

Una herramienta de diseño virtual de circuitos digitales para un aprendizaje basado en proyectos de ingeniería

Ing. Arturo J. Miguel de Priego Paz Soldán
amiguel@pucp.edu.pe
Chincha, Perú, 17 de abril 2018

Introducción

En 2003 surgió la oportunidad de enseñar durante los fines de semana un taller de ingeniería en el colegio nacional José Pardo y Barreda de Chincha, Perú, sobre la base de un currículo de Intel [1]. Se incluyeron temas básicos de circuitos digitales y para ayudar a los estudiantes con las prácticas se inició el desarrollo de un simulador digital para ahorrar tiempo y costos e incrementar la comprensión del diseño lógico con circuitos integrados TTL. Actualmente, dos versiones del simulador digital, 0.9.5 y 0.9.7a, gratuitas y de uso libre, se utilizan en varias universidades y escuelas secundarias de América Latina y Europa en cursos de introducción al diseño lógico con circuitos digitales. La versión 0.9.8 fue publicada en 2013 [2] y el 17 de abril de 2018 se lanzó la versión 0.9.8a pero con restricciones de almacenamiento y recuperación de archivos con el propósito de encontrar cooperación mutua para seguir desarrollando la herramienta. Este documento describe esta última versión y sus aplicaciones para la enseñanza, el aprendizaje el diseño de circuitos digitales.

Esta herramienta está diseñada para contribuir a que los estudiantes posean “un conocimiento práctico de los fundamentos de los sistemas digitales y fluidez en el empleo de sistemas y herramientas de cómputo modernas” [3]. El simulador está diseñado con una orientación a objetos y programado en C++ para Windows, y contiene varios elementos que ayudan a enseñar y aprender desde diferentes perspectivas y estilos de aprendizaje [4]. El programa permite aplicar el aprendizaje basado en indagación científica y el aprendizaje basado en proyectos de ingeniería y contribuye a orientar a los estudiantes hacia las disciplinas STEM (acrónimo inglés de ciencia, tecnología, ingeniería y matemática). La inspiración y ayuda para realizar el programa proviene de cursos MOOC [5], [6], cursos en línea de las mejores universidades del mundo [7], [8], recursos educativos [9]-[12], estándares [13]-[15], logros del siglo XX [16], retos del siglo XXI [17], concursos [18]-[20], etc.

El programa provee los elementos básicos para abordar el diseño digital desde varias representaciones de diseño y ensayar las soluciones con circuitos integrados SSI y MSI tanto TTL como CMOS, de lógica programable, símbolos y bloques lógicos, diagramas esquemáticos y escenarios virtuales. El usuario puede insertar tableros (protoboards, interruptores, leds, temporizadores), circuitos integrados y símbolos lógicos (puertas lógicas, selectores, sumadores, registros, contadores, etc.), osciloscopios, circuitos de lógica programable (PLA, PLD), diagramas de flujo y escenarios virtuales que se pueden interconectar con cables de colores. Estos elementos permiten aplicar conceptos transversales y aplicaciones prácticas para un aprendizaje constructivo, significativo y metacognitivo.

En las siguientes secciones se describen los elementos del programa; ejemplo de edición, simulación y análisis de un circuito; contador BCD de cuatro dígitos con sentido de cuenta y frecuencia seleccionables; simulación de funciones NAND y máquinas de estados; un taller de introducción a los circuitos digitales; un aprendizaje basado en proyectos de ingeniería; las ampliaciones; y finalmente las conclusiones y referencias.

“El ejemplo no es la principal manera de influenciar en otros. Es la única manera.”
Albert Schweitzer

Elementos del programa

Al iniciar el programa aparece una ventana de trabajo (figura 1) donde se construyen circuitos lógicos con símbolos y chips TTL y CMOS, tableros de entrada y salida y osciloscopios. Las conexiones se realizan mediante cables de colores. Todos los elementos del programa pueden interconectarse entre sí.

El simulador utiliza modelos lógicos de **circuitos integrados TTL LS** y **CMOS 4000** con retardos fijos. Los abanicos de entrada y salida, la potencia y los chips de pines bidireccionales y de salidas de tres estados no están considerados.

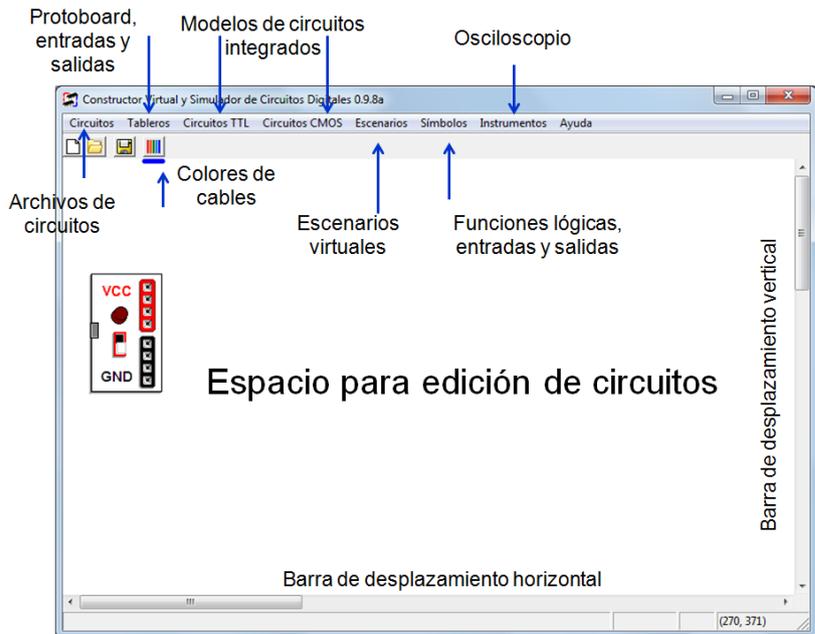


Figura 1. Interfaz inicial del programa.

Los tableros de entradas y de salidas (figura 2) deben conectarse apropiadamente con VCC y GND. Cada tablero tiene unas marcas que sirven para trasladarlos (con el botón izquierdo del ratón) o para eliminarlos (con el botón derecho). Las entradas lógicas pueden provenir de tableros de interruptores, pulsadores y temporizadores, mientras que los estados lógicos pueden ser observados en tableros de leds y de visualizadores de siete segmentos. Es posible colocar hasta diez protoboards, cada uno con capacidad para ocho circuitos integrados. Para interconectar casillas se lleva el cursor del ratón sobre una de ellas, se presiona el botón izquierdo del ratón, se lleva el cursor hasta la otra casilla y se suelta el botón. El programa evita las ediciones del circuito cuando el tablero de fuente DC está encendido, conexiones entre casillas del mismo nodo eléctrico y cortocircuitos entre VCC, GND y puertos de salida.

