



COMPUTADOR ANALÓGICO DE SEGUNDO ORDEN PARA LA APROPIACIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LOS SISTEMAS DINÁMICOS LIT

Leonardo E. Bermeo C. – lbermeoc@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Carrera 30 # 45-03, Edificio 453, Of. 202
Código Postal: 111321 – Bogotá D.C. – Colombia

Jesús M. Quintero Q. – jmquinteroqu@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Carrera 30 # 45-03, Edificio 453, Of. 222
Código Postal: 111321 – Bogotá D.C. – Colombia

Resumo: *Este trabajo busca rescatar la computación analógica en los cursos de ingeniería, proponiendo un modelo de computador analógico para experimentar con sistemas de segundo orden. El circuito propuesto está concebido con un mínimo número de componentes estándar y de bajo costo. Esperamos que mediante la interacción con este dispositivo los estudiantes puedan, de manera intuitiva y directa, ganar comprensión sobre conceptos importantes de los sistemas dinámicos lineales e invariantes en el tiempo tales como: estabilidad y su relación con la ubicación de polos, realización de diagramas de bloques, respuesta de sistemas de segundo orden y realimentación. Este trabajo ha sido realizado varias veces en el curso de Sistemas y Señales del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, recibiendo una valoración positiva por parte de los estudiantes.*

Palavras-chave: *Computación Analógica, Sistemas LIT, Estabilidad, Prácticas de Laboratorio, Amplificadores Operacionales*

1. INTRODUÇÃO

Sin temor de exagerar, el desarrollo de la computación analógica (a principios del siglo XX) estableció una nueva metodología fundamental para la investigación científica y el desarrollo de aplicaciones en ingeniería: *la simulación*. En la actualidad, la enseñanza de muchas materias de ingeniería no se concibe sin la posibilidad de realizar simulación, cuyo inicio lo demarca la introducción del revolucionario computador analógico (HOWE, 2005).

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





La computación analógica tuvo su origen en el MIT con el Analizador Diferencial Mecánico (ADM), construido por Vannevar Bush en 1930 (BUSH, 1931). Este impresionante computador analógico, capaz de resolver ecuaciones diferenciales hasta de 6º orden, fue la primera máquina para solucionar ecuaciones diferenciales construida por el hombre (ROBINSON, 2005; BUSH, 1931). La concepción original del computador analógico (y de todos los demás) fue expuesta por Lord Kelvin desde 1876, describiendo claramente como los integradores mecánicos que había inventado su hermano podrían ser conectados en bloques realimentados para solucionar ecuaciones diferenciales de segundo orden (y de orden superior) (BISSELL; DILLON, 2012). Sin embargo, este concepto solo pudo ser materializado por Bush con el desarrollo de los así llamados dispositivos *amplificadores de torque*. A este computador analógico le siguieron otros computadores analógicos como el portentoso TRIDAC¹ (SPEARMAN et al., 1956), cuya arquitectura ocupaba un edificio entero. Podemos destacar otros ejemplos de esta época como el REAC (*Reeves Corporation Analog Computer*), el BEAC (*Boeing Electronic Analog Computer*), el GEDA (*Goodyear Electronic Analog Computer*) y el computador del proyecto TYPHOON (ATHERTON, 2005). Todos estos computadores se caracterizaron por su gran envergadura y elevado costo, razón por la cual fueron desarrollados como proyectos gubernamentales o de grandes organizaciones.

El advenimiento del amplificador operacional de estado sólido posibilitó el desarrollo de computadores analógicos electrónicos más pequeños y baratos que sus predecesores (LUNDBERG, 2005), introduciendo, así, una primera masificación académica de los métodos de simulación. Así las cosas, universidades de diferentes partes del mundo comenzaron a utilizar computadores analógicos portátiles (por ejemplo el aún existente COMDYNA (SPIESS, 2005)) para la aprehensión de conceptos fundamentales de sistemas dinámicos (LUNDBERG, 2005).

La precisión numérica y versatilidad de los computadores digitales desplazó a los sistemas analógicos como herramienta de cómputo científico. Sin embargo, el “realismo” de los computadores analógicos y su consecuente aporte para la comprensión intuitiva de conceptos físicos y matemáticos no ha sido substituida por la computación digital, tal y como previó Warren Weaver² en 1950:

a vividness and directness of meaning of the electrical and mechanical processes involved which can hardly fail, I would think, to have a very considerable educational value. A Digital Electronic computer is bound to be a somewhat abstract affair, in which the actual computational processes are fairly deeply submerged. (OWENS, 1996, 39)

En este mismo sentido, la intuición lograda a través de la computación analógica está vivamente retratada en el relato que hizo Vannebar Bush sobre un mecánico que le ayu-

¹Este computador usaba analogías electrónicas, hidráulicas y mecánicas para su funcionamiento

²Warren Weaver (1894–1978) fue un prominente científico que, junto con Claude Shannon, desarrolló de la teoría de la información.



daba (quien no sabia nada de matemáticas) y que se convirtió en un experto consultor en simulación de sistemas, después de interactuar varios años con el ADM:

