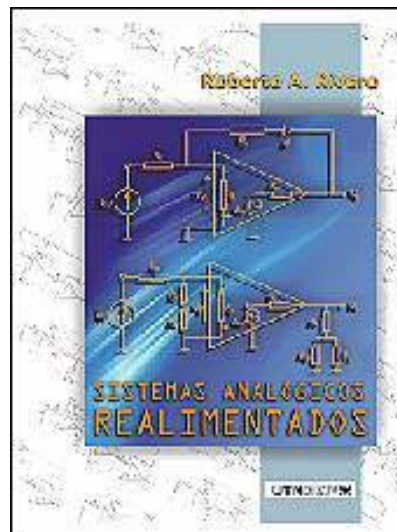


Sistemas Analógicos Realimentados

Roberto Ángel Rivero



edUTecNe
Buenos Aires, 2010

Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: *Ing. Héctor C. Brotto*

Vicerrector: *Ing. Carlos E. Fantini*

edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

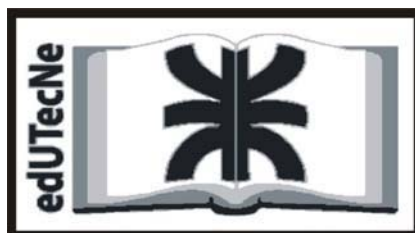
Coordinador General: *Ing. Ulises J. P. Cejas*

Director de Ediciones: *Ing. Eduardo Cosso*

Coordinador del Comité Editorial: *Ing. Juan Carlos Barberis*

Área Comercialización: *Ing. Hector H. Dabbadie*

Áreas Pre-prensa y Producción: *Téc. Bernardo H. Banega, Ing. Carlos Busqued*



Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin permiso expreso de edUTecNe

Sistemas analógicos realimentados

Roberto Ángel Rivero

Diseño de la tapa: Carlos Busqued

Corrección de Estilo: Bernardo Banega

Impreso en Argentina - Printed in Argentina

ISBN 978-987-25360-0-8

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723

©edUTecNe, 2009-05-26

Sarmiento 440, Piso 3

(C 1041AAJ) Buenos Aires, República Argentina

A mis nietos

CONTENIDO

Prólogo

Prólogo del autor

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 2. Transmitancias de sistemas analógicos realimentados

**Capítulo 3. Signo de una realimentación. Tipos y modos de
realimentación**

Capítulo 4 Variación de impedancias debido a la realimentación

Capítulo 5. Otras propiedades de la realimentación

Capítulo 6. Ancho de banda y fase de circuitos realimentados

Capítulo 7. Estabilidad

Capítulo 8. Análisis clásico de la estabilidad en los diagramas de bode

**Capítulo 9. Análisis general de estabilidad de sistemas analógicos
lineales**

Capítulo 10. Oscilaciones y osciladores senoidales

Anexo I. Método de Blackman para el cálculo de impedancias

Anexo II. Criterio de Routh-Hurwitz

**Anexo III. Transmitancias de fase no mínima - Transmitancias
pasatodo**

Anexo IV. Criterio de estabilidad de Nyquist

Anexo V. La Función Descriptiva

Indice

Bibliografía

PRÓLOGO

Explicar las cosas sirve para conocerlas.
Hacer las cosas sirve para comprenderlas.

“Docendo discitur” (enseñando se aprende). Johann Wolfgang Goethe.
“...Et homines, dum docent, discunt” (los hombres aprenden cuando enseñan). Séneca.

Estuve relacionado con la literatura científica durante aproximadamente medio siglo. Esta experiencia puede haber desarrollado en mí cierta sensibilidad sobre el tema. Ciertamente he adquirido prejuicios, algunos muy fuertes. Lo que ha crecido en mí lo volcaré ahora hacia ustedes, los lectores.

Esta nota precede a un libro escrito por un ex alumno, colaborador en la docencia y amigo, el ingeniero Roberto Angel Rivero, tucumano, nacido en 1938 y, para su fortuna, casado con Ana María Cangemi. Tienen cuatro hijos, dos varones y dos mujeres y ocho nietos.

En 1963 recibe su título de Ingeniero Electricista Especialidad Electrónica, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología y en 1989 el de Ingeniero Laboral, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán.

En 1974 la Universidad de Londres le otorga el grado de Master of Science in Control Systems.

Actualmente se desempeña en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán como profesor titular y en el Postgrado del curso de Especialización en Seguridad y Salud Ocupacional (ex-Ingeniería Laboral) y en la Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.

