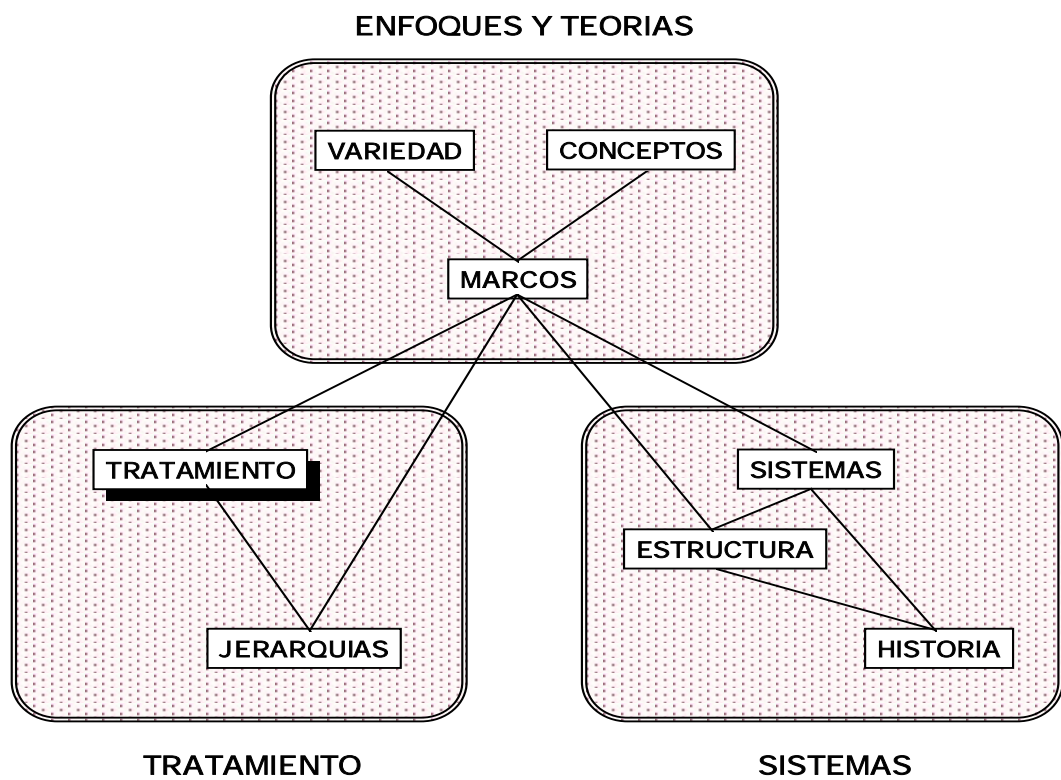
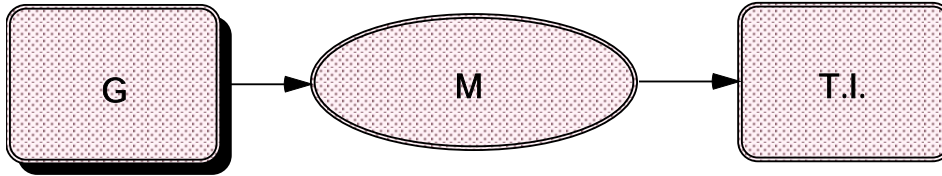


Tratamiento de la complejidad: Simplificación

El problema general de la simplificación
La simplificación, según Gerald Weinberg
Tempus y Hora. Una estrategia de simplificación, según H.A. Simon
Un paso más allá de la simplificación. Bell y Newell
Niveles y Abstracciones
Resumen
Bibliografía

La simplificación es un concepto indisociable de la complejidad. Si se admite la existencia de una cierta complejidad en los sistemas o en los objetos, hay que pensar en formas de reducirla para poder abordar los problemas asociados. Cualquier proceso de diseño es un proceso de tratamiento de complejidad en el que las ideas se van refinando sucesivamente hasta llegar a un modelo más o menos simplificado de lo que es la realidad. Dado que la simplificación es inevitable en todo proceso epistemológico, es conveniente analizar cómo se puede realizar preservando la mayor cantidad posible de significado y relevancia del problema.



1. Introducción

Una vez reconocida la existencia de la complejidad en los sistemas y en el mundo en general hay que tratar de establecer las formas de tratarla. La simplificación, más que una herramienta, es una necesidad, un enfoque o un planteamiento imprescindible para tratar la complejidad. Sin embargo el problema de la simplificación no se reduce a la eliminación de ciertas características o a despreciar algunas, o muchas, interrelaciones. El objetivo de este capítulo es presentar el problema general de la simplificación y las diversas aproximaciones a él que han adoptado diversos autores con la idea de mostrar todas las facetas implicadas a la hora de simplificar un sistema. Muchas de las ideas que veremos aquí están íntimamente relacionadas con las presentadas en otros capítulos y se deben a la estrecha relación que existe entre la forma de considerar los sistemas y la aproximación que se elige para simplificarlos.

