

Realimentación como paradigma de integración conceptual en educación

Daniel Martín Vega Barvo
ximenavegl@telesat.com.co

Fecha de recepción: 2-12-2003

Fecha de aceptación: 21-4-2004

ABSTRACT

Feedback is a key phenomena and concept in Control theory and systemic thinking. Its importance and historic evolution in different areas of endeavor are analyzed.

KEYWORDS

Systemic thinking, Control Theory, Feedback.

RESUMEN

Las implicaciones y la evolución histórica del fenómeno de retroalimen-

tación, en la estructuración de la Teoría de Control, y en la ejecución del pensamiento sistémico en diferentes áreas del saber son analizadas.

PALABRAS CLAVES

Pensamiento sistémico, teoría de control, retroalimentación.

Clasificación: B

INTRODUCCIÓN

En la solución de los múltiples problemas en el mundo se utilizan enfoques interdisciplinarios, los cuales requieren de fenómenos y herramientas integrativos, que estructuran la plasticidad funcional del profesional moderno, entrenado mediante la implementación de los nuevos desarrollos curriculares de pensamiento crítico, integrativo y de aprendizaje activo.

El análisis del fenómeno de retroalimentación, su implementación conceptual en el contexto de su existencia en el mundo biológico como base estructural adaptativa en la sobrevivencia de los seres, su implementación en la ejecución del pensamiento sistémico en el desarrollo de los modelos empresariales y educativos, en un marco evolutivo histórico, estructuran la reflexión a ejecutar.

Los sistemas vivientes se caracterizan por una variedad de mecanismos de control y regulación, que involu-

cran múltiples sistemas de “retroalimentación”, los cuales garantizan un estado estacionario del sistema, este tipo de mecanismos nunca se encuentra en el resto de la naturaleza “no viviente”. La capacidad de “autorregulación”, para mantener un sistema complejo viviente en estado estacionario es lo que se denomina homeostasis y/o retroalimentación.²

El pensamiento sistémico es una disciplina para ver totalidades. Es un marco para ver interrelaciones en vez de cosas, para ver patrones de cambio en lugar de “instantáneas” estáticas. Sus herramientas y técnicas específicas se originan en dos ramificaciones: el concepto de “realimentación” de la cibernética y la teoría del “servomecanismo” de la ingeniería que se remonta al siglo XIX, con aplicaciones durante los últimos cuarenta años, en una amplia gama de sistemas empresariales, urbanos, económicos, ecológicos y biológicos.¹

En qué consiste el fenómeno de retroalimentación (Figura 1).

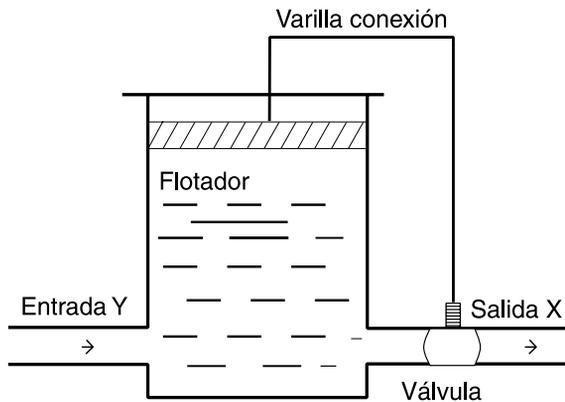


Figura 1. Un ejemplo sencillo de la vida cotidiana, ilustrativo del fenómeno de retroalimentación.

En todo sanitario es preciso mantener en un volumen de agua su nivel apropiado sin rebosar el recipiente, para lograr esto debe definirse siempre un equilibrio entre el flujo de entrada y salida de agua, el sistema posee una estructura de control constituida por una válvula con su varilla y flotador, los cuales cuando el flujo de entrada aumenta elevándose transitoriamente el nivel de agua se aumenta el flujo de salida hasta igualar al de entrada, con el objeto de llegar a un nuevo estado estacionario en el cual se minimiza la perturbación en el nivel de agua del recipiente.

Esta situación, cuyo objeto es mantener el nivel de una variable constante en procesos de aporte y consumo,

se estructura en el entorno de sistemas biológicos, empresariales y educativos. La formalizamos mediante el análisis de las Figuras 2 y 3.

