

ARCHIVOS

Problemas con los diagramas de ciclos causales

George P. Richardson

Traducción Joaquín Galarza Pérez, Queretaro, México, y

Eduardo González Mendivil, Monterrey, Mexico

Fundado a mediados de los años 50, el campo de la dinámica de sistemas tiene raíces intelectuales que se adentran mucho más allá en el pasado. La sección Archivos de la revista "System Dynamics Review", busca publicar material de ese pasado que pueda contribuir a la teoría y práctica actuales. La sección acoge trabajos previos no publicados pero que valgan la pena, clásicos de la literatura de dinámica de sistemas que deban recibir nuevamente la atención y artículos publicados previamente de otras disciplinas de particular importancia para los actuales practicantes de la dinámica de sistemas. Se sugieren particularmente contribuciones que enfatizen la filosofía y teoría de la construcción de modelos, validación, implantación, educación y estructuras genéricas. Las aportaciones pueden variar desde notas hasta artículos completos, pero deben ser editados. Envíe el material sugerido, junto con una breve introducción que lo coloque en el contexto histórico y actual, a John D. Sterman, System Dynamics Group, MIT E40-294, Cambridge, MA 02139, USA

Los primeros trabajos de dinámica de sistemas no incluían el uso de diagramas de ciclos causales. Las estructuras de retroalimentación eran descritas por ecuaciones o diagramas de acumuladores y flujos. Tales representaciones resultaban naturales para los ingenieros. En un intento de hacer la dinámica de sistemas accesible a un rango más amplio de personas, los diagramas de ciclos causales se han hecho cada vez más populares. En muchos textos y cursos son la primera herramienta que se describe. De hecho, recientemente muchos analistas han propuesto que los estudios de dinámica de sistemas se pueden llevar a cabo sin desarrollo alguno de modelos formales (Morecroft 1985; Wolstenholme y Coyle 1983; Wolstenholme 1985). A menudo los diagramas de ciclos causales figuran prominentemente en tales análisis. Pero hasta quienes promueven el uso de la dinámica de sistemas cualitativa son cuidadosos al apuntar que en todas las aplicaciones exitosas de tales métodos cualitativos, los analistas han tenido vasta experiencia previa en construcción de modelos formales. Sin embargo, parece inevitable que la gente de todos los niveles de experiencia continuará confiando en los diagramas de ciclos causales.

En el siguiente artículo, que data de 1976, George Richardson describe una variedad de problemas que surgen a menudo en la diagramación de ciclos causales, tanto en el desarrollo de los diagramas como en la explicación del comportamiento que producen. Las principales dificultades aparecen debido a que los diagramas de ciclos causales ocultan la estructura de acumuladores y flujos de los sistemas. Algunas veces nosotros enfatizamos tan fuertemente el papel de la estructura de retroalimentación que se pierde el importante papel de los procesos de acumulación. Incluso los modeladores expertos son engañados por los diagramas de ciclos causales. Yo sugiero el siguiente experimento: tome el diagrama sencillo para el feudo de familia del artículo de Richardson y pregunte a una muestra aleatoria de modeladores de dinámica de sistemas cómo se comportará. En mi experiencia, uno no sólo recibirá un amplio rango de respuestas, sino también la mayoría serán incorrectas. Luego repita el experimento usando el diagrama de acumuladores y flujos (obviamente, con un grupo diferente de personas). Aunque las respuestas también variarán, el número de respuestas correctas crecerá. Reconociendo estas dificultades, se ha revitalizado el uso de los diagramas de acumuladores y flujos como un medio de comunicar la estructura (Morecroft 1982). Sin embargo, el artículo de Richardson no debe ser tomado como un argumento para abandonar el uso de los diagramas de ciclos causales o la dinámica de sistemas cualitativa. Pero sirve como precaución contra el uso superficial de una técnica de la que se abusa fácilmente. A pesar de sus problemas, es probable que los diagramas de ciclos causales sigan siendo herramientas importantes para comunicar la estructura de retroalimentación.

John D. Sterman, Editor

Introducción

Los ciclos de retroalimentación positivos y negativos son los bloques de construcción de la dinámica de sistemas. Mientras que una especificación completa de la estructura de retroalimentación de un sistema requiere especificar niveles (estados) y tasas, los componentes esenciales e interacciones pueden ser comunicados rápidamente y de forma concisa en un

George P. Richardson es profesor asociado de matemáticas y ciencias de la computación en el Wheaton College. Tiene una M:A:T: en matemáticas por la Universidad de Chicago y un doctorado en dinámica de sistemas por la Sloan School of Management del MIT. Es coautor de *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*. Actualmente, colabora con la System Dynamics Society como vicepresidente de publicaciones y editor de problemas de investigación para la *System Dynamics Review*.
Dirección:
Science Center 105B,
Wheaton College,
Norton, MA 02766,
USA

diagrama de ciclos causales. La simplicidad de los diagramas de ciclos causales ha provocado su uso en las primeras etapas de la conceptualización de modelos, en material de introducción para clases de dinámica de sistemas desde el quinto grado hasta escuelas de graduados y en presentaciones de estudios de dinámica de sistemas tanto en publicaciones populares como técnicas. Sin embargo, la simplicidad de los diagramas de ciclos causales esconden una sutileza, que genera problemas que aún no han sido reconocidos adecuadamente.