I never consciously taught this man any part of the subject of differential equations; but in building that machine (the differential analyzer), managing it, he learned what differential equations were himself...It was very interesting to discuss this subject with him because he had learned the calculus in mechanical ... he did not understand it in any formal sense, but he understood the fundamentals; he had it under his skin. (BISSELL; DILLON, 2012, 107)

Las observaciones de estos pioneros de la computación y de la informática han sido replicadas por varios autores actuales, quienes lamentan el abandono del computador analógico como herramienta de gran importancia en la aprehensión intuitiva de conceptos físicos y matemáticos (SPIESS, 1987; OWENS, 1996; BISSELL; DILLON, 2012; MACLENNAN, 2007). El uso de herramientas como la computación analógica es solo un aspecto de una discusión más profunda y actual de la educación en ingeniería que podemos sintetizar en la siguiente pregunta: ¿Debemos continuar privilegiando el “saber que” (propio de la cultura científica) sobre el “saber como” (propio de la educación clásica de los ingenieros) tal y como ha ocurrido desde la segunda parte del siglo XX en las diferentes universidades del mundo? La reflexión contenida en esta pregunta es si la educación en ingeniería debe continuar favoreciendo una presentación formal y abstracta de los conceptos, reduciendo, cada vez más, el uso pedagógico de los métodos de comprensión intuitiva y experimental³.

Considerando la importancia de la computación analógica en la actualidad, es relevante señalar que está resurgiendo fuertemente como método de investigación científica, fundamentalmente por su eficiencia energética computacional (HASLER, 2016). Esta eficiencia se debe a que la computación analógica realiza más cálculos con menos componentes, disponiendo de mayor capacidad computacional para la simulación de sistemas masivamente paralelos como, por ejemplo, los sistemas biológicos (SARPESHKAR, 2014). Como hito trascendental de este resurgimiento, vale la pena mencionar el trabajo realizado por investigadores del MIT, quienes han diseñado un compilador para sintetizar algoritmos de computación analógica en hardware moderno especializado (ACHOUR; SARPESHKAR; RINARD, 2016).

Este trabajo busca rescatar la computación analógica en los cursos de ingeniería, proponiendo un modelo de computador analógico para sistemas de segundo orden. El circuito está concebido con un mínimo número de componentes estándar y de bajo costo. Mediante este dispositivo los estudiantes pueden, de forma intuitiva y directa, practicar conceptos relevantes de los sistemas dinámicos LIT (lineales e invariantes en el tiempo)

³Es interesante la discusión sobre el particular presentada por el profesor Chen en la introducción de su libro “Signals and Systems: A Fresh Look”. El profesor Chen discute las razones históricas y sociales que motivaron este enfoque de la educación en ingeniería como consecuencia de diversos factores subsecuentes a la segunda guerra mundial.



tales como: estabilidad, ubicación de polos, conceptos de sistemas de segundo orden y realimentación. Este trabajo ha sido realizado varias veces en el curso de Sistemas y Señales del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, recibiendo una valoración positiva por parte de los estudiantes.

A continuación presentamos la estructura del artículo. En la Sección 2 presentamos los fundamentos del computador analógico para la simulación de un sistema LIT de segundo orden. En la sección 3 presentamos el circuito electrónico que implementa el computador analógico descrito en la Sección 2. En la Sección 4 presentamos algunos resultados obtenidos por los estudiantes al usar el computador analógico propuesto. Al final de la misma sección, presentamos algunos comentarios de realimentación que hemos recibido de los estudiantes tras realizar el trabajo propuesto con el computador analógico. Finalmente, en la Sección 5, presentamos conclusiones y posibles avances posteriores de este trabajo.

2. COMPUTADOR ANALÓGICO

2.1. Fundamentos

Un sistema LIT continuo puede ser representado usando diferentes descripciones matemáticas: *ecuaciones diferenciales*, *funciones de transferencia* y *representación en variables de estado*. Consideremos, específicamente, un sistema de segundo orden representado por la siguiente ecuación diferencial:

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2y(t) = \omega_n^2u(t). \quad (1)$$

en donde $u(t)$ y $y(t)$ son, respectivamente, la entrada y la salida del sistema, ω_n es la frecuencia natural y ζ es la razón de amortiguamiento. El modelo representado por la ecuación (1) describe a nivel conceptual el comportamiento de varios tipos de sistemas que aparecen en diferentes dominios y que se poseen dos elementos que almacenan masa o energía. Por ejemplo un circuito RLC, un sistema masa–resorte–amortiguador, un sistema hidráulico con dos tanques, entre otros (CLOSE; FREDERICK; NEWELL, 2003). Aplicando la transformada de Laplace, obtenemos la función de transferencia de un sistema prototipo de segundo orden, según la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (2)$$

en donde $U(s)$ y $Y(s)$ son, respectivamente, la entrada y la salida del sistema en el dominio de Laplace. Esta función de transferencia tiene la siguiente realización⁴ en variables de estado:

⁴El término *realización*, ahora usado frecuentemente en el argot de la teoría de sistemas lineales, tuvo su origen en los computadores analógicos, puesto que la representación en variables de estado contiene implícitamente la estructura necesaria para que un sistema pueda ser “realizado” en un computador analógico.



