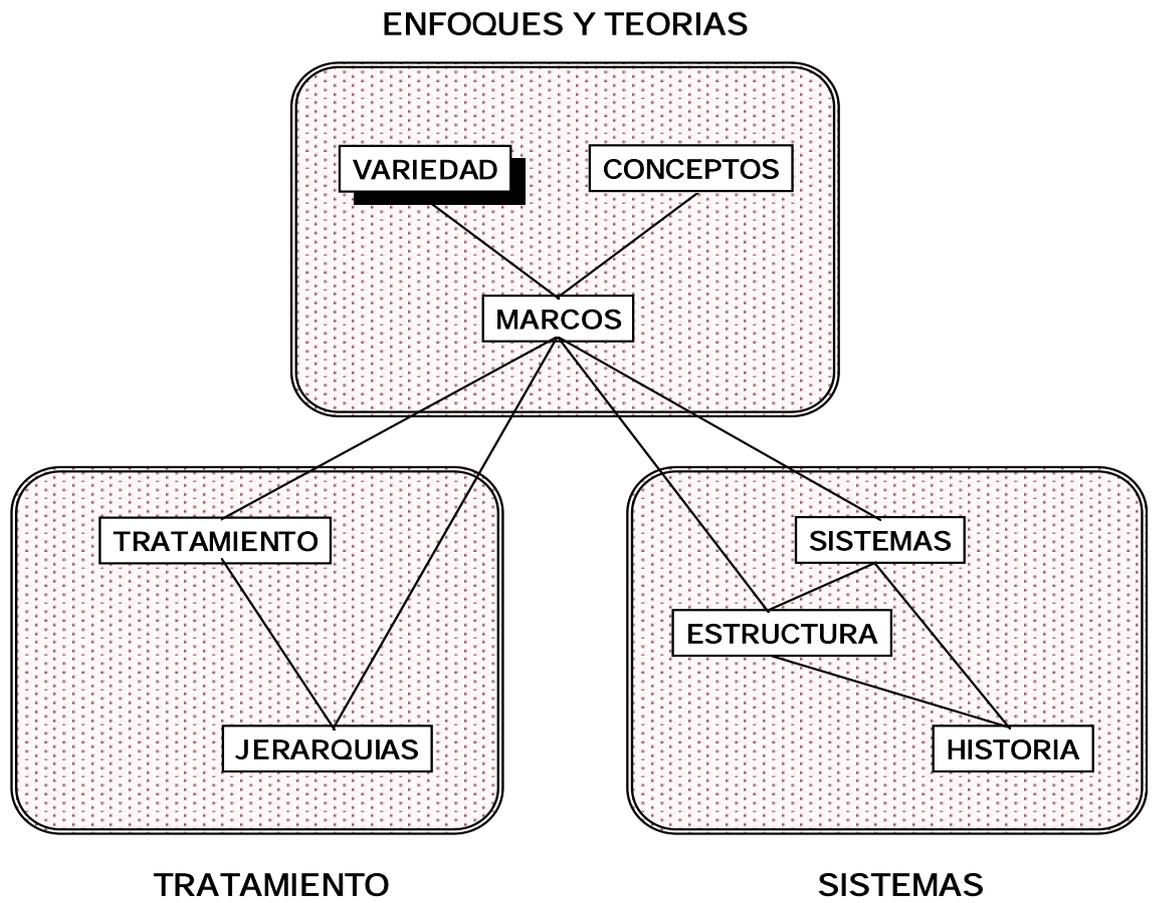
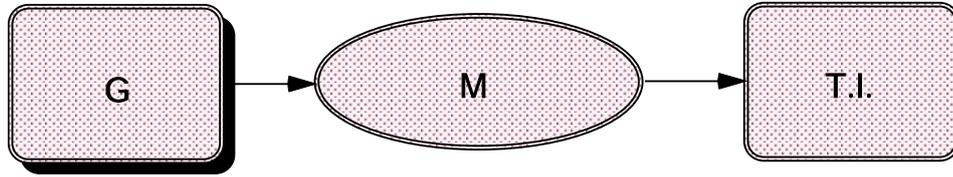


La variedad, en el sentido cibernético.

Introducción.
Variedad.
Variedad y sistemas de control.
Variedad y observador.
Las leyes de la variedad.
Adaptación = Amplificación + Reducción.
Demostración de la ley de la variedad.
Resumen.
Bibliografía.

Antes de introducirnos de lleno en el estudio de la complejidad, hemos creído conveniente introducir el concepto de variedad, que en general es más intuitivo y sencillo de comprender. Y sin embargo, su potencia es suficiente para que Beer compare la importancia de una de sus consecuencias (la ley de la variedad requerida) con las leyes para la mecánica de Newton.

Aunque el origen de la idea de variedad se encuentra en el ámbito de los sistemas de control, veremos cómo es de gran aplicación en otros muchos campos, incluso en la vida diaria. Nos daremos cuenta, incluso, de las veces que sin saberlo utilizamos en nuestra vida diaria herramientas basadas en este concepto. Probablemente, después de leer este capítulo, seamos capaces de descubrir la variedad y sus aplicaciones por todas partes.



1. Introducción.

Stafford Beer compara la importancia de la ley de la variedad requerida con las leyes de Newton [Beer, 1974]. En cualquier caso, la importancia del concepto de variedad es muy grande en el campo de los sistemas de regulación, y en muchos otros. Nosotros lo usaremos además como primera toma de contacto con la complejidad, al proponerlo (siguiendo a Beer), como una medida de ésta.

En general, podemos decir que los objetos del mundo que nos rodea son complejos, y por lo tanto tienen asociada una determinada variedad. Nosotros, para comprenderlos y manejarlos, necesitamos absorber de alguna forma esta variedad. Pero las capacidades que tenemos para realizar esto son limitadas: dependen de nuestra propia variedad. Veremos que para poder manejar sistemas de mayor complejidad que la nuestra hemos de usar unas herramientas (físicas o conceptuales): los filtros de variedad.

La variedad, por otra parte, depende en gran medida del observador. Dos personas distintas, con intereses y capacidades diferentes, asociarán con el mismo objeto dos variedades generalmente no iguales. Por eso tiene sentido aplicar el concepto de variedad al conjunto objeto-observador, y no a ninguno de ellos por separado.