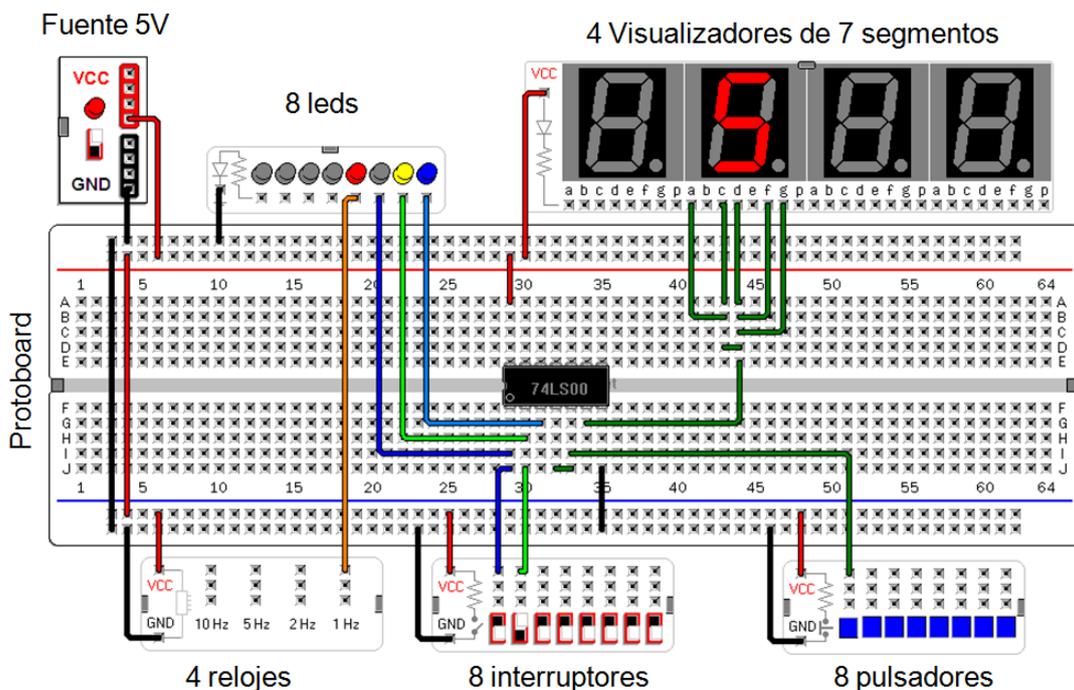


Figura 2. Tableros del programa.

Existen **símbolos lógicos** (figuras 3 y 4) de entradas, salidas, puertas lógicas, flip-flops, selectores, descodificadores, sumadores, comparadores, registros y contadores. Cuatro son programables: NAND y OR de ocho entradas, un multiplexor y un descodificador.

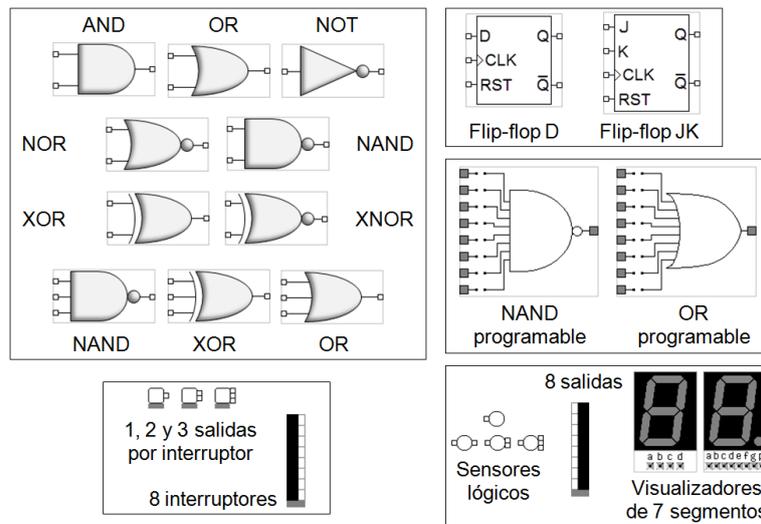


Figura 3. Símbolos de lógica SSI y de entradas y salidas.

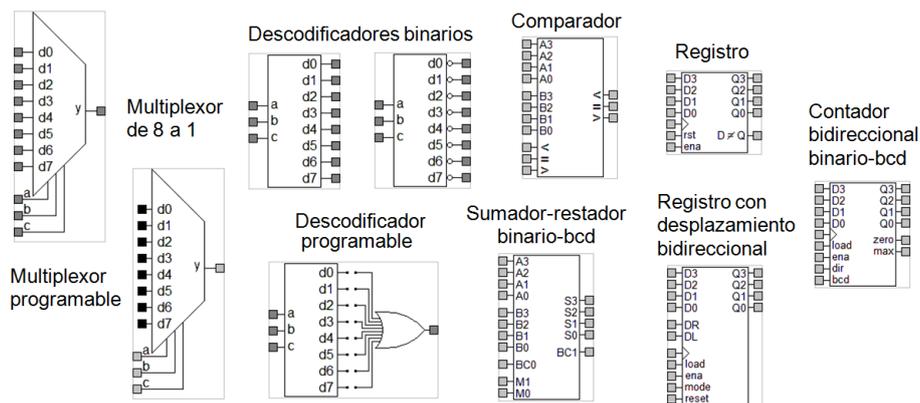


Figura 4. Símbolos de lógica MSI.

Los **diagramas de flujo** (figura 5) sirven para describir lógica combinacional mediante condiciones y operaciones lógicas. Los operadores de condición son el de suma para OR, el punto para AND y el de igualdad para comparación. Los valores de cada operando pueden ser 0, 1, X y X' (complemento), donde X puede ser A, B o C. Para cambiar un operador o un operando se pulsa sobre ellos repetidamente.

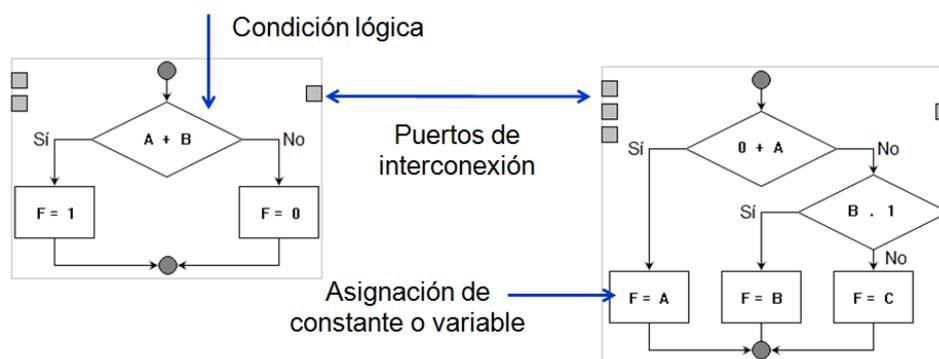


Figura 5. Diagramas de flujo.

Existen dos modelos de **circuitos de lógica programable**: PLA (*programmable logic array*) y PLD (*programmable logic device*) mostrados en la figura 6. El PLA puede formar cuatro sumas de ocho productos con cuatro entradas. El PLD consta de un arreglo AND cuyos productos alimentan predeterminadamente a unas OR que están conectadas a flip-flops D. Las salidas pueden seleccionarse entre la salida combinacional y la registrada. Para unir y separar líneas se pulsa sobre las intersecciones entre las líneas de los planos programables.