$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_n & -\omega_n \\ \omega_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_n \\ 0 \end{bmatrix} u(t),$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Partiendo de la realización dada por ecuación (3), obtenemos el diagrama de bloques representado en la Figura 1. Notemos que este diagrama solo contiene tres tipos de operaciones: adición (o substracción), multiplicación por una constante e integración. Estos son los bloques fundamentales de construcción de un computador analógico para realizar simulación de cualquier sistema LIT⁵ (CHEN, 1998). Para realizar electrónicamente

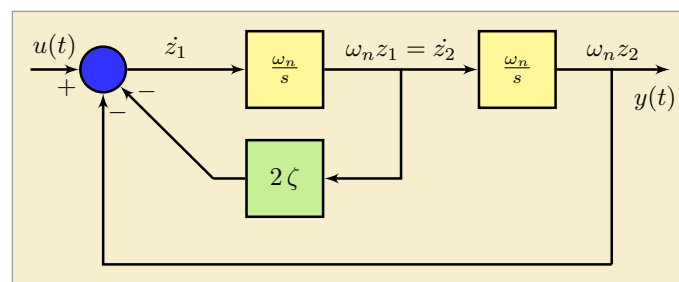


Figura 1 – Diagrama de computador analógico para el sistema de segundo orden descrito por la realización de estado de la Ecuación (3).

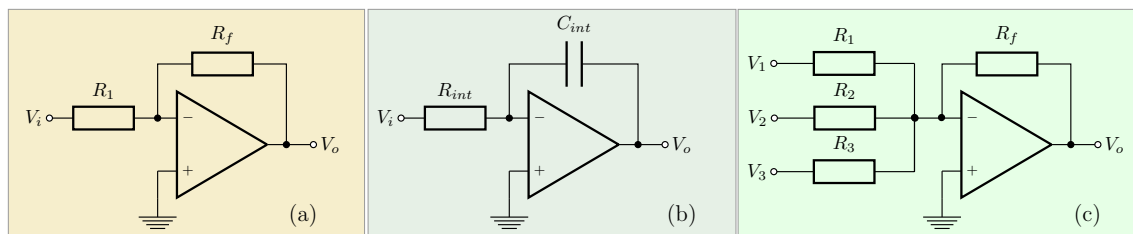


Figura 2 – Bloques básicos de computación analógica: (a) Multiplicador por constante; (b) Integrador; (c) Sumador inversor.

estas operaciones, usamos las 3 configuraciones de amplificadores operacionales⁶ mostradas en la Figura 2. La Figura 2(a) es la implementación electrónica correspondiente a la multiplicación por una constante, representando, así, el bloque verde rotulado por 2ζ en la Figura 1. La Figura 2(b) es la implementación electrónica de los integradores con ganancia, es decir, de los bloques amarillos rotulados por ω_n/s en la Figura 1. A su vez, la Figura 2(c) es la implementación electrónica del sumador representado por el círculo azul en la Figura 1.

⁵En simulación de sistemas no lineales más generales, se requieren adicionalmente otros pocos bloques como los multiplicadores y los generadores arbitrarios de funciones, según fue establecido por Shannon (SHANNON, 1941).

⁶Es importante resaltar que el término, hoy en día ubicuo, de “Amplificador Operacional” fue acuñado originalmente por Jhon Ragazzini en 1947 por el hecho de que las configuraciones mostradas en la Figura 2 permiten hacer las operaciones fundamentales requeridas en computación analógica (RAGAZZINI; RANDALL; RUSSELL, 1947).



2.2. Estabilidad del sistema de segundo orden

Parte del propósito de este trabajo es introducir de forma vívida el concepto de *estabilidad*. En un sistema estable, toda entrada acotada $u(t)$ produce una salida acotada $y(t)$. Específicamente, si la entrada $u(t)$ es un *escalón*⁷, la salida $y(t)$ se irá aproximando a un valor constante para valores grandes de tiempo. La forma usual de determinar la estabilidad de un sistema LIT es a través de los polos de su función de transferencia. Si todos los polos tienen parte real negativa, entonces podemos afirmar que el sistema es estable.

Consideremos nuevamente la función de transferencia de la Ecuación (2). En esta función el parámetro ω_n se considera positivo por razones físicas. Los dos polos de la función definida por la Ecuación (2) quedan en las siguientes localizaciones:

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}, \text{ si } |\zeta| \geq 1; \quad (4a)$$

$$s_{1,2} = -\zeta \omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \text{ si } |\zeta| < 1. \quad (4b)$$

Al considerar ζ estrictamente positivo, entonces las expresiones (4a) y (4b) determinan que los dos polos del sistema dado por la Ecuación (2) tienen partes reales negativas y, consecuentemente, el sistema de segundo orden es estable para $\zeta > 0$.

