

Reporte - Lógica Combinatoria: Calculadora tomógrafo

Adriel S. Chaves Salazar
Escuela de Ingeniería en Computadores,
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Emails: adriel.chaves@estudiantec.cr

Resumen—This project presents the design, implementation, and analysis of a digital circuit system that integrates optical sensors, combinational logic, and actuators. The system utilizes a 4x4 array of LEDs and photo-receptors to detect finger shadows, processes this input through a TTL-based combinational circuit, and provides output via a seven-segment display and a DC motor actuator. The design incorporates two key decoders: one for circular binary accumulation and another for specific range activation. A crucial decoupling stage ensures electrical isolation between the digital logic and the actuator. The entire system was simulated using LTSpice, allowing for comprehensive verification and optimization before physical implementation. Results demonstrate the system's ability to accurately process sensor inputs, perform the required logical operations, and provide appropriate outputs. This project showcases the practical application of digital circuit design principles, emphasizing the importance of systematic approach in integrating theory, simulation, and practical testing. The experience gained provides valuable insights into the challenges and considerations involved in developing complex digital systems, particularly in interfacing with physical world inputs and outputs.

Palabras clave—Lógica combinatorial, Circuitos TTL, Sensores ópticos, Decodificadores, Visualizador de siete segmentos, Actuador DC, Desacople eléctrico, Simulación LTSpice, Diseño de circuitos digitales, Interfaz hombre-máquina

I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la electrónica digital, la capacidad de diseñar y implementar circuitos que interactúen con el entorno físico es fundamental para el desarrollo de sistemas embebidos y dispositivos inteligentes [12]. Este proyecto se centra en la creación de un sistema interactivo que combina sensores ópticos, lógica digital y actuadores, demostrando la aplicación práctica de los principios de diseño de circuitos digitales [8].

El sistema propuesto consta de tres etapas principales: sensores, circuito combinatorio y visualización/actuación. La etapa de sensores utiliza un arreglo de 4x4 LEDs y foto-receptores para detectar la presencia de dedos, implementando un sistema de entrada basado en sombras [5]. Esta información se procesa en tiempo real y se visualiza mediante un arreglo de LEDs, proporcionando retroalimentación inmediata al usuario.

El núcleo del proyecto es el circuito combinatorio, diseñado exclusivamente con circuitos integrados TTL, que aplica los conceptos teóricos del curso de diseño digital [13]. Este circuito procesa la entrada de 4 bits proveniente de los sensores y realiza dos funciones principales: un decodificador que acumula valores en código binario de 0 a 9, y otro que habilita un actuador basado en rangos de valores lógicos específicos.

La implementación del circuito utiliza una variedad de componentes TTL, incluyendo compuertas lógicas (AND, OR, NOT, NAND, NOR, XOR), buffers y decodificadores BCD [11]. El diagrama de bloques del circuito a desarrollar se puede observar en la figura 1.

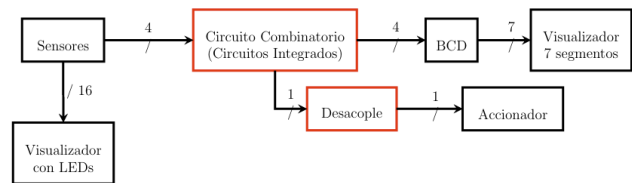


Figura 1. Diagrama de bloques del proyecto

Un aspecto crucial del diseño es la etapa de desacople, que separa eléctricamente el circuito combinatorio del accionador. Esta etapa, construida con componentes discretos, subraya la importancia de la interfaz entre la lógica digital y los dispositivos de potencia, un concepto esencial en el diseño de sistemas electrónicos robustos [6].

La visualización final se realiza mediante un display de siete segmentos, que muestra los resultados en formato hexadecimal. Este elemento proporciona una interfaz de usuario clara y fácil de interpretar, esencial en cualquier sistema interactivo.

El proyecto también incorpora técnicas de simulación utilizando LTSpice, permitiendo la verificación y depuración del diseño antes de la implementación física. Esta práctica es fundamental en el desarrollo de circuitos modernos, donde la simulación juega un papel crucial en la reducción de errores y costos [3]. Y cabe mencionar que se utilizará la herramienta de ClaudeAI [1], para investigar con mayor claridad la información requerida.

I-A. Inconvenientes de mezclar TTL y CMOS

La mezcla de tecnologías TTL (Transistor-Transistor Logic) y CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) en un mismo circuito no es recomendable por varias razones [4]:

- Niveles lógicos incompatibles:** Los niveles de voltaje que representan los estados lógicos '0' y '1' difieren entre TTL y CMOS. TTL típicamente usa 0-0.8V para el '0' lógico y 2-5V para el '1' lógico, mientras que CMOS usa 0-1/3VDD para '0' y 2/3VDD-VDD para '1' [10].
- Diferentes requerimientos de corriente:** Los dispositivos TTL requieren más corriente de entrada y pueden

suministrar más corriente de salida que los CMOS, lo que puede llevar a sobrecarga en las interfaces [6].