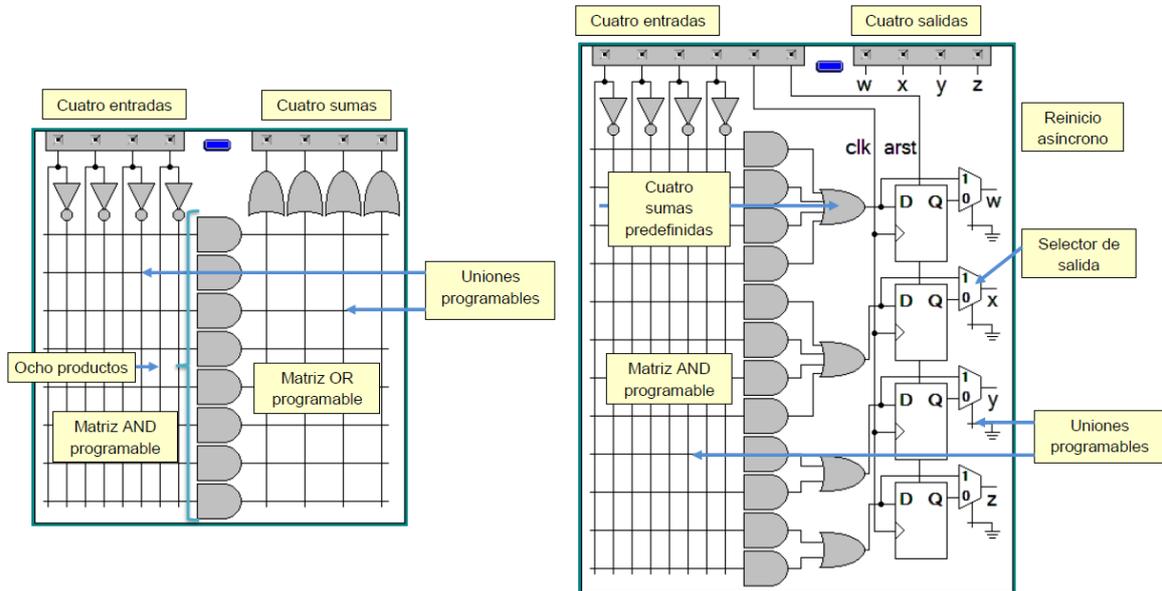


Figura 6. Circuitos PLA y PLD.

El **osciloscopio** (figura 7) permite visualizar secuencias de datos síncronas y asíncrona de los circuitos lógicos. Nueve casillas de interconexión son para ocho canales de datos y un canal de disparo (en la casilla inferior). Si existe una señal de disparo, el osciloscopio registra los datos cuando ocurre el flanco de subida de esa señal. Si el canal de disparo está desocupado el osciloscopio registra los datos cuando cambia cualquier señal de los otros canales en modo asíncrono y cada 50ms en modo síncrono. **Reinicio** vacía la memoria de datos. **Pausa** suspende la captura de datos hasta que vuelva a conmutarse. Las flechas permiten avanzar o retroceder para explorar los datos almacenados (paso, página de 40 pasos, extremo inicial o final).

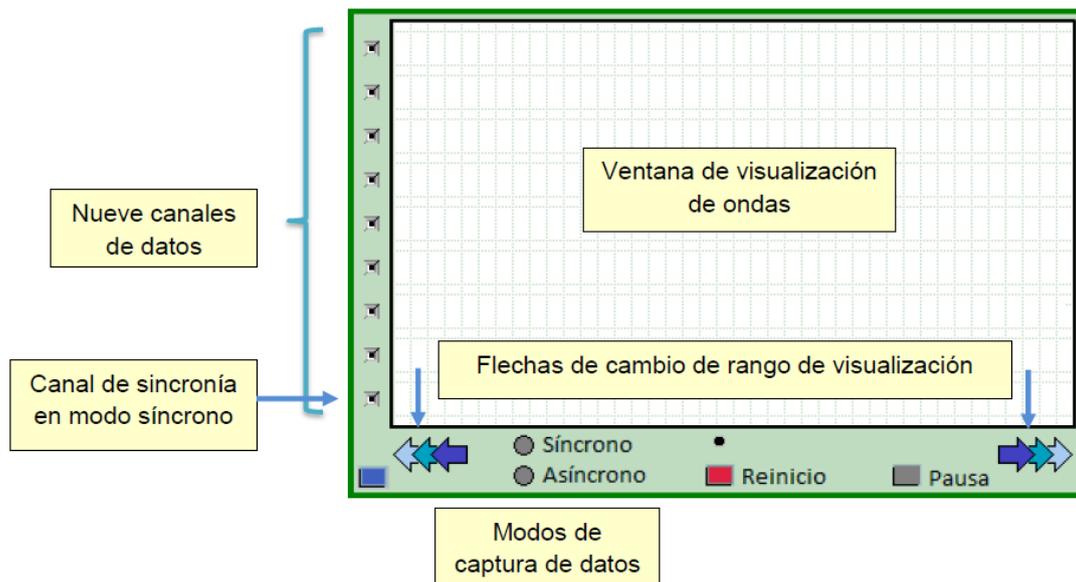


Figura 7. Osciloscopio.

Los **escenarios virtuales** permiten simular el funcionamiento de los circuitos con modelos de situaciones ambientales. No se incluyen los circuitos electrónicos necesarios para las interfaces electrónicas. Los escenarios funcionan en modo independiente cuando el circuito está apagado y responden a las señales lógicas cuando el circuito está encendido. Todos los retardos de entrada a salida de los escenarios, y de los símbolos, son de 50 ms.

La figura 8 muestra dos escenarios para control del nivel de agua en tanques. En el primero hay ocho sensores del nivel de agua, un sensor de flujo de agua por la tubería de ingreso, una llave para desalojar el agua del tanque y una bomba para el suministro de agua. El segundo contiene dos depósitos de agua donde una cisterna provee agua para un tanque.

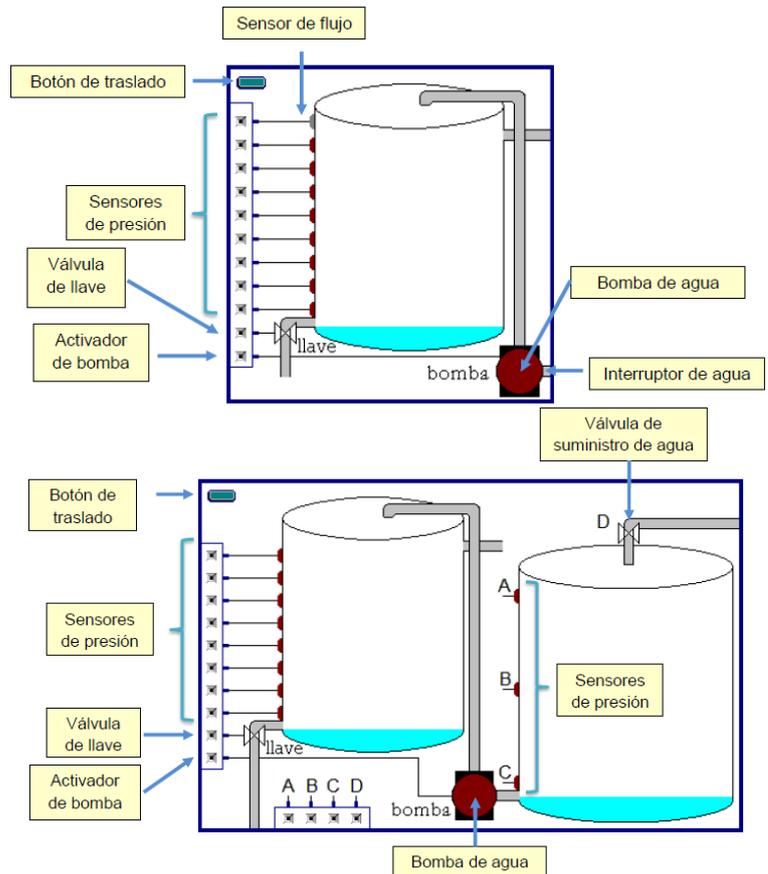


Figura 8. Escenarios de tanques de agua.

