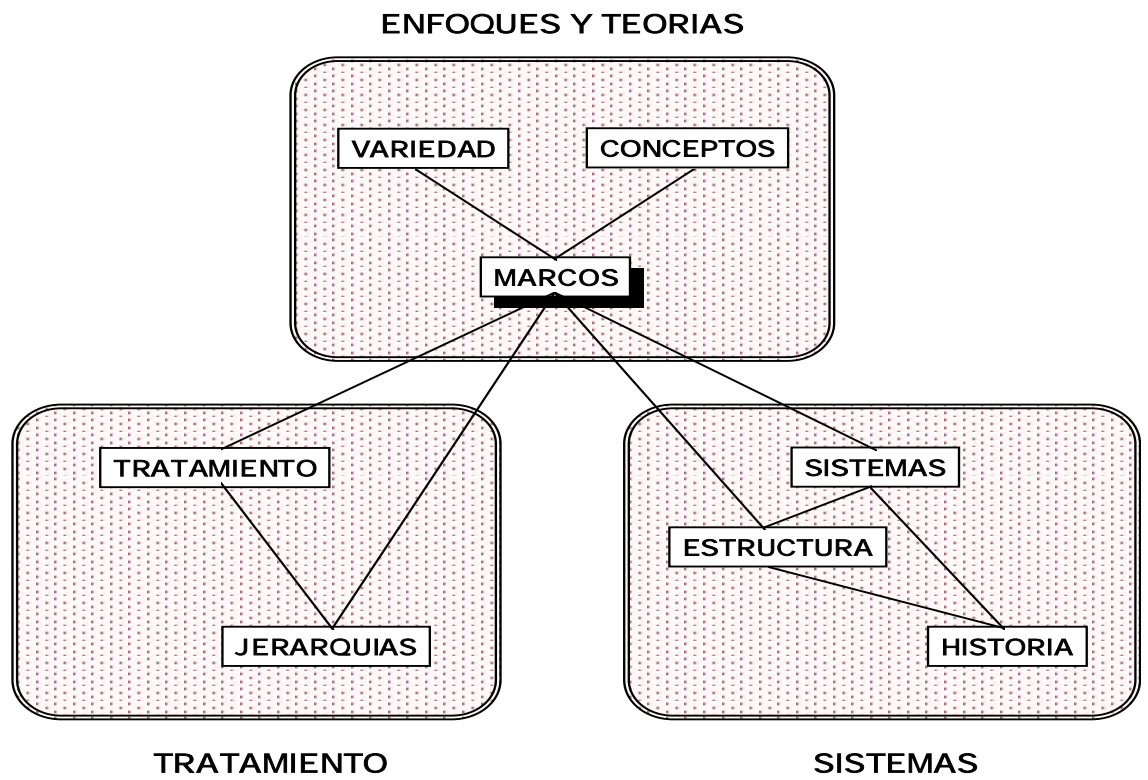
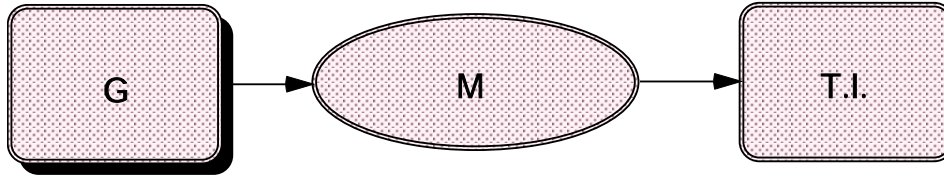


Marcos conceptuales.

| |
|--|
| Introducción |
| Warren Weaver. Una clasificación de la complejidad |
| George J. Klir. Complejidad y Jerarquías de sistemas |
| Complejidad en los objetos |
| Jerarquía epistemológica de sistemas |
| Principios generales de la complejidad de sistemas |
| R. Flood. Una nueva dimensión de la complejidad |
| Complejidad y observador |
| Complejidad en los objetos |
| Interacciones significativas |
| Multiplicidad |
| No linealidad |
| Asimetría |
| No holonomicidad |
| F. Saéz Vacas. Modelo de tres niveles de complejidad |
| Complejidad. Definición por extensión |
| Complejidad en sistemas artificiales |
| Modelo de tres niveles |
| Resumen |
| Bibliografía |

¿Qué es exactamente lo que se entiende por complejidad?. ¿Cómo podemos formalizar la idea intuitiva que tenemos de este término?. Como veremos, diversos autores han realizado un esfuerzo por crear un marco donde definir la complejidad. En este capítulo realizaremos una aproximación a unos cuantos de estos esfuerzos.