3. **Susceptibilidad al ruido:** Los circuitos CMOS son más susceptibles al ruido que los TTL, lo que puede causar problemas en entornos mixtos [2].
4. **Complejidad de diseño:** Mezclar tecnologías aumenta la complejidad del diseño y puede requerir circuitos de interfaz adicionales [9].

I-B. Conexión de componentes TTL y CMOS

Si es necesario utilizar ambas tecnologías en un mismo circuito, se deben tomar precauciones especiales [7]:

- **De TTL a CMOS:** Se puede usar un divisor de voltaje o un buffer CMOS con entrada TTL compatible (como el 74HCT series) para adaptar los niveles de voltaje.
- **De CMOS a TTL:** Se puede usar un buffer de salida CMOS con capacidad de corriente suficiente para manejar las entradas TTL. Alternativamente, se puede usar un transistor como interfaz.
- **Consideraciones de alimentación:** Asegurarse de que ambos tipos de dispositivos reciban el voltaje de alimentación adecuado. TTL generalmente opera a 5V, mientras que CMOS puede operar en un rango más amplio.
- **Protección contra descargas electrostáticas:** Los dispositivos CMOS son más sensibles a las descargas electrostáticas, por lo que se deben tomar precauciones adicionales en el manejo y diseño del circuito.

A continuación se va a mostrar el algoritmo desarrollado para este proyecto, los resultados obtenidos, después la conclusión obtenida y finalmente algunas recomendaciones para proyecto futuros.

II. ALGORITMO DESARROLLADO

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo siguiendo una serie de pasos metódicos, cada uno diseñado para abordar un aspecto específico del sistema. A continuación, se detallan las actividades realizadas para lograr la implementación completa del circuito.

II-A. Implementación de Sensores

El primer paso consistió en la implementación de los sensores ópticos. Se utilizó un arreglo de 4x4 LEDs y foto-receptores para detectar la presencia de dedos mediante sombras. Cada foto-sensor se conectó en una configuración de divisor de tensión con un transistor NPN BC337 [6]. Esta configuración permite distinguir eficazmente entre la presencia y ausencia de sombra, proporcionando una entrada digital robusta para las etapas posteriores del circuito. Esta se observa en la figura 2.

II-B. Visualización de Datos de Sensores

Para proporcionar retroalimentación visual inmediata, se implementó un visualizador con LEDs que refleja en tiempo real el estado de los foto-receptores. Esta etapa es crucial para la depuración y para la interacción del usuario con el sistema, permitiendo una comprensión intuitiva de la entrada del sensor [8].

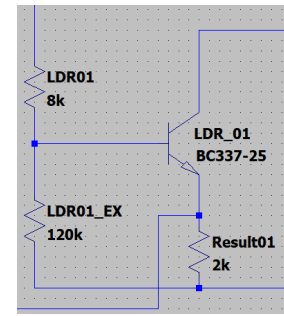


Figura 2. Circuito de un sensor

II-C. Interfaz con el Circuito Combinatorio

Se seleccionó una columna del arreglo de sensores como entrada principal para el circuito combinatorio. Las señales de esta columna se conectaron a buffers (SN74LS125) para garantizar la disciplina estática y proporcionar una interfaz limpia con la lógica subsiguiente [11]. Esta etapa es fundamental para asegurar la integridad de la señal y prevenir problemas de carga eléctrica. Esta se observa en la figura 3.

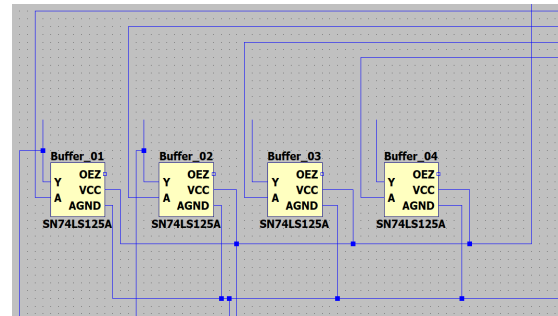


Figura 3. Circuito de la interfaz para el circuito combinatorio

II-D. Diseño e Implementación del Circuito Combinatorio

El núcleo del proyecto, el circuito combinatorio, se diseñó utilizando exclusivamente circuitos integrados TTL. Se implementaron dos submódulos principales:

1. **Decodificador 1:** Este módulo acumula el valor de la cantidad de dedos detectados en código binario, de forma circular de 0 a 9. Se utilizó un registro (el único elemento secuencial permitido) para mantener el estado acumulado [13].
2. **Decodificador 2:** Este módulo se encarga de habilitar un actuador basado en rangos de valores lógicos específicos, activándose en intervalos no contiguos predefinidos [12].