2. El problema general de la simplificación. George J. Klir

La complejidad de los sistemas se estudia principalmente para desarrollar métodos con los cuales se pueda reducir a niveles manejables la complejidad de sistemas incomprensibles o intratables. Esta es la definición más genérica que se puede hacer de la simplificación y, al mismo tiempo, nos indica la relación que existe entre la simplificación y el estudio de la complejidad de los sistemas. Para Klir, los problemas de simplificación son quizás los problemas más importantes del estudio de los sistemas.

Quizá convenga recordar aquí que Klir parte de la idea de que la noción de complejidad está directamente relacionada con la de sistema. Y él desarrolla el tratamiento de la simplificación de acuerdo con los principios generales de complejidad que propone y su jerarquía de sistemas (ver el capítulo de Marcos Conceptuales).

Principios generales de la complejidad de los sistemas

1.- La complejidad de un sistema, sea del tipo que sea, debe ser proporcional a la cantidad de información necesaria para describir el sistema.

2.- La complejidad de un sistema debe ser proporcional a la cantidad de información necesaria para resolver cualquier incertidumbre asociada con dicho sistema.

Para Klir, la complejidad de cualquier tipo de sistema está sujeta a dos principios generales, uno que la relaciona con la cantidad de información descriptiva necesaria y otro que la relaciona con la incertidumbre existente en el sistema. La simplificación debe estar, por tanto, orientada a reducir la complejidad basada en la información descriptiva y la basada en la incertidumbre. El principal problema radica en que estas dos complejidades son, en cierta forma, contrapuestas, es decir, cuando reducimos una, aumenta la otra o, en el mejor de los casos, permanece inalterable.

Esta relación es fácil de ver con el siguiente ejemplo: definamos una clase de una universidad como un conjunto de alumnos que atienden a las mismas asignaturas en el mismo horario y en la misma aula. Este conjunto tiene una complejidad descriptiva asociada y una complejidad relacionada con la información necesaria para resolver las incertidumbres que se nos presentan respecto a él. Una definición de una clase determinada que reduce mucho la complejidad descriptiva es la siguiente: esta clase está formada por 90 alumnos. Es una definición buena y la complejidad descriptiva es pequeña, pero la complejidad dependiente de la incertidumbre está prácticamente en su grado máximo, con esa definición no podemos resolver prácticamente ninguna incertidumbre.

Supongamos que queremos estudiar la preferencia que tiene esa clase por un determinado equipo de fútbol. Saber que la clase tiene 90 alumnos nos proporciona la incertidumbre máxima (no sabemos nada), en este caso la complejidad descriptiva es muy pequeña y la complejidad de incertidumbre es muy grande. Si aumentamos la complejidad descriptiva y decimos que la clase está formada por 90 alumnos, de los cuales 15 son de Barcelona, 20 de Vigo y 55 de Madrid, la incertidumbre sobre las preferencias futbolísticas de esa clase disminuye en una medida importante pues ya nos permite suponer, bastante razonablemente, cuales van a ser las preferencias de los tres grupos en que se ha dividido la clase. Es importante ver y entender cómo para reducir la incertidumbre hay que aumentar la complejidad descriptiva y cómo una disminución de esta última complejidad conduce a un aumento de la incertidumbre.

Para Klir, todas las estrategias de simplificación pueden reducirse a una formulación general, que no trataremos aquí. Las diferencias que hay entre unos métodos de simplificación y otros se pueden resumir en cuatro puntos:

1.- El tipo epistemológico de sistema que se simplifica: Una forma genérica de simplificación es eliminar variables. Según sea el tipo de sistema con el que se trabaje así será la eliminación que se haga. Por ejemplo, en un sistema fuente se pueden eliminar directamente variables o reducir el nivel de resolución de sus valores, con lo cual se simplifica la complejidad descriptiva, o se puede reducir el número de estados posibles de un sistema generativo para reducir así la complejidad dependiente de la incertidumbre. Como ejemplo de un sistema fuente podemos tomar un circuito electrónico en el que, para reducir la complejidad descriptiva, no consideramos la disipación de potencia y nos quedamos sólo con las variables de intensidad de corriente y tensión. Para reducir la complejidad relacionada con la incertidumbre podemos pensar en reducir el ruido para evitar comportamientos extraños o en limitar la entrada para evitar que algún componente entre en saturación.

2.- El conjunto de simplificaciones consideradas válidas dentro de un sistema: es evidente que no en todos los sistemas se puede aplicar el mismo tipo de simplificaciones. Así, en los sistemas de los que se ocupa la mecánica clásica se puede utilizar el principio de superposición para simplificar la complejidad descriptiva, esto es absolutamente impensable en un sistema social, lo que determina una estrategia de simplificación radicalmente distinta, un psicólogo se sentiría muy feliz si pudiera estudiar las relaciones de grupos dividiéndolas en interacciones dos a dos. El éxito de los mecanismos de simplificación depende mucho de ligerísimas variaciones en el sistema considerado y lo que puede valer para un caso deja de servir para otro.