Se estudiarán, entre otros asuntos, algunas clasificaciones de la complejidad (los tres rangos de Weaver, la T de Flood, el modelo de tres niveles de Sáez Vacas,...), los atributos que la caracterizan (importancia del observador, consideración del objeto como sistema,...), y una clasificación de sistemas (Klir) que da lugar a diferentes formas de entender la complejidad.



1. Introducción.

"...[el término] **complejidad** tiene varios significados posibles..." [Klir, 1985].

"En general, parece que asociamos **complejidad** con algo que nos parece difícil de entender" [Flood, 1987].

"La **complejidad** de un objeto está en los ojos del observador" [Klir, 1985].

"La **complejidad** es un concepto con el que nos enfrentamos en todas las actividades humanas" [Sáez Vacas, 1990].

"...un concepto que la ciencia moderna intenta aprehender sin haber conseguido todavía definir satisfactoriamente. Es la **complejidad**" [Wagensberg, 1985].

"...no hay todavía una prueba convincente de que las tareas realizadas por los modernos ordenadores [...] no podrían ser realizadas igual de bien [...] con la mitad de componentes. Esta posibilidad ha dado lugar a una nueva disciplina matemática llamada teoría de la **complejidad**" [Pippenger, 1978].

Observemos un momento estas citas, tomadas de diversos autores que se han ocupado de trabajar sobre la complejidad. Unas hablan de la importancia de la complejidad. Otras realizan alguna observación sobre su significado. Pero después de analizarlas con un poco de detalle, nos surgirá la duda de qué es exactamente lo que se entiende por complejidad en cada uno de los casos. A medida que vayamos profundizando en el tema, podremos observar que hay varias formas de entender este concepto. En este capítulo realizaremos una aproximación a unos cuantos esfuerzos destinados a obtener un marco global donde encajar y definir el término "complejidad", y otros con él relacionados.

Comenzaremos por un enfoque, debido a Weaver, donde los sistemas se clasifican según ciertas características estructurales. A partir de esta clasificación, obtendremos una primera idea de las características que tiene lo complejo.

Según Klir, la complejidad está íntimamente ligada a los sistemas, y por tanto para poder estudiarla adecuadamente, es necesario primero realizar una clasificación y definición adecuada de éstos. Así, estudiaremos la complejidad de los objetos a través de su clasificación jerárquica como sistemas.

Para Flood la complejidad está ligada tanto al objeto observado como al observador (idea, por otra parte, ya adelantada por Klir). A partir de esta premisa, estudia las características de cada uno de estos dos elementos, y cómo influyen en la aparición de complejidad. Así llegamos a un "desensamblado por niveles" de la complejidad. Además, realiza una clasificación de las ciencias que en cierta forma extiende la división de los sistemas de Weaver, al considerar el elemento humano.

Sáez Vacas, además de aportar una definición extensiva, propone una diferenciación de la complejidad en tres niveles. Este modelo en niveles es aplicable de forma muy directa, entre otros, al campo de las tecnologías de la información.

2. Warren Weaver. Una clasificación de la complejidad.

Una de las clasificaciones más clásicas de la complejidad es la propuesta por Warren Weaver [Weaver, 1948], basada en el tipo de tratamiento matemático que requieren los sistemas para su estudio y tomando como punto de partida dos de sus características estructurales:

- a. Por una parte, el número de elementos (o variables) que componen el sistema. Estableciendo un rango que va desde los que están formados por muy pocos elementos (como pueden ser los modelos del sistema solar, los problemas de cinética clásica, etc.) hasta los que tienen multitud de ellos (como los gases constituidos por moléculas, los ordenadores basados en millones de transistores, o el modelo de ser vivo visto como un conjunto de células).