El centro del problema con los diagramas de ciclos causales, que este artículo explora con algo de detalle, es que no se hace distinción entre ligas de información y ligas tasa-a-nivel (llamadas algunas veces “flujos conservados”). Se piensa que esa simplificación es una de las ventajas de los diagramas de ciclos causales, sin embargo tiene una desventaja dramática: en casos que involucran relaciones tasa-a-nivel las caracterizaciones normales de polaridades positiva y negativa son falsas.

Este artículo expone primero las dificultades con las definiciones tradicionales de la polaridad positiva y negativa de las ligas en los diagramas de ciclos causales. Se sugieren varias mejoras posibles. Luego se consideran los ciclos y se descubren las fallas en las definiciones y caracterizaciones tradicionales, llegando a la conclusión de que esas definiciones y caracterizaciones no son posibles en términos de comportamiento dinámico.

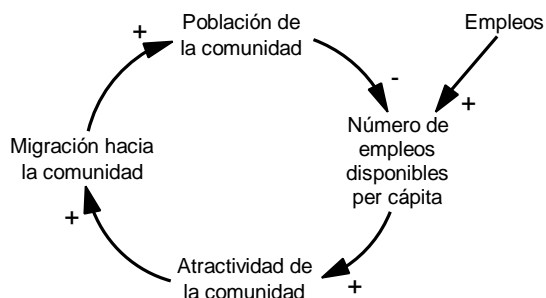
Aunque las observaciones de este artículo tienen alguna importancia para los practicantes de la dinámica de sistemas, particularmente en sus escritos para audiencias no especializadas, el propósito principal del artículo es el de aclarar ideas importantes en la enseñanza de la dinámica de sistemas. Por otro lado debo decir que las ideas básicas presentadas aquí no son nuevas, la mayoría aparecieron previamente en alguna forma. Sin embargo, la simplicidad seductora de los diagramas de ciclos causales ha propiciado su práctica generalizada, que algunas veces es muy casual y puede generar malas interpretaciones.

Definiciones de ligas positivas y negativas

Definiciones tradicionales

Las siguientes definiciones de influencias positivas y negativas en los diagramas de ciclos causales son representativas de toda la literatura.¹

La figura siguiente (Figura 1) muestra un conjunto posible de relaciones causales. Las flechas indican la dirección causal de las influencias. Los signos adyacentes a las flechas indican la polaridad. Un signo positivo (+) implica que el cambio en la variable en la base de la flecha causará un cambio en la variable en la punta de la flecha en la misma dirección. ... De manera similar, un signo menos (-) implica que un cambio en la variable en la base de la flecha causará un cambio en la punta de la flecha en la dirección opuesta.



La flecha de “atractividad” a “migración” se cita como ejemplo de una influencia positiva: “Un *incremento* en la atractividad de la comunidad *incrementa* la migración hacia la comunidad.”. La flecha de “población” a “empleos disponibles per cápita” se da como ejemplo de una influencia negativa: “Un *incremento* en la población de la comunidad causará un *decremento* en el número de empleos disponibles per cápita”. Las definiciones dadas en esta referencia en términos de cambios de las variables son enteramente consistentes con los ejemplos presentados.

Sin embargo, si se hubiera aplicado la definición positiva a otra influencia positiva en el ciclo de la Figura 1, hubiera aparecido una inconsistencia. Considere la liga de migración a población. La definición dice que un cambio en migración producirá un cambio en población en la misma dirección, pero un *decremento* en migración no producirá un *decremento* en población a menos que la migración sea negativa. En tanto la migración sea positiva, siempre incrementará la población en la comunidad, aunque la migración se esté creciendo o decreciendo. Más aún, ni siquiera es siempre válido que un *incremento* en migración produce un *incremento* en la población en el ciclo de la Figura 1. Suponga que los empleos disponibles per cápita son tan pocos que la comunidad no es atractiva y la gente está migrando fuera de la ciudad. En tal caso, la migración negativa siempre reduce la población de la comunidad, aunque la migración misma esté creciendo o decreciendo (tomando en cuenta, por supuesto, que un incremento en la migración no es suficiente para hacer que la migración neta sea positiva).

Entonces, no puede decirse con certidumbre que un cambio en migración en la Figura 1 producirá un cambio en la población en la misma dirección. Parte del problema aquí es que se puede interpretar que la migración representa una tasa *neta* (ver adelante), pero la dificultad real es más ubicua. Las definiciones tradicionales de las ligas positivas y negativas en los ciclos causales no son válidas en al menos una liga en los diagramas de ciclos causales que pudieran dibujar los practicantes de la dinámica de sistemas. En el ciclo positivo simple que involucra población y nacimientos por año, la liga de nacimientos a población no cumple con la definición tradicional: un decremento en los nacimientos no producirá un decremento en la población, dado que los nacimientos solamente pueden incrementar una población. En el ciclo negativo usado comúnmente como ejemplo que representa el llenado de un vaso de cerveza, la liga de la velocidad del flujo de cerveza al nivel de cerveza en el vaso no cumple con la definición tradicional: aquí, un decremento en el flujo no producirá un decremento en el nivel de cerveza en el vaso. Se podrían describir otro cúmulo de ejemplos, pero el punto es claro: las definiciones

Fig. 1. Un diagrama típico de ciclos causales (influencia) usado para definir las ligas (influencias) positivas y negativas

tradicionales de ligas positivas y negativas fallan en una amplia variedad de casos.