Es importante resaltar que durante varios cursos iniciales de ingeniería (por ejemplo los de teoría de circuitos), los estudiantes se han familiarizado con sistemas lineales conformados por elementos pasivos (los cuales son inherentemente estables) y en donde se da por sentado la existencia de la respuesta de estado estable⁸. Entonces, a nivel de aprendizaje, es significativo usar el computador analógico exhibiendo el comportamiento de un sistema LIT cuando los polos se encuentran ubicados en el semiplano derecho y aparece la inestabilidad. En este sentido, las expresiones 4(a) y 4(b) nos muestran que

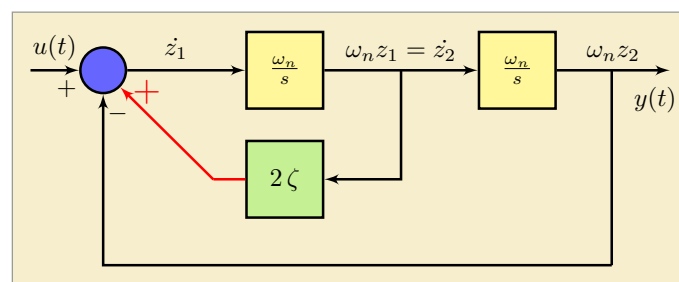


Figura 3 – Diagrama de computador analógico del segundo orden para producir valores negativos de ζ .

esto se produce para valores de ζ negativos. Estos valores se logran invirtiendo el signo que llega del bloque rotulado por 2ζ al sumador, conforme está siendo resaltado en el signo en rojo en la Figura 3.

⁷El *escalón* es una función idealizada de prueba usada frecuentemente en sistemas dinámicos. Se define como $u(t) = 0$ para $t \leq 0$ y $u(t) = a$ para $t > 0$.

⁸Este es el caso del análisis de circuitos en AC.



3. DISEÑO ELECTRÓNICO DEL COMPUTADOR ANALÓGICO

La Figura 4 muestra el circuito esquemático del computador analógico de segundo orden presentado en este trabajo. A continuación describimos los elementos fundamentales de este circuito:

- **GENERADOR DE ESCALONES.** La salida Q de onda cuadrada del circuito integrado CD4047 se usa para generar la función escalón, de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 4(a). La señal generada varía desde 0 hasta una amplitud configurada por el usuario mediante la resistencia R_A . La duración del escalón se ajusta por medio de la fórmula $T = 4.4R_T C_T$, siendo R_T y C_T , respectivamente, el resistor variable y el capacitor colocados entre los pines 1, 2 y 3 del integrado CD4047.
- **REINICIO DE INTEGRADORES.** Para que el computador analógico posea un comportamiento que se pueda visualizar fácilmente es necesario reiniciar periódicamente la simulación. Esto implica aplicar la entrada $u(t)$ y simultáneamente reiniciar los dos condensadores de integración C_{int} . Para este propósito, se usan dos de los interruptores analógicos provistos por el circuito integrado CD4066, de acuerdo a la conexión presentada en la Figura 4(b). La señal de reinicio es generada por la señal complementaria \bar{Q} del integrado CD4047. De esta forma, cuando el escalón de entrada está en cero, entonces la señal \bar{Q} toma un valor lógico positivo que cierra los interruptores, deshabilitando la acción de los integradores en el semiperíodo en que la señal escalón Q está en cero.
- **BLOQUES DE COMPUTO ANALÓGICO.** El esquemático de la Figura 4(c) muestra la realización electrónica de los diagramas de computo analógico de las Figuras 1 y 3. Para implementar este circuito se usan dos circuitos integrados de bajo costo LF347. Note que la frecuencia natural del sistema de segundo orden está determinada por la ganancia de cada integrador. Esta ganancia es ajustada de acuerdo con la ecuación

$$\omega_n = \frac{1}{R_{int} C_{int}}. \quad (5)$$

A su vez, el valor de ζ se ajusta mediante el resistor variable R_{var} . Seleccionando, por ejemplo, $R_{var} = 20k\Omega$, podemos obtener valores en el rango $|\zeta| \leq 2$.

- **MODO FUNCIONAMIENTO ESTABLE/INESTABLE.** El selector $S_{E,I}$ (dibujado en azul en la Figura 4(c)) permite cambiar de un valor de ζ positivo en la posición E a un valor de ζ negativo en la posición I . Esto permite que el sistema de segundo orden pueda estar en modo estable o inestable.
- **GALVANÓMETRO.** Para visualizar mecánicamente el comportamiento del computador analógico se recomienda colocar un galvanómetro. Cuando se elige una frecuencia natural

$$\omega \approx 2\pi,$$

la aguja del galvanómetro dramatiza efectos como el sobrepico, respuesta de estado estable y estabilidad.

