) y comunicación UART para la selección remota de canciones.
- Desarrollar una **cerradura electrónica** con control de acceso mediante teclado matricial, visualización en LCD e implementación de almacenamiento no volátil del PIN mediante la memoria EEPROM interna del microcontrolador.
- Construir un **plotter XY** controlado por motores paso a paso, capaz de representar gráficamente figuras en un plano, aplicando técnicas de control secuencial y temporización precisa.
- Diseñar un **selector de color** basado en un sensor fotoresistivo (LDR) y un servomotor, de modo que el sistema oriente el eje de detección hacia la fuente de luz predominante.
- Analizar el comportamiento eléctrico de cada montaje, evaluando la respuesta temporal, el consumo energético y la estabilidad del sistema durante su operación continua.
- Documentar el desarrollo, la metodología de diseño y los resultados experimentales de cada sistema, siguiendo el formato técnico IEEE propuesto para los informes de laboratorio.

### III. MARCO TEÓRICO

#### III-A. Componentes y fundamentos del sistema

##### III-A1. Microcontrolador ATmega328P / Arduino UNO:

El ATmega328P es un microcontrolador de 8 bits con arquitectura AVR, reloj típico de 16 MHz, memoria Flash (programa), SRAM (datos) y EEPROM (no volátil). Dispone de temporizadores de 8 y 16 bits, puertos GPIO digitales, conversores A/D y periféricos de comunicación (UART, TWI/I<sup>2</sup>C, SPI). En este laboratorio se utilizó montado sobre la plataforma Arduino UNO, aprovechando su circuito de alimentación, cristal de 16 MHz y acceso conveniente a pines de E/S [1].

**III-A2. Señales PWM y temporización:** La modulación por ancho de pulso (PWM) se empleó para dos fines: (i) generación de señales acústicas en el piano (variación de frecuencia/periodo mediante temporizadores), y (ii) control de posición de servomotores (variación de ciclo útil dentro de un periodo fijo). La obtención de frecuencias precisas se realizó configurando los temporizadores del ATmega328P en modos compatibles con la resolución requerida [1].

**III-A3. Indicadores: LEDs y buzzer piezoeléctrico:** Se utilizaron LEDs como señalización visual de estados (éxito, error, bloqueo) y un buzzer piezoeléctrico pasivo para retroalimentación acústica. El buzzer pasivo requiere una señal conmutada (proporcionada por el microcontrolador), a diferencia del activo que integra su propio oscilador. En el piano se aprovechó PWM para tonos audibles; en la cerradura se usaron patrones de *beeps* cortos/largos para codificar eventos [2].

**III-A4. Pantalla LCD 16×2 con interfaz I<sup>2</sup>C (PCF8574):** Para visualización se integró un LCD 16×2 comandado en modo 4 bits mediante un *backpack* basado en el expensor de E/S PCF8574. El microcontrolador opera como maestro TWI/I<sup>2</sup>C y escribe comandos/datos en el expensor, reduciendo el número de pines necesarios y simplificando el cableado [3].

**III-A5. Teclado matricial 4×4:** El ingreso de datos en la cerradura se realizó con un teclado 4×4 escaneado por filas/columnas: se activa cada fila y se leen las columnas con *pull-up* interno. Se aplicó *debouncing* por software con retardos cortos y verificación del estado estable, mapeando (fila,columna) a caracteres (0 { 9, A { D, \*, #) [4].

**III-A6. Memoria EEPROM interna:** El PIN de la cerradura se almacenó en EEPROM para persistencia sin energía. Se validó longitud y contenido al arranque, inicializando un valor por defecto cuando fuera necesario. Las rutinas de escritura/actualización minimizan el desgaste por ciclos de borrado/escritura [1].

**III-A7. Servomotor (modelo SG90):** Se empleó un servomotor de rotación limitada (aprox. 0°–180°) controlado por impulsos de 1–2 ms dentro de un período de 20 ms (50 Hz). El ángulo se define por el ancho del pulso: valores cercanos a 1 ms, 1,5 ms y 2 ms corresponden típicamente a los extremos e intermedio del recorrido, respectivamente. En el laboratorio se utilizó el modelo SG90, cuyas especifi-

caciones eléctricas y mecánicas se tomaron de su hoja de datos [5].

**III-A8. Motores paso a paso (Plotter):** Para el *plotter XY* se consideró el control de motores paso a paso, caracterizados por su avance angular discreto. El movimiento se obtiene excitando las bobinas según secuencias (*full-/half-step*, microstepping), coordinadas temporalmente por el microcontrolador. La temporización precisa es clave para mantener torque y evitar pérdida de pasos.

**III-A9. Sensor LDR (fotoresistencia):** El LDR presenta una resistencia inversamente proporcional a la iluminación incidente, lo que permite sensar luminosidad con un divisor resistivo y lectura A/D. En el selector de color se empleó como señal de realimentación para posicionar el servomotor hacia la fuente de luz predominante [6].

**III-A10. Comunicación UART y debouncing:** La UART se utilizó para emitir mensajes de diagnóstico y recibir comandos (por ejemplo, selección de melodías en el piano). Para entradas digitales provenientes de pulsadores y teclado se aplicó *debouncing* por software mediante retardos y verificación consecutiva del estado estable, técnica suficiente dada la baja tasa de eventos del sistema [1].

#### III-B. Piano

El piano se basa en el microcontrolador ATmega328P, encargado de leer las entradas digitales provenientes de pulsadores y generar las notas musicales correspondientes a través de un buzzer piezoeléctrico. Para la síntesis de sonido, se hace uso de señales de modulación por ancho de pulso (PWM), configuradas mediante los temporizadores internos del microcontrolador, permitiendo así obtener frecuencias precisas asociadas a cada nota musical.

En términos acústicos, cada nota musical se corresponde con una frecuencia específica medida en hertzios (Hz), donde un incremento de una octava implica duplicar la frecuencia base. Por ejemplo, la nota La de la cuarta octava tiene una frecuencia de 440 Hz, mientras que en la quinta octava alcanza los 880 Hz. Esta relación logarítmica entre nota y frecuencia permite reproducir escalas musicales de manera controlada mediante la variación del período de la señal PWM.