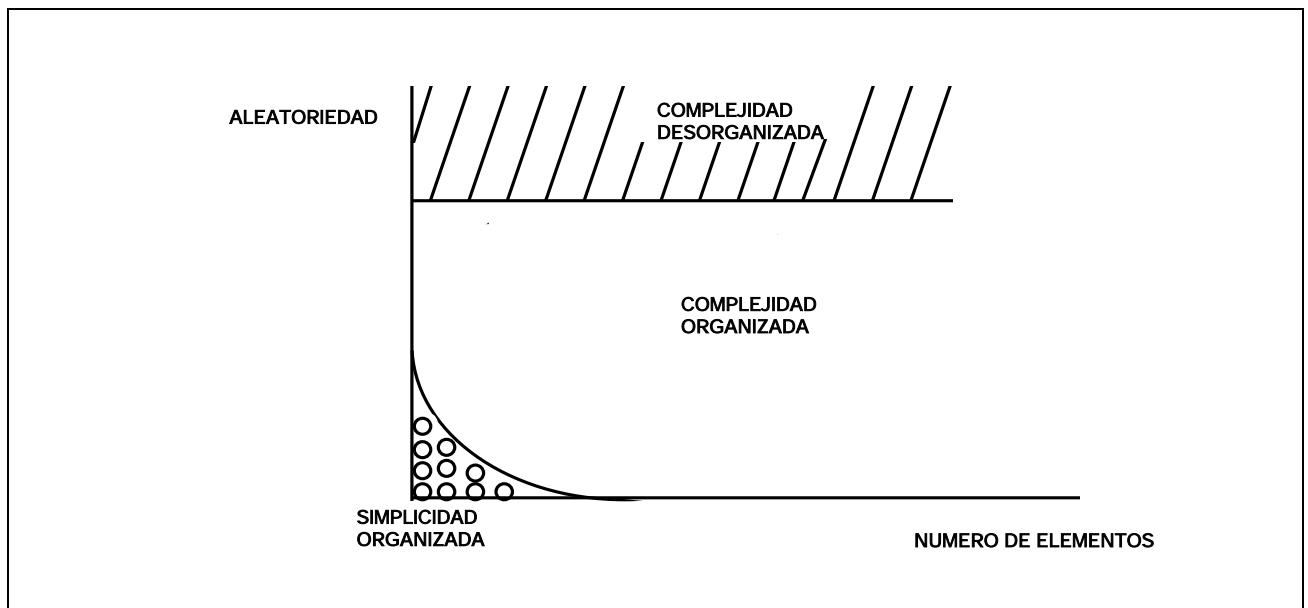


Fig.1 Los tres rangos de complejidad propuestos por Weaver.

- b. Por otra, el grado de aleatoriedad observado en el comportamiento de los elementos del sistema. Aquí nos moveremos desde el determinismo puro y duro de los sistemas físicos newtonianos hasta la imprevisibilidad total (a nivel microscópico) de los modelos de la mecánica estadística aplicada (por ejemplo) a los gases.

Los tres rangos de complejidad propuestos por Weaver son los siguientes:

- a. **Simplicidad organizada.** Weaver incluye aquí los sistemas que están compuestos por un número pequeño de variables, dependientes unas de otras de una forma fuertemente determinista. Este es el tipo de sistemas estudiados normalmente por la ciencia hasta finales del siglo XIX. La forma en que avanzaba el conocimiento científico en esa época tenía que ver sobre todo con el descubrimiento de un modelo simple que era utilizable para explicar fenómenos a primera vista mucho más complejos. Esta simplificación normalmente se conseguía despreciando muchas variables, suponiendo que su contribución al efecto observado era mínima. Así se conseguía también diseñar experimentos minimizando la influencia de esas variables despreciadas, para corroborar las teorías. Este tipo de sistemas son

perfectamente adecuados para su tratamiento con métodos del análisis matemático (ecuaciones diferenciales, etc.).

b. **Complejidad desorganizada.** Este rango se da en sistemas donde las variables se relacionan de una forma muy aleatoria. Comenzaron a estudiarse a finales del siglo XIX, con los trabajos sobre las moléculas de un gas en un espacio cerrado. El número de variables implicadas es sencillamente inimaginable: del orden de 10^{23} moléculas. Además, se mueven muy rápidamente, y el gran número de colisiones que sufren hace que su comportamiento individual sea en la práctica impredecible. Muy pronto se comprendió que estos sistemas no eran abordables con los métodos desarrollados hasta entonces (usados con éxito en los problemas de simplicidad organizada). La solución vino de la mano de los métodos estadísticos, debidos entre otros a los trabajos de Gibbs. Se pasa de considerar las características de cada partícula a estimar unos valores medios para ciertas variables de sistema. Este enfoque se mostró tanto más apropiado cuanto mayor era la aleatoriedad de los elementos del sistema considerado.