El nivel de agua es nuestra variable regulada, la cual es incrementada transitoriamente mediante una perturbación continua en el tiempo (incremento del flujo de entrada, Figura 2), generándose así una señal de error (diferencia entre el valor deseado de su nivel y el actual). El sistema de retroalimentación negativo, constituido por la estructura de control descrita minimiza el error, incrementando el eflujo, definiendo un nuevo estado estacionario, en el cual el aporte (influjo) es igual al consumo (eflujo) y el nivel de agua retorna a un valor cercano al de referencia.

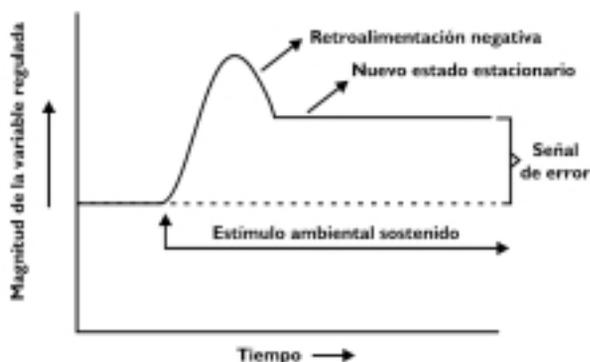


Figura 2. Elementos dinámicos de una respuesta compensatoria.

En este contexto podemos describir el patrón general y propósito de los sistemas de control con retroalimentación, bien sean biológicos o diseñados por el hombre. En la Figura 3 utilizamos la notación del “diagrama de bloque”, un instrumento descriptivo en análisis de sistemas. En esta

notación cada proceso unitario (planta por ejemplo) está representado por un bloque con una entrada y_c y una salida y . La salida (variable dependiente) depende de la entrada (variable independiente) de acuerdo con una “ley de sistemas”, la cual puede ser expresada en términos verbales,

demostramos identificar. Incidentalmente, es esta resta (o inversión de signo alrededor del circuito) la que estructura la retroalimentación “negativa” y garantiza que los ajustes en la variable regulada se ejecuten en la dirección correcta.

En los sistemas de control biológicos es prácticamente imposible identificar un comparador. Podemos definir cuantitativamente un punto de referencia implícito, como valor operacional normal del conjunto de parámetros del sistema, pero no sabemos dónde está y cómo ajustarlo operativamente. En forma análoga, se puede identificar una inversión de signo

alrededor del circuito de control, el “sine qua non” de la retroalimentación negativa, el cual no es ejecutado por un simple comparador, sino más bien por una relación particular de entrada-salida de algún componente particular, bien sea de la planta o del controlador, lo que destaca la complejidad en el diseño de sistemas de control biológicos.³

Aunque hemos hecho énfasis en retroalimentación negativa, ¿cuál es la diferencia fundamental entre un sistema de retroalimentación negativa y uno positivo?

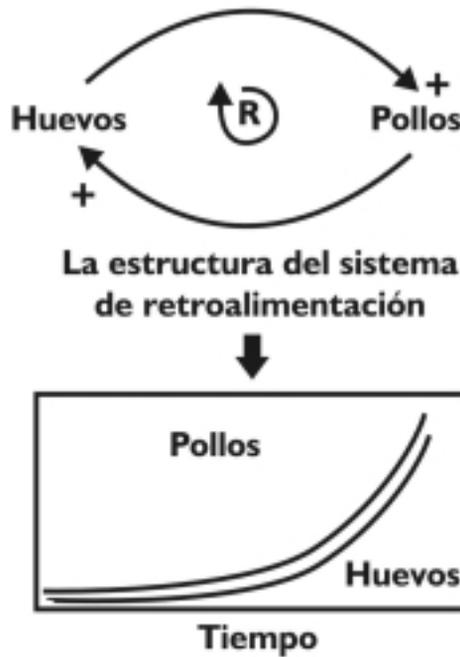


Figura 4. Un ejemplo de retroalimentación positiva.

Sterman J.D.⁴ presenta la situación de un criadero de pollos en donde la estructura del sistema de retroalimentación define una dinámica, en la cual un incremento en el número de huevos puestos por las gallinas genera un incremento en el número de nacimientos de pollos en el sistema de reproducción (Figura 4).

Ilustrándose así el hecho fundamental dinámico que mientras en un sistema de retroalimentación “positiva” se refuerza no obteniéndose un nuevo estado estacionario, en el de retroalimentación “negativa” existe autocorrección, hacia un nuevo estado estacionario, en presencia de una perturbación.