El sistema implementa un conjunto de 12 pulsadores, cada uno asignado a una nota de la escala cromática (Do, Do#, Re, Re#, Mi, Fa, Fa#, Sol, Sol#, La, La#, Si). Además, se integran dos pulsadores adicionales para modificar la octava activa, lo que amplía la capacidad tonal del instrumento sin aumentar significativamente el número de entradas físicas.

El buzzer piezoeléctrico utilizado actúa como transductor electroacústico, recibiendo la señal PWM generada por el ATmega328P y transformándola en vibraciones audibles. El uso de resistencias *pull-up* internas en los pines de entrada digital simplifica el cableado, evitando la necesidad de resistencias externas para los pulsadores.

Por otra parte, la inclusión de la comunicación serial mediante UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) permite la selección de canciones predefinidas almacenadas en memoria, además de ofrecer la posibilidad

de enviar mensajes informativos hacia un terminal externo. De esta forma, el sistema no solo funciona como piano manual, sino también como reproductor automático de melodías programadas.

En cuanto al rango tonal, se implementaron las octavas 4 a 7, dado que en la práctica el buzzer presentaba limitaciones físicas en su rango de respuesta. Al reproducir frecuencias inferiores a la cuarta octava, el sonido resultaba monótono e indistinguible, mientras que por encima de la séptima octava el transductor no lograba generar vibración audible. De esta manera, el sistema cubre el rango más perceptible y estable para este tipo de actuadores.

En la sección de anexos, dentro de tablas complementarias I, se detalla la correspondencia entre las notas musicales y sus frecuencias asociadas, así como el índice utilizado en el arreglo de notas dentro del código fuente del proyecto.

En resumen, el piano implementado combina técnicas de generación de señales mediante modulación por ancho de pulso (PWM) con el control secuencial de entradas digitales, demostrando la capacidad del microcontrolador ATmega328P para integrar procesos de adquisición, procesamiento y salida de información en tiempo real, propios de un sistema embebido interactivo.

### *III-C. Cerradura electrónica*

La cerradura digital implementada se basa en el microcontrolador ATmega328P y combina adquisición de entradas, procesamiento secuencial y señalización al usuario para validar un PIN de acceso. El sistema integra un teclado matricial 4x4 como interfaz de ingreso, una pantalla LCD 16x2 con interfaz I<sup>2</sup>C para retroalimentación, y elementos de salida (LEDs y buzzer) para confirmar eventos y estados del sistema. El PIN se almacena de manera no volátil en la memoria EEPROM interna del microcontrolador, lo que permite conservar la configuración aun sin alimentación [1].

*III-C1. Ingreso por teclado matricial 4x4:* El teclado se organiza en una matriz de cuatro filas y cuatro columnas. La lectura se realiza mediante *escaneo por filas*: el firmware activa secuencialmente cada fila (lógica baja) y, en cada paso, muestrea las columnas configuradas como entradas con *pull-up* interno. Cuando una tecla se presiona, se establece un camino de conducción que fuerza a nivel bajo la columna correspondiente, permitiendo identificar la pareja (fila, columna) y mapearla al carácter asociado (0 a 9, A a D, \*, #). Este procedimiento se complementa con retardos breves para atenuar el efecto de rebote mecánico (*debouncing*). La disposición eléctrica y el mapeo de pines siguen el módulo de teclado 4x4 utilizado [4].

*III-C2. Visualización: LCD 16x2 con interfaz I<sup>2</sup>C:* La pantalla LCD se controla en modo de 4 bits a través de un *backpack* basado en el expensor de E/S PCF8574, que traslada la comunicación I<sup>2</sup>C (líneas SDA/SCL) a señales paralelas (RS, E, D4 a D7 y control de backlight). A nivel de bus, el ATmega328P opera como maestro TWI e inicia/termina transacciones mediante condiciones *START/STOP*, escribiendo bytes en la dirección del expensor. Sobre esa base, el software implementa las primitivas de inicialización

del LCD (función, *display on/off, clear, entry mode*) y las rutinas de posicionamiento y envío de datos/caracteres. La interfaz seleccionada reduce el número de pines GPIO necesarios y simplifica el cableado [3].

*III-C3. Almacenamiento no volátil del PIN (EEPROM):* El PIN de usuario (longitud configurable entre 4 y 6 dígitos) se guarda en la EEPROM interna, junto con su longitud. En el arranque, si no hay un PIN válido, el firmware inicializa un valor por defecto y normaliza la estructura de almacenamiento. La EEPROM permite escritura/lectura byte a byte, con funciones de actualización que evitan ciclos de borrado innecesarios, prolongando la vida útil de la memoria [1].

*III-C4. Gestión de estados y seguridad:* El flujo lógico se organiza como una máquina de estados finitos:

- **Modo normal:** ingreso del PIN y validación.
- **Cambio de PIN:** secuencia guiada en tres pasos: verificación del PIN actual, ingreso del nuevo PIN y confirmación (comando C para iniciar; A para confirmar; B para limpiar).
- **Bloqueo:** tras tres intentos fallidos consecutivos, el sistema ingresa en estado de alarma/bloqueo. La salida requiere la *llave maestra* (D), lo que restablece el contador de intentos y retorna a modo normal.

Adicionalmente, se implementan validaciones de formato (por ejemplo, longitud mínima de 4 dígitos). Las decisiones de diseño (límite de intentos, clave maestra, confirmación doble del nuevo PIN) elevan la robustez frente a errores de ingreso y mitigaciones de prueba y error.

*III-C5. Señalización: LEDs y Buzzer:* La interacción con el usuario se refuerza mediante señales visuales y acústicas. El **LED verde** y un patrón de tres pulsos cortos del **buzzer** indican validación correcta; el **LED rojo** junto con un pulso sostenido del buzzer señalan error de PIN o formatos inválidos. En estado de bloqueo, se alternan períodos de activación/desactivación de LED rojo y buzzer hasta la intervención con la tecla maestra. El buzzer piezoelectrónico empleado funciona como transductor binario (encendido/apagado) para retroalimentación breve, diferenciándose del uso tonal continuo aplicado en el ejercicio del piano [2].

*III-C6. Consideraciones temporales y debouncing:* La temporización se apoya en retardos de corta duración para estabilizar lecturas del teclado y construir patrones de señalización perceptibles (confirmaciones, alarmas). En sistemas embebidos, el *debouncing* por software con retardos y verificación consecutiva de estado es una estrategia suficiente para teclados de baja tasa de eventos; no obstante, para escalabilidad se podrían considerar interrupciones por cambio de pin, filtros digitales o máquinas de tiempo dedicadas.