La fuente del problema

La razón por la cual cada una de estas ligas es inconsistente con las definiciones tradicionales es que cada una representa una conexión de tasa a nivel (un “flujo conservado”), pero las definiciones son aplicables solamente a ligas de información. Para un flujo conservado, la variable que está en la base de la flecha es la tasa de cambio (la derivada) de la variable que está en la punta de la flecha. (En algunos de los ciclos mencionados, la variable de la base es sólo la parte positiva o negativa de la derivada, por ejemplo, nacimientos por año, muertes por año, etc., pero sigue siendo importante hacer la diferencia). Una noción elemental del cálculo es que la naturaleza incremental de la derivada $f'(t)$ determina la curvatura de la gráfica para $f(t)$, no si $f(t)$ está creciendo o decreciendo.

Fig. 2. Patrones de comportamiento de una acumulación a través del tiempo (el nivel de cerveza en el vaso) afectado por diferentes tasas de entrada, que ilustran que el incremento o decremento en la tasa de entrada afecta sólo a la *curvatura* de la gráfica de la acumulación, no a si la acumulación misma crece o decrece.



Por ejemplo, considere el llenado de un vaso con cerveza. Si la tasa de flujo hacia el vaso es constante (y positiva), el nivel de cerveza en el vaso a través del tiempo tiene la gráfica lineal que se muestra en la Figura 2a. Si la tasa del flujo está creciendo, el nivel de cerveza en el vaso a través del tiempo tiene la gráfica de la línea curvada hacia arriba, como se muestra en la Figura 2b y el vaso se está llenando cada vez más rápido (una política peligrosa). Si la tasa del flujo está decreciendo (pero aun es positiva), el nivel de cerveza a través del tiempo aparecería como en la Figura 2c, donde la tasa disminuye sensiblemente cuando el nivel en el vaso se hace más grande.

Las gráficas de la Figura 2 muestran que la naturaleza creciente del nivel de cerveza no es cambiado por un incremento o decremento en la tasa de llenado; sólo cambia la curvatura. La definición tradicional falla en el caso de esta liga positiva de la tasa de llenado al nivel de cerveza en el vaso precisamente porque la liga representa un flujo conservado. Debe aclararse que se podrían dibujar tres gráficas similares para una liga negativa de tasa a nivel, como en el caso de la liga de muertes por año a población y se obtiene una conclusión similar. Las definiciones tradicionales funcionan para ligas que representan relaciones proporcionales, pero no funcionan en los casos que representan acumulaciones de una tasa de flujo.ⁱⁱ

Definiciones mejoradas

Una posible mejora a la definición tradicional de una influencia positiva en un diagrama de ciclos causales es la siguiente, que se sugiere a partir de las observaciones anteriores acerca de la curvatura:

A tiene una influencia positiva en B si un incremento (decremento) en A genera un valor de B que es mayor (menor) que el que hubiera tenido si A no hubiese cambiado.

(Es fácil inventar una definición similar para una influencia negativa). En el ejemplo del vaso con cerveza, un incremento en la tasa del flujo genera un mayor nivel de cerveza en el vaso del que hubiera tenido si la tasa se hubiera mantenido constante (compare las Figuras 2b y 2a). De forma similar, un decremento en la tasa de flujo genera un nivel de cerveza menor que el que hubiera tenido si la tasa se hubiera mantenido constante (compare las Figuras 2c y 2a). Una verificación muestra que la definición se comporta apropiadamente en todos los casos, tanto para ligas de información como para conexiones de tasa a nivel.

Aunque el problema de la definición está aparentemente resuelto por enunciados como el anterior, indudablemente existen casos en los que uno no quisiera usar una definición así.

Fig. 3. Un diagrama de ciclos causales que distingue entre las ligas aditivas (tasa a nivel) y las ligas proporcionales (de información). Las flechas sólidas son usadas aquí para identificar procesos reales de adición o sustracción.



En el material para cursos de introducción, tales definiciones pueden oscurecer más que aclarar. Pueden resultar también demasiado complejo para los escritos descriptivos acerca de estudios de dinámica de sistemas. Más aún, la definición sugerida tiende a esconder la razón por la que son necesarias las palabras adicionales. El siguiente es un segundo intento, que toma en cuenta la distinción entre ligas de información y flujos conservados, que son el centro del problema:

A tiene una influencia en B si A se agrega a B , o si un cambio en A genera un cambio en B en la misma dirección.

De manera similar:

A tiene un efecto negativo en B si A se sustrae de B , o si un cambio en A genera un cambio en B en la dirección opuesta.

La distinción que se hace en estas definiciones es la misma que se hace para las diferentes flechas usadas en los diagramas de flujo/nivel, en las que las flechas sólidas son usadas comúnmente para las conexiones de tasa a nivel (adición o sustracción) y las flechas punteadas son usadas para las ligas de información (Forrester 1961, 67-72). Estas definiciones sugieren que los diagramas de ciclos causales se podrían mejorar si se usaran dos símbolos diferentes, reconociendo los dos tipos de ligas. Por ejemplo, en la Figura 3 las líneas sólidas y punteadas representan a las ligas de flujo conservado y de información respectivamente.