3.- Los dos tipos de complejidad determinados por los principios generales: Dependiendo de la estrategia que elijamos, simplificaremos la complejidad descriptiva o la relacionada con la incertidumbre y la conveniencia de reducir una u otra depende de cada caso particular. El método más común de reducir la complejidad descriptiva de un sistema es descomponerlo en subsistemas, lo que conlleva un aumento (o, en el caso mejor, una estabilización) de la complejidad dependiente de la incertidumbre, dado que el sistema es más que la suma de las partes. Un ejemplo útil para ver mejor este punto es la célula. Al describirla, la dividimos en diversas unidades funcionales, cada una con una misión concreta. Sin embargo, la reunión simple de todos estos elementos no da lugar a una célula, simplemente a un conjunto de elementos. Al dividir la célula en partes funcionales diferenciadas hemos dejado de lado todas las interrelaciones entre estas partes, interrelaciones que son fundamentales para el funcionamiento del todo pero que no son relevantes en el comportamiento de cada parte. Por otro lado, los sistemas presentan la propiedad de la emergencia, es decir, que el todo presenta características que no son explicables a partir de los elementos que lo forman. Estas características, al quedar eliminadas descomponiendo la célula en subsistemas, aumentarán la incertidumbre a la hora de predecir el comportamiento de la célula. Un método muy en boga para reducir la complejidad relacionada con la incertidumbre es disminuir la precisión exigida y utilizar la teoría de conjuntos borrosos que permite manejar un grado de incertidumbre mayor. Evidentemente, introducir la borrosidad en un sistema complica mucho su descripción y por tanto aumenta la complejidad de este tipo.

4.- La naturaleza de otros órdenes de preferencia (respecto a las simplificaciones).

Con todo ello, Klir nos presenta una formulación muy amplia de problema de la simplificación que nos es muy útil como punto de partida para desarrollar este tema.

3. La simplificación, según Gerald M. Weinberg

Para Weinberg la simplificación es un punto de mucha importancia, tanto es así, que define la ciencia de los sistemas como la ciencia de la simplificación. Para ilustrarlo propone el siguiente ejemplo:

Consideremos el problema de describir un sistema de dos objetos. En este sistema hay cuatro ecuaciones: a) cómo se comporta cada objeto por separado, dos ecuaciones; b) cómo se relacionan entre ellos, una ecuación; y c) qué sucede cuando los objetos no están, una ecuación, conocida como ecuación de campo. Para describir un sistema con n cuerpos se tiene 2^n ecuaciones. Para 10 cuerpos esto resulta en más de 1.000 ecuaciones. Si lo que se pretende es estudiar el sistema solar, formado por unos 100.000 cuerpos el número de relaciones es de $10^{30.000}$, un problema realmente intratable.

Hipotéticamente, éste fue, sin embargo, el problema que se le planteó a Newton cuando intentó describir el comportamiento del sistema solar. Resulta evidente que es necesario utilizar algún medio de simplificación que haga que el problema se reduzca a límites manejables:

En primer lugar consideremos que podemos prescindir de las masas pequeñas ya que no influyen de manera decisiva en el comportamiento de las masas grandes como son los planetas o el sol. Con ello hemos reducido el problema de $10^{30.000}$ ecuaciones a unas 1.000, correspondientes a 10 cuerpos. La diferencia es apreciable pero, no disponiendo de un ordenador, 1.000 ecuaciones se pueden plantear pero no resolver.

El segundo paso es aplicar el principio de superposición, es decir, suponer que se pueden aislar las relaciones de los cuerpos dos a dos, lo cual es factible porque la ley de la gravedad así nos lo indica ya que postula que la fuerza de atracción entre dos cuerpos no depende de la presencia de un tercero. Con ello podemos reducir nuestro sistema de ecuaciones a unas 45. Sistema que ya se puede considerar resoluble.

Pero Newton fue más allá. Supuso que el sol, al ser mucho mayor que el resto de las masas planetarias, era la masa dominante en el sistema, de forma que se podrían ignorar las relaciones entre los planetas, quedándose sólo con las relaciones sol-planeta. Esto reduce el sistema de ecuaciones a 10. Y aún hizo más, supuso que las relaciones sol-planeta podían aislarse una a una, de forma que la resolución de las ecuaciones requería mucho menos cálculo pues n ecuaciones requieren n^2 unidades de computación, mientras que n ecuaciones separadas requieren únicamente n unidades de computación. En este punto dejó de simplificar y ya resolvió el sistema.