*III-C7. Síntesis:* En conjunto, la cerradura digital ilustra la integración de periféricos síncronos (I<sup>2</sup>C/TWI) y asíncronos (GPIO escaneados), memoria no volátil (EEPROM) y una máquina de estados que implementa políticas de seguridad (longitud mínima, límite de intentos, clave maestra). El diseño resultante evidencia la capacidad del ATmega328P para articular adquisición, procesamiento y respuesta en

tiempo real en un entorno embebido con interfaz hombre-máquina clara y consistente.

#### IV. METODOLOGÍA

##### IV-A. Limitaciones del entorno de simulación

Durante el desarrollo del Laboratorio 2 no fue posible realizar las simulaciones correspondientes en el software Proteus, debido a que no se dispone de una licencia institucional ni de acceso a la versión recomendada. Por este motivo, todas las pruebas y verificaciones se llevaron a cabo directamente sobre el hardware físico empleando la placa Arduino UNO R3 con el microcontrolador ATmega328P, junto con los periféricos y componentes definidos para cada práctica.

A pesar de esta limitación, se logró validar el funcionamiento de cada sistema mediante la ejecución en hardware real, registrando evidencias fotográficas y audiovisuales de los resultados obtenidos, disponibles en el repositorio de GitHub [7].

##### IV-B. Plotter

##### IV-C. Seleccionador de colores

##### IV-D. Piano

###### IV-D1. Materiales a utilizar:

- Microcontrolador ATmega328P (plataforma Arduino UNO).
- 12 pulsadores para las notas de la escala cromática.
- 2 pulsadores adicionales para el control de octavas.
- Buzzer piezoelectrónico.
- Resistencias pull-up internas configuradas por software.
- Conexiones con jumpers y protoboard.

*IV-D2. Diseño del sistema:* El sistema se estructuró en torno a los siguientes bloques principales:

1. **Lectura de pulsadores:** Se configuraron los pines digitales como entradas con resistencias pull-up internas. El estado lógico bajo indica que la tecla fue presionada.
2. **Generación de notas:** Utilizando los temporizadores del ATmega328P en modo PWM, se programaron las frecuencias correspondientes a cada nota musical. Las notas se definieron en una tabla para facilitar su acceso en el programa.
3. **Cambio de octava:** Se reservaron dos pulsadores adicionales para aumentar o disminuir la octava activa. Esto permite variar la frecuencia base de todas las notas según la octava seleccionada.
4. **Reproducción de canciones:** La comunicación UART se estableció para recibir comandos externos y activar la ejecución de melodías predefinidas. Estos comandos permiten conmutar entre modo piano manual y modo automático.

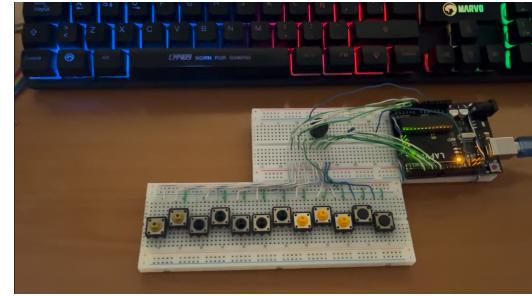


Figura 1. Montaje general del piano electrónico con pulsadores, buzzer y microcontrolador ATmega328P. Fuente: elaboración propia.

*IV-D3. Obtención y transcripción de melodías:* Para la programación de las canciones predefinidas, fue necesario obtener previamente las secuencias de notas, duraciones y octavas de cada una.

La primera melodía, denominada “Asesina”, fue extraída a partir del video de YouTube [8]. Para identificar las notas y sus duraciones se utilizó una aplicación de piano roll disponible en App Store, con la cual se reprodujo la melodía y se registraron manualmente las notas en una hoja de referencia, indicando la octava correspondiente y el tiempo de ejecución de cada una. Posteriormente, estos valores fueron transferidos al código fuente en forma de arreglos.

La segunda melodía, correspondiente al tema principal de *Super Mario Bros*, se obtuvo a partir de la partitura disponible en el portal MuseScore [9]. Dicha fuente incluía además una simulación visual en piano roll, lo que facilitó la identificación de las notas y su duración sin necesidad de realizar el reconocimiento auditivo de las notas, como se hizo con la primera canción.

En el documento de evidencias anexo se incluyen las hojas manuscritas utilizadas en la transcripción de ambas canciones, junto con una tabla que relaciona las notas musicales con su índice numérico dentro del arreglo de notas del programa. No fue posible incluir el archivo PDF con la partitura de la canción de *Super Mario Bros* debido a que requiere una suscripción paga para su descarga, pero, sin embargo, accediendo al enlace indicado en la bibliografía es posible visualizar la partitura y la simulación en piano roll mencionada anteriormente.

Para la validación del funcionamiento, se realizaron pruebas individuales de cada bloque funcional (lectura de teclas, generación de notas y comunicación UART). Se verificó la respuesta temporal del sistema y la precisión de las frecuencias generadas mediante observación en la salida del buzzer y comparación con valores teóricos de frecuencia.

##### IV-E. Cerradura electrónica

El desarrollo de la cerradura digital se llevó a cabo en lenguaje C utilizando el entorno de programación Microchip Studio, con el microcontrolador ATmega328P como núcleo principal.

El sistema se implementó y verificó directamente sobre hardware físico, debido a la falta de licencia para el entorno

de simulación Proteus, tal como se detalla en la sección de limitaciones.

**IV-E1. Estructura general del sistema:** El circuito se compone de un teclado matricial 4x4, una pantalla LCD 16x2 con interfaz I<sup>2</sup>C, dos indicadores luminosos (LED verde y rojo) y un buzzer piezoelectrónico pasivo.

El microcontrolador administra las señales de entrada provenientes del teclado, procesa la información según el estado actual del sistema y genera salidas visuales y acústicas para retroalimentar al usuario sobre el resultado de las operaciones.

La Figura 2 presenta el montaje general del sistema, con la pantalla LCD mostrando el mensaje inicial “Pin:”, los LEDs indicadores y el buzzer conectados al ATmega328P.