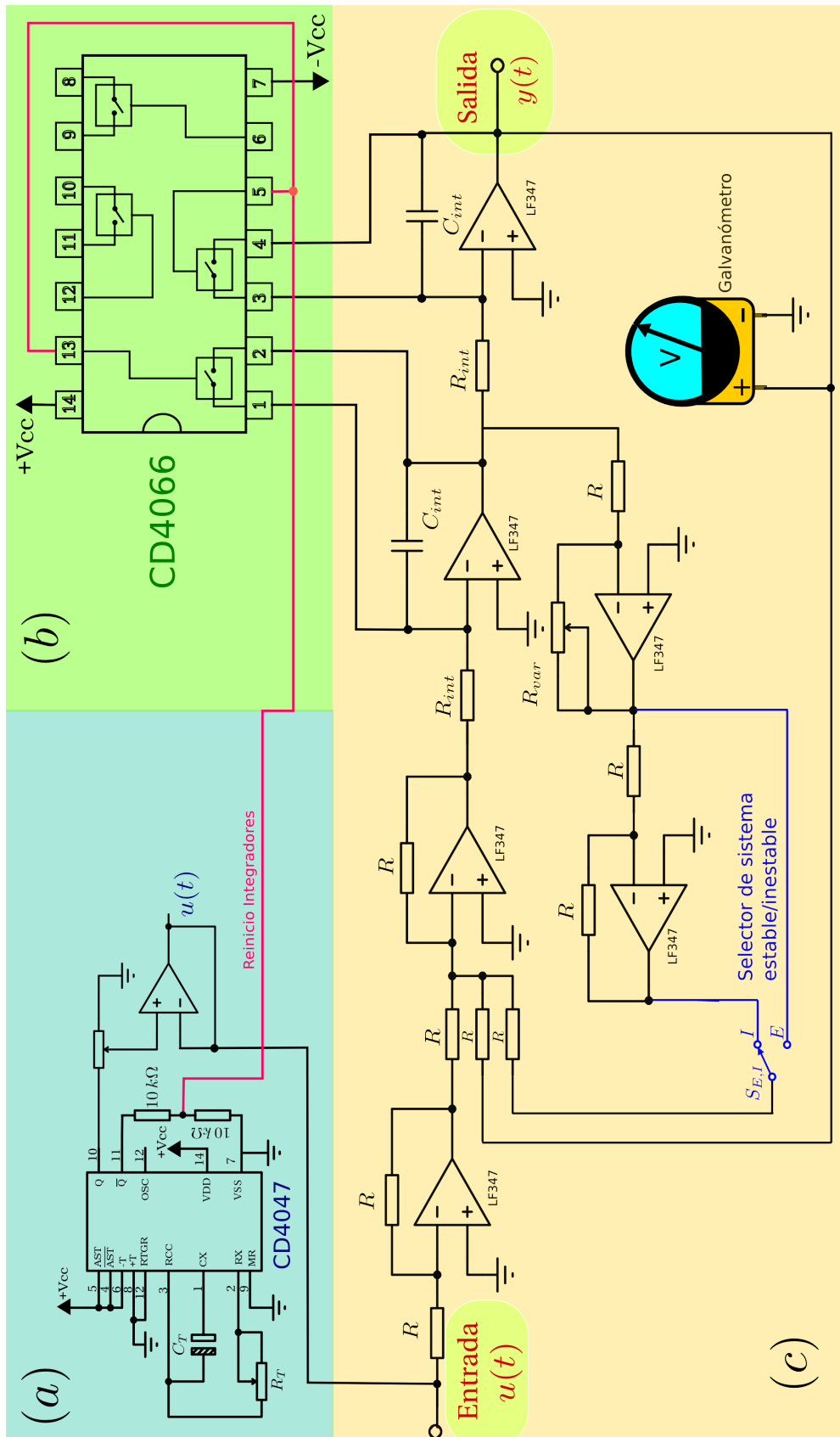


Figura 4 – Circuito esquemático del computador Analógico: (a) Generador de escalones y de señal de reinicio de los integradores con el circuito integrado CD4047; (b) Interruptores analógicos de reinicio de los integradores con el integrado CD4066; (c) Implementación electrónica del computador analógico de segundo orden estable (Figura1) e inestable (Figura3).



4. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON EL SISTEMA

4.1. Guia de trabajo

Como paso inicial, los estudiantes deben construir el circuito de la Figura 4 para dos valores diferentes de frecuencia natural ω_n (valores éstos, determinados por la Ecuación (5)). Los valores sugeridos son los siguientes:

- i. Un valor de frecuencia natural *lento*, $\omega_n = 2\pi$, para visualizar mecánicamente el comportamiento de la simulación en el galvanómetro.
- ii. Un valor de frecuencia natural *rápido*, $\omega_n = 1000\pi$, para visualizar la simulación en un osciloscopio o por medio de la tarjeta de audio de un computador.

Para estos dos casos se pide variar ampliamente el valor de ζ en el intervalo $-2 \leq \zeta \leq 2$, incluyendo expresamente el valor $\zeta = 0$ de oscilación no amortiguada. Con base en estos casos, se deben determinar las características dinámicas de un sistema de segundo con $\zeta > 0$, tales como: frecuencia natural experimental, sobrepico y tiempo de establecimiento. Así mismo, se debe observar y concluir sobre la respuesta dinámica del sistema de segundo orden para valores de

$$\zeta \leq 0,$$

esto es, cuando los polos del sistema están en el eje imaginario o en el semiplano derecho.

4.2. Resultados obtenidos

La Figura 5 muestra algunos resultados obtenidos por los estudiantes con el computador analógico. Es interesante observar el efecto del selector $S_{E,I}$ que cambia los polos del sistema de segundo orden desde el semiplano izquierdo (Figuras 5(a) y 5(c)) al semiplano derecho (Figuras 5(b) y 5(d)), permitiendo, así, visualizar inmediatamente el cambio en la estabilidad. La Figura 5(f) muestra un oscilador sin amortiguamiento. Para lograr que ζ sea cero se debe colocar el computador en modo inestable y aplicar un poco de realimentación positiva con el resistor R_{var} para eliminar los efectos resistivos no contemplados de pérdida de energía en el sistema.