Por consiguiente, los sistemas automáticos de control con realimentación se caracterizan por:

1. Su propósito es realizar en forma automática una acción de gobierno, manteniendo una variable regulada cercana a su punto de referencia en estado estacionario, cuando es retroalimentación negativa.
2. El sistema opera en circuito (lazo) cerrado.
3. El sistema incluye un proceso sensor de la variable regulada y un proceso comparador de medida con su punto de referencia, como elementos funcionalmente separables del resto.

Cuál ha sido la evolución histórica de la retroalimentación

Todo ser vivo es un sistema autorregulado que debe su existencia, su es-

tabilidad y la mayor parte de su conducta a los mecanismos de realimentación que lleva implícitos. Considerando la universalidad del concepto y el hecho de que la operación de realimentación se puede observar en una variedad de fenómenos, por ejemplo desde los ciclos de población de los animales hasta los altibajos que sufre el mercado de valores, resulta curioso que el estudio teórico del concepto de control por realimentación sucediese tan tarde en el desarrollo de la ciencia y de la tecnología.

Hablar de sistemas de control automático significa hablar de realimentación. En palabras de Norbert Wiener⁵ “realimentación es un método de controlar un sistema reinsertando en él los resultados de su comportamiento anterior”. Desde un punto de vista más restrictivo diremos que un sistema de control realimentado o un sistema de control en lazo cerrado es aquel que tiende a mantener una relación prevista de una variable del sistema con otra, comparando funciones de estas variables y utilizando su diferencia como medio de control.

Así como se emplea la realimentación de forma inconsciente, podemos decir que las primeras evidencias de la actividad consciente del hombre en el campo de control automático las tenemos en los sistemas de regadío empleados en Babilonia 2000 años antes de Cristo. Los orígenes y líneas fundamentales del desarrollo de la realimentación se ilustran por el diseño de tres dispositivos: 1) Los antiguos relojes de agua. 2) Los termostatos. 3) Los mecanismos para controlar los molinos de viento.

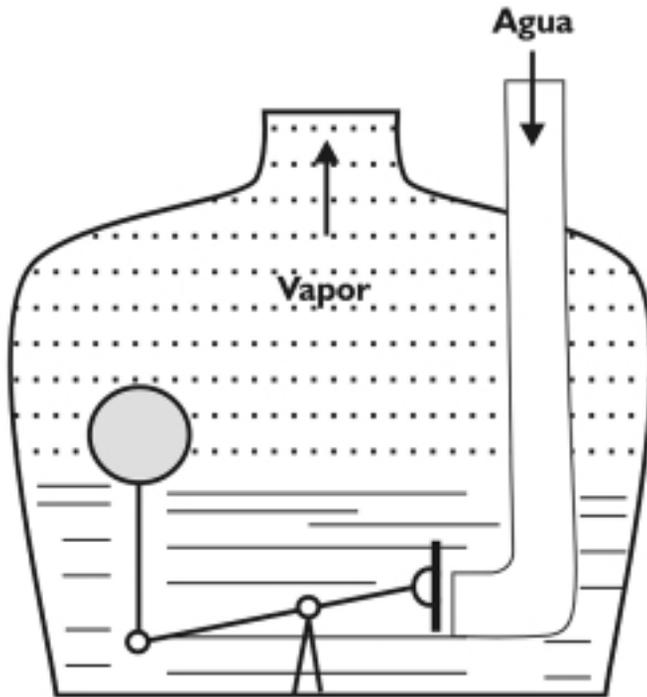


Figura 5. Regulador de flotación del nivel de agua. I. Polzuvov (1765).

En la segunda mitad del siglo XVIII, la aplicación del concepto de realimentación en la tecnología se manifestó como una verdadera explosión. ¿Qué acontece realmente para que suceda este fenómeno? Factores tecnológicos no fueron probablemente decisivos; casi todos los dispositivos de regulación del siglo XVIII se podían haber construido ya en el Renacimiento. El argumento es que progresos en otros campos de la tecnología habían creado la necesidad de dispositivos reguladores e iniciado así una gran actividad inventiva por parte de ingenieros más progresistas en Inglaterra, Francia y Rusia; la “revolución industrial” se manifiesta en una mul-

titud de inventos e innovaciones en campos tan diversos como la agricultura, el transporte, el comercio, etc.