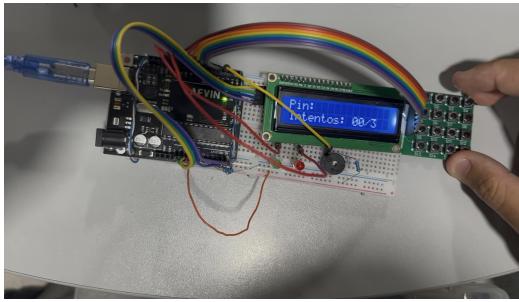


Figura 2. Montaje general de la cerradura electrónica con LCD iniciado mostrando el mensaje Pin:, teclado 4x4, LEDs y buzzer. Fuente: elaboración propia.

El diagrama de conexión completo se presenta en la sección de anexos correspondiente (Figura 11).

**IV-E2. Procedimiento de programación:** El programa se estructuró de forma modular, agrupando las funciones según su propósito:

- **Módulo de LCD e interfaz I<sup>2</sup>C:** funciones de inicialización, escritura de comandos, envío de datos y posicionamiento del cursor, implementadas mediante rutinas básicas de TWI.
- **Módulo del teclado matricial:** lectura por escaneo de filas, detección de pulsaciones y conversión a caracteres mediante un mapa interno. Se emplearon retardos cortos de estabilización para eliminar rebotes mecánicos.
- **Módulo de EEPROM:** almacenamiento del PIN en memoria no volátil, con verificación de validez al inicio e inicialización con valor por defecto (“1234”) en caso de no existir un PIN previo.
- **Módulo de retroalimentación:** control del LED verde, LED rojo y buzzer para representar estados del sistema (acceso concedido, error, bloqueo, confirmación de cambio de clave, etc.).

**IV-E3. Flujo de operación:** El sistema inicia verificando la existencia de un PIN válido en la memoria EEPROM. Si no se detecta, se crea uno por defecto y se muestra el mensaje “Pin:” en el LCD. A partir de allí, el usuario puede:

1. Ingresar el PIN y confirmar con la tecla A.
2. Iniciar el cambio de contraseña con la tecla C.
3. Borrar el ingreso actual con la tecla B.

4. Utilizar la tecla D como llave maestra para desbloquear el sistema.

Si el PIN ingresado tiene menos de 4 dígitos, el sistema muestra “Min 4 dígitos” y emite un pitido corto. Si el PIN es incorrecto, se incrementa un contador de intentos y se activa una señal acústica junto al LED rojo durante 500 ms. Tras tres intentos erróneos consecutivos, el sistema entra en modo de bloqueo, activando una alarma visual y sonora que permanece encendida hasta que se ingrese la tecla maestra D. Cuando el PIN es correcto, se activa el LED verde y el buzzer emite tres pulsos cortos de confirmación.

El modo de cambio de PIN consta de tres fases secuenciales: verificación del PIN actual, ingreso del nuevo PIN (4–6 dígitos) y confirmación. El nuevo valor se almacena en la EEPROM mediante escritura byte a byte.

**IV-E4. Validación funcional:** Las pruebas de verificación se realizaron en hardware real, evaluando la respuesta del sistema ante diferentes secuencias de entrada: PIN correcto, PIN incorrecto, longitud insuficiente, cambio de clave y condición de bloqueo. En cada caso, se registraron los mensajes mostrados en el LCD y los patrones de activación del buzzer y LEDs, confirmando el cumplimiento del comportamiento esperado definido en el diseño lógico.

## V. RESULTADOS

### V-A. Plotter

### V-B. Seleccionador de colores

### V-C. Piano

El sistema desarrollado logró cumplir satisfactoriamente los objetivos propuestos. Se implementó un piano electrónico basado en el microcontrolador ATmega328P, capaz de reproducir las 12 notas de la escala cromática mediante pulsadores individuales. Cada tecla activa la generación de una frecuencia específica a través del buzzer pasivo, logrando un sonido claro y fácilmente distinguible entre notas.

La comunicación UART fue implementada correctamente, permitiendo el control remoto del sistema desde una interfaz serial. Se configuraron tres comandos principales: C1 y C2, utilizados para la reproducción de dos canciones predefinidas almacenadas en memoria, y el comando PIANO, que devuelve al modo manual de ejecución por teclas. El comando STOP no fue implementado debido a limitaciones de tiempo, aunque el sistema mantiene estabilidad y correcta respuesta durante la ejecución de las melodías.

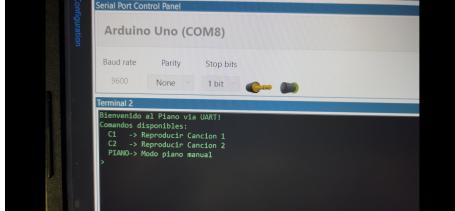


Figura 3. Interacción del piano electrónico mediante comunicación UART, mostrando la recepción de comandos desde el terminal serial. Fuente: elaboración propia.

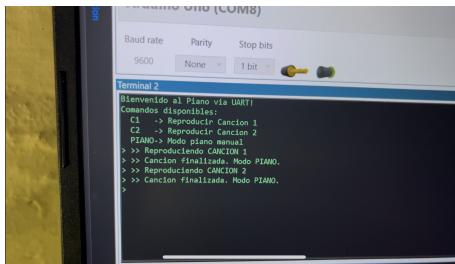


Figura 4. Ejecución automática de una melodía predefinida en el piano electrónico. Fuente: elaboración propia.

Durante las pruebas se observó un comportamiento estable en la reproducción de las notas y una respuesta inmediata ante la pulsación de teclas. El buzzer pasivo entregó una calidad sonora adecuada, permitiendo distinguir correctamente las canciones y las frecuencias individuales. No se presentaron problemas de latencia ni de resonancia indebida, confirmando la correcta configuración del temporizador para la generación de las señales PWM.

De forma general, el desempeño del sistema fue considerado satisfactorio, tanto en el modo de ejecución manual como en el automático. Las canciones predefinidas se reprodujeron de forma fluida y reconocible, evidenciando un correcto manejo de tiempos y frecuencias en la modulación del sonido.

#### V-D. Cerradura electrónica

El sistema de cerradura digital presentó un funcionamiento estable y predecible bajo todas las condiciones de prueba. Las pruebas experimentales se realizaron en el hardware real, observando tanto la respuesta visual (pantalla LCD y LEDs) como la acústica (buzzer), y verificando la coherencia con la lógica definida en el código fuente.