Algunos autores han hecho distinciones análogas de manera natural en los diagramas de ciclos causales que usan para los lectores en general. En una variación sutil pero efectiva, se usan líneas rectas para las conexiones de flujo a nivel, mientras que las líneas curvas se reservan para ligas de información. Los diagramas no son más complicados visualmente que los diagramas tradicionales de ciclos causales, pero ayudan significativamente al lector cuidadoso a discernir la estructura real de los supuestos que representa el diagrama. Levin, Roberts y Hirsch (1975) usan una técnica más común, en la que las tasas y niveles se representan explícitamente como “válvulas” y “depósitos”, mientras que otras conexiones son las flechas curvas de los diagramas de ciclos causales tradicionales. Cada una de estas variantes es un intento, consciente o inconsciente, de manejar las dificultades que se presentan al representar ligas de tasa a nivel en los diagramas de ciclos causales.

Existen otras formas de buscar la definición perfecta para las polaridades de las ligas causales, al reconocer de alguna manera la distinción entre un flujo y una liga de información. El lector puede tener la suya propia dentro de estas definiciones mejoradas. Tal vez las diferentes definiciones se adapten a diferentes propósitos y audiencias. Incluso, puede haber situaciones en las que las definiciones tradicionales, incompletas, sean las más recomendables. Sin embargo, el autor cree que pueden surgir un número suficiente de confusiones de las definiciones comunes en los cursos de introducción que usan diagramas de ciclos causales, por lo que es recomendable usar una definición mejorada como las anteriores. Una definición con un dibujo de las distinciones entre las ligas aditivas y proporcionales (entre flujos conservados y ligas de información) ayuda a llevar al estudiante de conceptualizaciones elementales a conceptos de modelación. Adicionalmente, incrementa la probabilidad de que un diagrama de ciclos causales simple pueda ser “leído” y pueda inferirse hasta cierto grado su comportamiento dinámico. Desafortunadamente, al incrementar la “legibilidad” de los ciclos de retroalimentación, el reconocer las ligas de tasa a nivel en un diagrama de ciclos causales invalida a las definiciones tradicionales, como muestra la siguiente sección.

Caracterización de ciclos causales positivos y negativos

Dado que la dinámica de sistemas implica el estudio de las relaciones entre la estructura de retroalimentación y el comportamiento dinámico, existe un gran ímpetu por tratar de inferir el comportamiento a partir de las representaciones de la estructura. Aparentemente, este ímpetu ha generado un conjunto de definiciones de las polaridades de los ciclos causales que describen en términos del comportamiento a través del tiempo. Con las definiciones de los ciclos causales sucede lo mismo que con las de las ligas causales: la existencia de ligas de tasa a nivel invalida las definiciones tradicionales de los ciclos causales positivos y negativos de los diagramas. En esta sección se indican las dificultades con las definiciones tradicionales, enfocando la discusión particularmente en las ligas de tasa a nivel, ciclos ocultos y tasas netas. Esta sección termina con un breve análisis de un ciclo causal que, junto con el resto de este artículo, arroja graves dudas acerca de la posibilidad de definir la polaridad de los ciclos causales en términos del comportamiento dinámico.

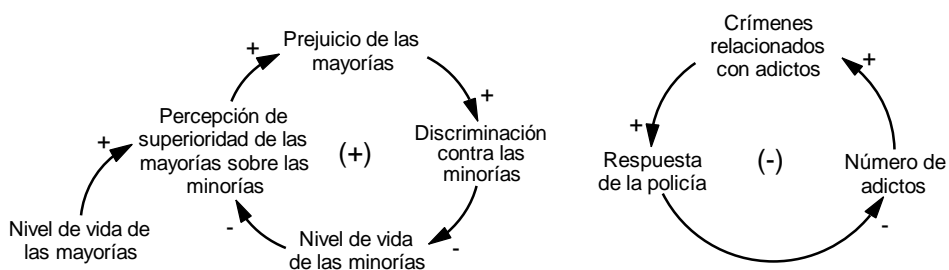
Definiciones comunes

A menudo se define un ciclo positivo como “...por el hecho de que un cambio inicial en cualquier factor induce eventualmente más adelante un

auto-cambio en la dirección original” (Levin, Roberts y Hirsch 1975, 7). La siguiente es representativa de las definiciones de los ciclos de retroalimentación negativos: “Cuando la respuesta de un ciclo de retroalimentación al cambio de una variable se opone a la perturbación original, el ciclo es negativo o de búsqueda de metas” (Goodman 1974, 9). Usualmente la definición de un ciclo negativo se interpreta como: “...un cambio en un elemento se propaga a lo largo del ciclo hasta que regresa a cambiar ese elemento en la dirección opuesta a la del cambio original” (Meadows 1972, 42).

Estas definiciones nos conducen fácilmente a las caracterizaciones confiables de un ciclo positivo como un ciclo que tiene un número *par* de ligas causales negativas y de un ciclo negativo como uno que tiene un número *non* de ligas negativas. En diagramas de ciclos causales dibujados sin ligas de tasa a nivel, estas definiciones son completamente consistentes con las definiciones tradicionales de las ligas negativas y positivas discutidas en la primera sección de este artículo. La Figura 4 muestra ejemplos de un ciclo positivo y de un ciclo negativo que son consistentes con estas definiciones, como podrá verificar el lector siguiendo el cambio en alguna variable a través de cada ciclo.