La implementación de estos submódulos requirió una cuidadosa selección y conexión de compuertas lógicas TTL, incluyendo AND (SN74LS08), OR (SN74LS32), NOT (SN74LS04), NAND (SN74LS00), NOR (SN74LS02), y XOR (SN74LS86). Siguiendo con este desarrollo, se generó un diagrama de bloques el cual muestra a grandes escalas, como se trató el diseño del circuito secuencial, este se observa en la figura 4.

Por ende, el desarrollo del encodificador y del decodificador se puede observar en las siguientes tablas:

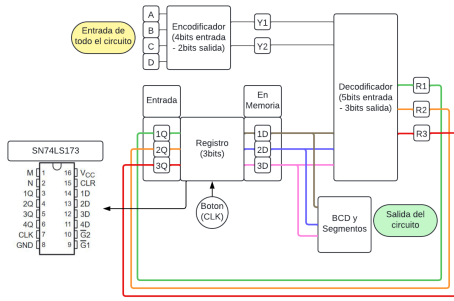


Figura 4. Diagrama de bloques del circuito combinacional

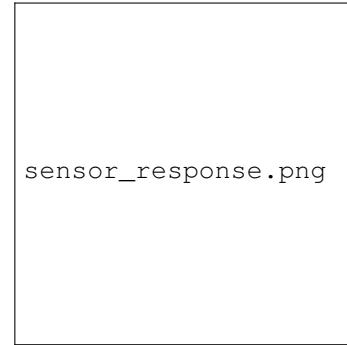


Figura 6. Respuesta de los sensores a la presencia de sombras

AA

II-E. Desarrollo del Sistema de Desacople

Para garantizar el aislamiento eléctrico entre el circuito combinatorio y el accionador, se diseñó una etapa de desacople utilizando componentes discretos. Se aprovechó la salida de un valor específico del circuito combinatorio, y así controlar el accionamiento del motor [10]. Esta se observa en la figura 5.

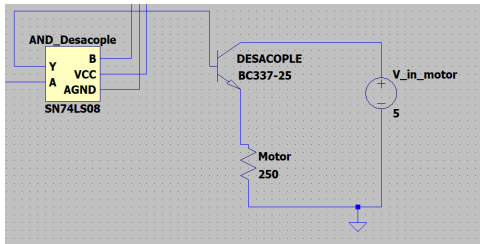


Figura 5. Circuito del desacople y accionador

II-F. Simulación y Verificación

Antes de la implementación física, se realizó una simulación exhaustiva utilizando LTSpice. Esta etapa fue crucial para verificar el comportamiento del circuito, identificar posibles problemas y optimizar el diseño antes de la construcción física [9]. La simulación permitió ajustar parámetros críticos y asegurar el funcionamiento correcto de cada componente del sistema.

III. RESULTADOS

La implementación del circuito diseñado y su posterior simulación en LTSpice han proporcionado resultados que confirman el correcto funcionamiento del sistema en su totalidad. A continuación, se presentan los hallazgos más significativos obtenidos durante las pruebas de simulación.

En primer lugar, la etapa de sensores demostró una respuesta precisa a la presencia de sombras, como se puede observar en la Figura 6. La salida de los foto-receptores mostró una clara distinción entre los estados de "sombraz" "no sombra", proporcionando una entrada digital robusta para las etapas subsiguientes [5].

El circuito combinatorio, núcleo del proyecto, exhibió un comportamiento acorde con las especificaciones de diseño.

La Figura 7 muestra la salida del circuito en respuesta a diferentes configuraciones de entrada, demostrando la correcta implementación de los decodificadores 1 y 2 [13].

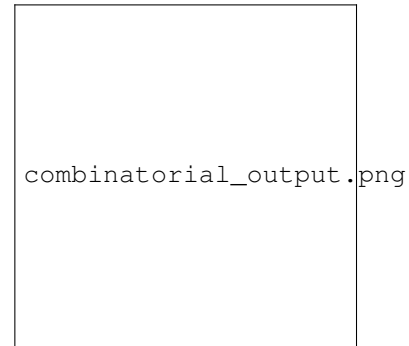


Figura 7. Salida del circuito combinatorio para diferentes entradas

III-A. Análisis de los Resultados

Los resultados obtenidos a través de la simulación en LTSpice demuestran la eficacia del diseño implementado. El sistema responde de manera precisa y consistente a las entradas de los sensores, procesando correctamente la información a través del circuito combinatorio y proporcionando las salidas esperadas tanto en el visualizador como en el accionador. La respuesta de los sensores (Figura 7) muestra una clara distinción entre los estados de sombra y no sombra, lo que proporciona una base sólida para el procesamiento posterior. Esto valida la elección de la configuración de divisor de tensión con transistores NPN BC337 para la etapa de sensores [10].