**V-D1. Validación del PIN:** Durante la fase de ingreso de contraseña, se comprobó que el sistema no permite la validación de PINs con menos de cuatro dígitos, mostrando en el LCD el mensaje Min 4 dígitos y emitindo un pitido breve acompañado del encendido del LED rojo.

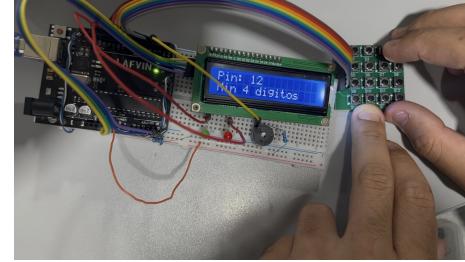


Figura 5. Mensaje Min 4 dígitos mostrado en el LCD y activación del LED rojo al ingresar una contraseña demasiado corta. Fuente: elaboración propia.

Al ingresar un PIN correcto, el sistema reinicia el contador de intentos y activa la señal de confirmación: el LED verde se enciende y el buzzer emite tres pulsos cortos, mientras que en la pantalla se muestra el mensaje OK.

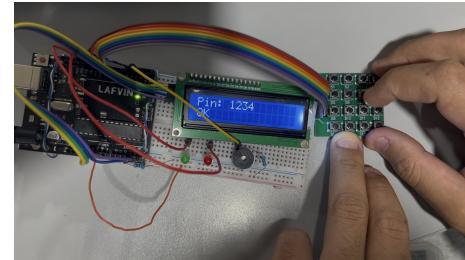


Figura 6. Validación correcta del PIN: mensaje OK en el LCD, LED verde encendido y triple confirmación sonora. Fuente: elaboración propia.

Cuando el PIN es incorrecto, se incrementa el contador de intentos fallidos, se activa el LED rojo durante aproximadamente 500 ms junto con un tono continuo en el buzzer, y se muestra en el LCD el texto Error.

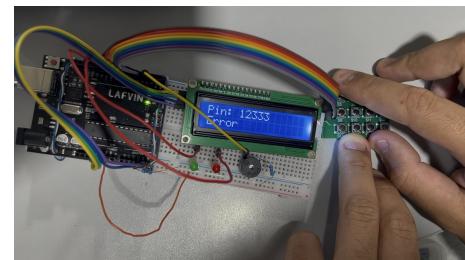


Figura 7. Mensaje Error en el LCD y LED rojo encendido tras ingreso de PIN incorrecto. Fuente: elaboración propia.

**V-D2. Gestión de intentos y bloqueo:** Tras tres intentos consecutivos incorrectos, el sistema ingresa automáticamente en modo de **bloqueo**. En esta condición, el LED rojo y el buzzer alternan su activación de forma intermitente, acompañados del mensaje Bloqueado en el LCD.

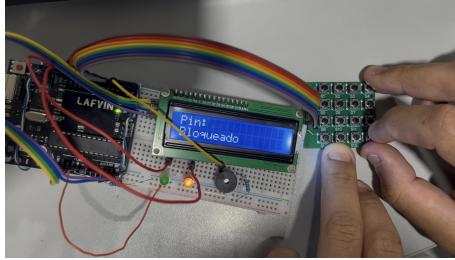


Figura 8. Estado de bloqueo: mensaje Bloqueado en LCD, LED rojo y buzzer activos. Fuente: elaboración propia.

El bloqueo permanece activo indefinidamente hasta que se presiona la tecla maestra D, que actúa como una llave de desbloqueo simbólica. Una vez presionada, el sistema apaga las señales de alarma, restablece el contador de intentos y retorna al modo normal de operación, mostrando el mensaje Listo.

*V-D3. Cambio de PIN:* Se verificó correctamente el proceso de modificación de la contraseña utilizando la tecla C para iniciar la secuencia. El sistema solicita primero el PIN actual y valida su coincidencia con el valor almacenado en la EEPROM. Si es correcto, solicita el nuevo PIN (entre 4 y 6 dígitos) y luego una segunda confirmación.

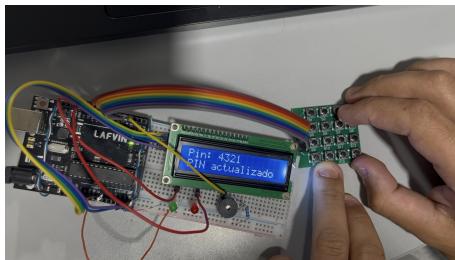


Figura 9. Proceso de cambio de PIN completado exitosamente: mensaje PIN actualizado en LCD y confirmación mediante LED verde y pitidos breves. Fuente: elaboración propia.

Ante coincidencia, el nuevo valor es grabado en la EEPROM, mostrando el mensaje PIN actualizado, junto con la confirmación sonora (tres pulsos breves) y el encendido momentáneo del LED verde. Si los PINs no coinciden o la longitud no es válida, se muestra el error correspondiente y se enciende brevemente el LED rojo.

*V-D4. Reinicio con tecla maestra:* Durante las pruebas del modo de bloqueo, se comprobó el correcto funcionamiento de la tecla maestra D, la cual permite reiniciar el sistema en cualquier estado. Al ser presionada, se apagan las señales de error o alarma, se reinician los contadores de intentos, y se emite la secuencia de confirmación (tres pulsos cortos de buzzer y LED verde), mostrándose el mensaje MASTER OK en la pantalla.

*V-D5. Síntesis de resultados:* El sistema respondió correctamente ante todos los escenarios previstos: detección de errores, bloqueo, cambio de clave, reinicio y validación. La coordinación entre las salidas luminosas, sonoras y visuales permitió una retroalimentación clara al usuario, y la persistencia del PIN en EEPROM aseguró la conservación

de la configuración entre reinicios. No se detectaron fallos de lectura ni errores en la escritura de memoria, confirmando la robustez del diseño implementado.

## VI. CONCLUSIONES

### VI-A. Plotter

### VI-B. Seleccionador de colores

### VI-C. Piano

El desarrollo del piano electrónico permitió aplicar conceptos fundamentales del manejo de periféricos del microcontrolador ATmega328P, en particular el uso de temporizadores para la generación de señales PWM y la comunicación UART para el intercambio de comandos externos.