Fig. 4. Diagramas de ciclos causales típicos usados para ilustrar las definiciones de las polaridades de los ciclos.



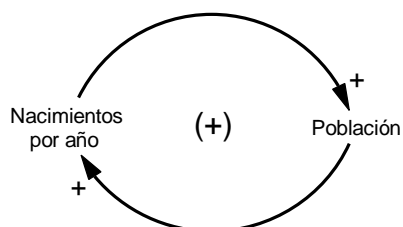
Para referencias posteriores, es interesante notar que estas definiciones tienen dos implicaciones particulares. Primero, un ciclo positivo consistente con las definiciones se puede seguir tanto como un ciclo de crecimiento como de decrecimiento —en la Figura 4a uno podría decir que se trata de un “círculo vicioso” como de uno “virtuoso” dependiendo de la dirección del cambio exógeno inicial. Segundo, aunque nadie pretende llegar a esta conclusión, cada ciclo negativo que cumple con la definición de los ciclos causales es, por implicación, una estructura que oscila —un incremento, dice la definición, seguido a través del ciclo, se convierte en un decremento, que produce otro incremento después de otro ciclo y éste un decremento y así sucesivamente a través del tiempo. Sin embargo, las oscilaciones dependen de las estructuras tasa/nivel así como las estructuras de retroalimentación. El hecho de que no todos los ciclos positivos ni todos los ciclos negativos se comporten así sugiere que existen problemas con las definiciones tradicionales de la polaridad de los ciclos causales, como lo muestran las siguientes secciones acerca de ligas tasa a nivel, ciclos ocultos y tasas netas. El problema más persistente es la urgencia por definir las polaridades en términos del comportamiento dinámico: dado que el comportamiento depende de las tasas y los niveles, que no se especifican en los diagramas de ciclos causales, parece más difícil inventar definiciones aplicables universalmente en términos de comportamiento dinámico.

Ligas de tasa a nivel

En cualquier ciclo que involucre una liga explícita de tasa a nivel, las definiciones tradicionales de las polaridades de los ciclos de retroalimentación

dadas anteriormente producen inconsistencias. Como ejemplo, considere el ciclo elemental de nacimientos/población que se muestra en la Figura 5. Al seguir las implicaciones de un incremento en población, no aparecen dificultades reales; el cambio inicial induce “más cambio propio en la misma dirección” y el ciclo se ajusta a las definiciones comunes de un ciclo positivo. Suponga, por otro lado, que el cambio inicial es negativo, por alguna razón decrece la población. Los nacimientos por año decrecerán, pero los nacimientos seguirán incrementando la población (aunque con menor rapidez) porque la liga de nacimientos a población es un “flujo”. Una liga de tasa a nivel. Entonces, no puede decirse que un decremento inicial en población induce más adelante un auto-cambio en la misma dirección. (Note que si la liga de tasa a nivel se lee incorrectamente —un decrecimiento en nacimientos causa un decrecimiento [*sic*] en población”— el ciclo se ajusta nuevamente a la definición. Existe una tendencia humana natural, parece, a ser más consistente que exacto, cuando uno no puede ser las dos cosas).

Fig. 5. Un ciclo de retroalimentación positiva que no concuerda con la definición usual de polaridad positiva de los ciclos debido a una liga explícita de tasa a nivel.



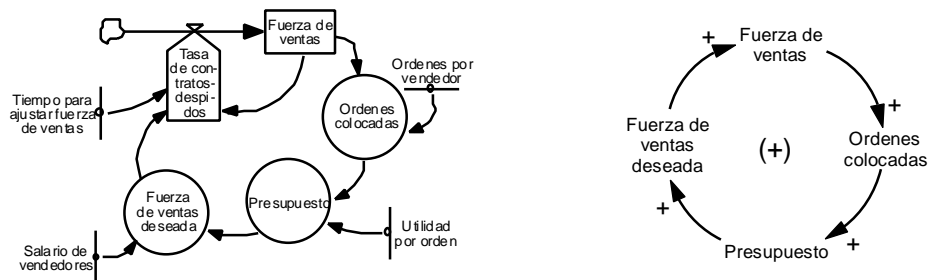
De forma similar, aparecen dificultades en los ciclos negativos con las ligas explícitas de tasa a nivel. En el ciclo común de población/muertes, por ejemplo, un decrecimiento en población no “...se propaga a través del círculo hasta que regresa para cambiar ese elemento en una dirección opuesta al cambio inicial”. Claramente, no todo ciclo positivo de retroalimentación puede ser seguido congruentemente tanto como ciclo de crecimiento o decrecimiento (tanto “vicioso” como “virtuoso”) y no todo ciclo negativo es un oscilador, como implican las definiciones tradicionales de ciclos causales. Las definiciones usuales en términos de comportamiento a través del tiempo suponen que todas las ligas en el ciclo son del tipo proporcional y no del tipo acumulativo, de tasa a nivel.