4.3. Comentarios recibidos

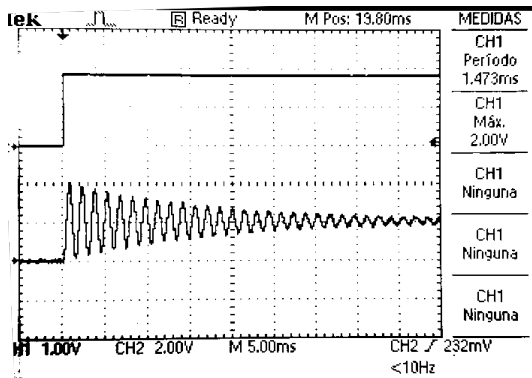
A continuación presentamos las opiniones de dos estudiantes cuando se les formularon las dos siguientes preguntas:

Pregunta 1: *¿Cuáles conceptos considera que fueron afirmados tras la realización del trabajo del computador analógico?*

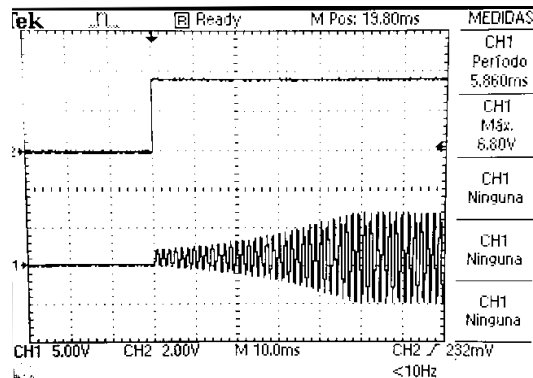
Estudiante A: Al observar el tipo de respuesta que muestra el computador analógico al hacer cambios en las características en cuanto a los polos (imaginarios, complejos o reales) de la función de transferencia, se puede entender más los conceptos de estabilidad de sistemas, el por que son estables, como se hace estables, entre otros.

Estudiante B: Los conceptos que reafirmé fueron el de diagrama de bloques y función de transferencia. El primero, por que es muy diferente ver dibujos

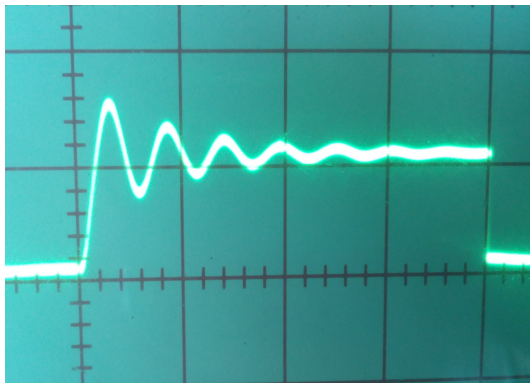
(a) $\zeta = 0.01$ (Cortesía de Julián Cantor).



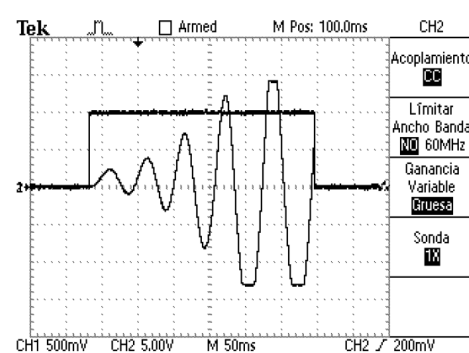
(b) $\zeta = -0.01$ (Cortesía de Julián Cantor).



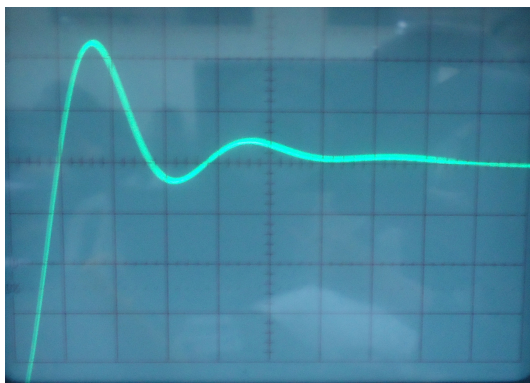
(c) $\zeta = 0.1$ (Cortesía de Father Rodríguez).



(d) $\zeta = -0.1$ (Cortesía de Sergio Hernández).



(e) $\zeta = 0.3$ (Cortesía de Giovany Britton).



(f) $\zeta = 0$ (Cortesía de Father Rodríguez).

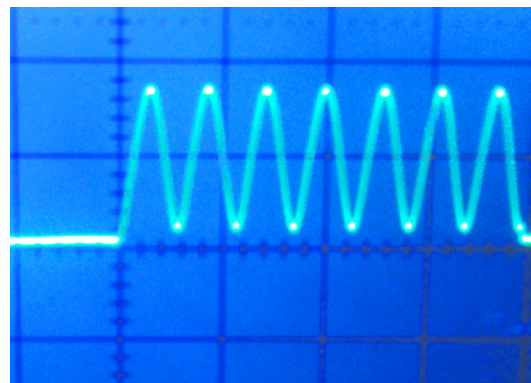


Figura 5 – Salida $y(t)$ del computador analógico para diferentes valores de ζ .

de cajas en el tablero del salón a ver algo construido por nosotros y que esta en la capacidad de emular respuestas que hemos estudiado desde el curso de circuitos I. El segundo por qué al cambiar los parámetros de la función, podíamos ver modificada la respuesta de ese sistema. entre otros.