Su prolongada, brillante e ininterrumpida carrera docente se inicia en el año 1957 con el cargo de ayudante estudiantil de la cátedra “Análisis Matemático I”, FACET, UNT.

En su actividad de investigación y desarrollo ha participado en numerosos e importantes proyectos.

Tanto su actividad docente como la de investigador han dado lugar a numerosos trabajos publicados en revistas de circulación internacional, en libros y en presentaciones en jornadas y congresos.

Agradezco al ingeniero Rivero y a la Universidad Tecnológica Nacional que nos den la oportunidad de participar en este proceso de comunicación, ya que la comunicación constituye la esencia del proceso de enseñanza – aprendizaje. Educación y comunicación son procesos inseparables, ya que cualquier hecho educativo requiere mediaciones comunicativas y no hay situación comunicativa que no tenga una influencia educativa, en algún sentido.

Ya desde la Introducción Rivero atrapa la atención del lector con ejemplos e imágenes muy bien elegidos y desarrollados al presentar a los sistemas realimentados e introducir el concepto de *“lazo de circulación de la señal de realimentación”*. Nos muestra que la realimentación está prácticamente presente en casi todas las áreas de la naturaleza. En el ítem “Un poco de Historia” hace alarde, seguramente sin proponérselo, de su erudición en el tema de este libro.

Más adelante nos alerta sobre los peligros de los “*sistemas inestables*” y nos comenta claramente las ventajas de la “*realimentación negativa*”.

Los capítulos que siguen presentan una forma conceptual y práctica para el análisis y síntesis de circuitos electrónicos realimentados.

Es criterio del autor que se debe intensificar la preparación del estudiante en estos temas, pero de una manera más amplia y generalizada, dada la universalidad de los ámbitos en los que se desenvuelven tales conceptos. En consecuencia, es intención en este texto, de aprovechar conocimientos desarrollados en la teoría de control para aplicarlos de manera general en el análisis y síntesis de los circuitos electrónicos, en la esperanza de facilitar y agilizar la interpretación del fenómeno de la realimentación, y al mismo tiempo poder cubrir una necesidad dentro de la bibliografía existente en electrónica.

Si bien este libro está orientado a los sistemas analógicos realimentados, los conceptos básicos que se desarrollan son de extrema utilidad para cuando se desean analizar sistemas digitales realimentados. Téngase presente que hoy en día, en muchos casos, se juntan subsistemas de ambos tipos, resultando difícil de definir en qué “categoría” se los pueden clasificar, es decir, si se los consideran “analógicos” o “digitales”. Más aún, existe una clara tendencia a integrar cada vez más estos tipos de circuitos, sin mencionar “categorías”.

En palabras de María A. Maidana de Lazarte, los escritores son lectores voraces, proceden como termitas ante la letra impresa, leen por placer y por su historia íntima con las palabras. Y también leen para aprender. Quieren saber cómo hicieron otros, qué formas o figuras eligieron, cómo resuelven una historia, sus lecturas no son desinteresadas. Saben que del otro lado está el lector al que pretenden interesar, desafiar, informar o conmover pero al que sobre todo respetan. Los escritores son los que han leído. Y sin desconocer la existencia del talento, de cierto don, siempre es posible aprender a escribir mejor. La lectura es la herramienta necesaria si queremos hacerlo. La otra es el trabajo.

Recorriendo las páginas de este libro, confirmo que su autor ha leído, ha asimilado y ha trabajado.

Ing. Juan Manuel Yalour
Bernal

PROLOGO DEL AUTOR

La publicación de mi libro, “Introducción a la Realimentación en Electrónica”, (año 1993 - Editorial Universidad de Tucumán) en donde analizaba la problemática relacionada con el análisis y el diseño de circuitos analógicos realimentados, me permitió valorar en su magnitud la idea sobre la necesidad de que los alumnos dispongan de más bibliografía específica y complementaria sobre dichos temas.

Motivado por ello y empujado en muchos casos por los mismos alumnos, decidí actualizar ese libro, con algunas modificaciones, agregando nuevos conocimientos complementarios y más ejemplos aclaratorios que entiendo mejoran y facilitan el entendimiento de los conceptos fundamentales. Fruto de ese trabajo, es esta nueva presentación. He tratado de volcar en el mismo, la experiencia adquirida en los años de docencia universitaria en asignaturas relacionadas con el análisis y el diseño de circuitos electrónicos, más la experiencia desarrollada en la implementación de los mismos.