c. **Complejidad organizada.** Así pues tenemos métodos para tratar con los dos extremos del diagrama de Weaver. Pero ¿que pasa con la amplia zona intermedia?. Aquí tenemos un gran número de sistemas cuyo estudio a menudo interesa a varias disciplinas, como son los que tratan las ciencias de la vida, de la sociedad, del medio ambiente... Todos ellos comprenden un gran número de aspectos que no pueden ser despreciados (al menos sin desvirtuar fuertemente la validez del modelo), con lo que se salen del alcance del análisis matemático usado en los problemas de simplicidad organizada. Pero tampoco tienen el grado de aleatoriedad suficiente como para que los métodos estadísticos sean de aplicación. Así pues, se hace necesario descubrir y aplicar nuevas formas de simplificación para tratar con estos problemas. Este es el tipo de complejidad al que nos referiremos a partir de ahora.

Consideremos un programa de ordenador medianamente grande. Supongamos que está en un lenguaje X, y que está compuesto por N instrucciones distintas. Cualquiera que haya programado alguna vez sabe que si ese N aumenta, la dificultad para entender el programa aumenta también, pero mucho más rápido. Si el lenguaje no está diseñado para evitarlos, aparecen los efectos colaterales: si cambiamos un pequeño grupo de instrucciones en una parte del código, no sabemos con exactitud qué efecto tendrá este cambio sobre otras partes del programa. Los lenguajes de programación intentan evitar esto mediante la definición de procedimientos, funciones, módulos, etc. Desde los lenguajes cercanos a la máquina (ensambladores) hasta los más modulares (ADA, MODULA-2) hay un largo camino intentando jerarquizar al máximo posible los programas. Puede entenderse este esfuerzo como una tentativa de sacar los programas del terreno de la complejidad organizada, en el que se encuentran "naturalmente" por tener un alto número de componentes (instrucciones) relacionadas determinísticamente (en el ordenador cabe muy poca aleatoriedad), llevándolos hacia la simplicidad organizada (pocos módulos "cerrados", relacionados de forma sencilla).

3. George J. Klir. Complejidad y Jerarquías de sistemas.

Es importante señalar que Klir es un destacado "sistemista" y son muy conocidos sus trabajos en el campo de la formalización matemática de los mismos. Aquí no vamos a entrar en este apartado sino que nos vamos a centrar en la complejidad teniendo en cuenta siempre el sesgo que tienen las propuestas de Klir. Como se recoge en los apartados en que se va a subdividir este breve estudio, la complejidad de la que habla Klir es la complejidad de los sistemas que casi utiliza como una excusa para introducir el tema más importante de las jerarquías epistemológicas.

3.1. Complejidad en los objetos.

El término "complejidad" es difícil de manejar porque tiene muchos significados posibles. Reconociendo esta realidad, Klir se plantea estudiar los aspectos invariantes de la complejidad cuando recorremos las muchas caras que presenta. Como primer paso propone una definición de complejidad extraída directamente del diccionario:

"Complejidad: la cualidad o estado de algo complejo, i.e.,

- con muchas partes o elementos o estructuras interrelacionadas y, en consecuencia, difícil de entender, o
- caracterizado por muchas partes, aspectos, detalles o nociones y exigiendo un profundo estudio o examen para ser entendido o tratado."

Esta definición es en principio aplicable a todas las cosas, materiales o abstractas. Y las dos primeras consecuencias que podemos extraer de ella son las siguientes: primero que el grado de complejidad parece asociarse con el número de partes y de interrelaciones reconocibles y segundo que la complejidad tiene una connotación subjetiva dado que se hace depender de la habilidad del observador para entender o manejar el objeto en consideración.