El viento del sol

En cierto sentido se puede decir que los vuelos espaciales se deben a Newton. Gracias a sus cálculos, a su ley de la gravedad y a sus teorías se pueden calcular las órbitas de los satélites. Sin embargo, el método seguido por Newton tiene simplificaciones peligrosas para los que calculan una determinada órbita para un determinado satélite pues a menudo estas simplificaciones no son del todo correctas. Ejemplo de ello son los cálculos de la órbita del satélite Echo (Eco, en español), que era, básicamente, una esfera de Mylar inflada. Tras meses de trabajo se vió que las ecuaciones clásicas no valían para el Echo. Se daba el caso, averiguado tras muchos cálculos, de que el Echo, dada su composición, tenía una densidad muy baja y comparativamente resultaba mucho mayor que cualquier cuerpo solar "normal". El resultado era que no se podía despreciar la presión de la luz radiada por el sol -el viento solar- como se hace con los cálculos de las órbitas "normales".[A partir de Weinberg, en (Klir, 1972, p.124)]["El viento solar" es un cuento de Arthur C. Clarke, Alianza Editorial, Colección el Libro de Bolsillo, Madrid, 1974]

Hoy, con toda la potencia de cálculo que los ordenadores ofrecen, es difícil comprender por qué los cálculos de las órbitas planetarias de Newton se cuentan entre los logros más importantes de la mente humana. Newton y sus contemporáneos estaban muy interesados por los supuestos simplificadores que les permitían realizar cálculos como el descrito. Con el límite práctico de cálculo muy por debajo del actual Newton necesitaba de todos los supuestos simplificadores que pudiese encontrar y ahí está el secreto de su genialidad, seguir un proceso de simplificación que le permitió llegar a un problema abordable y que al mismo tiempo mantenía la validez de los

resultados. También tuvo la suerte de que los instrumentos de observación de su época eran infinitamente menos precisos que los actuales.

El problema de la simplificación sigue siendo muy importante hoy en día. Establecer unos principios generales de comportamiento y unas líneas simplificadoras válidas de forma que los problemas complejos sean manejables no es una tarea sencilla. Cada problema requiere su método de simplificación particular y hay que ser muy cuidadoso con los factores que se desprecian, un ejemplo de los problemas que pueden resultar de no hacerlo así se resume en el cuadro "El viento del sol".

4. Tempus y Hora. Una estrategia de simplificación, según H.A. Simon

Dentro de su ensayo "La arquitectura de la complejidad", en el que trata diversos aspectos relacionados con la complejidad de los sistemas, Simon propone una de las parábolas emblemáticas del estudio de la complejidad, que ilustra perfectamente cómo se puede tratar ésta y los problemas derivados de ella. El cuento, o la parábola, como lo llama Simon, dice más o menos así:

Hubo una vez dos relojeros, llamados Tempus y Hora, que fabricaban relojes de excelente calidad. Los dos gozaban de una gran reputación y tenían un gran número de clientes. Sin embargo, Hora prosperó mientras que Tempus se fue empobreciendo cada vez más hasta que finalmente perdió el negocio. La razón de ello requiere una explicación previa.

Los relojes que ambos hacían estaban compuestos por unas 1.000 piezas. Tempus ensamblaba los relojes de tal manera que si interrumpía el proceso de fabricación en cualquier punto que no fuera el final de la construcción del reloj, éste se desmontaba y había que empezar el proceso de nuevo desde el principio. A medida que tenía más clientes que llegaban a su taller a formalizar sus encargos, sufría más interrupciones y se le hacía más difícil tener tiempo suficiente para acabar un reloj.

Los relojes que hacía Hora no eran menos complejos, pero estaban diseñados de tal forma que se podían construir partes completas por separado, cada una de ellas de unas diez piezas. Cada parte de éstas servía para construir otra subparte más grande de unas cien piezas y diez de estas subpartes formaban el reloj completo. De aquí que, cuando Hora se veía interrumpido por un cliente, con la misma frecuencia que Tempus, el trabajo que perdía era sólo una pequeña parte del trabajo total, consiguiendo montar un reloj en mucho menos tiempo que Tempus.

El propio Simon analiza numéricamente este ejemplo. Supongamos que la probabilidad de interrupción mientras se monta una pieza es p . La probabilidad que tiene Tempus de acabar un reloj es la probabilidad de que no le interrumpan mientras monta cada una de las 1.000 piezas, esto es, $(1 - p)^{1.000}$, que para p mayor que 0,001 es una probabilidad muy pequeña y supone que cada interrupción representa perder $1/p$ partes montadas. Por otro lado, Hora tiene que completar 111 montajes, cada uno de diez partes, de forma que la probabilidad de no ser interrumpido mientras completa cada una de estas subpartes es $(1 - p)^{10}$, aunque lo que más interesa es que cada interrupción supone que sólo se pierde el trabajo de montar 5 piezas.

Para $p = 0,01$ basta decir que Tempus conseguiría completar 44 relojes de cada millón de intentos mientras que Hora conseguiría acabar 9 de cada 10 subpartes de las que empieza, lo que se traduce en una relación de 4.000 a 1.

La moraleja evidente de esta parábola es que la complejidad se puede manejar muy eficientemente, aunque no en todos los casos, por medio de módulos o jerarquías, otro aspecto muy importante de la complejidad que trataremos aparte en un capítulo más extenso. El ejemplo que propone Simon es muy útil para ilustrar cómo reducir la complejidad descriptiva según el punto 3 que propone Klir.