El escenario de tráfico vehicular (figura 9) provee cuatro sensores de paso y cuatro semáforos individuales de cuatro luces. Los sensores se activan cuando un vehículo pasa sobre ellos o cuando el usuario pulsa sobre las flechas azules. Los autos del escenario aparecen cíclicamente y siguen trayectorias rectilíneas.

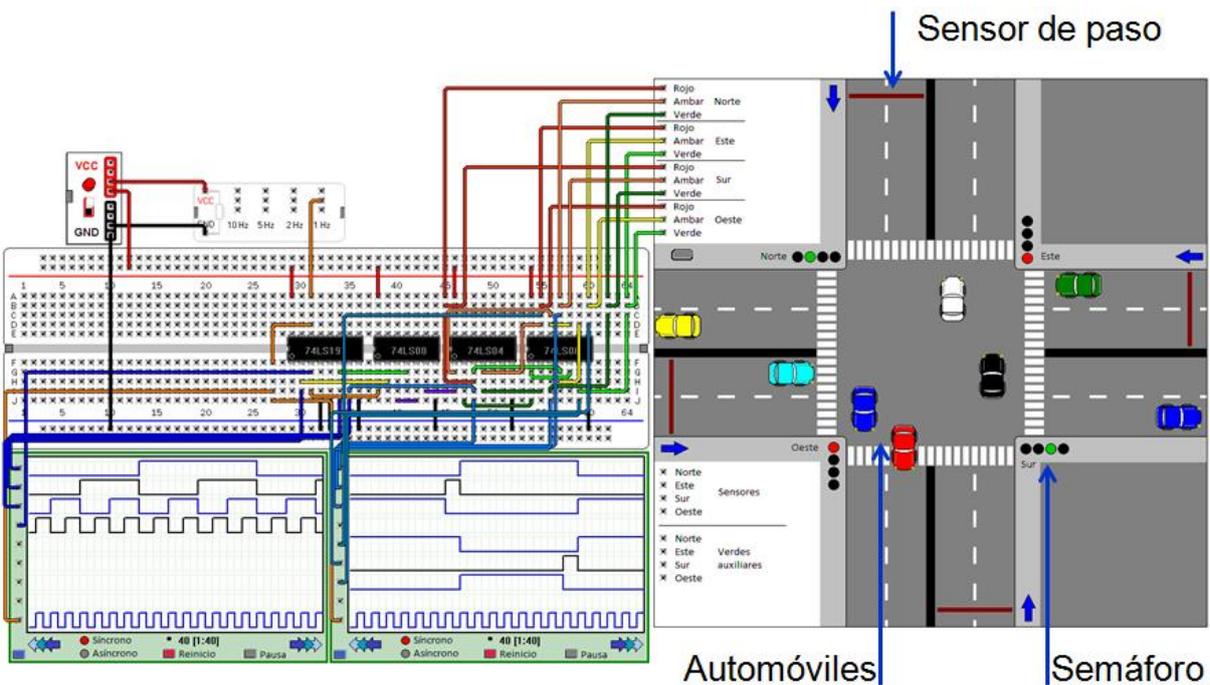


Figura 9. Escenario de tráfico entre avenidas.

Ejemplo de edición, simulación y análisis de un circuito

La secuencia de la figura 10 describe la edición y simulación de una puerta NAND en el chip 74LS00. En el análisis se concluye que la salida es alta cuando cualquier entrada es baja y solo es baja cuando los dos interruptores están altos. Los estados alto y bajo pueden luego ser codificados como 1 y 0.

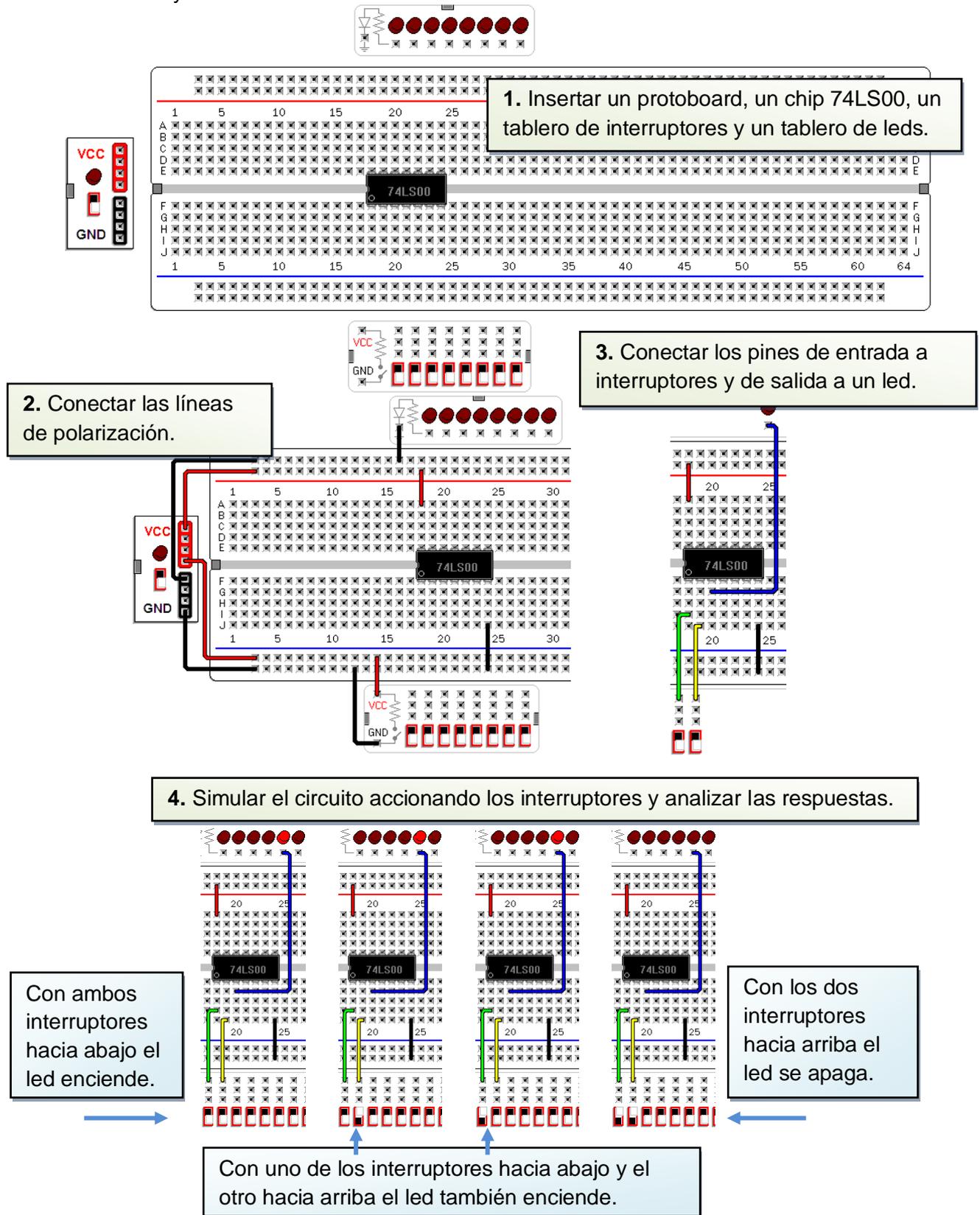


Figura 10. Edición y simulación de un circuito con una puerta NAND.

Contador BCD de cuatro dígitos con sentido de cuenta y frecuencia seleccionables

Un circuito complejo se construye incrementalmente y comprobando los valores de las señales en cada fase intermedia. En el siguiente contador de cuatro dígitos se verifica el funcionamiento de la primera etapa (unidades) antes de construir la siguiente etapa (decenas) y así hasta las decenas de millar. El circuito consta de contadores 74190, descodificadores 7447 y un multiplexor 74157.