Por ejemplo, se puede apuntar el progreso en el suministro doméstico de agua, que necesitaba reguladores de flotación (Figura 5).

Un desarrollo análogo tuvo lugar en el campo de la política económica. El mercantilismo, sustentado por Colbert, enseña que para una nación el camino hacia la prosperidad es una planificación cuidadosa de su política económica, dirigida principalmente por políticos de gran competencia. En contraste con esto, el sistema económico del liberalismo, formulado en

1776 por Adam Smith en su capital obra “Wealth of Nations” estaba basado en el postulado de “dejar hacer”; si el Estado se abstiene de toda interferencia, la economía automáticamente alcanza el equilibrio en condiciones óptimas. En lugar de un control centralizado, la función forzante en este caso es el propio interés de los individuos participantes en la vida económica. La teoría de Smith era que las desviaciones de la economía de su estado óptimo automáticamente serían corregidas por el sistema de mercado libre y la ley de oferta y demanda. Esta concepción implica con claridad una relación causal en lazo cerrado que es en principio idéntica al lazo cerrado de la realimentación.

En la actualidad se considera que el concepto de realimentación no está solamente encuadrado en la estructura de los sistemas de ingeniería sino que universalmente se le reconoce como un concepto importante y unificador en el marco formal de la ciencia. Realimentación es pues un concepto abstracto que no está adscrito a ningún medio físico en particular. En tecnología se puede utilizar en sistemas de origen mecánico, eléctrico, neumático, hidráulico o químico, pero su significación principal y más profunda actual está en que se puede aplicar en economía, sociología, educación, o biología; los métodos matemáticos de los sistemas de control son igualmente válidos en todas estas áreas del saber.

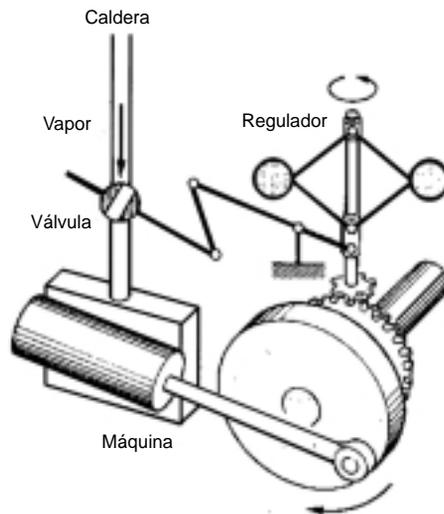


Figura 6. Regulador centrífugo de Watt (1769).

El regulador de Watt (Figura 6) se puede tomar como punto de partida para trazar el desarrollo del control automático como disciplina científica. La solución del problema de la fluctuación en la velocidad atrajo la

atención de un número importante de científicos e ingenieros.

Finalmente fue resuelto por J.C. Maxwell⁶ quien inició así la teoría de los sistemas de control automático

con su trabajo "On governors". Su contribución estuvo en reconocer que "la conducta de un sistema de control automático en la vecindad de una posición de equilibrio se podía aproximar por una ecuación diferencial lineal y por lo tanto su estabilidad se podía discutir en términos de las raíces de una ecuación algebraica asociada". Maxwell planteó así el problema general de investigar la estabilidad de un sistema dinámico en fun-

ción de la localización de las raíces de su ecuación característica.

La importancia práctica creciente del control automático durante el final del siglo XIX y comienzos del XX se pone de manifiesto por la concesión en 1912 del premio Nobel en Física al sueco Dalen por su desarrollo de reguladores automáticos que se utilizan conjuntamente con los acumuladores de gas para balizas luminosas.

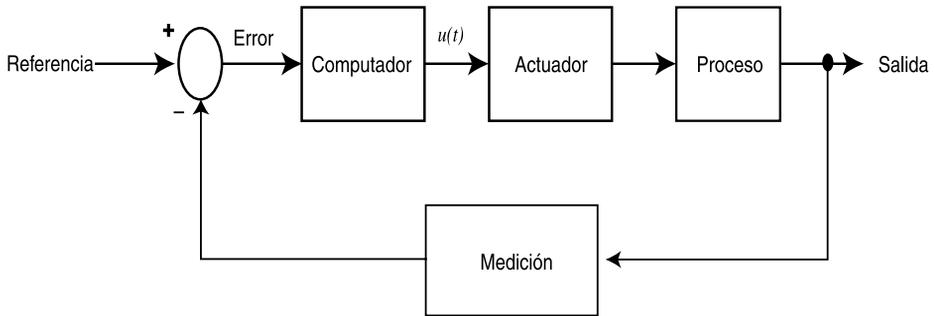


Figura 7. Sistema de control por amplificador (1934) o por computador (1950).