En todo el desarrollo del libro, siempre se ha partido de conceptos básicos de la teoría de circuitos y de la teoría de realimentación, las que fueron adaptadas, en aquellos casos en que fue necesario, a las necesidades para el desarrollo de esta presentación. Se trata de mostrar en forma simple las propiedades fundamentales existentes en todo circuito realimentado.

El autor estima que, a pesar del notable desarrollo y avance de las técnicas digitales que tienden a desplazar la utilización de algunas teorías clásicas, los conocimientos básicos desarrollados en este libro son fundamentales y que los mismos se mantendrán útiles durante mucho tiempo en la vida profesional de la ingeniería electrónica.

Al igual que en el libro anterior, éste consta de dos partes fundamentales. La primera, desde el capítulo dos al seis inclusive, trata sobre formas de análisis de los circuitos, su estructura conceptual, su funcionamiento y las propiedades necesarias que se deducen para el diseño. La segunda parte estudia la estabilidad de los mismos, condición necesaria pero no suficiente para asegurar un comportamiento adecuado. Se presentan métodos de evaluación a lazo cerrado y a lazo abierto, con las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Esta obra está dirigida fundamentalmente a los estudiantes de grado y posgrado de ingeniería electrónica y a aquellos profesionales dedicados al diseño de sistemas y/o circuitos analógicos realimentados.

Espero que este esfuerzo no haya sido en vano y cumpla con mis expectativas de servir a docentes y alumnos.

Agradecimientos:

Deseo dejar expresado mi agradecimiento a las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional, a su editorial (edUTecNe) que me brindaron el apoyo necesario para la publicación de esta obra y en especial al Ing. Ulises J. P. Cejas, quien siempre me alentó para seguir adelante con este trabajo.

También al amigo Ing. Diego Miguel Gil por su permanente colaboración en la discusión de distintos temas, a los alumnos que durante años pasaron por mis cátedras y que en forma anónima con sus dudas, preguntas y críticas colaboraron con importantes aportes para el enriquecimiento de esta obra.

Al Ing. Pedro H. Cano, quien me brindó un importante impulso al tipear el texto original, base sobre el cual se desarrolló el presente trabajo.

Un especial agradecimiento a mi profesor y amigo Juan Manuel Yalour, que me brindó gran apoyo profesional y prologó este libro.

No puedo dejar de agradecer a Dios, que me dio la salud necesaria para que después de cincuenta y dos años de docencia, concretara este trabajo, y por supuesto, a mi familia que siempre me acompaña.

Ing. Roberto Angel Rivero

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Los sistemas analógicos realimentados

No resulta difícil comprender que sistemas realimentados siempre existieron en la naturaleza y que gracias a los mismos se vive en equilibrio entre todas sus variables. También es frecuente suponer que tales sistemas son por lo general esencialmente complejos y que por lo tanto resultan difíciles de analizar. Sin embargo, muchos de ellos no son tan complicados como pudieran parecer. Por ejemplo, en las primeras instancias de la educación de la niñez, se muestran ciertos casos simples, que aunque no se presentan como “*sistemas realimentados*” el concepto de lazo cerrado subyace en su explicación. Un fenómeno elemental pero concreto de lo anterior es el famoso circuito del “*agua que se evapora, nubes que se forman, agua que en forma de lluvia vuelve a la tierra y que luego se desparrama por el suelo, y más tarde se vuelve a evaporar*”. Más aún, el niño normalmente realiza un dibujo de estas partes uniéndolas con flechas que indican la “*circulación del agua*”. Como puede observarse, se trata de un “estado de equilibrio” debido a una realimentación existente.

Otro claro ejemplo diario lo constituye el comportamiento humano cuando parte de él actúa como motor. Como ejemplo, supóngase que se desea alcanzar una taza con una mano. El primer paso es tomar conocimiento de la posición relativa que tiene la mano respecto a la posición de la taza, a través del sentido de la vista. Es la información que luego ingresa al sistema nervioso, el cual después de procesarla instruye a los músculos para que ejecuten determinados movimientos. De esta manera se conforma un sistema de *lazo cerrado* donde la información circula permanentemente según el esquema distancia mano-taza, vista-sistema nervioso, sistema muscular, etc., que se muestra en la figura 1.1.

A medida que la distancia disminuye, la información que llega al cerebro también cambia, enviando órdenes a los músculos de variado tenor tal que para la *distancia cero* la mano haya podido alcanzar la taza.