La complejidad depende de la interacción entre una persona y el objeto y por tanto de los intereses y la forma de interactuar con el objeto que escoja la persona. La complejidad está en los ojos del observador. Dado que las formas de interactuar con un objeto son virtualmente infinitas, hay por tanto infinitas formas en las que puede manifestarse la complejidad. Esta está en función de la imagen que se forme del objeto a partir de una serie de atributos observables en él. Según Klir, estos atributos no son directamente accesibles al observador sino sólo a través de sus imágenes abstractas, resultado de la percepción y de un tipo de medida específico. A estos atributos Klir los llama variables, y cuando se dispone de un conjunto de variables referidas a un mismo objeto se dice que se ha establecido un sistema. Un sistema es una forma de ver el mundo.

Esto tiene una consecuencia muy importante, dado que no se está tratando con los objetos sino con imágenes de ellos (sistemas), y por tanto no es operativamente significativo ver la complejidad como una propiedad intrínseca de los objetos. La noción relevante es la de complejidad en los sistemas.

De aquí que Klir se plantee como una tarea primordial estudiar cómo se desarrollan las imágenes del mundo con las que trabajamos. Es decir cuáles son los procesos que conducen al desarrollo de un sistema y qué abstracciones los caracterizan. La respuesta de Klir es las jerarquías epistemológicas de sistemas pero también adelanta que no es una solución única pues depende del marco conceptual en el que estemos trabajando. Para diferentes sistemas dentro del mismo marco conceptual se deben aplicar diferentes significados de la complejidad.

3.2. Jerarquía epistemológica de sistemas.

Klir empezó a desarrollar este trabajo en la década de los 60, partiendo de la noción de sistema en diversas disciplinas. Esta jerarquía se utiliza hoy en día en un sistema experto diseñado para tratar problemas de sistemas.

Dicho de una forma general, la formulación de un problema en una disciplina científica cualquiera es en realidad la adopción, por un investigador, de un punto de vista sobre ese problema [Orchard, 1972]. El científico definirá y aislará el problema, con lo que "creará" el objeto de estudio, que ya es una modelización de la realidad. Sobre este objeto realizará experimentos, recogerá datos, hará análisis teóricos... Intentará encontrar un modelo que permita explicar su comportamiento, estableciendo una correspondencia entre objeto y modelo. El paso de unos modelos a otros, cada vez más generales, nos hace ir definiendo sucesivos sistemas a partir del objeto estudiado, que no son sino estados o etapas para una vía de conocimiento del objeto. Cada uno de estos sistemas pertenecerá a lo que Klir denomina un "nivel epistemológico" diferente.

La diferencia entre un sistema de un nivel epistemológico y otro de un nivel superior es el nivel de conocimiento asociado a las variables que lo definen. Estas variables se establecen en el nivel inferior. Un sistema en un determinado nivel comprende el conocimiento de todos los sistemas de nivel inferior y, al mismo tiempo, posee un determinado conocimiento que no está en los niveles inferiores.

En el nivel epistemológicamente más bajo, denominado nivel 0, un sistema viene definido por un conjunto de variables, un conjunto de estados posibles (valores) conocido para cada variable y algún método operacional para describir el significado de las variables y sus estados en términos de los atributos asociados del mundo real y sus manifestaciones.

El conjunto de variables se divide en dos, el conjunto básico y el conjunto de apoyo. Ejemplos de variables de apoyo son las que representan el tiempo, el espacio o poblaciones de individuos de la misma categoría. Estos sistemas se denominan también Sistemas Fuente por su capacidad potencial de generar datos.

Cuando al sistema fuente se le añaden una serie de datos, esto es, una serie de estados concretos de las variables básicas dentro del conjunto de apoyo se pasa a considerar un sistema de nivel epistemológico 1. Este tipo de sistemas se denomina también sistema de datos. Por lo general, los conjuntos de datos que se asocian al sistema fuente para formar el Sistema de Datos se pueden representar de acuerdo con alguna función, por ejemplo, una función del tiempo.

Los niveles superiores se caracterizan por algún aspecto invariante de los límites impuestos a las variables básicas. Estos límites se pueden utilizar para generar estados concretos de las variables. Así, el nivel epistemológico 2 es el de los sistemas representados por alguna característica invariante (invariante con el tiempo, invariante en el espacio, invariante con la población ...) de los límites impuestos a las variables básicas del sistema fuente y, posiblemente, por algunas variables adicionales. Cada una de estas variables adicionales se obtiene a partir de una variable básica y una transformación en las variables de apoyo. Este tipo de sistemas se denominan también Sistemas Generativos ya que los límites impuestos pueden utilizarse para describir procesos en los que se generan estados de las variables básicas.