La variedad tiene sus leyes, tan inquebrantables como las de Newton (según citaba Beer). De ellas deduciremos el comportamiento de esas herramientas que hemos mencionado: los filtros de variedad.

Para finalizar el capítulo, aportaremos una demostración de la ley de la variedad requerida para un caso que, si bien es restringido, no por ello está exento de interés.

2. Variedad.

Comencemos por definir el concepto de variedad, tal y como es entendido por Ashby. Para ello, atendamos a un observador interesado en algún aspecto del mundo que le rodea. Consideremos que el objeto al que dedica su atención está formado por un conjunto de elementos. Pues bien, la variedad de ese conjunto puede ser definida como el número de elementos diferenciables por el observador. Así, el conjunto $\{a,b,a,b,d,a,c,a,b,d\}$ tendrá una variedad igual a 4 (cuatro elementos diferenciables: a, b, c y d)

Intentaremos aclarar el significado de esta definición recurriendo a unos ejemplos, debidos al propio Ashby ([Ashby, 1956], citado en [Sáez Vacas, 1987], pág.115, y [Ashby, 1973], citado en [Klir, 1985], pág.132).

Definamos las clases de cerdos por las propiedades "raza" y "sexo". Un granjero puede distinguir 8 razas distintas de cerdos, pero no es capaz de reconocer si son machos o hembras. Sin embargo su mujer distingue perfectamente los sexos, aunque no entiende nada de razas. Pues bien, ante un conjunto de cerdos donde se den todas las combinaciones posibles de sexos y razas, el granjero percibirá 8 clases diferentes (variedad 8), mientras que su mujer sólo podrá distinguir dos (variedad

2). Si los dos trabajan en equipo, uno encargándose de diferenciar razas y otra sexos, podrán apreciar 16 clases diferentes (variedad 16).

Sea ahora un neurofisiólogo estudiando el cerebro. Sin duda lo considerará como algo extremadamente complejo (con neuronas entrecruzándose, enzimas catalizando reacciones, etc), y distinguirá en él un elevado número de elementos diferentes. Por lo tanto, para el neurofisiólogo la variedad del cerebro es muy elevada. Por el contrario, para un carnicero ese mismo cerebro no es más que un tipo de carne. Los elementos diferentes que distinguirá en él serán muy pocos (quizás incluso lo considere como un único elemento). La variedad que percibirá el carnicero en este caso será muy pequeña.

Una forma también sencilla de entender la idea de variedad es utilizando las unidades de memoria empleadas en los ordenadores. Así, un dígito binario, un bit, tiene dos posibles estados, 1 y 0, su variedad es 2. Un conjunto de ocho bits, un byte, tiene una variedad de $2^8 = 256$. Una memoria de 1 Kbyte posee una variedad de $1.024 \times 256 = 262.144$. De la misma forma, lo que se entiende por una palabra en el argot de los ordenadores (16 bits) tiene una variedad de $2^{16} = 65.536$, mientras que 1 Kpalabra alcanza una variedad de $1.024 \times 65.536 = 67.108.864$.

Aunque a partir de los ejemplos vistos pueda parecer lo contrario, la idea de variedad no suele ser sencilla a la hora de aplicarla a casos no triviales. No siempre se puede obtener una medida concreta de la variedad (así, en el ejemplo del cerebro, ¿cuál sería la variedad que percibe el neurofisiólogo?). Sin embargo es un concepto muy potente, y en muchos casos no es necesario tener una medida exacta, sino simplemente ideas de su orden de magnitud, o de la relación entre las variedades en dos casos distintos, etc. Por ejemplo, volviendo al cerebro, nos ha servido para dar una idea de cómo la imagen que de él tienen un carnicero y un neurofisiólogo no tienen nada que ver (aunque en ninguno de los dos casos hayamos calculado con exactitud la variedad percibida).

3. Variedad y sistemas de control.

Beer define la variedad de un sistema como el número de los estados posibles de ese sistema [Beer, 1974]. Y considera a la variedad así definida como una medida de la complejidad de ese sistema. Para él, la complejidad vendría dada por tanto por los estados posibles.

Sea un sistema formado por dos personas, cada una subida en una escalera. Sostienen desde esa altura los extremos de una cuerda elástica, de cuyo punto medio cuelga una pelota. Supongamos que cada persona sólo realiza dos movimientos: subir o bajar su extremo de la cuerda. Mediante estos movimientos, ambos intentan controlar el movimiento de la pelota. Y para darle emoción al asunto, tenemos en la vecindad un gato que gusta de jugar dándole zarpazos de vez en cuando. Esto nos asegura que nuestros sufridos personajes tengan trabajo de manera continua.

Pues bien, ya tenemos el sistema, que además puede quedar definido por un estado de salida: la posición instantánea de la pelota. Además consideraremos que los estados estables (los que nuestros personajes intentan mantener) son aquéllos en los que la pelota está quieta.

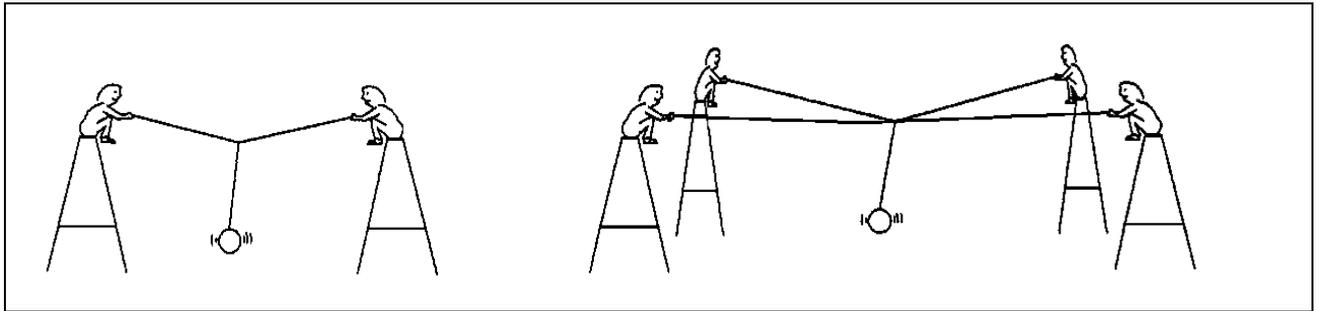


Fig. 1. Individuos subidos en escaleras, sosteniendo la pelota.

