

Retroalimentación: cuando la salida vuelve como entrada

IDE-010 · Ideas fundamentales

Ensayos conceptuales para El universo y sus observadores

Autor: Juan Segurola

Versión: v0.6 ES · 19 de septiembre de 2026

Estado: Versión de publicación

Forma del artículo: Ensayo conceptual

Escala / contexto: Lazos de control en ingeniería, fisiología y sistemas ambientales

Límite: La estructura y la dinámica de los lazos: signo, ganancia, retardo, no linealidad y estabilidad. Cómo se establece un lazo causal a partir de datos observacionales corresponde a IDE-004

Trabajos relacionados: IDE-011, IDE-004, IDE-017

Perfil epistémico: Conocimiento establecido

Licencia en publicación: Todos los derechos reservados

Resumen del artículo

Hay retroalimentación cuando un proceso modifica una magnitud que después actúa sobre ese mismo proceso. Cerrar el lazo no ajusta simplemente un valor: cambia la dinámica del sistema, y por eso un sistema realimentado puede hacer cosas que ninguna de sus partes hace por separado. Maxwell analizó así el regulador de la máquina de vapor en 1868, y el mismo análisis cubre hoy amplificadores, fisiología, ecosistemas y clima.[1] El artículo expone qué determina el comportamiento de un lazo: el signo del camino de retorno, la ganancia, el retardo y las no linealidades que acaban acotándolo. Sostiene que el signo por sí solo casi no predice nada, que regular no es mantener una consigna y que un diagrama de lazo es una afirmación causal que hay que ganarse, no dibujar.

En 60 segundos

Un lazo se cierra cuando la salida de un proceso vuelve a su propia entrada. La realimentación negativa devuelve una corrección que se opone a la desviación; la positiva devuelve una que la refuerza. Los signos son lo fácil. Lo que decide el comportamiento es la ganancia de lazo, cuánta salida vuelve, y el retardo, cuánto tarda en volver.[3,6] Una realimentación negativa con ganancia alta y suficiente desfase no estabiliza: oscila, y por eso Black tuvo que dar al diseño de amplificadores un criterio de estabilidad y no solo un signo de corrección.[2,3] En modelos de realimentación no lineales, la realimentación positiva acotada puede asentarse en puntos fijos; la biestabilidad y la histéresis dependen de la existencia y estabilidad de múltiples ramas.[5] Regular no es un termostato que sostiene un número: la homeostasis fisiológica mantiene variables dentro de rangos mediante varios lazos que interactúan a velocidades distintas.[4] Y un lazo dibujado en un diagrama afirma dirección y tiempo. Sin eso, un lazo aparente puede disolverse en un impulsor común.

Por qué importa esta pregunta

La retroalimentación es una de las pocas ideas que cruza de verdad la ingeniería, la biología, la economía y la ciencia del clima, y ese alcance la vuelve fácil de usar como adorno. Decir que un sistema tiene realimentación negativa suena a decir que es estable, y no lo es: eso lo deciden el retardo y la ganancia, y un lazo corrector con los valores equivocados es un oscilador. Decir que tiene realimentación positiva suena a predecir desbocamiento, y normalmente predice un umbral. Acertar aquí importa siempre que lo que está en juego esté en la dinámica y no en la dirección, lo que incluye cualquier discusión sobre con qué rapidez responde un sistema regulado cuando se lo empuja.

1. Qué hace cerrar un lazo

Un regulador centrífugo en una máquina de vapor deja que la propia velocidad de la máquina ajuste el suministro de vapor: si gira rápido, los contrapesos suben y cierran la válvula. La aportación de Maxwell no fue el dispositivo, que ya se usaba, sino el análisis. Escribió las ecuaciones de la máquina junto con su regulador y estudió las raíces que determinan si una perturbación decae o crece.[1]

Ese paso es toda la materia en miniatura. Antes de cerrar el lazo, la velocidad de la máquina es consecuencia del suministro de vapor. Después, ambas quedan mutuamente determinadas, y lo que hay que resolver ya no es un valor sino el comportamiento de un sistema cuyas ecuaciones contienen ahora su propia salida. Los lazos cambian por tanto el orden y el carácter de la dinámica, y añaden modos que no tienen ni la planta ni el controlador por separado.[6]

Por eso la realimentación compra propiedades que el diseño en lazo abierto no puede. Un amplificador cuya ganancia depende de la temperatura y de la válvula concreta montada puede hacerse de modo que su ganancia quede fijada casi por completo por un divisor pasivo en el camino de retorno, porque el lazo lleva el error hacia cero en vez de confiar en el camino directo. [2] La precisión se compra con estructura y no con componentes.