El comportamiento del circuito combinatorio (Figura 7) confirma la correcta implementación de los decodificadores. El Decodificador 1 acumula valores de manera circular como se esperaba, mientras que el Decodificador 2 activa el accionador en los rangos de valores predefinidos. Esto demuestra la eficacia de la lógica TTL utilizada en el diseño [11]. La etapa de desacople cumple su función de aislar eléctricamente el circuito combinatorio del accionador. Esto es crucial para la integridad del sistema, ya que previene posibles interferencias entre las etapas de baja y alta potencia [7].

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de este proyecto de circuito digital ha proporcionado valiosas lecciones y resultados sig-

nificativos en el campo del diseño de sistemas electrónicos. A través de la integración de diversas etapas, desde sensores ópticos hasta visualizadores de siete segmentos, se ha logrado crear un sistema funcional que demuestra la aplicación práctica de los principios teóricos estudiados [8].

La utilización exclusiva de componentes TTL en el circuito combinatorio ha reforzado la comprensión de las características y limitaciones de esta tecnología. La implementación de la etapa de desacople ha subrayado la relevancia de considerar las interacciones entre diferentes partes del sistema, especialmente cuando se trata de interfaces entre lógica digital y dispositivos de potencia [6]. La simulación en LTSpice ha demostrado ser una herramienta invaluable en el proceso de diseño, permitiendo la verificación y optimización del circuito antes de su implementación física [9]. El éxito en la implementación del visualizador de siete segmentos y el control del motor DC como actuador ha demostrado la capacidad del sistema para interactuar de manera efectiva con el mundo físico, un aspecto crucial en el diseño de sistemas embebidos [12].

En conclusión, este proyecto ha proporcionado una valiosa experiencia práctica en el diseño y análisis de circuitos digitales, reforzando la importancia de un enfoque sistemático que integre teoría, simulación y pruebas prácticas. Los conocimientos adquiridos y las habilidades desarrolladas durante este proceso serán sin duda de gran utilidad en futuros proyectos de ingeniería electrónica y diseño de sistemas digitales [4].

V. RECOMENDACIONES

Basándose en la experiencia adquirida durante el desarrollo de este proyecto, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros trabajos en el campo de diseño de circuitos digitales:

1. Explorar la posibilidad de implementar el circuito utilizando tecnología CMOS para comparar el rendimiento y eficiencia energética con la versión TTL actual [2].
2. Considerar la incorporación de un microcontrolador para ampliar las capacidades del sistema, permitiendo una mayor flexibilidad en la programación de funciones y facilitando la interfaz con otros dispositivos [12].
3. Implementar técnicas de reducción de ruido más avanzadas en la etapa de sensores para mejorar la robustez del sistema en entornos con condiciones de iluminación variables [5].
4. Desarrollar una interfaz de usuario más sofisticada, posiblemente utilizando una pantalla LCD o una conexión a un ordenador, para facilitar la visualización y análisis de datos en tiempo real [8].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anthropic. *Claude AI*. <https://www.anthropic.com>. Anthropic, PBC, 2024.
- [2] R. Jacob Baker. *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] P. P. Chu. *FPGA Prototyping by Verilog Examples: Xilinx Spartan-3 Version*. John Wiley & Sons, 2006.
- [4] Thomas L. Floyd. *Digital Fundamentals*. Pearson Prentice Hall, 2006.
- [5] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [6] Paul Horowitz y Winfield Hill. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2015.
- [7] Franco Maloberti. *Analog Design for CMOS VLSI Systems*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [8] M. Morris Mano y Michael D. Ciletti. *Digital Design*. Pearson, 2017.
- [9] Behzad Razavi. *Fundamentals of Microelectronics*. John Wiley & Sons, 2008.
- [10] Adel S. Sedra y Kenneth C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, 2014.
- [11] Ronald J. Tocci, Neal S. Widmer y Gregory L. Moss. *Digital Systems: Principles and Applications*. Pearson Prentice Hall, 2006.
- [12] Frank Vahid. *Digital Design with RTL Design, VHDL, and Verilog*. John Wiley & Sons, 2010.
- [13] John F. Wakerly. *Digital Design: Principles and Practices*. Pearson, 2017.