Es fácil imaginar a los dos subiendo y bajando la cuerda, hasta que consiguen mantener la pelota quieta. Si se coordinan bien, es de esperar que lo consigan rápidamente.

Pero supongamos ahora que aparecen más personas que quieren participar en nuestra empresa. Cogen a su vez una escalera cada uno, y añaden una nueva cuerda al montaje. Se unen así más elementos (personas y cuerdas) al sistema. Sean así tres, cuatro, cinco... Y el gato sigue incordiando. A poco que nos imaginemos la escena, tendremos a todas las personas gritándose unas a otras, diciendo lo que creen que deben hacer los otros, en un vano intento por coordinarse (supongamos, por ejemplo, que tenemos 20 personajes intentando hablar con cada uno de los otros 19...). La situación puede llegar a ser absolutamente caótica.

¿Qué ha ocurrido? Utilicemos la nueva herramienta que acabamos de introducir: calculemos la variedad del sistema en cada uno de los casos. Para dos personas, tendremos 4 estados posibles (cada elemento sólo puede tener dos estados: subir o bajar su cuerda): variedad 4. Pero para tres personas serán ya 8 los estados (variedad 8). La variedad crece alarmantemente, según la expresión 2^n , siendo n el número de personas que intervienen.

De este rápido aumento de la variedad se puede deducir (según hemos visto hace un momento) un rápido aumento de la complejidad del sistema, o lo que es lo mismo, de la dificultad para mantener la pelota quieta: el sistema crece exponencialmente en variedad, y así crece también la dificultad para controlarlo. Serán necesarios métodos que reduzcan ésta variedad, si queremos un mínimo de efectividad. Entre éstos pueden estar los siguientes:

- a. Introducción de una jerarquía: cada M personas a las órdenes de un jefe, que limita su libertad (con lo que tendremos menos estados posibles).
- b. Conexiones rígidas entre las cuerdas elásticas, que limitan el efecto de un movimiento.
- c. Obviamente, matar al gato también ayudaría: una vez alcanzado el equilibrio, nos aseguramos de que el sistema se quede en él indefinidamente.

4. Variedad y observador.

Algunos de los ejemplos anteriores (en especial el del cerebro y el del granjero) nos muestran de una forma muy directa la dependencia entre variedad y observador. Esta dependencia es tan grande, que podemos decir que la variedad no tiene sentido como propiedad intrínseca de los objetos, que

sólo adquiere significado cuando se asocia a un observador concreto. Así, hablaremos de "la variedad del cerebro cuando lo estudia un neurofisiólogo", y no de "la variedad del cerebro", o de la de un grupo de cerdos para el granjero (y no simplemente de la variedad de los cerdos).

Algunas veces no hablamos explícitamente del observador, pero lo incluimos de una forma más o menos solapada a la hora de elegir y definir el objeto a que nos referimos. Sería este el caso del ejemplo de las memorias de ordenador. Implícitamente hemos considerado que el observador está interesado únicamente en el aspecto cuantitativo de almacenamiento de información "bruta" (medida en bits). Si en este caso el observador se hubiese centrado en los aspectos electrónicos (por ejemplo, basándose en la cantidad de componentes necesarios para obtener una pastilla de memoria dada) las variedades obtenidas habrían sido muy diferentes.

Cuando el observador intenta medir la variedad de un conjunto, lo primero que debe hacer (y hace, de una forma más o menos rigurosa), es seleccionar los atributos de los elementos del conjunto que considera relevantes, de acuerdo con sus intereses y posibilidades. Dicho de otra forma, **define** el conjunto con el que va a trabajar. Y es con esta definición con la que está condicionando la variedad que va a medir. En el ejemplo del cerebro, el neurofisiólogo define el cerebro como un conjunto de infinidad de neuronas, y así, la variedad observada será grande. Pero el carnicero lo define como un trozo de carne, con lo que la variedad que perciba será muy pequeña.

Un ejemplo más [Sáez Vacas, 1987]: los esquimales pueden llegar a distinguir más de veinte tipos de blanco en la nieve, lo que "produce" una variedad que es impensable para las personas que no estamos habituadas a vivir en su medio. En este caso, el esquimal tiene la capacidad (dada por su larga experiencia como observador de nieve) y el interés (muchas de sus actividades dependen fuertemente de la nieve) suficientes para definir el conjunto de blancos en función de varios atributos que nosotros no somos capaces de percibir. Para él la variedad del conjunto "colores blancos" es veinte, mientras que nosotros probablemente diferenciamos como mucho entre "blanco mate" y "blanco brillante" (variedad dos).

A la hora de tratar con un objeto, todo observador **selecciona** ciertos atributos. De esta forma, es inevitable que parte de la realidad quede sin considerar. Si el observador es experto y cuenta con unos instrumentos que le den una capacidad de discriminación apropiada, percibirá una variedad mayor que el que sea inexperto en ese campo, o no disponga de los instrumentos adecuados. Apreciará detalles y matices que el otro sólo puede intuir de una forma confusa, o simplemente desconoce. El ejemplo de la percepción del blanco por los esquimales ilustra bastante bien estas ideas. Cuando en la definición de nuestro "conjunto observado" despreciamos algún atributo (por desconocimiento, o porque así lo decidimos para tener un caso más sencillo), ciertos aspectos de la realidad inevitablemente se nos escapan. Así, aunque para nuestro contacto habitual con la nieve nos basta con nuestra idea de "blanco", el detalle con que considera el esquimal esa misma idea le permite realizar deducciones importantes incluso para su supervivencia (por ejemplo, si es capaz de detectar la presencia de una sima escondida bajo una nieve gracias a que presenta un blanco de un tipo especial).