5. Un paso más allá de la simplificación. Bell y Newell

Como decíamos al principio de este capítulo, la simplificación es una necesidad, dada la complejidad del mundo que nos rodea. Hemos visto diversos ejemplos de cómo se reduce la complejidad de un determinado sistema hasta tener un nivel asequible. Klir muestra los aspectos formales del problema de la simplificación, Weinberg lleva la idea aún más lejos considerando la simplificación como una ciencia ("La simplificación de la ciencia y la ciencia de la simplificación" [Weinberg, en Klir, 1978]) y nos proporciona un ejemplo muy ilustrativo de su importancia en la ciencia. Simon también propone un ejemplo para demostrar la importancia de las jerarquías y la modularidad en el tratamiento de sistemas complejos. Con todos estos autores hemos desarrollado una imagen muy completa de lo que es la simplificación, pero falta algo más.

La simplificación por sí sola no sirve para tratar sistemas complejos. Efectivamente es un problema muy importante pero es sólo un lado de la ecuación. La formulación completa de esta ecuación es la que aparece reflejada en la siguiente figura:

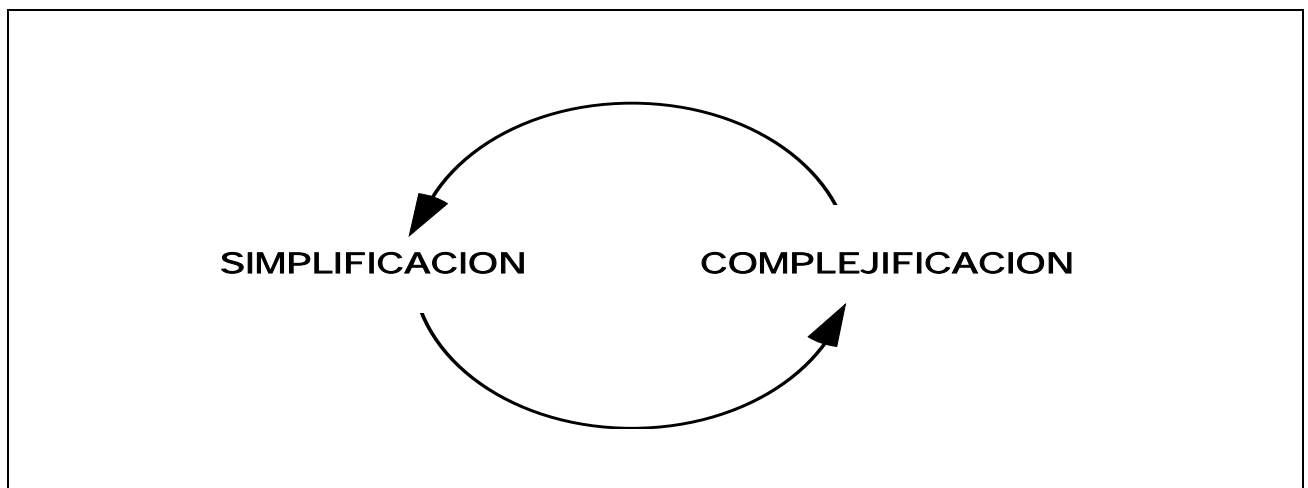


Fig 1. La simplificación y la complejificación, como procesos complementarios.

Este bucle define una jerarquía epistemológica, una espiral evolutiva del conocimiento [Morin, 1986, p. 63]. En un primer paso, al enfrentarnos con un sistema o con un objeto genérico hay que seleccionar algún método de simplificación que nos permita alcanzar el adecuado balance de variedades (ver el capítulo dedicado a la variedad y la ley de la variedad requerida), esto es el proceso que Weinberg quiere mostrar con el ejemplo de Newton. Una vez que se ha alcanzado un

cierto grado de conocimiento sobre el sistema o el objeto, nuestra variedad se amplía y somos capaces de abarcar realidades más complejas pues disponemos de una teoría explicativa y de un lenguaje que nos permite nombrar lo que vemos (sobre la importancia del lenguaje volveremos más adelante). Entonces se produce el proceso complementario, complejificamos, esto es, desarrollamos a partir de ese modelo simplificado una serie de conocimientos que nos permiten aumentar el alcance y la profundidad de lo que sabemos.

Es un cambio permanente de perspectiva: primero, observamos la totalidad y la simplificamos para poder explicarla; cuando aprehendemos esa realidad se abren multitud de nuevas perspectivas – complejificación-, que de nuevo volvemos a simplificar en un nivel superior de conocimiento para poder profundizar en su estudio. La simplificación ilustrada por Weinberg conduce a la ley de gravitación universal y a una estructura determinada del sistema solar, una vez que ésta se conoce se puede aumentar el número de factores que consideramos y llegar a un nuevo modelo de sistema solar.

Este bucle se puede interpretar a la luz de los dos principios generales de la complejidad de Klir. La simplificación es una reducción de la complejidad descriptiva, la complejificación una disminución de la incertidumbre asociada con el sistema. Ambas son complementarias y constituyen las piezas fundamentales del ciclo cognitivo que ilustra la figura 1.