Pregunta 2: *¿Cuál es su opinión personal sobre el trabajo del computador analógico?*



Estudiante A: Este trabajo es muy útil, en cuanto al entender los sistemas de una forma mas sencilla y de donde sale cada una de los conceptos de las señales y sistemas, ya que con las herramientas digitales como simuladores y software no se permite interactuar bien adentro del sistema. A comparacion de este proyecto en donde tuvimos que empezar desde lo basico de armar el circuito a ya cambiar las características del sistema, lo que permitio afianzar temas teóricos dentro de la practica.

Estudiante B: La practica siempre va a ser el complemento perfecto de la teoría. Retomando mi idea y aplicándola en otro campo de la Ingeniería Eléctrica: nosotros podemos ver un curso de Transformadores completo en la Universidad pero es necesario aterrizar esos conceptos haciendo las pruebas de corto y de circuito-abierto, ya que eso familiariza al estudiante con algo físico, algo que es tangible en el mundo real y no con un modelo.

Estudiante C: ¡El computador analógico fue genial!

Estudiante D: Gracias al computador analógico entendí muchísimas cosas sobre los sistemas aplicados a la vida real.

Es importante comentar que las observaciones de los estudiantes C y D no fueron obtenidas durante la encuesta, sino que ellos las expresaron espontáneamente durante el proceso de evaluación de cursos que se hace al final de cada semestre en la universidad. Nos pareció importante incluir estas observaciones porque muestran lo significativo que fue el trabajo para quienes así se expresaron libremente.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado un modelo básico de computación analógica para experimentar con la respuesta de un sistema de segundo orden. El circuito presentado produce como entrada la señal escalón y, a su vez, el reinicio periódico de las condiciones iniciales en los integradores. Por facilidad de construcción se han utilizado un numero de componentes mínimo y accesible.

El computador analógico propuesto ofrece la posibilidad “jugar” fácilmente con la ubicación de los polos de un sistema físico *real*. Así es posible visualizar fácilmente el efecto de la ubicación de los polos en relación a la dinámica de los sistema LIT. Específicamente el paso directo de polos del semiplano izquierdo al semiplano derecho (cambiando el signo de ζ mediante un selector) permite una comprensión directa e intuitiva del concepto de estabilidad en sistemas LIT. El mayor aporte de este trabajo es la concepción de un sistema que combina simplicidad y riqueza dinámica suficiente para la experimentación en cursos fundamentales de señales y sistemas, circuitos y control.

Como docentes, acompañamos el punto de vista expresado por los estudiantes A y B en respuesta a la segunda pregunta. En síntesis, ellos ubican el valor principal de este trabajo en la estrecha conexión que se produce entre teoría y práctica, al trabajar con un

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





computador analógico. Esta conexão permite una mayor interiorización de los conceptos fundamentales de sistemas LIT. Desde una percepción complementaria, debemos resaltar la emotiva expresión del estudiante C cuando expresa que “El computador Analógico fue genial”. Estos puntos de vista nos permiten comenzar a dimensionar la importancia que este tipo de trabajos tienen dentro de la educación en ingeniería.

Desde una perspectiva más profunda y general, consideramos que este es un momento trascendental para redefinir la forma en que se debe impartir la educación en ingeniería tomando como base una teoría filosófica del aprendizaje más completa y humana. En este sentido, es valioso retomar la formidable síntesis que Erich Fromm hace del pensamiento de Spinoza, sobre los caminos que para aprender cualquier arte⁹:

¿Cuáles son los pasos necesarios para aprender cualquier arte? El proceso de aprender un arte puede dividirse convenientemente en dos partes: una, el dominio de la teoría; la otra, el dominio de la práctica. Si quiero aprender el arte de la medicina, primero debo conocer los hechos relativos al cuerpo humano y a las diversas enfermedades. Una vez adquirido todo ese conocimiento teórico, aún no soy en modo alguno competente en el arte de la medicina. Sólo llegaré a dominarlo después de mucha práctica, hasta que eventualmente los resultados de mi conocimiento teórico y los de mi práctica se fundan en uno, mi intuición, que es la esencia del dominio de cualquier arte. (FROMM, 2003, 4)

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo en la presentación de este trabajo. De igual manera, expresamos nuestro reconocimiento a los estudiantes que compartieron sus opiniones sobre el trabajo y gentilmente suministraron las imágenes presentadas en la Sección 4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHOUR, S.; SARPESHKAR, R.; RINARD, M. C. Configuration Synthesis for Programmable Analog Devices with Arco. *SIGPLAN Not.*, ACM, New York, NY, USA, v. 51, n. 6, p. 177–193, jun. 2016. ISSN 0362-1340. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2980983.2908116>.

ATHERTON, D. P. Control engineering and the analog computer: academic and industrial machines in Britain. *IEEE Control Systems*, v. 25, n. 3, p. 63–67, June 2005. ISSN 1066-033X.