Además, a medida que cambia el punto de vista del observador, aparecen y desaparecen distintas partes del objeto. Así ocurre con los distintos lenguajes de programación. La realidad con la que se enfrentan es, en el fondo, la misma: programar un ordenador. Pero el conjunto de instrucciones,

estructuras de datos e incluso conceptos que utilizan varía mucho de uno a otro. Los hay que no permiten manejar bits, sino caracteres, enteros, reales, valores booleanos, o combinaciones de éstos (cadenas, registros, matrices, etc.), como Pascal estándar. Se olvida conscientemente que existe un nivel de trabajo "a base de bits". En cambio, cuando se programa con un lenguaje ensamblador no se dispone de enteros, ni reales, ni letras, ni valores Verdadero o Falso ni mucho menos matrices, cadenas y tipos de alto nivel. Y esto es así porque los objetivos que persiguen los distintos lenguajes son distintos, tratan con perspectivas distintas del mismo objeto. Imagínese el lector el esfuerzo que supone escribir un mismo programa en Pascal y en ensamblador. Se dirá que depende del programa. Y efectivamente así es. Hacer una base de datos de tamaño medio en un ordenador actual utilizando lenguaje ensamblador pasa por ser una hazaña digna de constar en el Guinness de los Records, mientras que hacer un gestor de interrupciones en Pascal estándar es simplemente imposible. Cada uno de ellos, Pascal y ensamblador, se ocupan de un aspecto diferente de la realidad (el ordenador). Así, el observador, al elegir el lenguaje que utiliza, está eligiendo también los aspectos del ordenador que le interesan. Y definiendo distintos "conjuntos observados", cada uno con su variedad.

5. La ley de la variedad requerida.

El padre del concepto de variedad es W. Ross Ashby, quien lo introdujo en un libro ya clásico [Ashby, 1956]. Aparte de proponer el término, Ashby formuló la Ley de la Variedad Requerida (o Ley de la Variedad Necesaria, según otras traducciones), que se ha convertido en ley básica de la cibernética.

Vamos a considerar un sistema cuya estructura está compuesta por dos partes: una que llamaremos **regulador**, y otra, **regulado**. Consideremos que ambas partes pueden tener un cierto número (finito) de estados. En este tipo de sistema, la entidad reguladora recoge información de la regulada, y de acuerdo con esta información, actúa sobre ella. El conjunto de estas acciones y de los estados en los que se encuentran las dos partes dan lugar al comportamiento observable del sistema.

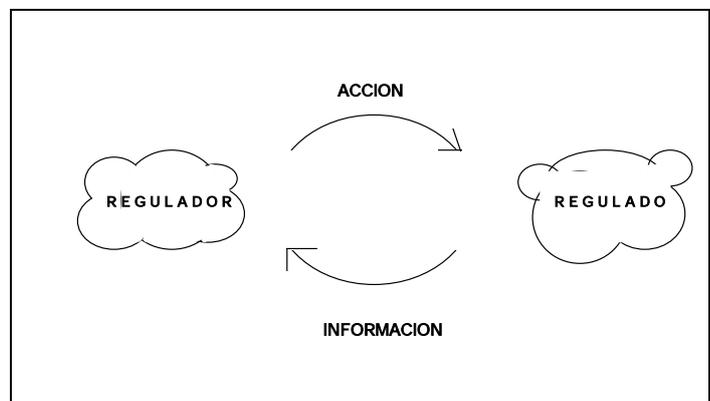


Fig. 2. Esquema básico de un sistema regulador-regulado

Un ejemplo muy sencillo de regulación es el compuesto por el sistema termostato-calefacción. Supongamos una habitación que se desea mantener a una temperatura constante. Para ello instalamos un sistema de calefacción controlado por un termostato. Cuando la temperatura de la habitación esté por debajo de la prefijada, los dispositivos del termostato encenderán la calefacción. Cuando la temperatura deseada se alcance, la apagarán.

En este ejemplo es fácil concluir que el subsistema regulador es el termostato, que ejerce sus acciones (apagar o encender la calefacción), según sea la información que recoge del subsistema

regulado (la temperatura de la habitación). El estado estable, por supuesto, se da cuando la temperatura de la habitación es la temperatura objetivo.

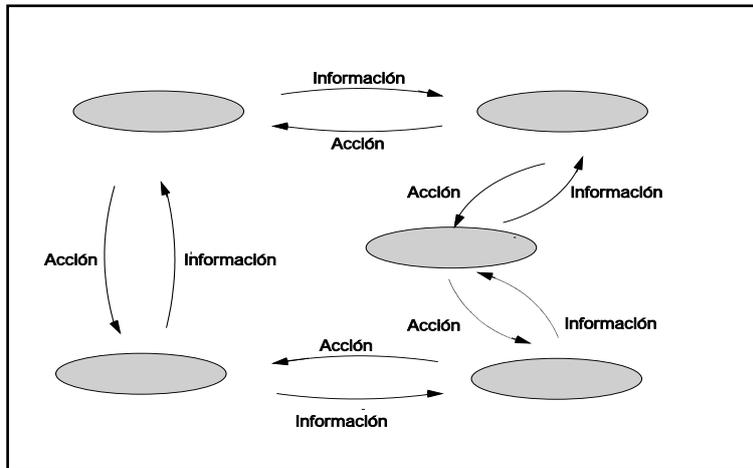


Fig. 3. Varias partes de un sistema regulándose unas a otras.

En problemas reales raramente nos encontraremos con un caso de sistema regulador-regulado puro. Posiblemente la parte "reguladora" esté a su vez regulada por otra u otras, y a su vez regule a más partes que a la "regulada", etc, presentándose por tanto un conjunto muy complicado de relaciones entre los componentes del sistema. Pero nos será muy útil e instructiva esta simplificación, ya que en ella se dan los fenómenos esenciales de regulación, de una forma suficientemente sencilla como para que podamos sacar una

conclusión muy importante: si el subsistema regulador tiene menos variedad que el regulado, no se puede alcanzar la estabilidad. El sistema estará condenado a ser inestable.

Esta afirmación que a primera vista puede parecer demasiado contundente, e incluso infundada, está basada en la ley de la variedad requerida, o ley de Ashby, que exponemos a continuación: **"Sólo la variedad puede absorber variedad"**. Dicho de otra forma: En un sistema regulador-regulado, es preciso que la parte reguladora tenga al menos la misma variedad que la regulada, para que el sistema pueda alcanzar la estabilidad.