Ciclos ocultos

Refuerzan la dificultad de definir polaridades de ciclos causales en términos de comportamiento los sistemas de retroalimentación simbolizados con ligas de retroalimentación escondidas (no representadas). Un ejemplo revelador es el siguiente ciclo de vendedores tomado de *Principles of Systems* (Forrester 1967, 2-21 a 2-25). Es práctica común, incluso en diagramas de flujos y acumuladores, omitir la tasa y el pequeño ciclo negativo en estas estructuras de suavización exponencial, mostrando solamente el ciclo positivo básico resumido en la Figura 6b. El ciclo oculto, sin embargo, tiene mucho que ver con el comportamiento del sistema a través del tiempo, complicando así el problema de tratar de definir la polaridad de un ciclo causal en términos de comportamiento. Si los vendedores se incrementan, permanecen constantes o decrecen depende de si la “fuerza de ventas deseada” es mayor que, igual o menor que la “fuerza de ventas”, dado que:

$$\text{tasa de contratos/despidos} = \frac{\text{fuerza de ventas deseada} - \text{fuerza de ventas}}{\text{tiempo para ajustar fuerza de ventas}}$$

Fig. 6. Diferentes representaciones de ciclos de retroalimentación que afectan el crecimiento de una fuerza de ventas, que ilustran los ciclos ocultos y las tasas netas en los diagramas de ciclos causales.



La relación entre “fuerza de ventas deseada” y “fuerza de ventas” está determinada únicamente por los valores de tres parámetros que aparecen en la Figura 6a, pero que siempre se omiten y no se especifican, como en la Figura 6b, en el diagrama de ciclos causales de ese sistema.ⁱⁱⁱ El ciclo de fuerza de ventas es positivo porque la “fuerza de ventas deseada” entra a la ecuación de tasa con un signo positivo, no porque el ciclo responda de cierta manera a un cambio. Una definición de un ciclo positivo redactada en términos del incremento de variables en el ciclo es difícil de aplicar —no se puede decir con certeza que un incremento en cualquiera de las variables del ciclo causal que se siga a través del ciclo produce “un mayor cambio propio en la misma dirección”. Por supuesto, uno podría (y debería) invocar una situación de *ceteris paribus* cuando definiera la polaridad de un ciclo causal, pero debido a ciclos como el de la fuerza de ventas, uno se enfrenta aun con definiciones de comportamiento que podrían no concordar con el comportamiento real del sistema debido a los ciclos ocultos.

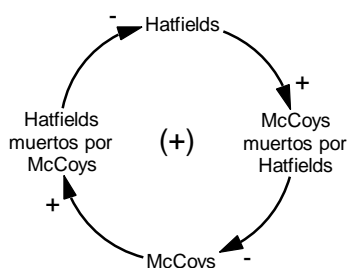
Tasas netas

El ciclo de fuerza de ventas de la Figura 6 contiene una tasa neta de contratos/despidos, un concepto que causa aún más dificultades para los diagramas de ciclos causales. Debido a que la tasa neta es una agregación de un flujo de entrada y de un flujo de salida, no es posible decidir si una liga de tasa neta a nivel es una influencia positiva o negativa. Considere la tasa neta de nacimientos en un modelo agregado de población. Si los nacimientos netos por año son positivos, los nacimientos se agregan a la población y el ciclo es positivo; por el contrario, si los nacimientos netos por año son negativos, los nacimientos netos se restan de la población y el ciclo es negativo, idéntico al ciclo de población/muertes. Entonces, una tasa neta en un diagrama de ciclos causales crea un ciclo sin decisión —tal vez positivo o tal vez negativo, dependiendo de los parámetros y variables que no están contenidos en el ciclo.

Es interesante notar que comúnmente se piensa en la liga de una tasa neta tal como la de nacimientos netos/población, como una liga positiva y así se simboliza, tal vez porque la palabra “nacimientos” sesga el caso, pero más probablemente porque el ciclo población/nacimientos se comporta como un ciclo positivo cuando se piensa erróneamente que se trata de una liga de información y no de una liga de tasa a nivel. “Si los nacimientos netos por año crecen”, decimos, “entonces la población crece y si los nacimientos netos decrecen entonces la población decrece [*sic*]”. Aunque una afirmación como esta concuerda con el patrón de las definiciones tradicionales, sabemos que los nacimientos netos harán decrecer a la población solamente si el número baja lo suficiente como para hacerse negativo, en cuyo caso el ciclo no es positivo,

sino negativo. Los diagramas de acumulaciones y flujos manejan este caso con una flecha de doble punta, pero no se ha establecido alguna convención similar para los diagramas de ciclos causales, tal vez porque las definiciones tradicionales han oscurecido esta necesidad.

Fig. 7. Diagrama de ciclo causal de un pleito entre los Hatfields y los McCoys



Un ejemplo final

La presencia de ligas de tasa a nivel, ciclos ocultos y tasas netas en los diagramas de ciclos causales hace difícil definir la polaridad en términos del comportamiento. El tratar a todas las ligas como proporcionales garantiza que la mayoría de las inferencias de comportamiento a partir de diagramas de ciclos causales sean incorrectas. Sin embargo, el reconocer las ligas de tasa a nivel así como las ligas de información hace más probable (aunque no seguro) que se pueda inferir correctamente el comportamiento a partir de los ciclos causales. El siguiente ejemplo muestra la gran confiabilidad que se obtiene de leer correctamente las ligas de tasa a nivel, mientras que reitera lo inadecuado de las definiciones tradicionales y enfatiza los peligros de intentar inferir el comportamiento a partir de la polaridad de los ciclos causales.