Para tratar este punto con más detalle, vamos a tomar como ejemplo la jerarquía que proponen Bell y Newell para un ordenador en la que se ilustra perfectamente cómo se debe de jugar tanto con la simplificación como con la complejificación para describir un sistema completo. Además, utilizar este ejemplo nos puede servir también como un primer nexo de unión con la parte de este trabajo dedicada a las tecnologías de la información y como ejemplo de aplicación de todas las ideas desarrolladas hasta ahora.

6. Niveles y Abstracciones

Ya hemos visto cómo se puede reducir la complejidad de un sistema si se organiza en varias partes o, lo que es lo mismo, en varios niveles. Esto nos permite entenderlo mucho mejor al separar diferentes propiedades y características en diferentes estratos que se pueden estudiar por separado.

Esto es lo que hicieron Bell y Newell con los ordenadores. Descomponiendo éstos en varios niveles se facilita el estudio de sus diversas funcionalidades y el análisis de sus características. Para ello se manejan dos conceptos fundamentales: abstracción y refinamiento. El paso de un nivel inferior de la jerarquía a otro superior se hace por abstracción, es decir, suprimiendo detalles innecesarios y quedándose sólo con la información relevante en cada nivel. El paso de un nivel superior a otro inferior se hace por refinamiento, es decir, ampliando los detalles de ese nivel.

Dicho de otra manera, cada nivel del sistema se caracteriza por una serie de componentes y una serie de formas de relacionarlos para formar estructuras. El comportamiento de un nivel se define en términos del comportamiento de sus componentes y de las combinaciones específicas. Para pasar a un nivel superior se abstraen los detalles de los componentes y nos quedamos sólo con lo relevante

a ese nivel. Para descender a un nivel inferior se amplían los detalles de esos componentes, se refina la estructura con un grado de discriminación cada vez mayor.

Y ésta es una característica recursiva: un sistema, formado por una serie de componentes organizados de una determinada manera, puede verse como un componente de un sistema superior. En todos los niveles se pueden distinguir sistemas que no se pueden explicar a partir de estructuras de sistemas del mismo tipo, estos sistemas se denominan primitivas. Una resistencia, por ejemplo, es una primitiva en un circuito, pero no siempre hay primitivas puras (los operadores lógicos AND, OR, NOT, NAND, NOR, etc. pueden todos representarse unos en función de otros, luego no se podría hablar de primitivas estrictamente).

El ordenador, como jerarquía de niveles

Siewiorek, Bell y Newell proponen una interpretación jerárquica del ordenador en la que los niveles inferiores son "los ladrillos" con los que se construye el nivel inmediatamente superior. En cada nivel se pueden distinguir componentes, que se pueden ver como primitivas en ese nivel, y estructuras construidas a partir de varios componentes.

El nivel más bajo sería el nivel de circuitos, los componentes en este nivel son resistencias, condensadores, bobinas, transistores, etc. Las estructuras que con ellos se construyen son los amplificadores, retardos, relojes, puertas lógicas, etc.

El siguiente nivel sería el nivel de diseño lógico, a su vez dividido en los subniveles de transferencia de registros y de conmutación de circuitos. En este último los componentes son las puertas, flip-flops, "latches", retardos, etc. Las estructuras son contadores, registros, codificadores y, decodificadores. En el subnivel de transferencia de registros los componentes son los registros, contadores y demás, mientras que las estructuras ya son unidades aritméticas, secuenciadores. Como estructuras superiores de este nivel estarían los microprogramas y las microrrutinas.

Estos dos niveles son suficientes para ilustrar cómo cada nivel tiene unos componentes básicos y unas estructuras que se construyen a partir de ellos y también cómo cada nivel tiene su lenguaje propio que sólo se entiende en ese nivel. Para los circuitos una parte de ese lenguaje es la ley de Ohm, que no tiene ningún sentido en el nivel de diseño lógico, donde el lenguaje es el álgebra de Boole, por ejemplo. La existencia de estos lenguajes diferenciados es una prueba de la existencia de estos niveles.

Esta jerarquía considera también el nivel de programa, dividido en varios subniveles, donde se utilizan los diferentes lenguajes de programación que existen, lenguaje ensamblador para el subnivel más bajo, primitivas del sistema operativo, lenguajes de programación de aplicaciones, módulos de aplicaciones (librerías de funciones matemáticas, por ejemplo) y aplicaciones completas (como puede ser un sistema de reserva de billetes). Por encima de este nivel está el de Procesadores-Memoria-Conmutadores, en el que se manejan redes de ordenadores, sistemas multicomputador, etc.

Cada sistema se constituye así en un nivel de la jerarquía en que se descompone el sistema total y se caracteriza por un lenguaje distintivo que permite representar los componentes de ese nivel (componentes, leyes de comportamiento y relaciones) y además representa propiedades especiales de esos componentes pues de no ser así no tendría sentido utilizar un lenguaje específico. El hecho de que estos lenguajes son muy distintos aumenta la confianza sobre la existencia de diferentes niveles. Esto se puede relacionar directamente con la jerarquía de niveles que propone Klir, en la que cada nivel epistemológico tiene un lenguaje concreto y distintivo asociado. Este proceso se puede ver en la figura 3 La jerarquía que proponen Bell y Newell se resume en la figura 2. [Siewiorek, Bell y Newell, 1982, p. 10].