El sistema demostró un funcionamiento estable y confiable, logrando la reproducción precisa de las 12 notas musicales y una correcta interpretación de las canciones predefinidas. La calidad del sonido obtenida mediante el buzzer fue adecuada, con una frecuencia de salida clara y sin distorsiones perceptibles.

La implementación de la comunicación serial aportó una capa adicional de control, permitiendo al usuario seleccionar canciones o volver al modo manual de manera sencilla. Si bien no se desarrolló el comando STOP ni el cambio de octavas, los objetivos principales del ejercicio fueron alcanzados con éxito.

En términos generales, este ejercicio evidenció una correcta integración entre hardware y software, así como una adecuada gestión de temporización y respuesta a eventos. Como líneas de mejora, se puede proponer incorporar un sistema de control de volumen o modulación, implementar el comando de detención, y explorar el uso de interrupciones para optimizar la detección de teclas y la eficiencia del sistema.

Este módulo representa un ejemplo claro de la integración entre teoría de control, electrónica digital y fundamentos acústicos aplicados al desarrollo de sistemas embebidos musicales.

### VI-D. Cerradura electrónica

El desarrollo de la cerradura electrónica permitió aplicar de forma integrada los conocimientos sobre manejo de periféricos digitales, comunicación I<sup>2</sup>C, almacenamiento no volátil y control secuencial mediante software embebido.

El sistema demostró un funcionamiento estable, con correcta interacción entre el teclado matricial, la pantalla LCD, los indicadores luminosos y el buzzer piezoelectrónico, validando la lógica de estados implementada.

El uso de la memoria EEPROM del ATmega328P permitió conservar el PIN de acceso incluso ante la pérdida de alimentación, lo que refleja un diseño robusto y funcional para aplicaciones de control de acceso o autenticación básica.

Asimismo, la implementación modular del código facilitó la comprensión, depuración y posterior ampliación del sistema, ya que cada bloque (LCD, teclado, EEPROM y retroalimentación) se gestionó de manera independiente.

Desde el punto de vista funcional, el sistema cumplió con todos los objetivos planteados: limitó correctamente los intentos de acceso, gestionó el bloqueo mediante una alarma visual y sonora, permitió la actualización segura del PIN y ofreció una retroalimentación clara al usuario en cada etapa del proceso.

Como líneas de mejora, se propone incorporar un sistema de control de volumen o modulación del buzzer, implementar la gestión de temporización mediante interrupciones para optimizar la eficiencia energética, y considerar la integración de un sensor adicional (por ejemplo, magnético o de proximidad) para detectar la apertura física del mecanismo. Otra posible extensión sería implementar comunicación serial con un sistema externo para el registro de eventos o intentos fallidos de acceso.

En síntesis, la cerradura electrónica desarrollada evidencia la capacidad del microcontrolador ATmega328P para integrar entrada, procesamiento y salida de datos en tiempo real, constituyendo una aplicación representativa de sistemas embebidos orientados a la seguridad.

## REFERENCIAS

- [1] Microchip Technology Inc. Atmega328p datasheet. Documento técnico del microcontrolador utilizado en todos los ejercicios del laboratorio. [Online]. Available: [https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
- [2] ETC / Manorshi Electronics. (2024) Emx-7t05sp passive piezoelectric buzzer — datasheet. Buzzer piezoelectrónico pasivo utilizado para la generación de notas musicales mediante señal PWM en el candado electrónico. [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.es/html-pdf/229750/ETC2/EMX-7T05SP/99/1/EMX-7T05SP.html>
- [3] Handson Technology. (2024) I2c\_1602 lcd module — technical data. Pantalla LCD 16x2 con interfaz I<sub>C</sub> utilizada para visualización de datos en el laboratorio. [Online]. Available: [https://www.handsontec.com/datasheets/module/I2C\\_1602\\_LCD.pdf](https://www.handsontec.com/datasheets/module/I2C_1602_LCD.pdf)
- [4] OKYSTAR. (2023) Oky0272 — 4x4 matrix keypad module datasheet. Teclado matricial 4x4 utilizado para ingreso de contraseñas en la cerradura electrónica. [Online]. Available: <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/O/OKY0272.PDF>
- [5] Tower Pro. (2022) Sg90 micro servo — technical specifications. Servo SG90 empleado para el control de movimiento en el módulo del laboratorio. [Online]. Available: [http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1\\_EE/stores/sg90\\_datasheet.pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf)
- [6] Generic / Advanced Photonix. (2023) Light dependent resistor (ldr) — general specifications. Sensor de luminosidad utilizado en el selector de color para detección de intensidad de luz. [Online]. Available: <https://components101.com/sites/default/files/component-datasheet/LDR%20Datasheet.pdf>
- [7] Mateo Lecuna - Mateo Sanchez. (2025) Evidencias del laboratorio 2 — repositorio tec.micro. Carpeta con videos, imágenes y registros del funcionamiento de los sistemas desarrollados en el Laboratorio 2. Accedido el 18 de octubre de 2025. [Online]. Available: <https://github.com/MateoLecuna/Tec.Micro/tree/main/lab2/Evidencias>
- [8] CASTIGADOSUY. (2023) Canción asesina [video]. Accedido el 18 de octubre de 2025. Fuente utilizada para la transcripción de la primera melodía. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=ZSH1W\\_cJ31Q](https://www.youtube.com/watch?v=ZSH1W_cJ31Q)
- [9] WildMojarras. (2020) Super mario bros theme [score]. Accedido el 18 de octubre de 2025. Fuente utilizada para la transcripción de la segunda melodía. [Online]. Available: <https://musescore.com/user/27687306/scores/4913846>
- [10] circuito.io. (2018) Arduino uno pinout diagram. Referencia de pines y funciones del microcontrolador ATmega328P en la placa Arduino Uno. [Online]. Available: <https://www.circuito.io/blog/arduino-uno-pinout/>
- [11] Microchip Community (AVR Freaks). Avr freaks — comunidad de desarrolladores avr. Foros técnicos y soluciones prácticas sobre AVR. [Online]. Available: <https://www.avrfreaks.net/>
- [12] Carpeta del laboratorio (google drive). Carpeta compartida del laboratorio con evidencias y videos de funcionamiento. [Online]. Available: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1fPOaILozXeapRgDPDNWT1TRhAYr1PPPT>
- [13] Laboratorio de Microcontroladores, UTEC, “Repositorio de laboratorio de microcontroladores (tec.micro),” <https://github.com/MateoLecuna/Tec.Micro>, 2025, repositorio de código y versiones de los ejercicios del laboratorio.
- [14] Electro Dh. (2024) 5 mm white led — datasheet. LED blanco de 5 mm utilizado como elemento indicador en los módulos experimentales del laboratorio. [Online]. Available: [https://static.electrodh.com/datasheets/12/12.675\\_5\\_B\\_C\\_20K-Datasheet.pdf](https://static.electrodh.com/datasheets/12/12.675_5_B_C_20K-Datasheet.pdf)