Obsérvese que este sistema así descrito, no podría funcionar si alguna de las partes que lo componen desapareciera, pues al abrirse el lazo se interrumpe la circulación permanente de la información, resultando imposible que la mano pueda alcanzar la taza. Tal es el caso de un ciego, un manco, etc. En otras palabras, la circulación permanente de la información es condición vital para alcanzar el objetivo propuesto.

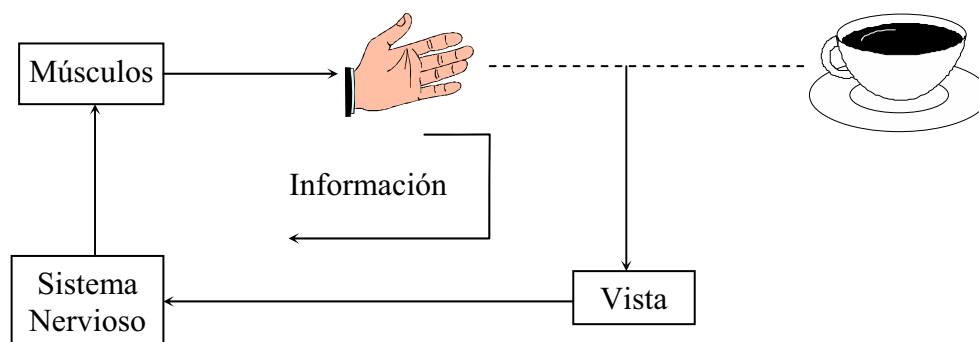


Fig. 1.1. Esquema del lazo cerrado por donde circula permanentemente la información para que la mano pueda alcanzar la taza.

Entonces, cuando la información circula en esta forma cerrada, se dice que existe un lazo de realimentación, y es la característica fundamental de todos los sistemas realimentados.

Otro ejemplo interesante de un sistema que al principio resulta difícil de imaginárselo como realimentado, es el del simple atenuador resistivo de figura 1.2.a). Este concepto puede entenderse fácilmente a partir de la figura 1.2.b) que muestra un diagrama de flujo de dicho divisor resistivo y donde se observa claramente la existencia de un lazo de realimentación. Más aún, si se desea tener una explicación verbal de la realimentación existente en el circuito, podría analizarse el mismo de la siguiente manera, utilizando el diagrama de figura 1.2.a). Supóngase por un momento que la tensión de salida v_2 aumentase por algún motivo externo a la señal de entrada v_1 . En ese momento, la diferencia de tensión $(v_1 - v_2)$ disminuiría, y por ende la corriente $i = (v_1 - v_2) / R_1$ también. En consecuencia, si la corriente i disminuye, la tensión de salida $v_2 = i \times R_2$, también disminuirá tratando de compensar el aumento inicial.

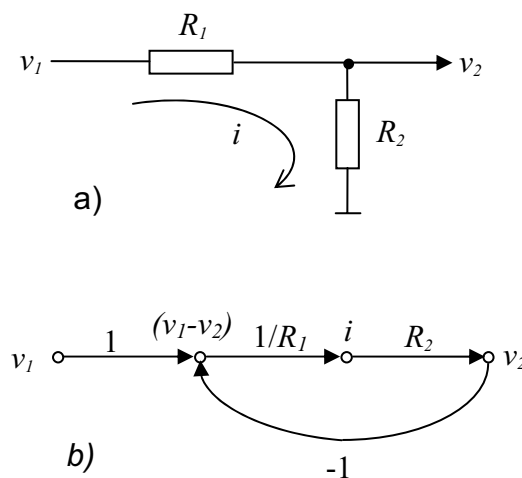


Fig. 1.2. a) Atenuador resistivo, b) interpretación como sistema realimentado

Se podría continuar mostrando numerosos otros ejemplos de la vida diaria, donde siempre se encontraría la presencia de algún elemento y/o información que circula permanentemente por un recorrido cerrado, conocido como el “lazo de circulación de la señal de realimentación”.

Pero con estos tres simples ejemplos indicados más arriba, en apariencia tan disímiles entre sí, es intención mostrar que la realimentación está prácticamente presente en casi todas las áreas de la naturaleza. Por ello, no podrá resultarle extraño al lector la aseveración de que siempre existirá alguna forma de realimentación en todos los circuitos de la electrónica analógica. Un claro ejemplo fue el del divisor resistivo de figura 1.2. Más aún, un sistema analógico no puede implementarse sin que alguna realimentación asegure características estables de su funcionamiento.