				Structures: Networks, multiple processor systems, computers Components: Processors, memories, switches, controllers, transducers, data operators, links
PMS level				
Program level	High level language sublevel	Application systems		Structures: Statistical Package for the Social Sciences (SPSS), partial differential equation solver, power system simulator, airline reservation system Components: Mathematical library routines, formatting routines
		Application routines		Structures: Mathematical functions, plotting packages Components: Subroutines, memory allocation
		Run - time system		Structures: Memory allocation, input/output, file system Components: Operating system calls
		Operating system		Structures: Schedulers, allocators, communication Components: Subroutines, coroutines, programs
	ISP sublevel			Structures: Instruction sets Components: Memory state, processor state, effective address calculation, instruction decode, instruction execution
Logic design level	Register transfer sublevel	Control	Microprogramming Hardwired	Structures: Microprograms, microroutines Components: Microsequencer, Microstore Structures: Sequencer Components: Sequential machines
			Data paths	Structures: Arithmetic units, register files Components: Registers, data operators
	Switching circuit sublevel	Sequential Combinational	Structures: Counters, functional generators, registers Components: Flip-flops, latches, delays Structures: Encoders, decoders, data operators Components: Gates	
Circuit level				Structures: Amplifiers, delays, clocks, gates Components: Transistors, relays, resistors, capacitors

Fig.2 Jerarquía descriptiva de los ordenadores (Bell y Newel, 1982)

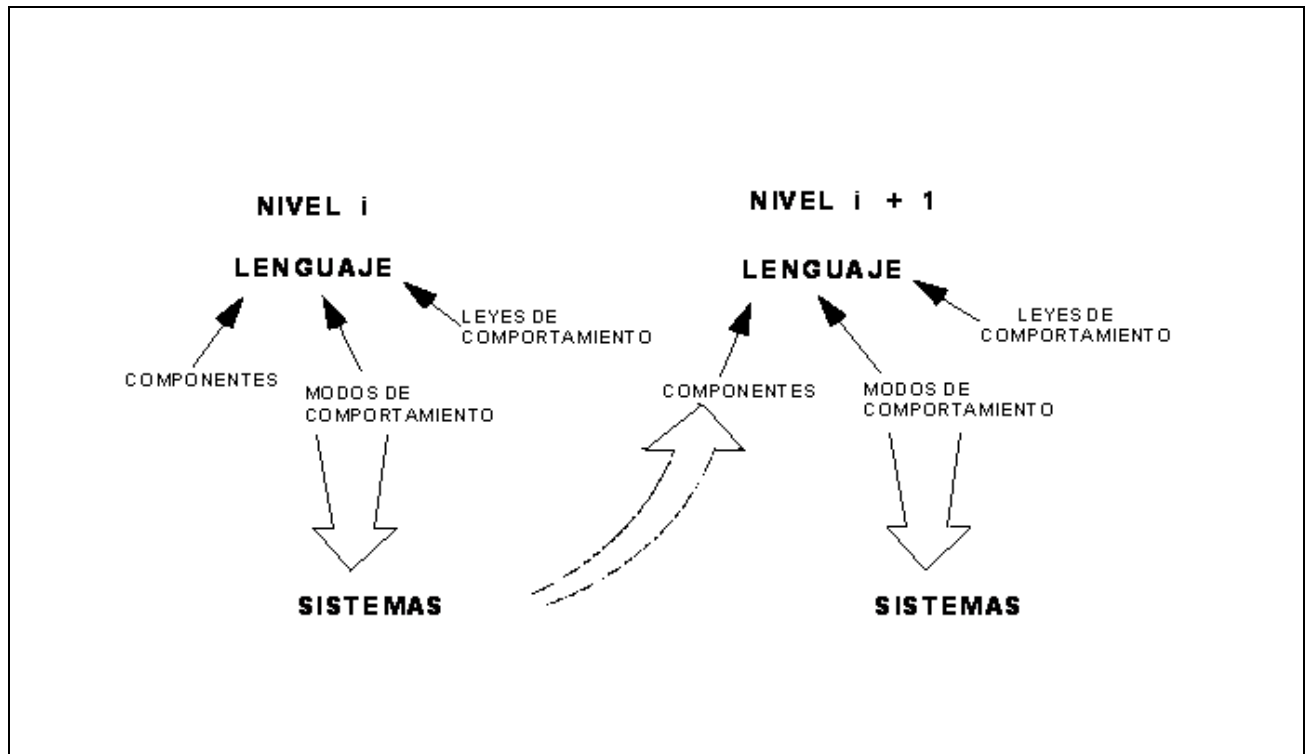


Fig. 3. Jerarquía de niveles, cada uno con su lenguaje correspondiente.