## VII. ANEXOS

### VII-A. Esquemas de conexión

**VII-A1. Piano electrónico:** En la Figura 10 se muestra el esquema de conexión del piano electrónico, elaborado en Tinkercad®. Se pueden observar las conexiones entre el microcontrolador ATmega328P, los pulsadores, y el buzzer piezoelectrónico pasivo EMX-7T05SP.

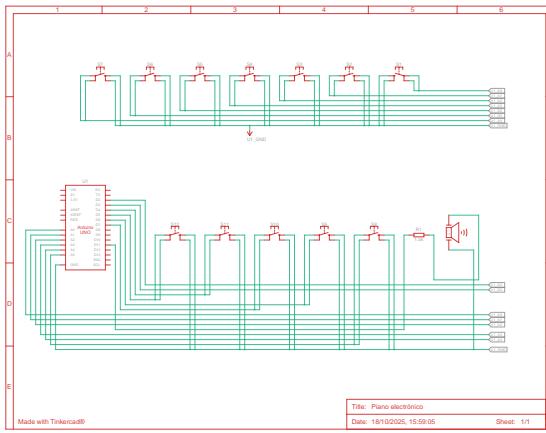


Figura 10. Esquema de conexión del piano electrónico. Elaboración propia en Tinkercad®.

**VII-A2. Cerradura electrónica:** En la Figura 11 se presenta el esquema de conexión del sistema de cerradura electrónica. El circuito fue diseñado en Tinkercad® y muestra la interconexión entre el microcontrolador ATmega328P, el teclado matricial 4x4, la pantalla LCD 16x2 con interfaz I<sup>2</sup>C, los LEDs indicadores (rojo y verde) y el buzzer de señalización.

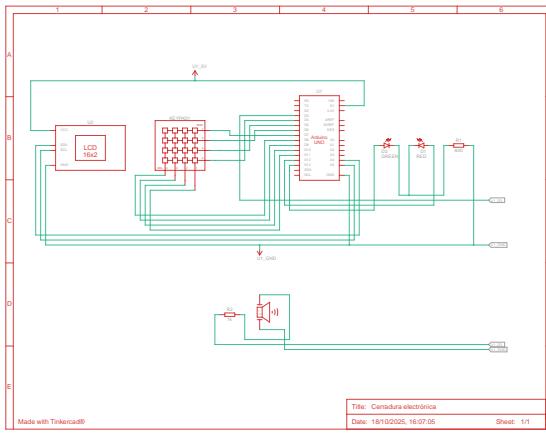


Figura 11. Esquema de conexión del candado electrónico. Elaboración propia en Tinkercad®.

### VII-B. Códigos fuente

**VII-B1. Piano electrónico:** A continuación se detalla la estructura de archivos del proyecto del piano electrónico:

```
-- main.c
-- piano.h
-- piano.c
-- sonidos.h
-- sonidos.c
-- funciones.h
-- funciones.c
-- figuras.h
-- figuras.c
-- canciones.h
-- canciones.c
-- hw_pins.h
-- hw_pins.c
-- uart.h
-- uart.c
```

El código fuente completo del proyecto se encuentra disponible en el repositorio de GitHub [13].

### VII-C. Evidencias

Las evidencias de la realización de los ejercicios del laboratorio dos, se encuentran adjuntas en la carpeta “Evidencias” [7]. Dentro de ella, se encuentran las fotos, videos, documentos, que demuestran la correcta implementación y funcionamiento de los sistemas desarrollados en este laboratorio.

### VII-D. Tablas complementarias

A continuación se presentan las tablas complementarias las cuales resumen la información técnica relevante utilizada durante el desarrollo y programación de los sistemas.

#### VII-D1. Piano:

**VII-D1a. Correspondencia entre notas y frecuencias del piano:** En la Tabla I se presenta la correspondencia entre las notas musicales, sus frecuencias y el índice utilizado dentro del arreglo `notas[]` en el programa del piano electrónico. Los valores corresponden a la octava número 4, considerada la octava base del sistema.

| Nota | Frecuencia (Hz) | Índice en arreglo | Octava |
|------|-----------------|-------------------|--------|
| DO   | 262             | 0                 | 4      |
| DO#  | 277             | 1                 | 4      |
| RE   | 294             | 2                 | 4      |
| RE#  | 311             | 3                 | 4      |
| MI   | 330             | 4                 | 4      |
| FA   | 349             | 5                 | 4      |
| FA#  | 370             | 6                 | 4      |
| SOL  | 392             | 7                 | 4      |
| SOL# | 415             | 8                 | 4      |
| LA   | 440             | 9                 | 4      |
| LA#  | 466             | 10                | 4      |
| SI   | 494             | 11                | 4      |

Cuadro I

CORRESPONDENCIA ENTRE NOTAS, FRECUENCIAS E ÍNDICES DE LA OCTAVA 4 UTILIZADA EN EL PIANO ELECTRÓNICO.

Las frecuencias de las octavas superiores (5, 6 y 7) se obtuvieron a partir de las frecuencias de referencia de la octava 4, utilizando la relación:

$$f_n = f_0 \times 2^n$$

donde  $f_n$  representa la frecuencia de una nota en la octava  $n$ , y  $f_0$  es la frecuencia de la misma nota en la octava base. De esta forma, el sistema puede reproducir diferentes rangos tonales de manera programática.