En qué punto estamos

Cerrar un lazo convierte la salida del sistema en parte de su propia causa, lo que cambia las ecuaciones y no solo los números que producen. Eso permite que la realimentación dé exactitud con piezas inexactas. Pero introduce también una dinámica que antes no existía, y si esa dinámica se asienta o crece depende de magnitudes que el signo del lazo no contiene.

2. El signo no basta: ganancia, retardo y fase

La realimentación negativa se opone a la desviación respecto del punto de operación. De ahí no se sigue que la amortigüe. La corrección llega con retardo, y para cuando llega el sistema ya se ha movido. Si el retardo es suficiente para que la corrección empuje en la misma dirección que la perturbación cuando aterriza, el lazo refuerza aquello que se construyó para oponerse.[3,6]

Bode dio la manera clásica de enunciarlo. Sigue la respuesta del lazo frecuencia a frecuencia; allí donde la señal vuelve invertida por el desfase acumulado, pregunta si la ganancia de lazo es mayor o menor que la unidad. Si supera la unidad en esa frecuencia el sistema no se asentará, y los márgenes con que un diseño evita esa condición son las medidas estándar de cuánto retardo o cuánta variación de ganancia tolera.[3,6]

El enunciado de ingeniería generaliza, pero no a todo lazo. La inestabilidad de lazo cerrado y la oscilación sostenida dependen de las condiciones de ganancia y fase.[3,6]

En qué punto estamos

Un lazo negativo estabiliza solo para ciertas combinaciones de ganancia y retardo, y fuera de ellas el mismo lazo se convierte en oscilador. La inestabilidad de lazo cerrado y la oscilación sostenida dependen de las condiciones de ganancia y fase. La realimentación positiva se presenta a menudo como el caso opuesto, pero su comportamiento habitual tampoco es lo contrario de la estabilidad.

3. Realimentación positiva, umbrales y saturación

La realimentación positiva devuelve una corrección que se suma a la desviación, de modo que las diferencias pequeñas crecen. Un crecimiento a ritmo proporcional al valor actual es exponencial, y si nada interviniera la variable divergiría. En modelos de realimentación no lineales, la realimentación positiva acotada puede asentarse en puntos fijos; la biestabilidad y la histéresis dependen de la existencia y estabilidad de múltiples ramas.[5] Eso es lo que vuelve útil la realimentación positiva en una célula que debe comprometerse con una decisión.

En qué punto estamos

La biestabilidad y la histéresis dependen de la existencia y estabilidad de múltiples ramas.[5] Esta distinción también aclara qué mantienen estable los sistemas regulados.

4. Regular no es mantener una consigna

Cannon acuñó homeostasis para el mantenimiento fisiológico de las condiciones internas y fue cuidadoso con la palabra. Eligió un término que significa condición semejante y no condición fija, porque lo que la fisiología mantiene es un rango dentro del cual el organismo funciona, sostenido por varios lazos con velocidades y efectores distintos.[4]

Un termostato doméstico es un mal modelo de esto. Compara una temperatura medida con un número y conecta un calefactor, y el número se impone desde fuera del lazo. La temperatura corporal se defiende con sudoración, tiritona, cambios vasomotores y conducta, cada uno con su propio umbral, y el rango defendido se desplaza con la hora del día, la actividad y la enfermedad. No hay un único objetivo almacenado que se esté siguiendo.[4]

La distinción importa más allá de la fisiología. Describir un sistema regulado como poseedor de una consigna invita a preguntar dónde está guardado el número, y para casi toda regulación natural no hay respuesta porque no hay número. Lo que existe es una estructura de lazos cuya acción conjunta tiene una región estable, y esa región es propiedad del sistema entero y no un valor contenido en una de sus partes.

En qué punto estamos

Regular suele significar una región estable mantenida por varios lazos, no un objetivo almacenado que uno solo persigue. La homeostasis se nombró por la condición semejante y no por la fija, y el propio rango defendido se mueve. Queda entonces la cuestión de cómo se establece que un lazo dado existe realmente, que es donde los diagramas de realimentación deben ganarse.

5. Un diagrama de lazo es una afirmación causal

Dibujar una flecha de A a B y otra de B a A afirma dos influencias dirigidas y un orden temporal. Ninguna de las dos se obtiene de observar que A y B se mueven juntas. Dos variables impulsadas por una tercera común se correlacionan, y su correlación puede parecer un lazo al representarla sin que ninguna actúe sobre la otra.