7. Resumen

La simplificación es un concepto indisoluble de la complejidad. Como hemos señalado repetidas veces a lo largo del capítulo, la simplificación es una necesidad que viene impuesta por la complejidad de las cosas. Varios ejemplos nos han servido para ilustrar cómo se aplican diferentes formas de simplificación a diversos sistemas para conseguir reducirlos a una complejidad manejable. Pero más que el proceso en sí, nos interesa destacar la relación que existe entre simplificación y muchos conceptos relacionados con la complejidad que hemos tratado en capítulos anteriores.

Los principios generales de complejidad de Klir nos proporcionan la primera pista al incluir la incertidumbre en la complejidad de los sistemas. El bucle simplificación/complejificación nos permite relacionar la disminución de la complejidad descriptiva con la simplificación y, por tanto, con el aumento de incertidumbre. De ahí podemos saltar al Azar, pues la pregunta de si existe un Azar en sí mismo o es producto de nuestra ignorancia está directamente relacionada con el binomio descripción/incertidumbre. Si admitimos que no podemos describir las cosas en su totalidad (como postula el principio de Heisenberg) siempre existirá una incertidumbre asociada, incertidumbre que se traduce en Azar (ver el capítulo dedicado a los conceptos asociados a la complejidad). ¿Hasta dónde se puede llegar siguiendo el bucle epistemológico de complejificación/simplificación?; ésta es una pregunta que queda abierta y que invitamos al lector a responder desde la perspectiva global de este trabajo.

Por otro lado, la simplificación puede intentar formalizarse a través de la Ley de Variedad Requerida formulada por Ashby y que recogemos en el capítulo dedicado a la Variedad. La simplificación está encaminada a equilibrar las variedades, actuando como amplificador y reductor de variedad a un tiempo, y ha de cumplir las leyes cibernéticas sintetizadas en esta ley. También invitamos al lector a reflexionar sobre esta formulación.

Bibliografía

Dividida en dos apartados. En el apartado Notas Bibliográficas se comentarán aquellos trabajos que más profusamente han servido para redactar las páginas anteriores. El apartado de Referencias Bibliográficas contiene todos los trabajos citados.

Notas bibliográficas

El problema de la simplificación ha sido tratado por muchos autores y la bibliografía disponible es muy abundante, aunque un tanto dispersa al encontrarse las referencias a este tema dentro de obras con unos objetivos más amplios. Los títulos que aquí hemos utilizado como referencia son los siguientes:

Gerald M. Weinberg, "Una aproximación por computadores a la Teoría General de Sistemas", artículo que se encuentra en el libro editado por George J. Klir "**Tendencias de la Teoría General de Sistemas**", de la colección Alianza Universidad Ciencias, num. 208, Madrid 1978. Este artículo puede resultar muy interesante a los aficionados a la informática pues presenta muchas de las ideas sobre complejidad y sistemas a través de ejemplos donde el ordenador juega un papel primordial. El libro, editado por Klir, es una obra importante, que ya hemos utilizado varias veces en otros capítulos, y que recoge diversos artículos sobre sistémica de varios reconocidos expertos del tema (Ashby, Bertalanffy, Weinberg, el propio Klir, etc.) y que puede proporcionar una panorámica muy amplia de lo que es el enfoque sistémico, además tiene la ventaja de estar en español.

George J. Klir, "Complexity, Some General Observations", **Systems Research**, No. 2, pp. 131-140, 1985. Artículo básico en el estudio de la complejidad y que recoge gran parte de las ideas de su autor. Este artículo también nos ha servido de referencia en el capítulo de Marcos Conceptuales y la mayoría de las ideas que en él se presentan aparecen también en el libro de Klir que se comenta en el capítulo de Conceptos Asociados a la Complejidad.

Herbert A. Simon, "The Architecture of Complexity", ensayo recogido en el libro **The Sciences of the Artificial**, MIT Press, 1969. Éste es un pequeño libro con una serie de conferencias de Simon que tocan puntos muy diversos y muy interesantes. El artículo que tomamos como referencia es muy conocido y frecuentemente citado, tanto por los partidarios del enfoque sistémico como por sus detractores, dado que es una aproximación imparcial a los sistemas con críticas y propuestas de desarrollo muy acertadas. El resto del libro es también muy interesante y recomendable.

Siewiorek, Bell y Newell, **Computer Structures: Principles and Examples**, McGraw Hill, Nueva York, 1982. Es una auténtica biblia y enciclopedia de la estructura y arquitectura de los

computadores desde su primera aparición, sin Siewiorek, en 1971. Utiliza en sus primeros capítulos un método descriptivo jerárquico y define los lenguajes ips y pms.

Referencias bibliográficas

Klir G.J. (1985) "Complexity, Some General Observations", **Systems Research**, No. 2, pp. 131-140 .

Siewiorek, Bell y Newell (1982), **Computer Structures: Principles and Examples**, McGraw Hill, Nueva York,.

Simon H.A., (1969) "The Architecture of Complexity", ensayo recogido en el libro **The Sciences of the Artificial**, MIT Press.

Weinberg G.M. (1978), "Una aproximación por computadores a la Teoría General de Sistemas", en George J. Klir, **Tendencias de la Teoría General de Sistemas**, de la colección Alianza Universidad Ciencias, num. 208, Madrid.