Esta ley puede demostrarse matemáticamente de una forma relativamente sencilla, para diversos tipos de sistemas que sean adecuadamente formalizables [Ashby, 1956], por ejemplo, en términos de teoría de la información (ver al final del capítulo, en donde se desarrolla la demostración de la ley de la variedad para un caso sencillo). Pero también tiene una convincente explicación intuitiva: para cada posible estado del regulado, el regulador ha de tomar una acción adecuada si quiere mantener la estabilidad. Por tanto, a cada estado del regulado debe corresponderle al menos uno en el regulador (que será el que actúa cuando ese estado se produce). Si la variedad del regulador es menor que la del regulado, forzosamente tendrá que haber estados del regulado que no sean controlados (naturalmente, suponemos que los estados están elegidos de forma que sobre cada estado del regulado sólo puede actuar un estado del regulador).

Supongamos un autómata que tiene 256 estados posibles. Si queremos poder manejarlo hemos de desplegar una variedad equivalente. Si sólo tenemos como observadores una variedad de 100, únicamente seremos capaces de abordar 100 estados del autómata, existiendo 156 que quedan totalmente fuera de nuestro control. Traducido a términos más concretos, con una consola con cuatro interruptores, que nos permite una variedad de valor 16, no podremos nunca manejar un robot, pongamos por caso, que tiene 64 posibles estados. Con un volante que sólo permite indicar movimientos a la izquierda o a la derecha no podremos conducir un avión que, al desplazarse en un espacio tridimensional, requiere un control capaz de absorber esa variedad; un mínimo sería un mando que permitiera indicar movimientos hacia arriba, hacia abajo, a la izquierda y a la derecha.

Otro ejemplo muy ilustrativo es el juego de los chinos binarios. Cada jugador muestra su mano cerrada, en la cual puede haber o bien una moneda, o bien ninguna. Cada jugador, por turno, y teniendo en cuenta lo que han dicho los demás y su propia elección, dice un número. Gana quien acierta la cantidad de monedas que esconden entre todos los jugadores.

En este caso, el primer participante introduce una variedad 2 (tiene o no tiene moneda). A medida que aumenta el número de jugadores, aumenta la variedad del conjunto. Así, con dos jugadores la variedad es 3, con cuatro 5, con diez 11, etc. Podremos jugar mientras nuestra perspicacia y capacidad de cálculo sea capaz de absorber esa variedad. Cuando se vean superadas por la variedad introducida por un gran número de jugadores, el juego se convierte prácticamente en un sorteo. En este caso, el sistema regulado lo constituyen el conjunto de totales que se pueden dar (un número de 0 a 9, para el caso de nueve jugadores), y mientras que el regulador vendrá representado por cada uno de los participantes (que mediante cálculo y observación intenta abarcar la variedad del conjunto de resultados posibles).

Aquí conviene mencionar la importancia del entorno del objeto y del observador en lo que a la medida de la variedad se refiere. En este ejemplo, sería posible jugar a los chinos con mucha gente si se dispusiera del tiempo necesario para procesar toda la información que se genera. Pero el entorno impone una limitación al problema, en este caso de tiempo. Y ésta es una limitación fundamental, pues no podría desarrollarse el juego si fuera necesario dar una hora para que cada participante pensase la solución (en ese caso, se habría modificado la esencia del juego, con lo que la situación sería distinta). Estas limitaciones son harto frecuentes y generalmente se consideran asociadas al propio observador, ya que suele ser éste el que establece las condiciones. Pero también pueden verse como imposiciones del entorno, en contraposición a las características e intereses del observador.

De acuerdo con todo esto podemos estudiar un ejemplo de sistema regulador-regulado: una zapatería. Tenemos por un lado la parte que consideraremos reguladora: la tienda entendida como organización. Y por otra la regulada: los clientes. Consideraremos que la variedad que introduce el conjunto de clientes viene dada por sus gustos (en forma de tipos de zapatos que demandan), mientras que la de la zapatería puede calcularse como el número de modelos que oferta. Definiremos además el estado estable del sistema zapatería-clientes como aquel que se da cuando los clientes se quedan satisfechos, habiendo encontrado el tipo de zapatos que buscaban. Aunque no muy rigurosa, esta definición de estabilidad se corresponde bastante bien con la idea intuitiva de que la zapatería se mantendrá mientras los clientes que se acerquen a ella acaben comprando alguno de sus productos.

Pues bien, si sólo tenemos un único modelo de zapatos, no podremos absorber todos los gustos de los clientes: el sistema será inestable (los clientes dejarán de venir). La variedad de los zapatos es 1, mientras que la de los clientes es mucho mayor.

Solamente cuando haya suficientes tipos de zapatos para que cada cliente encuentre uno según su gusto, habremos alcanzado la estabilidad. Ahora las dos variedades están equilibradas.

Por supuesto hay otro caso: que nos dirijamos a un determinado tipo de clientes de variedad 1 (por ejemplo, militares buscando zapatos para su uniforme). En este caso podríamos mantener un único

tipo de zapatos sin perder la estabilidad (tal como la hemos definido para este caso). La variedad de las dos partes es en este caso también igual.

La ley de la variedad requerida establece una correspondencia biunívoca entre las variedades de ambos lados de la ecuación. Todos los ejemplos vistos muestran la necesidad de adaptar la variedad entre los dos extremos para que el funcionamiento del conjunto sea correcto. La forma de conseguir esa adaptación es utilizar mecanismos especiales de regulación.

6. Adaptación = Amplificación + Reducción.

Visto el significado de la variedad, y con la Ley de la Variedad Requerida en la mano, la pregunta más inmediata es cómo tratar un problema con una variedad distinta a la nuestra. La respuesta a esa pregunta es un concepto muy utilizado en la cibernética: adaptación.