Sin embargo, a pesar de ello y de la enorme cantidad de estos sistemas que existieron desde siempre, un estudio formal de los mismos no se llevó a cabo sino en épocas más recientes. Se desconoce cuando comenzó a utilizarse algún tipo de realimentación intencional en un sistema y que simultáneamente haya sido tratado como tal. Quizás el más elaborado y conocido (aparte de los primeros trabajos de Leonardo Da Vinci) aparece recién en 1788 con el regulador centrífugo de bolas de la máquina a vapor de Watt.

1.2. Un poco de Historia

Los primeros conceptos de realimentación aplicados a sistemas elementales datan de la época de Leonardo Da Vinci. Pero recién en 1922 Nicholas Minorsky en su *Directional Stability of Automatically Steered Bodies* publicó un compendio de la teoría y experiencia desarrollada hasta esa fecha, complementada por H. L. Hazen en 1934 con el libro *Theory of Servomechanisms*. En la misma época también existieron importantes trabajos de otros científicos sobre el particular. Como una muestra de reconocimiento a tales esfuerzos, la figura 1.3 muestra un escrito original de Harold Black, pionero en el tema.

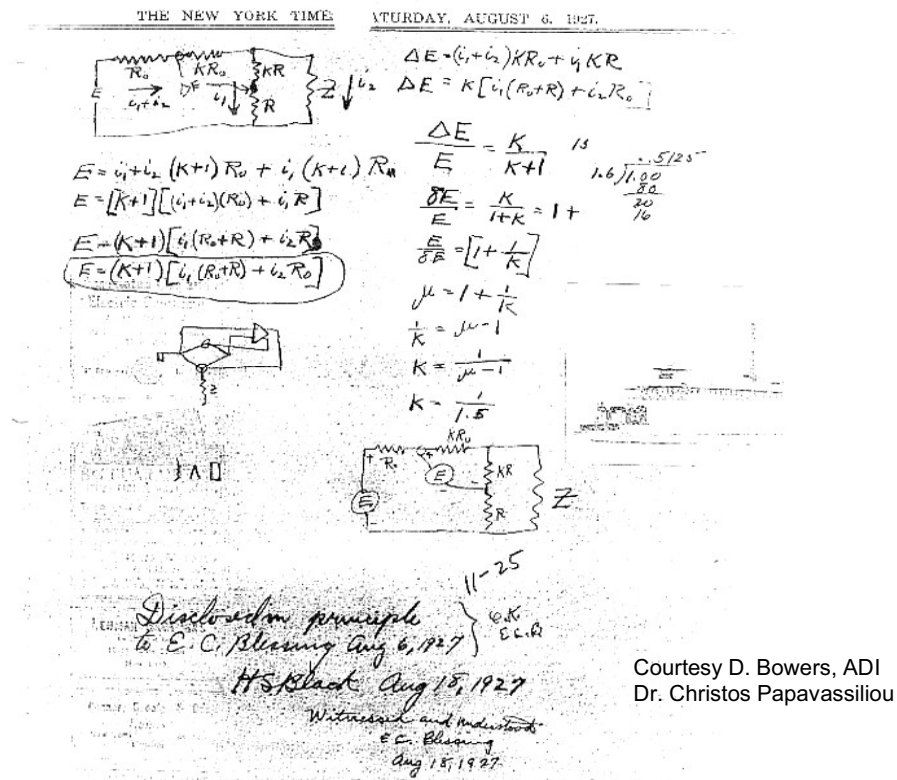


Fig. 1.3. Borrador original de Harold Black sobre amplificadores realimentados, de 1927.

En 1932, H. Nyquist publicó por primera vez en *Regeneration Theory* un procedimiento para estudiar la estabilidad de amplificadores realimentados usando técnicas de estado estacionario, que más tarde se convirtieron en el conocido criterio de la estabilidad de Nyquist.

En 1940, H. W. Bode en su libro *Feedback Amplifiers Design*, publicó técnicas de realimentación más modernas para el diseño de circuitos eléctricos, algunas de las cuales se utilizan en este texto.

La segunda guerra mundial, debido a la necesidad de contar con sistemas realimentados de alta performance, originó un extraordinario desarrollo en el tema, tanto en aspectos teóricos como prácticos. Pero por razones de seguridad militar, todo ello recién se conoció después de terminada la contienda bélica. En esa época, una de las publicaciones más interesantes fue *Theory of Servomechanisms* de H. James, N. Nichols y R. Phillips aparecida en 1947.