El desarrollo del amplificador de realimentación (Figura 7) con el objeto de hacer viable "la telefonía a distancia" se basó en el famoso trabajo clásico de H. Nyquist⁷ sobre la estabilidad de amplificadores realimentados, con el cual se abrió una nueva era en control automático. Antes de 1932, el enfoque basado en las ecuaciones diferenciales había sido una gran herramienta del teórico de control; en la década que siguió a la contribución de Nyquist estas técnicas fueron casi completamente reemplazadas por métodos basados en la teoría de variable compleja los cuales fueron consecuencia natural y directa de su nuevo planteamiento.

La aplicación del criterio de estabilidad de Nyquist no dependía de la disponibilidad de un modelo del sistema en la forma de una ecuación diferencial. Más aún, el contorno del lugar de Nyquist daba una indicación inmediata de cómo se podía mejorar la conducta de un sistema realimentado que estaba muy poco amortiguado o que incluso era inestable, modificando de una manera apropiada su característica de ganancia en lazo abierto, en función de la frecuencia.

La situación era pues que a finales de los años treinta existían dos métodos independientes, bien desarrollados, para atacar el problema de sistemas realimentados:

1. “El dominio temporal” que utilizaba ecuaciones diferenciales ordinarias y que se aplicaba fundamentalmente en procesos químicos, mecánicos, navales y aeronáuticos.
2. “El dominio frecuencial” que hacía uso de las representaciones de Nyquist y Bode, de funciones de transferencia y que era patrimonio exclusivo del estudio de amplificadores realimentados.

A comienzos de los años cincuenta, los métodos de respuesta en frecuencia habían copado el campo del control aplicado en el análisis y diseño de mecanismos de realimentación y de sistemas de control automático. La posición había cambiado completamente desde finales de los años veinte cuando el predominio de los métodos en el dominio temporal era inquestionable.

La aparición del computador digital (Figura 7) fue un prerequisite para el desarrollo del control óptimo y multivariable. Era ahora razonable intentar estudios más profundos y completos en teoría de control automático, de nuevo en el dominio temporal, ya que la potencia y la versatilidad de esta máquina hacía factible resolver los complejos algoritmos a que daba lugar.

Al mismo tiempo, el desarrollo de computadoras de propósito especial ofrecía la posibilidad de realizar esquemas de control más ambiciosos. Por lo tanto fue un paso natural considerar el control simultáneo de una serie de variables que interaccionan con diferentes tipos de objetivos del controlador, tal como la minimización del consumo de combustible en los

vuelos espaciales. Dos figuras científicas, entre otras, definieron las bases de este nuevo desarrollo en Teoría de Control Óptimo; en Rusia L.S. Pontryagin⁸ con la formulación matemática de su “principio máximo” y en los U.S.A.R. Bellman⁹ soluciona el problema de optimización dinámica desarrollando los principios y algoritmos de “programación dinámica”.

En la evolución conceptual y tecnológica de la ciencia médica, la teoría de control y el principio de realimentación han tenido una participación trascendental.³ N. Wiener se interesó profundamente en las relaciones entre los problemas de ingeniería y fisiología. Escribió un libro crucial sobre cibernética.⁵ Su libro tuvo un efecto importante al propagar las ideas del control por retroalimentación en general y de los métodos de respuesta en frecuencia, en particular en los campos de la teoría de sistemas estocásticos y de la fisiología.

El mantenimiento de una serie de parámetros fisicoquímicos constantes en el ambiente que rodea una población pluricelular, como base de la vida, definiéndose así el concepto de “homeostasis” fue estructurado por Empédocles en la antigua Grecia, Claude Bernard, en Francia, 1859 y Walter Cannon en U.S.A 1932. Posteriormente el concepto de retroalimentación fue aplicado en la regulación celular de la concentración de metabolitos por Monod J., Changeux J., 1963. Los trabajos pioneros de modelaje teórico del regulador respiratorio por F.S. Grodins, en asocio con J.S. Gray, 1950, 1954, J. Buell, R. Bellman, 1967 y S.M. Yamashiro, 1977, marcaron un hito en la aplicación de la Teoría de Control Moderno

al estudio de la regulación por retroalimentación negativa de variables fisiológicas que garanticen la “homeostasis” en el ser vivo (Figura 8). Líneas similares de trabajo científico y tecnológico han sido desarrolladas por A.C. Guyton, 1955, y F.S. Grodins,

1959, F.S. Grodins, T. Sato, D. Vega, 1974, en regulación circulatoria; por J. Hardy, 1961, en regulación de la temperatura corpórea; por J. Houk, 1967, en regulación del movimiento muscular; y por F.E. Yates, 1973, en endocrinología.