1. Diagrama de conexiones del selector, visualizador y contador BCD.

2. Ubicación de los taberos y de los circuitos integrados.

3. Polarización de los circuitos y de los taberos.

4. Conexiones para el contador de unidades.

5. Contador completo.

6. Conexionado sin ceros a la izquierda.

Figura 11. Construcción virtual de un contador BCD.

Simulación de funciones NAND

El programa permite describir funciones lógicas mediante varias representaciones y modelos de circuitos con el fin de entender con profundidad los conceptos fundamentales del diseño lógico. La figura 12 muestra esta aproximación como un tutorial para conocer la función lógica NAND de dos entradas y su empleo en circuitos de funcionalidad universal, entender su funcionamiento, aplicar los conceptos, analizar circuitos compuestos y evaluar desempeños con respecto a costo, versatilidad y tiempo de diseño. Los escenarios, como el de tanque y cisterna de agua (figura 13), ayudan a diseñar (sintetizar) soluciones a casos reales. De este modo se cubren todos los niveles cognitivos en la taxonomía de Bloom.

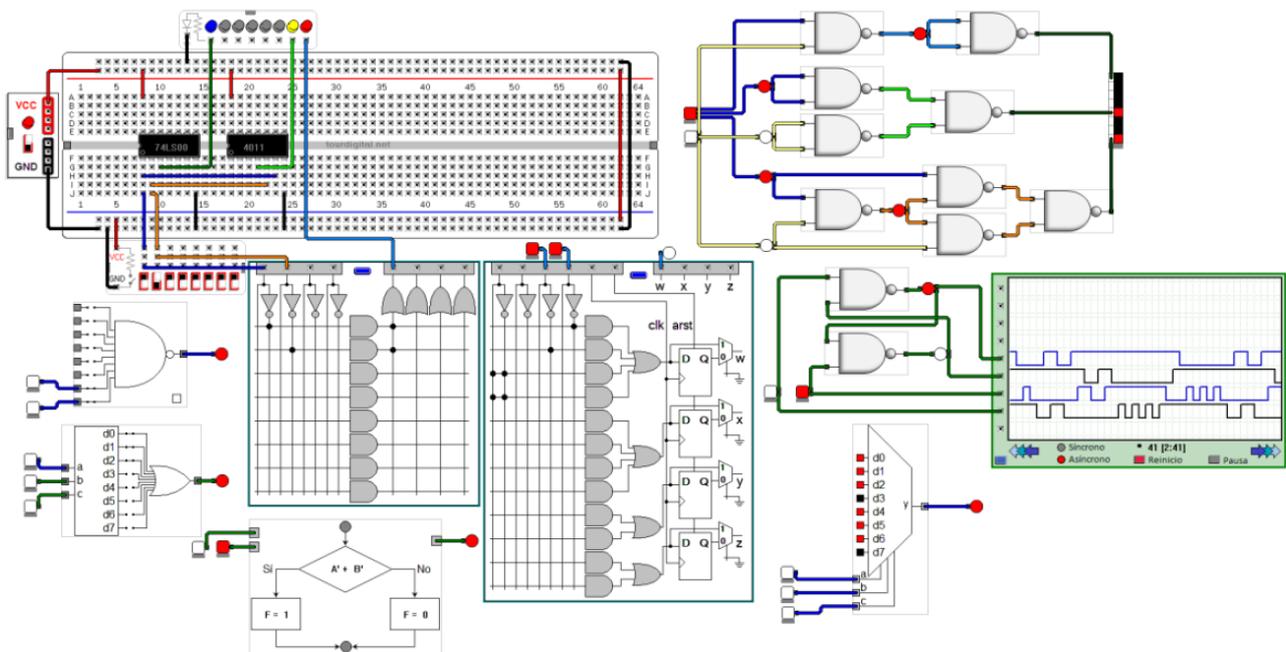


Figura 12. Circuitos con puertas NAND.

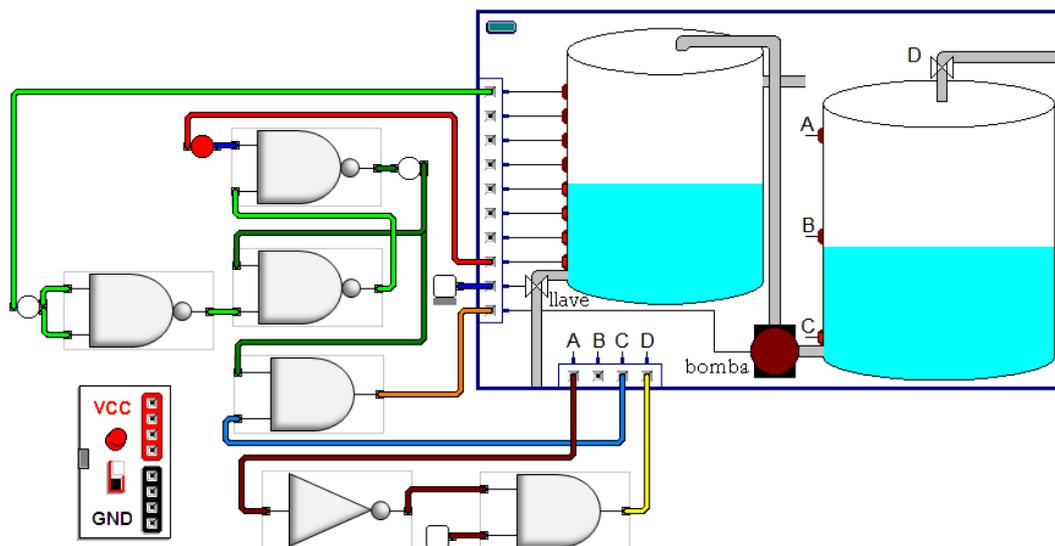


Figura 13. Control del nivel de agua en un tanque con cisterna.

Simulación de máquinas de estados

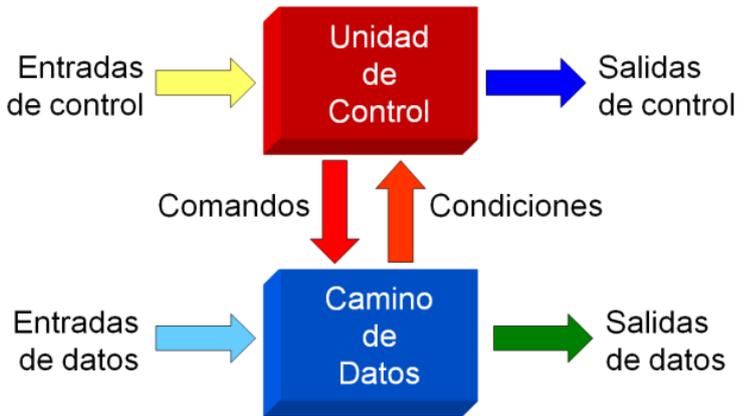


Figura 14. Máquinas de estados y camino de datos.

Por ejemplo, una máquina automática vende un producto en S/. 1,50. La máquina tiene un receptor donde se ingresa una moneda a la vez que reporta al circuito de control, mediante líneas diferentes, si la moneda depositada es de S/. 0,50 o de S/. 1,00. La señal de moneda depositada permanece activa durante un período de reloj. La figura 15 muestra un diagrama de transiciones a partir del cual se obtienen las ecuaciones de transición de acuerdo a una codificación de estados. La figura 16 muestra la máquina resultante con flipflops D.