En 1955, John G. Truxal publicó *Automatic Feedback Control System Synthesis*, considerado como uno de los libros más importantes de esa época. Allí se analiza la realimentación en circuitos electrónicos utilizando los conceptos más modernos de

flujo de señal, diferencia de retorno, sensibilidad, etc., los que se utilizan como base en este libro para la presentación en capítulos siguientes.

En la década de 1960, con el advenimiento de las computadoras digitales, se comenzaron a analizar sistemas más complejos, lo que generó un impulso importante tanto en la teoría como en la práctica de los sistemas realimentados.

A partir de esa época, aparecen múltiples publicaciones y textos relacionados con el tema, dirigidos fundamentalmente a la teoría de control, a los servosistemas, a procesos de plantas industriales, etc., pero pocas relacionadas con la utilización de la teoría de control para el análisis y síntesis de los circuitos electrónicos analógicos realimentados en general.

Más aún, en los programas actuales de la enseñanza de la electrónica se observa, en la mayoría de los casos, que el estudio y utilización de la teoría de la realimentación aplicada en los circuitos electrónicos queda normalmente reducido a un punto más entre todos los temas que se enseñan en alguna asignatura.

Por ello, es criterio del autor que se debe intensificar la preparación del estudiante en estos temas, pero de una manera más amplia y generalizada, dada la universalidad de los ámbitos en los que se desenvuelven tales conceptos. En consecuencia, es intención en este texto, de aprovechar conocimientos desarrollados en la teoría de control para aplicarlos de manera general en el análisis y síntesis de los circuitos electrónicos, en la esperanza de facilitar y agilizar la interpretación del fenómeno de la realimentación, y al mismo tiempo poder cubrir una necesidad dentro de la bibliografía existente en electrónica.

1.3. Algunas ideas básicas

La figura 1.4 muestra como ejemplo, el esquema clásico de un sistema realimentado simple, muy utilizado en ingeniería. En particular, en electrónica, el sistema a controlar es frecuentemente un amplificador o un conjunto de ellos, o un conjunto de circuitos que conforman una función de transferencia determinada, etc., al que se conoce como *el sistema*.

La señal a realimentar se toma muchas veces de la salida del sistema y a través de una red de realimentación (normalmente pasiva), se la reinyecta a la entrada usando un circuito comparador, el que entrega una señal que se denomina señal de error $e(t)$. Esta señal es precisamente la señal que el sistema utiliza para corregir, haciendo que la salida sea la deseada.

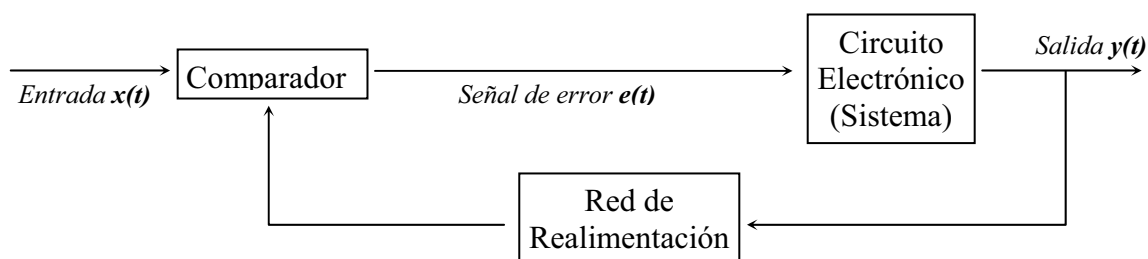


Fig. 1.4. Esquema clásico de una realimentación simple.

Pero sin embargo, intentar una definición general para un sistema realimentado resulta difícil. Podría decirse que es tomar información de uno o varios puntos de un sistema (a menudo de su o sus salidas) y volverla hacia atrás para que pueda ser comparada con información proveniente de una o varias entradas, tal que la *comparación o diferencia entre estas señales* sea la que sirva para controlar el sistema.

Esta definición no cubre todo el ancho espectro de posibilidades, pues solo es apta para el campo de la tecnología aplicada como en el caso de los circuitos electró-

nicos, reguladores, servosistemas, controles automáticos de procesos, etc. Si se piensa en el área de la biología, o de los sistemas ecológicos, etc., en donde existen fuertes vínculos dados por variadas y múltiples realimentaciones no lineales, evidentemente la definición anterior no resulta la más apropiada. Sin embargo es la que se tiene en cuenta para este texto, por considerársela adecuada para la generalidad de los circuitos electrónicos que poseen uno o más lazos de realimentación.