Considere una lucha entre familias. Los Hatfields y los McCoys han decidido finalmente aclarar las cosas: los Hatfields disparan contra los McCoys, los McCoys disparan contra los Hatfields y ninguno de los dos bandos tiene tiempo para llamar a sus familiares de los pueblos cercanos para los ayuden. Al aplicar las definiciones tradicionales al ciclo que se muestra en la Figura 7, podríamos concluir que un crecimiento en Hatfields, por ejemplo, causaría más McCoys que son muertos por Hatfields, lo cual causaría menos McCoys y menos Hatfields muertos, lo cual causaría más Hatfields [*sic*] —un crecimiento en Hatfields que genera un crecimiento aún mayor en Hatfields. De manera similar podría seguirse un decrecimiento en Hatfields y la conclusión sería la misma— una familia crece y la otra decrece, tal vez hasta que se rinda o sea eliminada. Pero es absurdo, por supuesto, concluir que una familia crece mientras se están matando unos a otros.

Al tomar en cuenta los flujos conservados en el ciclo de la Figura 7, concluimos que un incremento en Hatfields causa más McCoys muertos, lo que causa un decremento en el número de McCoys y por consecuencia un decremento en el número de Hatfields muertos por los McCoys (como antes), que sin embargo causa un *decremento* en el número de Hatfields. Un incremento en Hatfields causa un decremento en Hatfields —tal afirmación es en parte confusa. Continuando con el ciclo, concluimos que el decremento en Hatfields causa menos muertes de McCoys a manos de los Hatfields, lo que genera aun menos McCoys, pero la disminución no es tan grande como fue en el ciclo anterior. Menos McCoys matan menos Hatfields, así que los Hatfields decrecen, pero no tanto como lo hicieron la primera vez que dimos la vuelta al ciclo. El ciclo dice que tanto los McCoys como los Hatfields están decreciendo,

pero decreciendo cada vez más despacio a medida que pasa el tiempo. Podríamos esperar que sus gráficas fueran como las de la Figura 8. El sistema aparenta ser uno de búsqueda de metas, con un comportamiento más característico de un ciclo negativo que de uno positivo.

Fig. 8.
Comportamiento aparente de búsqueda de metas que se puede inferir del flujo conservado implícito en el ciclo del pleito (Fig. 7)

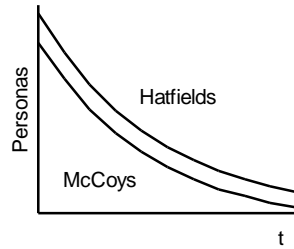
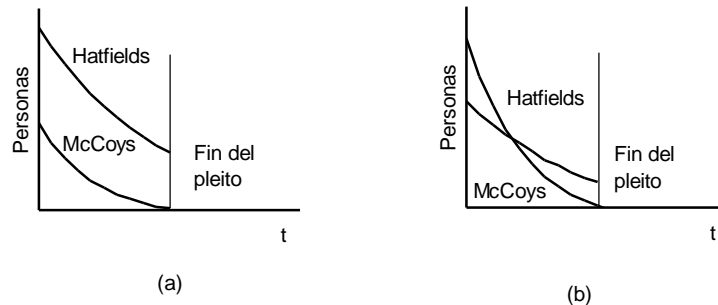


Fig. 9. Escenarios más típicos para el pleito en los que un lado u otro es eliminado. Ilustra el carácter desestabilizador del ciclo positivo del pleito.



Un poco más de análisis muestra que el ciclo de Hatfields y McCoys tiene más características positivas que negativas. Suponga que los Hatfields fueran más que los McCoys. El pleito terminaría más o menos rápido y las gráficas se verían como las de la Figura 9a. O suponga que cada Hatfield tuviera una ametralladora, mientras que lo más que los McCoys pudieran reunir fueran diez resorteras para todo el grupo. La Figura 9b muestra lo que podríamos esperar.

Así, las gráficas de la Figura 8, que muestran comportamiento de búsqueda de metas característico de un ciclo negativo, se ven como un caso particular en el que el número de personas y poder de disparo se balancean. Sin ciclos de retroalimentación adicionales en el modelo que prevengan la posibilidad de que Hatfields y McCoys se hagan negativos, los escenarios de la figura 9 continuarán a través del tiempo mostrando cómo ¡los McCoys se hacen más y más negativos mientras que los Hatfields crecen! De hecho el ciclo tiene el carácter desestabilizador que asociamos con los ciclos de retroalimentación positiva, pero no en el periodo de tiempo significativo del pleito y no para todas las condiciones iniciales.^{iv}

El ejemplo de los Hatfields y los McCoys muestra muy claramente la extrema dificultad de definir la polaridad de los ciclos causales en términos del comportamiento que se supone debe de mostrar un ciclo en respuesta a cambios en sus variables. El ejemplo del pleito muestra también que predecir el comportamiento solamente a partir de la polaridad del ciclo sin tomar en cuenta la distinción entre ligas de tasa a nivel y ligas de información es imposible.