Para explicar mejor la idea de adaptación conviene recurrir al ejemplo de los sistemas de control para luego generalizar en otros campos. En un sistema de control distinguíamos dos partes: el subsistema regulador y el subsistema regulado. Estos van a ser los dos términos de nuestra ecuación de la variedad. Cada uno de estos subsistemas va a tener una variedad determinada, coherente, que no necesariamente equivalente, con la del otro subsistema y relevante a la aplicación del conjunto. La coherencia corre a cargo del observador y es fundamental recordar que no se deben sumar peras y manzanas. La ley de la variedad requerida nos dice que para poder controlar algo tenemos que tener al menos la misma variedad que el objeto a controlar. El ejemplo que veíamos antes del avión y su control es muy ilustrativo en este punto.

En la mayoría de los casos no sucede que el controlador y el controlado tengan una variedad equiparable, ¿qué hacer entonces?. La solución está en la **adaptación de variedades**: reducir la de un lado y aumentar la del otro hasta que se cumpla la ley de la variedad requerida. Y el instrumento que permite realizar esto se denomina **filtro de variedad**. Veámoslo con un ejemplo.

Un profesor (sistema regulador) tiene una variedad muy pequeña frente a la del conjunto de sus alumnos (sistema regulado), desequilibrio que aumenta a medida que hay más alumnos. De una forma harto simplista, pero ilustrativa, podríamos medir la variedad del profesor como el número de horas que puede dedicar a sus alumnos (preparando e impartiendo las clases, resolviendo dudas, evaluándolos...), y la de los alumnos como las que dedicarán a comprender la asignatura (asistiendo a clase, estudiando, etc.). Sería imposible el funcionamiento del conjunto si no hubiera medios para aumentar la variedad del profesor y disminuir la de los alumnos. Imagínese un sistema donde ambas variedades tuvieran que acoplarse directamente: tantas horas de dedicación del profesor, tantas del alumno. Esto corresponde al esquema de clases individuales, con una relación directa entre profesor y alumno.

Pero en la universidad no es éste el esquema elegido: un solo profesor ha de absorber la variedad de muchos alumnos. Para ello, el profesor dispone, por ejemplo, de libros de texto, a través de los cuales los alumnos pueden acceder a información sin necesidad de consultar directamente con él. El libro actúa como un amplificador de la variedad del profesor. La propia organización de las clases, donde un único profesor intenta transmitir su saber simultáneamente a una gran cantidad de

alumnos, es otro ejemplo de amplificador de variedad. Para reducir la variedad de los alumnos se utilizan, por ejemplo, los exámenes; el profesor no puede evaluar individualmente a todos los alumnos (de nuevo habría que igualar tiempo de profesor y tiempo de alumno), y por ello establece una serie de preguntas y problemas iguales para todos. El examen actúa como un reductor de la variedad de los alumnos.

Existen otros muchos amplificadores y reductores de variedad relacionados con este mismo ejemplo: horarios de tutoría, bibliografía recomendada, colecciones de problemas, etc. A través de ellos se produce la adaptación de variedad son lo que se denomina filtros de variedad. Como tales filtros no alteran las características de los sistemas entre los que actúan pero permiten que estos interactúen entre sí. Su funcionamiento es sencillo: proporcionan la variedad necesaria para equilibrar las de ambos subsistemas y por supuesto funcionan en las dos direcciones, es decir, pueden tanto amplificar como reducir, o atenuar, la variedad.

Un **filtro de variedad** es un sistema (o una parte de un sistema) que actúa en dos sentidos. En uno, aumenta la variedad, mientras que en el otro la disminuye. Correctamente aplicado, el regulador ve disminuir la variedad del regulado en la medida necesaria para poder absorberla, y el regulado ve aumentada la del regulador en la misma cantidad.

Naturalmente, no basta con aumentar/reducir la variedad: el filtro debe hacerlo de la forma adecuada, actuando sobre los elementos necesarios para alcanzar el equilibrio.

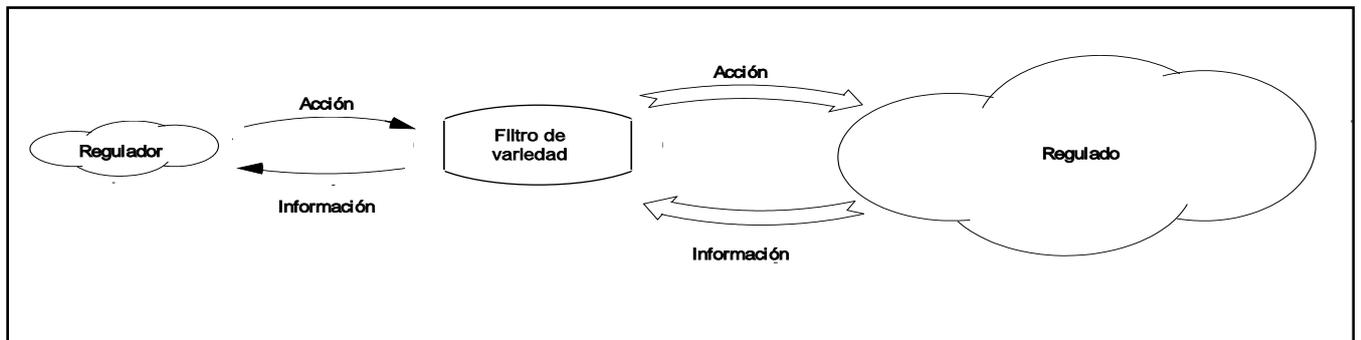


Fig. 4. Filtro de variedad colocado entre un regulador y un regulado, para adaptar sus variedades.

Son innumerables los ejemplos de filtros de variedad y estamos tan acostumbrados a verlos, aunque no como tales, que pueden parecer absolutamente triviales aunque en muchos casos están muy lejos de serlo. El ordenador puede ser considerado como un filtro de variedad. Supongamos que lo estamos usando para mantener una base de datos. Por un lado trata con una buena cantidad de información, que seguramente una persona no podría asimilar (sistema regulado). Por la otra, estamos nosotros (sistema regulador), consultando la base, buscando elementos relacionados y pidiendo estadísticas. El ordenador es aquí utilizado para acoplar la variedad del problema que estamos tratando a la variedad de nuestro cerebro (que es la que podemos usar en nuestros análisis).