BISSELL, C.; DILLON, C. *Ways of Thinking, Ways of Seeing: Mathematical and other Modelling in Engineering and Technology*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

⁹El término “Arte” no lo estamos usando aquí en el sentido tradicional de expresión humana artística, como la música o la pintura. El término lo usamos como la categoría del conocimiento que se quiere aprender: por ejemplo el arte de la medicina, el arte del diseño de edificios, el arte de la construcción de computadores, etc.



(Automation, Collaboration, & E-Services). ISBN 9783642252082. Disponível em: <https://books.google.com.co/books?id=FbifkQEACAAJ>).

BUSH, V. The differential analyzer. a new machine for solving differential equations. *Journal of the Franklin Institute*, v. 212, n. 4, p. 447 – 488, 1931. ISSN 0016-0032. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003231906169>).

CHEN, C.-T. *Linear System Theory and Design*. 3rd. ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc., 1998. ISBN 0195117778.

CLOSE, C.; FREDERICK, D.; NEWELL, J. *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*. John Wiley, 2003. ISBN 9780471452966. Disponível em: <https://books.google.co.nz/books?id=6X9bPgAACAAJ>).

FROMM, E. *El arte de amar: una investigación sobre la naturaleza del amor*. Paidós, 2003. (Paidós Contextos). ISBN 9789501269710. Disponível em: <https://books.google.com.co/books?id=axIFAAAACAAJ>).

HASLER, J. Opportunities in physical computing driven by analog realization. In: *2016 IEEE International Conference on Rebooting Computing (ICRC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8.

HOWE, R. M. Analog computers in academia and industry: a history of analog computing at the university of michigan and the founding of applied dynamics international. *IEEE Control Systems*, v. 25, n. 3, p. 37–43, June 2005. ISSN 1066-033X.

LUNDBERG, K. H. The history of analog computing: introduction to the special section. *IEEE Control Systems*, v. 25, n. 3, p. 22–25, June 2005. ISSN 1066-033X.

MACLENNAN, B. J. *Review of Analog Computing, Technical Report UT-CS-07-601*. U. of Tennessee, 2007. Disponível em: www.cs.utk.edu/mclennan).

OWENS, L. Where are we going, Phil Morse? Changing agendas and the rhetoric of obviousness in the transformation of computing at MIT, 1939-1957. *IEEE Annals of the History of Computing*, v. 18, n. 4, p. 34–41, Oct 1996. ISSN 1058-6180.

RAGAZZINI, J. R.; RANDALL, R. H.; RUSSELL, F. A. Analysis of problems in dynamics by electronic circuits. *Proceedings of the IRE*, v. 35, n. 5, p. 444–452, May 1947. ISSN 0096-8390.

ROBINSON, T. The Meccano set computers: a history of differential analyzers made from children’s toys. *IEEE Control Systems*, v. 25, n. 3, p. 74–83, June 2005. ISSN 1066-033X.

SARPESHKAR, R. Analog synthetic biology. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 372, n. 2012, 2014. ISSN 1364-503X. Disponível em: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/372/2012/20130110>).

Organização



Promoção



Joinville/SC – 26 a 29 de Setembro de 2017
UDESC/UNISOCIESC
“Inovação no Ensino/Aprendizagem em
Engenharia”



COBENGE 2017
XLV CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA

SHANNON, C. E. Mathematical Theory of the Differential Analyzer. *Journal of Mathematics and Physics*, v. 20, p. 337–354, 1941.

SPEARMAN, F. R. J. et al. Tridac, a large analogue computing machine. *Proceedings of the IEE - Part B: Radio and Electronic Engineering*, v. 103, n. 9, p. 375–390, May 1956.

SPIESS, R. The Comdyna GP-6 analog computer: alive but not exactly kicking. *IEEE Control Systems*, v. 25, n. 3, p. 68–73, June 2005. ISSN 1066-033X.

SPIESS, R. H. Analog computer needed! *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 2, n. 2, p. 2–4, Feb 1987. ISSN 0885-8985.

Organização



Promoção





INSTRUCTIONS FOR PREPARATION AND SUBMISSION OF WORKS TO THE
SCIENTIFIC COMMITTEE OF XLIV BRAZILIAN CONGRESS OF ENGINEERING
EDUCATION

Title: *SECOND ORDER ANALOG COMPUTER FOR GAINING INSIGHT ABOUT FUNDAMENTAL CONCEPTS IN LTI DYNAMIC SYSTEMS.*

Abstract: *In this work, we aim to recover the concepts from analog computing within engineering courses. In order to do so, we propose a model of an analog computer which allow to experiment with second order LTI systems. The circuit was conceived with a minimal number of components which are both standard and low-cost. We expect that students can gain great insight about fundamental concepts of linear time invariant dynamic systems by “playing” with this device. We also expect that students can learn, after interacting with the proposed analog computer, the following main concepts of LTI systems: stability and its relation with pole locations, block diagram realizations, second order system response and feedback. This circuit has been deployed several times in the course of Signal and Systems of the Electrical and Electronics Engineering Department of the National University of Colombia and has received very positive feedback comments from students after their work with it.*

Keywords: *Analog Computing, LTI systems, Stability, Laboratory practices, Operational Amplifiers.*

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



UNISOCIESC
Educação e Tecnologia

Promoção



ABENGE
Associação Brasileira de Educação em Engenharia