Conclusión

Las definiciones tradicionales de las polaridades de las ligas y ciclos causales son inadecuadas. Con ligeras modificaciones que tomen en cuenta la naturaleza acumulativa de las ligas de tasa a nivel, se pueden corregir las definiciones tradicionales de las *ligas* causales, reconociendo los flujos conservados, mejorando así la “legibilidad” de un ciclo causal. Sin embargo, debe resistirse la tendencia a definir las polaridades de los *ciclos* causales a partir del comportamiento a través del tiempo. En ejemplos particulares, la naturaleza desestabilizadora de los ciclos de retroalimentación positiva y el carácter de búsqueda de metas de los ciclos negativos puede inferirse al seguir a través del ciclo un cambio en una de sus variables. En general, sin embargo, los resultados de tal cambio no pueden establecerse con ninguna certidumbre y con ninguna aplicabilidad universal a todos los ciclos positivos o negativos. Parece ser que la mejor opción es definir claramente la polaridad de los ciclos causales en términos del número de ligas negativas en un ciclo y dejar que la intuición acerca de las implicaciones dinámicas de esas polaridades crezca mientras se vean y entiendan más y más ejemplos.

Las dificultades de desmenuzar el comportamiento dinámico a partir de los diagramas de ciclos causales sugieren que la gente que desea construir modelos dinámicos significativos debería ya sea evitarlos o usarlos con extremada cautela. Dado que “leerlos” con cierta confiabilidad requiere reconocer las ligas de tasa a nivel, un modelador que conceptualice un sistema debe usar también una representación que reconozca de la mejor manera la estructura de acumuladores y flujos. Aunque los diagramas de ciclos causales pueden tener un papel justificable en la enseñanza de dinámica de sistemas elemental, parece que su papel más apropiado es en escritos de exposición para el consumo público. En tales contextos, las descripciones del comportamiento dinámico en términos de ciclos causales están sustentados por el conocimiento cierto del modelador acerca de cómo un modelo dinámico real se comportó cuando se simuló o se resolvió por métodos analíticos.

Referencias

Forrester, Jay W., 1961, Industrial Dynamics, 464 páginas, ISBN 0-91529988-71 artículo #XINDDY-3 15, US\$50.00 Artículo, Productivity Press Inc., PO Box 13390, Pórtland, Oregon 97213-0390, Teléfono: 1/800/ 394-6868 o 503-2350600

Forrester, Jay W., 1961, Principles of Systems, 392 páginas, ISBN 0-91529987-9 artículo #XPRSYS-412, US\$24.95 Artículo, Productivity Press Inc., PO Box 13390, Pórtland, Oregon 97213-0390, Teléfono: 1/800/ 394-6868 o 503-2350600

Goodman, Michale R., 1974, Study Notes in System Dynamics, ISBN 0262-57051-3, 388 páginas, US\$24.95 Artículo, Orden XSNOTE-4] 2, Productivity Press Inc., PO Box 13390, Pórtland, Oregon 97213-0390, Teléfono: 1/800/ 394-6868 o 503-2350600

Heinze, John, et. al., 1971, Course Materials for Principles of Systems I, System Dynamics Group Memo D-1598, E60-383, Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA 02139

Levin, Gilbert, Edward G. Roberts y Gary B. Hirsch, 1975, The Persistent Poppy: A Computer-aided Search for Heroin Police, Cambridge, MA Ballinger Publishing, Co.

Maruyama, Magorah, 1968, Mutual Causality in General Systems, en John Milsum, ed., Positive Feedback: A General Systems Approach to Positive/Negative Feedback and Mutual Causality.

Meadows, Donella H., et. al., 1972, The Limits to Growth, 205 páginas, Universe Books, 381 Park Avenue South, New York, NY 10016.

Milsum, John 1968, Editor, Mathematical Introduction to General System Dynamics, Positive Feedback: A General Systems Approach to Positive/Negative Feedback and Mutual Causality.

Roberts, Nancy, 1975, Dynamic Feedback Systems Diagram Kit, System Dynamics Group memo D-3183, E60-383 Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA 02139

Esta página fue actualizada por Nan Lux, System Dynamics Group, 9/94.

Notas

ⁱ El ejemplo que se cita es de Heinze (1971). Ver también Goodman (1974, 7 & 9), Meadows (1972, 41-42), Maruyama (1968, 81-82) y Roberts (1975, 2).

ⁱⁱ Milsum (1968, 29) hace la distinción entre una influencia que es acumulativa y una que es proporcional.

ⁱⁱⁱ Detrás de estas observaciones está la noción de la ganancia de estado estable, de ciclo abierto, del ciclo positivo. El nivel de fuerza de ventas crece, permanece constante o decrece si la ganancia del ciclo positivo es, respectivamente, mayor que, igual a o menor que 1. Las afirmaciones acerca de la ganancia son realmente afirmaciones acerca de la dominancia de ciclos. Si la ganancia es mayor que 1, el ciclo positivo es dominante y si la ganancia es menor que 1, el ciclo negativo oculto es dominante.

^{iv} Si el sistema que se muestra en la Figura 7 está dado por

$$H'(t) = -aM \text{ y } M'(t) = -bH, \text{ (a, b > 0)}$$

donde H y M representan el número de Hatfields y de McCoys, entonces H(t) y M(t) muestran decremento exponencial puro si y sólo si $H_0(a)^{1/2} = M_0(b)^{1/2}$, entonces H(t) y M(t) son dominados eventualmente por términos que involucran $\exp((ab)^{1/2}t)$, así que el sistema explota.