El diseño con máquinas de estados es un método eficiente y sistemático con circuitos digitales (figura 14). El programa provee bloques de registros, contadores, comparadores, sumadores y puertas lógicas para validar mediante simulación el funcionamiento tanto de la máquina de estados como del camino de datos.

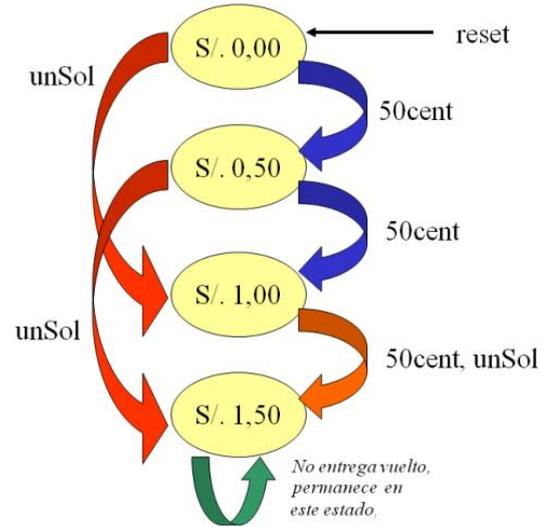


Figura 15. Diagrama de transiciones.

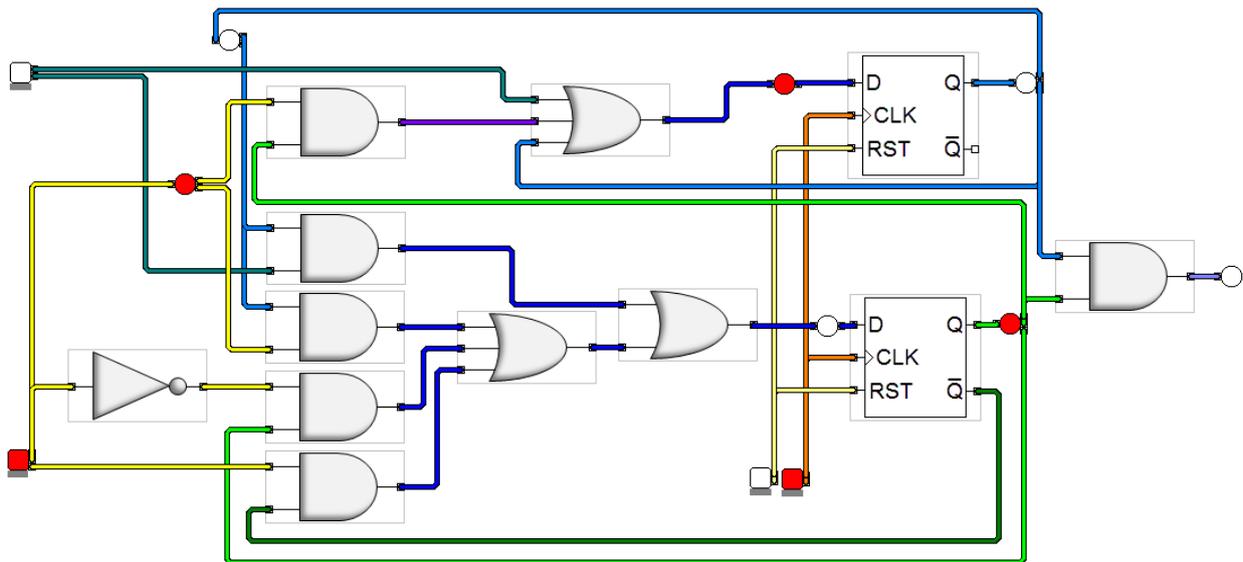


Figura 16. Circuito lógico para la máquina expendedora.

Un taller de introducción a los circuitos digitales

El programa permite apoyar varias clases de un curso de circuitos digitales. Por ejemplo, los símbolos lógicos pueden utilizarse para ilustrar el diseño de microprocesadores y controladores dedicados. Todos los circuitos SSI (puertas lógicas, latches, flip-flops) pueden estudiarse antes que los circuitos MSI (contadores, sumadores, comparadores, multiplexores, decodificadores).

Temas	Elementos de apoyo
Circuitos SSI	múltiples representaciones
Álgebra de conmutación	postulados y teoremas, con chips, símbolos, PLA, diagramas de flujo
Circuitos MSI	chips y símbolos
Máquinas de estados	puertas lógicas, flip-flops
Lógica programable	PLA, PLD
Descripción de circuitos	diagramas de flujo, registros
Microprocesadores y microcontroladores	ALU, registros, sumadores, selectores, memorias
Proyectos	escenarios virtuales

Varios talleres han sido realizados extracurricularmente en la escuela y universidad. Por ejemplo, en la escuela secundaria pública José Pardo y Barreda de Chíncha (2006) los estudiantes presentaron un circuito para medir la aceleración de la gravedad utilizando lógica programable; en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco en (2007, 2013) los estudiantes desarrollaron proyectos con chips TTL y FPGA; y en la escuela secundaria Ramón Castilla de Pucyura (2016), los estudiantes utilizaron chips TTL y microcontroladores para un control de tráfico en la carretera y para una pulsera de ayuda a personas invidentes. Con esta experiencia se ha diseñado un taller de cinco módulos de aprendizaje y diseño y un proyecto final.

	Se analizan las propiedades y características del circuito integrado 7400 y se representan mediante varios algoritmos, expresiones lógicas, tablas, cronogramas y diagramas. Se utilizan las propiedades de la función lógica NAND para descubrir nuevas funciones y aprenden a usar chips dedicados a esas funciones. Entre las principales actividades se destacan:	
Módulo I	<ol style="list-style-type: none"> 1. Construir un circuito con una puerta NAND del chip 74LS00. 2. Simular y obtener la tabla de verdad y cronograma de la función NAND. 	
	Con la asistencia del docente:	<ol style="list-style-type: none"> 3. Analizar y determinar la función NAND. 4. Expresar la función NAND con pseudocódigos, diagramas de flujo, diagramas esquemáticos, descripciones VHDL y objetos de clases en C++. 5. Deducir casos especiales para definir la función NOT. 6. Deducir la función AND.
	Con la asesoría del profesor:	<ol style="list-style-type: none"> 7. Repetir los pasos 1 a 5 con la función NOR del chip 74LS02. 8. Deducir la función OR.
	Trabajando en equipo:	<ol style="list-style-type: none"> 9. Deducir las funciones OR, AND y XOR a partir de funciones NAND y NOR. 10. Comprobar las funciones en los 74LS08, 74LS32 y 74LS86. 11. Describir de circuitos con dos y tres NAND o NOR. 12. Diseñar controlador del nivel de agua en un tanque.
	Módulo II	Presenta el álgebra de conmutación, transformaciones y síntesis manual de funciones booleanas, los varios tipos de circuitos MSI y el diseño modular.
	Módulo III	Se describen circuitos algorítmicamente, con descripciones VHDL para síntesis con lógica programable y objetos de clases C++.
	Módulo IV	Se diseñan microprocesadores y microcontroladores a partir de secuenciadores hechos con máquinas de estados finitos y máquinas de estados algorítmicas; se diseñan la unidad de control y el camino de datos extrayendo información de las sentencias lógicas y transformando algoritmos.
	Módulo V	Se practica el diseño en ingeniería para dar solución a un problema real aplicando los circuitos digitales.