**VII-D1b. Mapa de pines del piano electrónico:** En la Tabla II se detalla la asignación de pines del microcontrolador ATmega328P utilizados en el proyecto del piano electrónico, incluyendo las funciones específicas de cada pin.

| Señal        | Pin Arduino        | Descripción                                 |
|--------------|--------------------|---|
| BUZZER (PWM) | D3 (OC2B)          | Salida PWM para tono (Timer2).              |
| UART_TX      | D1 (TX)            | Transmisión serie a 9600 baud.              |
| UART_RX      | D0 (RX)            | Recepción serie (comandos).                 |
| TECLA 1..12  | D2, D4..D9, A0..A3 | Entradas con resistencias pull-up internas. |

Cuadro II

ASIGNACIÓN DE PINES UTILIZADA EN EL PIANO ELECTRÓNICO.

**VII-D1c. Comandos UART implementados:** Los comandos UART disponibles para el control del piano electrónico se presentan en la Tabla III.

| Comando | Acción               | Observación                         |
|---------|----------------------|-------------------------------------|
| C1      | Reproduce canción 1. | Melodía predefinida en canciones.c. |
| C2      | Reproduce canción 2. | Melodía predefinida en canciones.c. |
| PIANO   | Modo manual.         | Habilita lectura de teclas 1..12.   |

Cuadro III

COMANDOS UART DISPONIBLES PARA EL CONTROL DEL PIANO ELECTRÓNICO.

Estos comandos permiten al usuario seleccionar entre la reproducción automática de melodías predefinidas o el modo manual para tocar notas individuales mediante los pulsadores conectados al microcontrolador.

**VII-D1d. Figuras musicales y duración:** En la Tabla IV se muestra la relación de duraciones empleada para programar las melodías en el piano.

| Figura    | Relación vs negra | Ejemplo (ms) si negra = 500 ms |
|-----------|-------------------|--------------------------------|
| Redonda   | ×4                | 2000                           |
| Blanca    | ×2                | 1000                           |
| Negra     | ×1                | 500                            |
| Corchea   | ×1/2              | 250                            |
| Semicor.  | ×1/4              | 125                            |
| Semisemi. | ×1/8              | 62.5                           |

Cuadro IV

RELACIÓN DE DURACIONES EMPLEADA PARA PROGRAMAR LAS MELODIAS.

Estas duraciones permiten definir el ritmo de las melodías reproducidas por el piano electrónico, facilitando la programación de diferentes estilos musicales.

### VII-D2. Cerradura electrónica:

**VII-D2a. Mapa del teclado matricial 4x4:** En la Tabla V se detalla la disposición de las teclas del teclado matricial 4x4 utilizado en la cerradura electrónica, así como las funciones asociadas a cada una dentro del sistema. Esta asignación permitió simplificar la interacción del usuario con el microcontrolador y establecer un conjunto claro de comandos de control.

| Fila/Columna | C0 | C1 | C2 | C3                |
|--------------|----|----|----|-------------------|
| <b>F0</b>    | 1  | 2  | 3  | A (Confirmar)     |
| <b>F1</b>    | 4  | 5  | 6  | B (Borrar)        |
| <b>F2</b>    | 7  | 8  | 9  | C (Cambiar PIN)   |
| <b>F3</b>    | *  | 0  | #  | D (Llave maestra) |

Cuadro V

DISTRIBUCIÓN Y FUNCIONES ASIGNADAS A CADA TECLA DEL TECLADO MATRICIAL 4x4. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El mapeo se mantuvo constante durante todas las pruebas, garantizando la coherencia entre el hardware y la lógica del programa, y permitiendo una detección precisa de cada pulsación sin interferencias entre filas y columnas.

**VII-D2b. Mensajes mostrados en pantalla LCD:** La Tabla VI resume los mensajes principales que el sistema muestra en el LCD 16x2 durante las distintas etapas de operación. Cada texto cumple una función específica de retroalimentación para el usuario, indicando tanto los estados normales de funcionamiento como las condiciones de error o advertencia.

| Estado del sistema            | Mensaje en pantalla LCD |
|-------------------------------|-------------------------|
| Inicio del sistema            | Pin:                    |
| PIN correcto                  | OK                      |
| PIN incorrecto                | Error                   |
| Longitud insuficiente         | Min 4 digitos           |
| Bloqueo por intentos fallidos | Bloqueado               |
| Modo cambio de PIN (actual)   | Ingrese actual          |
| Modo cambio de PIN (nuevo)    | Nuevo PIN (4-6)         |
| Modo confirmación de PIN      | Confirmar nuevo         |
| PIN actualizado               | PIN actualizado         |
| Reinicio por llave maestra    | MASTER OK               |

Cuadro VI

MENSAJES VISUALIZADOS EN LA PANTALLA LCD DURANTE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estos mensajes facilitaron la interacción usuario-sistema, brindando indicaciones claras sobre cada fase del proceso de validación o configuración y reduciendo la posibilidad de errores en la manipulación del dispositivo.

**VII-D2c. Comportamiento de LEDs y buzzer:** La Tabla VII describe la correspondencia entre los eventos del sistema y las señales de salida emitidas por los indicadores luminosos (LEDs) y el buzzer piezoeléctrico. Estas salidas fueron fundamentales para proporcionar una retroalimentación inmediata, tanto visual como sonora, sobre el estado actual de la cerradura.

| Evento                | LED Verde       | LED Rojo        | Buzzer                |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| PIN correcto          | Encendido breve | Apagado         | 3 pulsos cortos       |
| PIN incorrecto        | Apagado         | Encendido 0.5 s | 1 tono continuo 0.5 s |
| PIN demasiado corto   | Apagado         | Encendido breve | 1 pitido corto        |
| Bloqueo               | Apagado         | Intermitente    | Alarma intermitente   |
| Cambio de PIN exitoso | Encendido breve | Apagado         | 3 pulsos cortos       |
| Cambio de PIN erróneo | Apagado         | Encendido breve | 1 pitido corto        |
| Reinicio (tecla D)    | Encendido breve | Apagado         | 3 pulsos cortos       |

Cuadro VII

RELACIÓN ENTRE EVENTOS DEL SISTEMA Y LAS SALIDAS DE RETROALIMENTACIÓN (LEDS Y BUZZER). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El esquema de respuesta permitió distinguir fácilmente entre acciones exitosas, errores y condiciones de alarma, mejorando la usabilidad del sistema y confirmando la correcta sincronización entre hardware y software.