Las diferentes modalidades de declaración de la renta actúan como filtro entre la variedad enorme de la sociedad (sistema que se intenta regular) y la del ministerio de Hacienda (que actúa como regulador), mucho menor. Un horario de trabajo en una fábrica reduce enormemente la variedad de

todos sus trabajadores obligándolos a adaptarse al él y al mismo tiempo amplifica la variedad de los que la dirigen que pueden así controlar la actividad que se desarrolla. La gama de colores y modelos que ofrece una tienda de ropa permite que ésta amplifique su variedad para adaptarla a la de los clientes, que suele ser enorme (recordar el ejemplo de la zapatería). En sentido inverso, esa misma gama de colores y modelos reduce la variedad de los clientes, que se tienen que ajustar a ella. La moda también se puede interpretar de esta forma. Sin semejante filtro, los productores se podrían encontrar con exigencias de clientes que no pueden satisfacer pues no pueden adaptarse a cada individuo. A través de la moda, se produce una canalización de la demanda que facilita la adaptación de variedad. Esto mismo es aplicable a la oferta de modelos de ordenadores de una determinada casa, a los anuncios, a los libros, etc.

Los conceptos de variedad y adaptación, junto con la ley de la variedad requerida, son unas herramientas intelectuales muy potentes para el análisis de la interacción entre dos entidades. A pesar de su aparente simplicidad, su grado de validez es prácticamente universal y constituyen una de las bases del pensamiento cibernético. Pero no deben considerarse de forma aislada pues, como iremos viendo, hay otros muchos factores en juego.

Que su aplicabilidad es grande se demuestra por las numerosas referencias que se le han dedicado en todo el mundo. Podemos citar esfuerzos muy próximos a nosotros, como es la modelización, a partir de la ley de la variedad, del mercado -aparentemente caótico a mediados de los ochenta- de los ordenadores personales [Sáez-Vacas, 1987] o, por otro, el desarrollo de un punto de vista teórico para los procesos de innovación tecnológica en una empresa [Sáez-Vacas, 1990]. Un campo en el que el concepto de variedad ha conseguido un desarrollo muy especial, aunque todavía pionero en cuanto a su implantación, es en el de la organización de empresas. La figura indiscutible en este área es Stafford Beer, quien, a través de muchos años de investigación, ha cuajado un enfoque de gran nivel para el diseño o el diagnóstico de organizaciones, conocido como el **Modelo del Sistema Viable** (VSM, por sus siglas en inglés) [Beer, 1985]. Muy recientemente, la revista Systems Practice le ha dedicado un número completo [Espejo, 1990].

7. Demostración de la ley de la variedad.

Aproximación a una demostración de la ley de la variedad requerida, tomada de [Ashby, 1956, cap. 11].

Supongamos que tenemos dos jugadores, llamémosles Regulador y Perturbador. Las reglas del juego en que están enfrascados son muy sencillas:

- a. Tienen ante ellos una tabla como la de la figura (tabla 1).
- b. Perturbador juega primero, eligiendo un número, al que le corresponderá una fila de la tabla.
- c. Regulador, conocido ese número, seleccionará una letra mayúscula (y por tanto, una columna).

	REGULADOR		
	A	B	C
1	b	a	c
2	a	c	b
3	c	b	a
PERTURBADOR			

Tabla 1. Primer juego entre Regulador y Perturbador

d. Regulador gana si la letra minúscula que ocupa el lugar donde se cruzan la columna que él ha elegido y la fila que eligió Regulador es una *a*. Si no, gana Perturbador.

Para esta tabla en particular vemos que Regulador puede ganar siempre. Elija lo que elija Perturbador, siempre podrá seguir la siguiente estrategia:

1	2	3
<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>

Esto es, si Perturbador elige 1, él puede elegir *B*, si elige 2, ganará escogiendo *A*, y si 3, bastará con que seleccione *C*. De esta forma, el resultado siempre será *a*.

Si analizamos un poco más la tabla que estamos usando, veremos que Regulador también puede ganar siempre en el caso de que el resultado deba ser *b* o *c*. Puede decirse que Regulador tiene un completo control del resultado (que a partir de ahora llamaremos **salida**).

		REGULADOR			
		A	B	C	D
PERTURBADOR	1	b	d	a	a
	2	a	d	a	d
	3	d	a	a	a
	4	d	b	a	b
	5	d	a	b	d

Tabla 2. Segundo juego entre Regulador y Perturbador.

Pero no todas las tablas posibles van a ser tan favorecedoras para Regulador como ésta. Por ejemplo, supongamos que nuestros dos jugadores deciden cambiar a la tabla 2 (ver figura). Mientras el objetivo sea *a*, no cambia nada: Regulador puede ganar siempre. Pero si el objetivo es *b* hay ciertos casos en los que perderá. Por ejemplo, cuando Perturbador elija una de las filas 2 o 3. Y este no es el peor caso para Regulador: si el objetivo es *c*, perderá siempre, independientemente de lo que elija su contrincante.

		REGULADOR		
		A	B	C
PERTURBADOR	1	f	f	k
	2	k	e	f
	3	m	k	a
	4	b	b	b
	5	c	q	c
	6	h	h	m
	7	j	d	d
	8	a	p	j
	9	l	n	h

Tabla 3. Tercer juego entre Regulador y Perturbador

Intentemos sacar alguna conclusión sobre las posibilidades que tiene Regulador de ganar para una tabla dada. En primer lugar, vamos a limitar un poco el tipo de tabla con que se juega. Para ello, impondremos la condición de que las letras no se repitan en la misma columna. Así evitamos que Regulador pueda no cambiar su elección cuando Perturbador cambia la suya. El problema que nos queda es aún suficientemente general, y de gran interés en teoría de regulación.

Así pues, en las tablas que consideramos, Regulador necesitará conocer exactamente cuál es la elección de su contrincante para poder ganar (cualquier cambio de Perturbador habrá de seguirse necesariamente de un cambio de Regulador).