“La mejor enseñanza ocurre cuando existe una relación directa entre un estudiante y un buen profesor, donde el estudiante discute las ideas, piensa acerca de lo que pasa y habla sobre ello. No es posible aprender mucho escuchando solamente o haciendo solo la tarea asignada.”

Richard Feynman

Aprendizaje Basado en Proyectos de Ingeniería

Las personas aprenden mejor cuando forman conceptos interrelacionados, aplicables y transferibles entre contextos y además repiten estas prácticas reflexionando sobre sus aprendizajes para que desarrollen su pensamiento autónomo, responsable, crítico y creativo y sean capaces de reconocer y resolver problemas del mundo real. La integración en el nivel escolar de las disciplinas STEM permite efectivamente lograr aprendizajes significativos y duraderos y ayuda a desarrollar la creatividad, persistencia y autonomía intelectual. La figura 17 muestra un marco de indagación científica, diseño en ingeniería y modelado matemático para integrar STEM en el aula de clases cuyo primero modelo fue presentando en [21]. Se basa en una combinación del modelo de instrucción 5E de BSCS [22], el currículo Diseño y Descubrimiento de Intel [1], los estándares de ciencias de Estados Unidos [14], los marcos de ciencias y de matemáticas de PISA y de Singapur [13], [15] y los niveles cognitivos de Bloom. El soporte proviene de recursos, libros, cursos y software de Internet gratuitos y de alta calidad y tecnología de bajo costo.

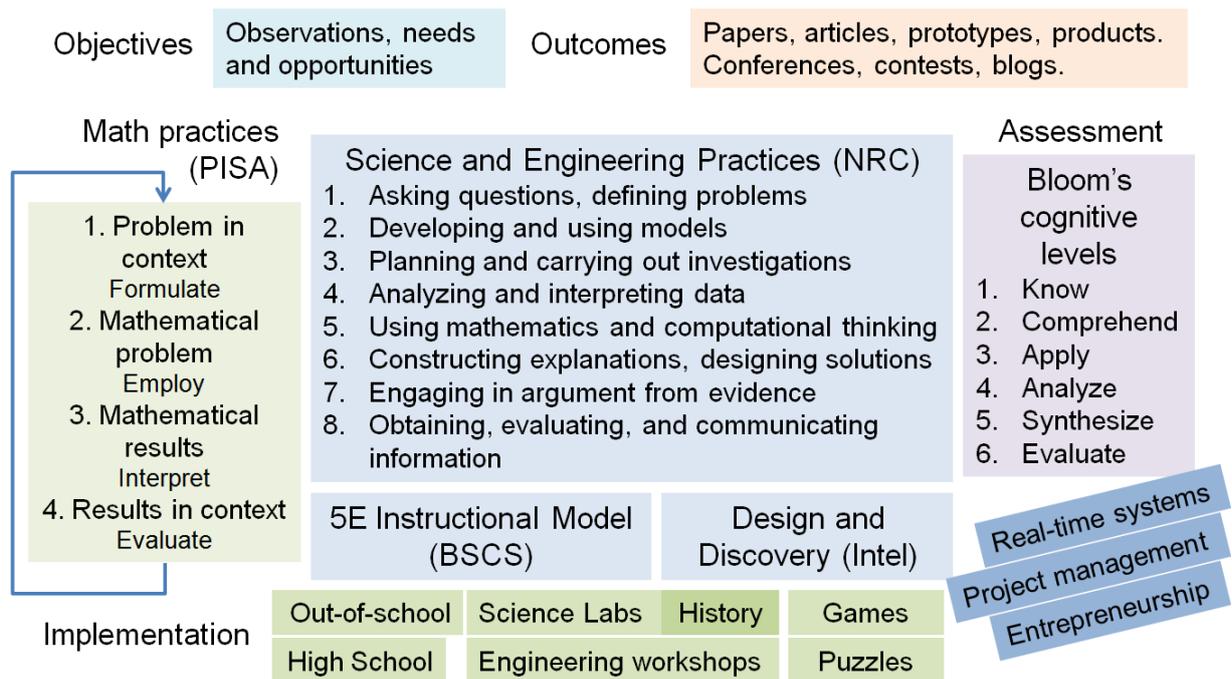


Figura 17. Un marco para STEM en la escuela secundaria.

Combinando los aprendizajes basados en indagación y en proyectos con énfasis en el diseño de circuitos electrónicos y programas de computadoras prácticos y útiles para el mundo real, el diseño de la herramienta está orientado a un aprendizaje cognitivo significativo atendiendo a principios subyacentes y conceptos relevantes en la solución de problemas, en el uso eficiente e informativo de estrategias con un objetivo, al auto-seguimiento constante y flexible, y a una explicación fundamentada y coherente de los temas aprendidos [4]. Por ejemplo, los escenarios proveen una descripción muy cercana a la necesidad o problema de ingeniería y los circuitos de lógica programable y símbolos lógicos ayudan a crear un prototipo lógico de la solución.

La metodología de enseñanza, aprendizaje y diseño (figura 18) busca motivar y convencer a los estudiantes para investigar y crear diseños de ingeniería útiles para la escuela, comunidad y la Tierra.



Figura 18. Una metodología de enseñanza, aprendizaje y diseño.

Los estudiantes consiguen datos del mundo real mediante experimentos reales y virtuales, y los analizan para descubrir patrones y leyes científicas que expresan en funciones lógicas y matemáticas como en el ejemplo de la figura 19. Las propiedades de los circuitos son determinadas mediante indagación y sus aplicaciones mediante diseño. Los estudiantes analizan tablas y gráficos, aproximan funciones, resuelven ecuaciones, consideran casos especiales, diseñan nuevos circuitos e interconectan dispositivos, predicen su comportamiento y simulan, verifican, analizan y evalúan los resultados. El simulador digital provee los escenarios virtuales para experimentos, pero además han sido programados en C++ [23] y en HTML5 otros escenarios y los estudiantes utilizan plantillas de programas en Python, C para Arduino y GeoGebra junto con sensores, actuadores y circuitos integrados estándares y programables.

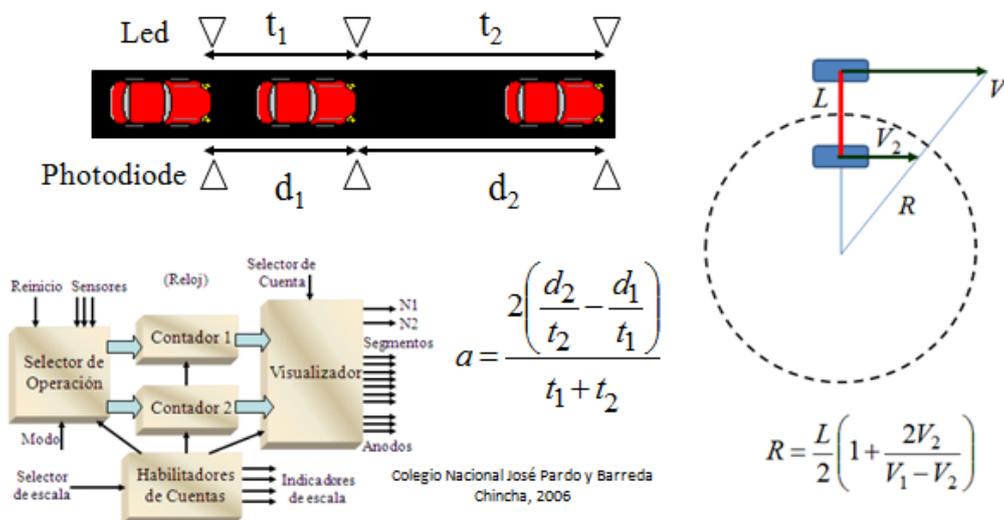


Figura 19. Un proyecto de electrónica, matemática y cinemática.