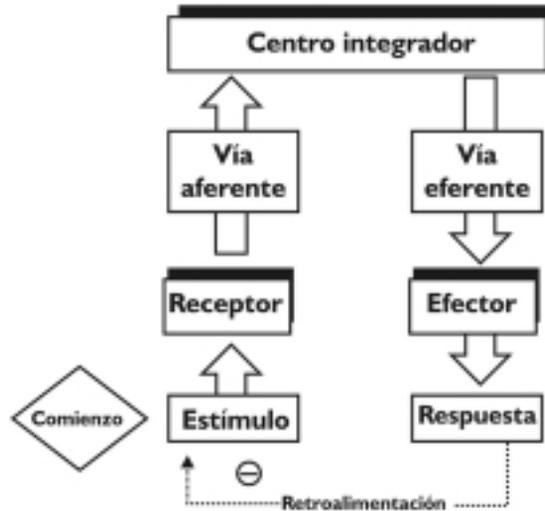


Figura 8. Componentes generales de un arco reflejo, en un sistema de retroalimentación negativa fisiológico.

Cómo extrapolar el proceso de realimentación a una situación educativa

La ejecución del proceso de aprendizaje depende de la retroalimentación (Figura 9).⁴ Nosotros ejecutamos decisiones que modifican el mundo real, evaluamos las consecuencias de estas decisiones y por retroalimentación informativa revisamos nuestros criterios decisorios y nuestra comprensión del mundo real. Sin embargo, el circuito simple de realimentación de información puede ser modu-

lado por modelos mentales del mundo real (Figura 10).

El proceso de retroalimentación analizado en la Figura 9 mimetiza un aspecto importante en el proceso de aprendizaje. La retroalimentación de información evaluativa de la situación del mundo real no es la única entrada a nuestro criterio decisorio. Nuestro patrón de criterios decisorios es el resultado de políticas de información acerca del mundo real. Estas políticas son estructuradas por estrategias de organización y normas culturales,

las cuales son definidas por nuestros modelos mentales. Si nuestros modelos mentales no cambian, el círculo de retroalimentación del aprendiza-

je es simple, un proceso por medio del cual nos entrenamos para lograr nuestros objetivos, en el contexto de nuestros modelos mentales existentes.



Figura 9. El aprendizaje es un proceso de realimentación.



Figura 10. Modulación del circuito simple de aprendizaje, por modelos mentales.

Cuál es la importancia de la “realimentación” en la estructuración conceptual y aplicada en ciencias administrativas

La optimización en la utilización de recursos en procesos administrativos requiere del uso de la metodología del pensamiento sistémico, en el diseño de modelos curriculares de entrenamiento del recurso humano.

Peter M. Senge¹ define el pensamiento sistémico en este contexto en la siguiente forma: “El pensamiento sistémico es una disciplina para ver totalidades. Es un marco para ver interrelaciones en vez de cosas, para ver patrones de cambio en vez de “instantáneas” estáticas. Sus herramientas y técnicas específicas se originan en dos ramificaciones: el concepto de “realimentación” de la cibernética y la teoría del “servomecanismo” de la ingeniería que se remonta al siglo XIX.” En este contexto es preciso ilustrar la trascendencia de la utilización de procesos reforzadores y compensadores en el manejo de situaciones administrativas.