Quede en claro entonces que lo que se busca en una realimentación intencional es que el sistema funcione de una determinada manera, y que las características de este comportamiento estén dadas fundamentalmente por la realimentación empleada.

Por ejemplo si se considera el problema más simple de un amplificador, lo que normalmente se desea es que la señal de salida del mismo siga a la señal de entrada solamente afectada por un coeficiente de proporcionalidad, conocido como la ganancia realimentada del amplificador. Por ejemplo, en el caso que el circuito sea para manejar un parlante, se busca que la información sobre dicho parlante, siga adecuadamente a la proveniente, por ejemplo, del micrófono, a pesar de la diferencia de potencia en juego entre la entrada y la salida.

Sin embargo, ello no siempre es fácilmente realizable debido a ciertos problemas que surgen en todo sistema realimentado. El más importante de todos ellos es el de la estabilidad del circuito que puede verse afectada cuando se aplica realimentación. Es fácil imaginar que un circuito inestable nunca podrá cumplir con las especificaciones deseadas de su diseñador. Pero a pesar de ello, este aspecto prioritario en todo diseño, a veces no es lo suficientemente analizado, pudiendo encontrarse soluciones equívocas que afecten fuertemente la confiabilidad de funcionamiento del mismo.

Por otra parte, uno de los aspectos positivos más relevantes buscados en los circuitos realimentados es la característica dinámica que se puede obtener, especialmente para los sistemas de comunicaciones, instrumentación, etc. La importancia de la performance dinámica de los mismos, materializada en la respuesta en el tiempo a entradas bien especificadas, se ha visto incrementada en los últimos tiempos, en detrimento del interés de las características estáticas.

Es precisamente en este campo en que la ingeniería electrónica ha influido fundamentalmente, facilitado por la implementación digital de elaboradas leyes de realimentación que permiten obtener el comportamiento dinámico requerido.

Otra característica de la realimentación es la modificación de todos los niveles de impedancia que el sistema posee y que estén de alguna manera relacionados con algún lazo de realimentación. A veces resulta una característica no deseada, pero en otras circunstancias, se la utiliza para obtener impedancias acordes con la especificación buscada. Tal es el caso de elevados valores de impedancia de entrada necesarios para algunos tipos de sensores especiales así como el de impedancia nula para el caso de fotocélulas, etc.

Pero quizás una de las ideas más extendidas de una *realimentación negativa* es que *siempre* proporciona soluciones a problemas que se presentan en los circuitos electrónicos, tales como ruido, distorsión, zumbido de fuente, etc. Equivocación que proviene normalmente de analizar casos particulares, donde los beneficios obtenidos se extienden después equivocadamente a otros casos. Un ejemplo común es el ruido generado en la entrada de un primer amplificador, el que no puede ser modificado por la realimentación negativa, ya que el mismo lo considera como si fuera una información más de entrada.

Por otro lado entre las características más beneficiosas que normalmente la *realimentación negativa* brinda, se tiene:

1. Reducir la sensibilidad de la relación entrada-salida para variaciones de componentes del circuito.

2. Reducir el efecto de no linealidades y distorsiones originadas por el circuito.
3. Incrementar la exactitud, o sea la habilidad de reproducir o conformar la señal de entrada.
4. Aumentar el ancho de banda disponible.

Tampoco deben olvidarse los beneficios que una *realimentación positiva* posee. Varios de ellos son utilizados en electrónica para obtener características deseadas de anchos de bandas, impedancias, etc., aspectos que se desarrollan a lo largo de la primera parte de este libro.

Los capítulos que siguen presentan una forma conceptual y práctica para el análisis y síntesis de circuitos electrónicos realimentados. Su característica principal es que permite una clara interpretación del proceso de la realimentación con la particularidad de que estos conceptos se mantienen a lo largo de todas las etapas de cálculo, facilitando el conocimiento de dicho fenómeno para la obtención de una solución adecuada a los intereses del diseñador. También se presentan en la segunda parte conceptos fundamentales de estabilidad, lo que se considera prioritario a tener en cuenta en todo diseño.

