

# Microcontroladores: Laboratorio 1

1<sup>st</sup> Mateo Lecuna

Ingeniería en Mecatrónica

Universidad Tecnológica (UTEC)

Fray Bentos, Uruguay

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

**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

### Objetivos específicos

## II. MARCO TEÓRICO

### II-A. Piano

El piano electrónico 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 electrónico 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.

## II-B. 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 4×4 como interfaz de ingreso, una pantalla LCD 16×2 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].

**II-B1. Ingreso por teclado matricial 4×4:** 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 4×4 utilizado [2].

**II-B2. Visualización: LCD 16×2 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 expansor 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 expansor. 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].

**II-B3. 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].

**II-B4. 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.

**II-B5. 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 periodos de activación/desactivación de LED rojo y buzzer hasta la intervención con la tecla maestra. El buzzer piezoeléctrico empleado funciona como transductor binario (encendido/apagado) para retroalimentación breve, diferenciándose del uso tonal continuo aplicado en el ejercicio del piano [4].

**II-B6. 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.

**II-B7. 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.

### III. METODOLOGÍA

#### III-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 con 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 [5].

#### III-B. Plotter

#### III-C. Seleccionador de colores

#### III-D. Piano electrónico

##### III-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 piezoeléctrico.
- Resistencias pull-up internas configuradas por software.
- Conexiones con jumpers y protoboard.

**III-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.

**III-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 [6]. 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 [7]. 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.

#### III-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.

**III-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 piezoeléctrico 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.

El diagrama de conexión se presenta en la sección de anexos correspondiente (Figura 2).

**III-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.).

*III-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.

*III-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.

## IV. RESULTADOS

### IV-A. *Plotter*

### IV-B. *Seleccionador de colores*

### IV-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.

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.

### IV-D. *Cerradura electrónica*

## V. CONCLUSIONES

### V-A. *Plotter*

### V-B. *Seleccionador de colores*

### V-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.

#### V-D. Cerradura electrónica

##### REFERENCIAS

- [1] Microchip Technology Inc. Atmega328p datasheet. Documento técnico del microcontrolador utilizado en todos los ejercicios del laboratorio. [Online]. Available: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
- [2] 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>
- [3] Handson Technology. (2024) I2c 1602 lcd module — technical data. Pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C utilizada para visualización de datos en el laboratorio. [Online]. Available: [https://www.handsontec.com/dataspecs/module/I2C\\_1602\\_LCD.pdf](https://www.handsontec.com/dataspecs/module/I2C_1602_LCD.pdf)
- [4] ETC / Manorshi Electronics. (2024) Emx-7t05sp passive piezoelectric buzzer — datasheet. Buzzer piezoeléctrico 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>
- [5] 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>
- [6] 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\\_cJ3IQ](https://www.youtube.com/watch?v=ZSH1W_cJ3IQ)
- [7] 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>
- [8] 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/>
- [9] Microchip Community (AVR Freaks). Avr freaks — comunidad de desarrolladores avr. Foros técnicos y soluciones prácticas sobre AVR. [Online]. Available: <https://www.avrfreaks.net/>
- [10] 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/1fP0aLlozXeapRgDPDNWT1TRhAYr1PPPT>
- [11] 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.
- [12] 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)
- [13] 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](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/LDR%20Datasheet.pdf)
- [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)

## VI. ANEXOS

### VI-A. Esquemas de conexión

**VI-A1. Piano electrónico:** En la Figura 1 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 piezoeléctrico pasivo EMX-7T05SP.

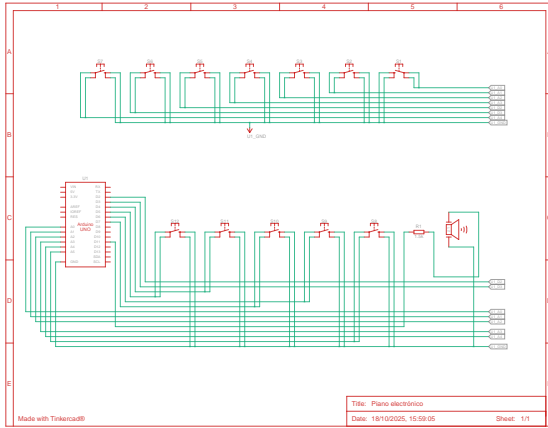


Figura 1. Esquema de conexión del piano electrónico. Elaboración propia en Tinkercad®.

**VI-A2. Cerradura electrónica:** En la Figura 2 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 I²C, los LEDs indicadores (rojo y verde) y el buzzer de señalización.

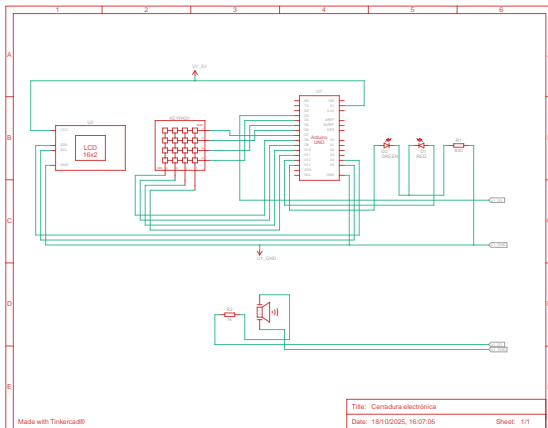


Figura 2. Esquema de conexión del candado electrónico. Elaboración propia en Tinkercad®.

### VI-B. Códigos fuente

**VI-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 [11].

### VI-C. Evidencias

Las evidencias de la realización de los ejercicios del laboratorio dos, se encuentran adjuntas en la carpeta “Evidencias” [5]. Dentro de ella, se encuentran las fotos, videos, documentos, que demuestran la correcta implementación y funcionamiento de los sistemas desarrollados en este laboratorio.

### VI-D. Tablas complementarias

A continuación se presentan las tablas complementarias correspondientes al piano electrónico, las cuales resumen la información técnica relevante utilizada durante el desarrollo y programación del sistema.

**VI-D1. Correspondencia entre notas y frecuencias del piano electrónico:** 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.

**VI-D2. 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.

**VI-D3. 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 <code>canciones.c</code> .
C2	Reproduce canción 2.	Melodía predefinida en <code>canciones.c</code> .
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.

**VI-D4. Figuras musicales y duración:** En la Tabla IV se muestra la relación de duraciones empleada para programar las melodías en el piano electrónico.

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

Cuadro IV

RELACIÓN DE DURACIONES EMPLEADA PARA PROGRAMAR LAS MELODÍAS.

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