En los procesos reforzadores, un cambio pequeño se alimenta de sí mismo. Todo movimiento es amplificado y produce más movimiento en la misma dirección. En la Figura 11 el proceso de ventas es causado por clientes que hablan entre sí acerca de un producto. Si el producto es bueno, más ventas significan más clientes satisfechos, lo cual implica más comentarios positivos. Esto provoca aún más ventas, más comentarios positivos, y así sucesivamente. Por otra parte, si el producto es defectuoso, el círculo virtuoso se transforma en círculo vicioso; las ventas redundan en menos clientes satisfechos, menos comentarios positivos y menores ventas, lo cual conduce a aún menos comentarios positivos y menos ventas. En un circuito de retroalimentación positiva (reforzadora), el cual opera en el incremento, por ejemplo, de la carrera armamentista (Figura 12) tal como sucede en nuestro medio colombiano, en el cual más violencia genera más adquisición de armas, las cuales producen más violencia, y así sucesivamente.



Figura 11. Realimentación reforzadora. ¿Cómo crecen los cambios pequeños?



Figura 12. Realimentación reforzadora: generación de un crecimiento acelerado.

Los procesos compensadores administrativos y los sistemas de control de retroalimentación negativa fisiológicos presentan analogías funcionales impresionantes. Por ejemplo, en la regulación de la temperatura corpórea deseada en hipotermia (Figura 13), el organismo genera median-

te arcos reflejos (Figura 8) un aumento de la producción de calor y una disminución en sus pérdidas, hasta que se obtiene un nuevo estado estacionario de equilibrio dinámico entre aportes y pérdidas, restableciéndose así la temperatura corporal deseada.

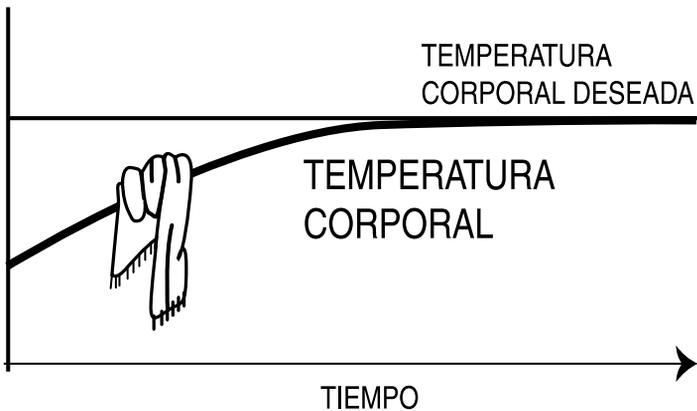


Figura 13. Evolución dinámica del proceso de minimización de la brecha (error), en la temperatura corporal.