Si bien este libro está orientado a los sistemas analógicos realimentados, los conceptos básicos que se desarrollan son de extrema utilidad para cuando se desean analizar sistemas digitales realimentados. Téngase presente que hoy en día, en muchos casos, se juntan subsistemas de ambos tipos, resultando difícil de definir en que “categoría” se los pueden clasificar, es decir, si se los consideran “analógicos” o “digitales”. Más aún, existe una clara tendencia a integrar cada vez más estos tipos de circuitos, sin mencionar “categorías”. Un ejemplo de ello se presenta en el capítulo 2 punto 8, donde se analiza con un “esquema analógico simple” a una “implementación digital” de un Circuito Controlado por Fase (Phase Lock Loop).

BIBLIOGRAFIA

- A. H. W. Bode – “Network Analysis and Feedback Amplifiers Design” – Van Nostrand – New York 1945.
- J. G. Truxal – “Automatic Feedback Control systems Synthesis” – Mc-Graw Hill - New York - 1955.
- S. Seshu y N. Balabian - “Linear Network Analysis” - John Wiley & Sons, New York, 1961
- K. Ogata – “Modern Control Engineering” – Prentice Hall – N.J. 1970.
- J. Millman and C.C. Halkias – “Integrated Electronics” – Mc. Graw Hill – New York 1972.
- Roberto Angel Rivero – “Proyectos de Circuitos Electrónicos”, Tomos I, II y III – Editorial Arbó – Buenos Aires 1976.
- Sol Rosenstark – “Feedback Amplifier Principles” – Macmillan Publishing Company – New York 1986.
- Roberto Angel Rivero - Introducción a la Realimentación en Electrónica – Ed. Universidad Nacional de Tucumán, 1993.
- Diego Miguel Gil - Diseño con Amplificadores Operacionales – Ed. Universidad Nacional de Tucumán – Tucumán, Argentina 1993.
- Robert Boylestad y Louis Nashelsky - Electrónica: Teoría de Circuitos – Prentice Hall – 1997.
- Sergio Franco - Design with Operacional Amplifiers and Analogue Integrated Circuits – Mc. Graw Hill
- R. Blackman – “Effect of Feedback on Impedance” – BSTJ, Vol. 22, Octubre 1943.
- C. Belove y D.L. Schilling – “Feedback Made Easy for Undergraduate” – IEEE Trans. On Educ., Vol. 12 – Junio 1969.
- S. Rosenstark – “A Simplified Method of Feedback Amplifier Analysis” – IEEE Trans. On Educ., Vol. E-17 – Nov. 1974.
- R. D. Middlebrook – “Measurement of Loop Gain in Feedback Systems” – Int. J. on Electronics – Abril 1975.
- A. M. Davis – “A General Method for Analysing Feedback Amplifiers” – IEEE Trans. on Educ. - Noviembre 1981.
- S. Rosenstark – “Loop Gain Measurement in Feedback Amplifiers” – Int. J. on Electronics – Marzo 1984.
- J. Choma – “Signal Flow Analysis of Feedback Networks” – IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol 17, Abril 1990.
- Sam Ben-Yaakov – “A Unified Approach to Teaching Feedback in Electronic Circuits Courses” – IEEE Transactions on Education, Vol. 34, November 1991.
- P.J. Hurst – “Exact Simulation of Feedback Circuit Analysis” – IEEE Trans. Circ. Syst., Vol 38 – Noviembre 1991.

- P.J. Hurst – “A comparison of Two Approaches to Feedback Circuit Analysis” – IEEE Transactions Education, Vol 35, Agosto 1992.
- B. Nikolic y S. Morjanovic – “A General Method of Feedback Amplifier Analysis” – IEEE Int. Symp. Circuits Systems, Monterrey, C.A. - 1998.
- J. L. Rodriguez Marrero – “Simplified Analysis of Feedback Analysis” – IEEE Tans. On Educ. Vol 48 – Febrero 2005.
- R. D. Middlebrook – “The General Feedback Theorem: A Final Solution for Feedback Systems” – IEEE Microwave, Vol 7 – Abril 2006.
- Christian Falconi Arnaldo-Gianluca Giustolisi Gaetano – “Rosenstark-like Representation of Feedback Amplifier Resistance” – IEEE Transactions – 2007.
- Roberto Angel Rivero – “Variación de impedancias debido a la realimentación” – Portal Web de la Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/tutoriales> - 2007
- Roberto Angel Rivero - Apuntes de cátedra - Portal Web de la Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/tutoriales> - 2006/2008