De este tipo es la tabla 3 (en figura adjunta). La estrategia de Regulador puede expresarse como una transformación univaluada (esto es, a cada movimiento de Perturbador le corresponderá uno y solo uno de Regulador). Una estrategia posible podría ser:

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>A</i>

De esta forma estamos especificando un conjunto de salidas, las que forzará Regulador para cualquier movimiento de Perturbador. De otra forma,

(1, <i>C</i>)	(2, <i>A</i>)	(3, <i>B</i>)	...	(9, <i>A</i>)
<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>	...	<i>l</i>

Es sencillo comprobar que la variedad de este conjunto de salidas {*k,k,k,...,l*} no puede ser menor que

$$\text{(Variedad de Perturbador)} / \text{(Variedad de Regulador)}$$

Probémoslo. Para ello, hagamos que Regulador, eligiendo su estrategia, intente mantener la variedad del conjunto de salidas tan pequeño como le sea posible. Para ello, elegir un elemento de la primera fila. En la segunda fila, deber cambiar de columna si quiere intentar no añadir un elemento distinto al conjunto (recordar que en una misma columna no se pueden repetir elementos). Para mantener la variedad de la salida al mínimo, debe elegir una nueva columna en cada fila. Así, si Regulador dispone de *n* columnas (3 en la tabla 3), después de la columna *n*-ésima, deber necesariamente elegir una columna ya elegida, con lo que obligatoriamente estar añadiendo un nuevo elemento al conjunto de salidas. En general, si Regulador dispone de **r** movimientos diferentes, y Perturbador de **p**, la variedad del conjunto de salida no podrá ser menor que **p/r**.

Este juego puede ser considerado de una forma un poco diferente: si Regulador siempre elige la misma columna, sea cual sea la elección de Perturbador, este último ejerce control total sobre las salidas: la variedad del conjunto de salidas será tan grande como lo sea la variedad de los movimientos de Perturbador. En general, si Regulador dispone de **r** columnas, la variedad del conjunto de salida puede reducirse a **1/n** de la de Perturbador, pero no a menos. Por tanto, solo la variedad en las posibilidades de Regulador puede disminuir la variedad en la salida. Esto nos lleva directamente a la ley de la variedad requerida: "Sólo la variedad en el Regulador puede disminuir la variedad debida a Perturbador, sólo la variedad puede absorber variedad." El llamado Perturbador es el sistema Regulado.

8. Resumen.

Hemos comenzando este capítulo definiendo el importante concepto de **variedad**, según la entendía Ashby, aplicada fundamentalmente a conjuntos. Luego nos hemos acercado a la utilización que Beer hace de este concepto, aplicándolo a los sistemas de control. Es importante remarcar el hecho de que Beer considera a la variedad como una **medida de la complejidad** de un sistema. En los siguientes capítulos profundizaremos en el significado de la complejidad, y podremos comparar esta idea con las de otros autores.

La importancia del **observador** en el concepto de variedad ha sido considerada como fundamental, ya que interviene directamente a la hora de elegir el conjunto con el que trabajaremos (lo que influye claramente en la variedad que se nos presentará). Y en concreto, serán los **conocimientos**, **intereses** e **instrumentos** del observador los que más influyan en esta elección. Esta importancia llega hasta tal punto, que cambios de punto de vista del observador producirán la aparición y desaparición de partes de nuestra percepción del objeto.

La introducción de los sistemas de regulación nos permitió la formulación de la **ley de la variedad requerida**, de gran importancia en la cibernética, e incluso en la vida diaria, como vimos en los ejemplos. A partir de estas ideas llegamos al concepto de **filtro de variedad**, herramienta que nos permite manejar sistemas que de otra forma serían incontrolables.

Por último, vimos una de las demostraciones la ley de la variedad requerida que aporta Ashby, para un caso sencillo, pero no carente de interés, ya que representa bastante bien a los sistemas sometidos a perturbaciones, muy extendidos en la realidad.

El estudio que hemos hecho hasta aquí del concepto de variedad nos permitirá adentrarnos con más facilidad (y ya más "en caliente"), en el complicado mundo de la complejidad, que trataremos en los siguientes capítulos.

Bibliografía.

Tenemos dos apartados. En Notas Bibliográficas se registran las referencias consideradas especialmente valiosas para el estudio del tema. En Referencias Bibliográficas se incluyen todas las referencias citadas en el capítulo.

Notas bibliográficas.

El libro de Beer, "**Designing Freedom**" [Beer, 1974] es muy apropiado para tomar idea del impacto producido por la aplicación del concepto de variedad a los sistemas sociales. Además (especialmente en los capítulos 1, 2 y 3), realiza una buena introducción de la variedad, y de algunas de sus consecuencias, como la ley de la variedad requerida y los filtros de la variedad.

En el libro de Ashby [Ashby, 1956] podemos encontrar los primeros estudios sobre el concepto de variedad, la ley de la variedad requerida, etc. Sin duda, este libro se ha convertido en un clásico del tema.

En el artículo de Klir, "**Complexity: some general observations**" [Klir, 1985] encontramos, antes de entrar a tratar con más profundidad otros aspectos de la complejidad, unas cuantas útiles nociones sobre variedad, incidiendo especialmente sobre la importancia del observador (acompañadas de unos cuantos ejemplos, algunos tomados de Ashby, parte de los cuales hemos reproducido aquí).

Referencias bibliográficas.

Ashby, W.R. (1956): "**An introduction to cybernetics**", Chapman and Hall, Londres [en español (1972): "Introducción a la cibernética", Ediciones Nueva Visión, Buenos Aires]

Ashby, W.R. (1973): "Some peculiarities of complex systems", **Cybernet. Med.**, num.9, pp.1-7.

Beer, S. (1974): "**Designing Freedom**", Wiley & Sons, Londres.

Beer, S. (1985): "**Diagnosing the System for Organizations**", Wiley & Sons, Chichester.

Espejo, R. ed. (1990): "Special issue: Stafford Beer's Viable System Model", **Systems Practice**, Vol. 3, num. 3.

Klir, G.J. (1985): "Complexity: some general observations", **Systems Research**, vol.2, num.2, pp.131-140.

Sáez Vacas, F. (1987): "**Computadores personales**", FUNDESCO, Madrid.

Sáez Vacas, F. (1990): "**Ofimática compleja**", FUNDESCO, Madrid.