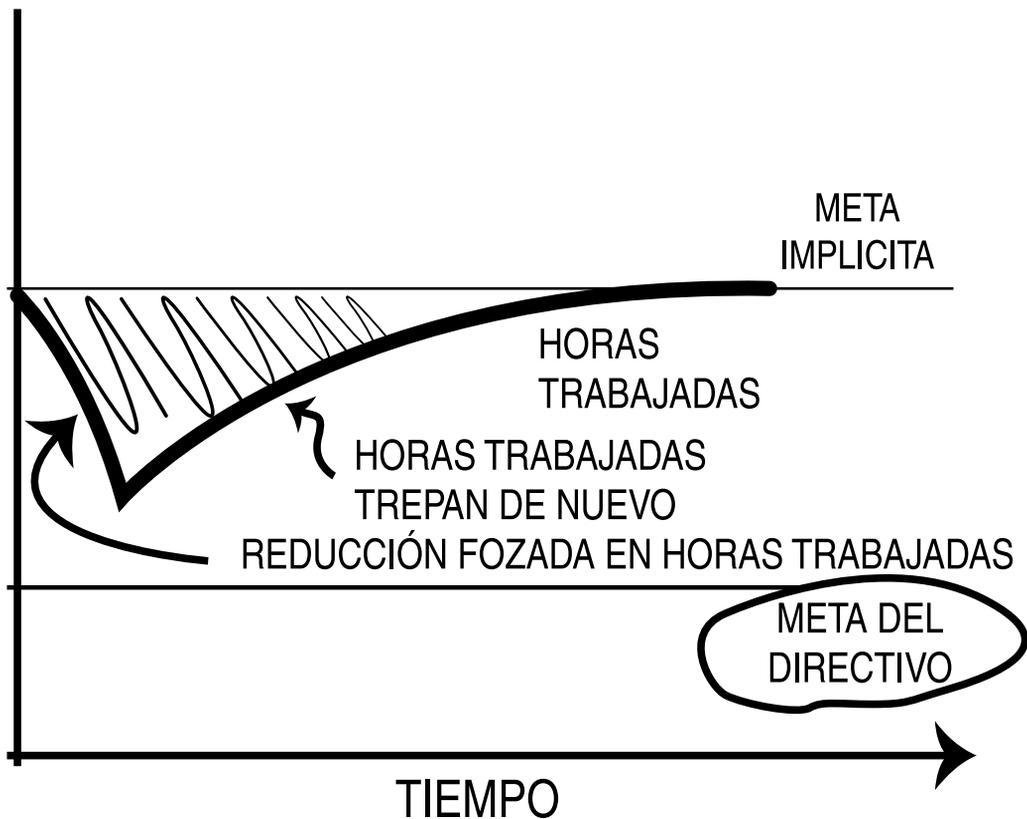


Figura 14. Dinámica de reducción de la brecha en un proceso compensador administrativo.

En una situación administrativa particular, un gerente pretende reducir el agotamiento de los profesionales de su empresa en rápida expansión.

Escribía memorandos, abreviaba las horas de trabajo (meta del directivo) (Figura 14) y cerraba las oficinas más temprano para evitar que la gente trabajara más de la cuenta.

Pero todos estos actos eran inconsecuentes: la gente ignoraba los memorandos, desobedecía los horarios más breves y se llevaba trabajo a casa

cuando cerraban las oficinas. ¿Por qué? Porque una norma tácita de la organización establecía que los verdaderos héroes, las personas que se interesaban de veras y progresaban en la organización, trabajaban la meta implícita de setenta horas semanales. Esta meta se había establecido por la prodigiosa energía y largas horas de trabajo del gerente.

CONCLUSIÓN

Una reflexión sobre las implicaciones del fenómeno y el concepto de retroa-

limentación se ha ejecutado como derrotero ilustrativo de lo que debe ser la metodología educativa del educador moderno, el cual debe desarrollar en el estudiante modelos mentales de pensamiento sistémico, que organicen información en el contexto de la solución interdisciplinaria viable a un problema o pregunta investigativa específica.

Agradecimientos

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos al señor Rector de la Universidad ICESI por propiciar el ambiente académico y humano, generador de esta publicación, contando con la asesoría de Luis Eduardo Múnera S. y Andrés López A. Similarmente a las fuentes continuas de mi inspiración, renovación intelectual y espiritual: mi esposa e hijos, mis discípulos amados en ejercicio profesional y en proceso de formación en las áreas de Ciencias de la Salud, Ingeniería y Administración.

BIBLIOGRAFÍA

1. Senge Peter M. *La Quinta Disciplina*, 1993.
2. Mayr E. *This is Biology*, 1996.
3. Grodins F.S. *Control Theory and Biological Systems*, 1963.
4. Sterman J.D. *Business Dynamics*, 2000.
5. Wiener N. *Cybernetics*. MIT Press 1948.
6. Maxwell J.C. *On governors*. Proc.Roy.Soc. London, 1868.
7. Nyquist H. *Regeneration Theory*. Bell.Syst.Tech. J., 1932.
8. Pontryagin L.S. *et al The Mathe-*

matical Theory of Optimal Processes, 1963.

9. Bellman R. *Dynamic Programming*. Princenton N.J., 1957.
10. Sato T.D. Vega, S.M. Yamashiro and F.S. Grodins. *Parameter sensitivity analysis of a network model of systemic circulatory mechanics*. Annals of BME.2.1974

CURRÍCULO

Daniel Martín Vega Barvo. Realizó sus estudios de Medicina y Biología en las Universidades del Valle y de los Andes donde obtuvo su B.Sc en 1963. Posteriormente, con Rockefeller Foundation Fellow realizó sus estudios de postgrado en Ingeniería Biomédica bajo la tutoría de F.S. Grodins en The University of Southern California obteniendo su M.Sc 1971, y su Ph.D 1973. En 1985 como National Institutes of Health Fogarty International Research Fellow en la misma institución ejecutó sus estudios de postdoctorado. Es miembro de las siguientes sociedades honoríficas de los U.S.A: ETA KAPPA NU: Electrical Engineering Honorary Society. SIGMA XI: National Research Honorary Society. ETA KAPPA NU: All University Honorary Society y ha sido incluido en la enciclopedia "Who is Who in the World" 1986. Es Profesor Titular Jubilado de la Universidad del Valle y actualmente es Coordinador y docente de Fisiología en la Universidad Libre y en la Fundación Universitaria San Martín de esta ciudad. 🌻