Establecer un lazo exige por tanto la misma evidencia que cualquier afirmación causal: intervención donde es posible, o supuestos estructurales explícitos donde no lo es, más una temporalidad que distinga los caminos. La ingeniería de control suele tener la versión fácil, porque el lazo puede abrirse deliberadamente y estudiarse el sistema con el retorno desconectado. Las disciplinas que no pueden abrir el lazo tienen que trabajar mucho más, y ese problema corresponde a IDE-004.

La versión honesta de una afirmación sobre realimentación nombra por tanto la variable del lazo, el signo, la ganancia, el tiempo de respuesta y la cota del crecimiento, y dice cómo se estableció la dirección. Un diagrama con flechas y sin números es una hipótesis dibujada con forma sugerente.

En qué punto estamos

Un diagrama de lazo afirma dirección y tiempo, y ninguna de las dos se sigue de la correlación, así que una afirmación sobre realimentación hay que ganarla con intervención o con supuestos estructurales explícitos. Nombrar la variable, el signo, la ganancia, el retardo y la cota de saturación es lo que convierte el diagrama en modelo. IDE-011 recoge un proceso que cierra un lazo propio, donde la persistencia diferencial altera lo que viene después.

Lo que sabemos y cómo lo sabemos

- Cerrar un lazo cambia la dinámica del sistema y no solo sus valores de salida, y por eso la realimentación puede dar una exactitud que no depende de la precisión del camino directo.[1,2]
- Que un lazo negativo estabilice depende de la ganancia y del retardo, y el criterio en el dominio de la frecuencia para la frontera es práctica estándar de diseño, no una aproximación.[3,6]
- La regulación fisiológica mantiene un rango mediante varios lazos con velocidades y efectores distintos, y el propio rango defendido varía, así que no es una consigna almacenada que se persiga.[4]

Lo que todavía no sabemos

- Cómo identificar de forma fiable la estructura de lazos en sistemas que no pueden abrirse experimentalmente y donde los lazos candidatos operan en escalas de tiempo parecidas.
- Cuánto de la robustez aparente de las grandes redes reguladoras biológicas y ecológicas procede de la arquitectura de lazos y cuánto de la redundancia de los propios componentes.
- Qué medidas cuantitativas de intensidad de realimentación se transfieren de forma útil entre sistemas de ingeniería, donde la ganancia de lazo se diseña, y sistemas naturales, donde hay que inferirla.

Qué podría hacernos cambiar de opinión

- Un sistema de control físico que mantuviera la estabilidad con ganancia de lazo superior a la unidad en la frecuencia donde el desfase acumulado invierte la señal devuelta, contabilizados todos los retardos y dinámicas, invalidaría el criterio de estabilidad estándar.[3,6]
- Una demostración de que una variable fisiológica defendida se sigue frente a un único objetivo numérico almacenado, identificado como magnitud física en una estructura concreta y no inferido del comportamiento, sustituiría el relato de la homeostasis por lazos múltiples.[4]
- Un sistema bien caracterizado con realimentación positiva cuya relación entrada-salida de estado estacionario medida cortara la condición de equilibrio en más de un valor estable, de modo que el modelo ajustado predijera un umbral y un ciclo de histéresis de anchura enunciada, y que aun así mostrara un único estado estable sin ninguno de los dos en barridos lentos de ida y vuelta de su parámetro impulsor, rompería el relato estándar de por qué los lazos positivos dan umbrales.[5]

Si solo recuerdas una cosa

La retroalimentación convierte la salida de un sistema en parte de su propia causa; el signo casi no dice nada, y lo dicen la ganancia, el retardo y qué detiene el crecimiento.

Artículos relacionados

- IDE-011 — Selección
- IDE-004 — Causalidad
- IDE-017 — Incertidumbre

Referencias

- [1] James Clerk Maxwell. On Governors. Proceedings of the Royal Society of London 16, 270-283 (1868). DOI 10.1098/rspl.1867.0055.
- [2] Harold S. Black. Stabilized Feedback Amplifiers. Bell System Technical Journal 13(1), 1-18 (1934). DOI 10.1002/j.1538-7305.1934.tb00652.x.
- [3] Hendrik W. Bode. Network Analysis and Feedback Amplifier Design. Van Nostrand (1945).
- [4] Walter B. Cannon. Organization for Physiological Homeostasis. Physiological Reviews 9(3), 399-431 (1929). DOI 10.1152/physrev.1929.9.3.399.
- [5] Steven H. Strogatz. Nonlinear Dynamics and Chaos, 2nd ed. CRC Press (2015), chapters 3 and 8.
- [6] Karl Johan Åström; Richard M. Murray. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, 2nd ed. Princeton University Press (2021).