“La función de la educación es enseñar a pensar intensiva y críticamente.”
 “Inteligencia más carácter: esa es la meta de una educación verdadera.”
 Martin Luther King Jr.

Ampliaciones

Entre las primeras mejoras para el programa [24] se han proyectado:

- Agregar etiquetas y textos descriptivos.
- Seleccionar, copiar, pegar, eliminar, trasladar y rotar varios elementos.
- Insertar circuitos desde otros archivos.
- Consultar las especificaciones de chips y símbolos.
- Mejorar el arte de las imágenes y estilos de conexiones.
- Completar la serie de circuitos integrados CMOS.
- Incorporar chips con salidas de tres estados y pines bidireccionales.
- Agregar escenarios para ascensores, estacionamientos, plantas industriales, motores a pasos, viviendas, parques, trenes.
- Incluir descripciones con tablas de verdad y pseudocódigos.
- Exportar los circuitos a descripciones Spice, VHDL y SystemVerilog.
- Organizar secuencias de circuitos en tutoriales.
- Incorporar interfaces con puertos USB, Bluetooth y WiFi para tarjetas de entrenamiento de lógica programable, microcontroladores y dispositivos electrónicos.

A mediano plazo se incluirán programas que actualmente funcionan independientemente para una integración gradual en educación STEM:

Un Analizador Básico de Sistemas de Control ayuda a comprender las transformadas de Laplace y las señales electrónicas. Se especifica las funciones de la entrada, del PID, del control, de la planta y del sensor de realimentación y se observan las gráficas del lugar de raíces, la respuesta temporal y los diagramas de Bode, Nyquist y Nichols para analizar rangos de estabilidad, márgenes de fase y de ganancia.

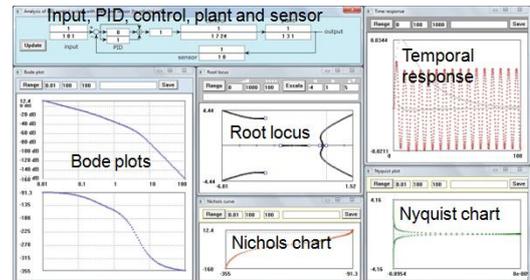


Figura 20. Sistemas de control.

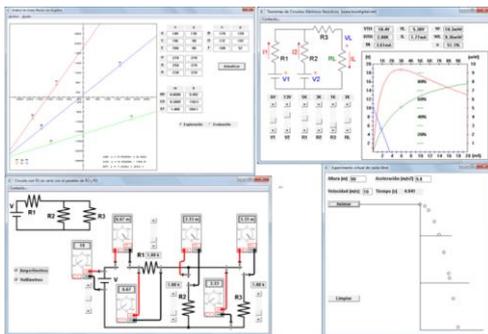


Figura 21. Electrónica y cinemática.

El programa Circuitos Eléctricos Básicos ayuda a descubrir, analizar y comparar propiedades de los circuitos eléctricos: ley de Ohm, leyes de Kirchhoff, principio de superposición, teorema de Thévenin y teorema de Norton.

Experimentos de cinemática sirve para realizar experimentos de movimiento en caída libre, movimiento semiparabólico y movimiento parabólico. Es excelente para aprender el método científico interrelacionando las disciplinas STEM.

El programa Análisis de Funciones Lineales y Cuadráticas permite encontrar patrones y resolver ejercicios de complejidad matemática creciente. Incluye temas de geometría, álgebra, trigonometría y estadística con aplicaciones en electrónica, informática y robótica. El Simulador de Reacciones Químicas ayuda a descubrir y determinar las leyes de las reacciones químicas a partir de patrones cuantitativos y desde una perspectiva histórica.

Algunas tareas pendientes incluyen corregir la desalineación cuando se mueven los tableros conectados y verificar las interfaces entre chips CMOS y TTL.

Conclusiones

Se ha descrito una herramienta para la enseñanza, el aprendizaje y el diseño de circuitos digitales. Este programa es útil para animar a los escolares a practicar el diseño en ingeniería y la indagación científica mediante soluciones a casos prácticos modelados en escenarios virtuales.

Varias personas han utilizado y utilizan las versiones anteriores del programa en cursos de circuitos digitales en escuelas y universidades de América Latina y Europa, y el autor lo ha utilizado en talleres extracurriculares en varias escuelas y universidades de Perú.

Actualmente se estudian técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático (*machine learning*) para incorporar un sistema de recomendaciones, seguimiento y evaluaciones de acuerdo a los avances y ritmos de aprendizaje de los estudiantes. Sobre la tecnología orientada a objetos en que fue diseñado el programa, se está avanzando un libro electrónico interactivo de indagación científica y diseño en ingeniería con énfasis en electrónica, mecánica, informática, robótica, química y biología.

Referencias

- [1] Intel, Design and Discovery, <https://www.intel.com/content/dam/www/program/education/us/en/documents/K12/design-and-discovery/dd-full-curriculum-fg.pdf>.
- [2] Arturo J. Miguel de Priego. 2013. A Builder and Simulator Program with Interactive Virtual Environments for the Discovery and Design of Logic Digital Circuits. 43rd Annual Frontiers in Education Conference.
- [3] National Research Council. 2004. The Engineer of 2020: Visions of Engineering in the New Century. Washington, DC: The National Academies Press, pp 14-15. www.nap.edu/catalog/10999.html.
- [4] National Research Council. 2000. How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School: Expanded Edition. Washington, DC: National Academy of Sciences. <http://www.nap.edu/catalog/9853.html>.
- [5] edX, www.edx.org.
- [6] Coursera, www.coursera.org.
- [7] MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu>.
- [8] Stanford Online, <https://online.stanford.edu>.
- [9] Intel education, <https://www.intel.com/content/www/us/en/education/intel-education.html>.
- [10] Edutopia, <https://www.edutopia.org>.
- [11] NASA education, <https://www.nasa.gov/offices/education/about/index.html>.
- [12] Science Buddies, www.sciencebuddies.org
- [13] PISA 2015 Assessment and Analytical Framework: Science, Reading, Mathematic, Financial Literacy and Collaborative Problem Solving, PISA, OECD Publishing, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264281820-en>.
- [14] Next Generation Science Standards (NGSS), <https://www.nextgenscience.org>.
- [15] Ministry of Education, Singapore, <https://www.moe.gov.sg/education/syllabuses/sciences>.
- [16] National Academy of Engineering, 20th century's Greatest Engineering Achievements, www.greatachievements.org.
- [17] NAE Grand Challenges for Engineering, www.engineeringchallenges.org.
- [18] Intel Science Fair, <https://www.intel.com/content/www/us/en/education/competitions/international-science-and-engineering-fair.html>.
- [19] Zayed Future Energy, <http://zayedustainabilityprize.com/en/>.
- [20] Google Science Fair, <https://www.google-sciencefair.com>.
- [21] Arturo J. Miguel de Priego. 2014. A Framework for K-12 Engineering Education at Low Budget Institutions. Engineering Leaders Conference on Engineering Education. Doha.
- [22] BSCS 5E Instructional Model, <https://bscs.org/bscs-5e-instructional-model>.
- [23] Dev-C++, 2011, <http://www.bloodsheet.net>
- [24] Simulador de circuitos digitales, www.tourdigital.net