Ejemplo de este tipo de sistemas son las ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes, las cadenas de Markov o las máquinas de estados finitos. Cada uno de ellos caracteriza una limitación de las variables, un límite invariante. La solución, por ejemplo, de una ecuación diferencial con condiciones de contorno específicas representa un conjunto de datos.

El tercer nivel epistemológico está formado por todos aquellos sistemas definidos en función de un conjunto de sistemas generativos vistos como subsistemas de un sistema genérico más amplio. Estos subsistemas pueden estar acoplados (compartir variables) o interactuar de alguna manera. Este tipo de sistemas se denomina Sistema-Estructura

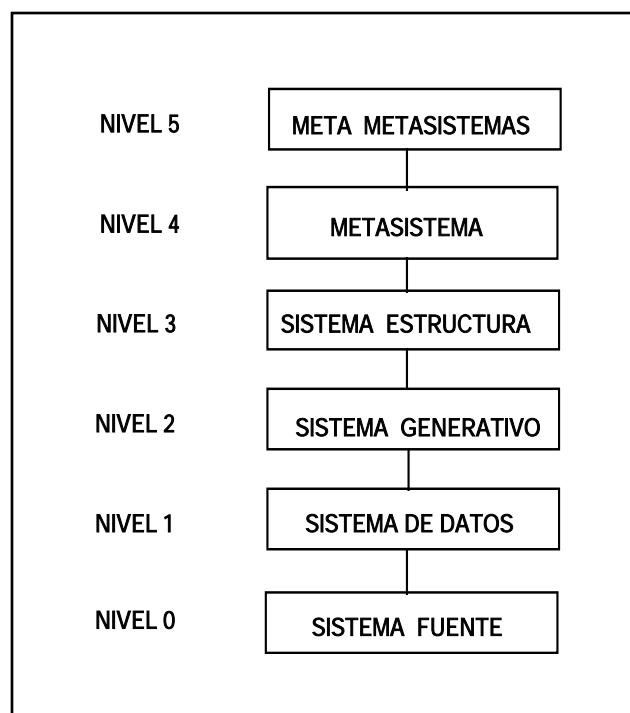


Fig. 2. Jerarquía de sistemas, según Klir.

y se representa típicamente por diagramas de bloques, siendo cada uno de los bloques un sistema generativo.

El cuarto nivel epistemológico, y siguientes, se caracterizan porque los subsistemas inferiores pueden cambiar de acuerdo con alguna de las variables del conjunto de apoyo del sistema fuente. Según el tipo de cambio permitido se tratará de un sistema de nivel 4, metasistema, de nivel 5, meta- metasistema, de nivel 6, meta-meta-metasistema, etc.

Ejemplo de metasistemas son máquinas de estados finitos en los que se permite una variación con el tiempo. La máquina de estado finito en sí es un sistema-estructura. Cuando se permite que ese sistema cambie de acuerdo con alguna norma establecida se pasa a considerar un metasistema, que se puede ver como una colección de sistemas cada uno correspondiente a un valor concreto de la variable que controla el cambio, por ejemplo el tiempo. Así, un metasistema se puede ver como un conjunto de sistemas estructura, uno para el momento 1, otro para el momento 2, etc.

Los metasisistemas, de cualquier orden, son importantes pues permiten estudiar fenómenos cambiantes como pueden ser la adaptación, autoorganización, morfogénesis, autopoiesis, evolución, etc.

Una forma más de representar esta jerarquía y todas las posibles combinaciones de sistemas que se pueden conseguir es la que se muestra en la figura 3. Los tipos individuales de sistemas se representan por F, D, G, y M (Fuente, Datos, Generativo y Metasistema), mientras que los representados por dos o más caracteres representan combinaciones de los tipos individuales. Por ejemplo, ED es un sistema estructura compuesto de sistemas de datos, MEG es un metasisistema compuesto de sistemas estructura que a su vez se descomponen en sistemas generativos, etc.

Para terminar con las jerarquías epistemológicas, vamos a ver un ejemplo de aplicación de estos conceptos a un sistema concreto: una resistencia.

Sistema Fuente: En el que debemos distinguir unas variables relevantes, unos estados y un procedimiento para relacionar las variables con el circuito real:

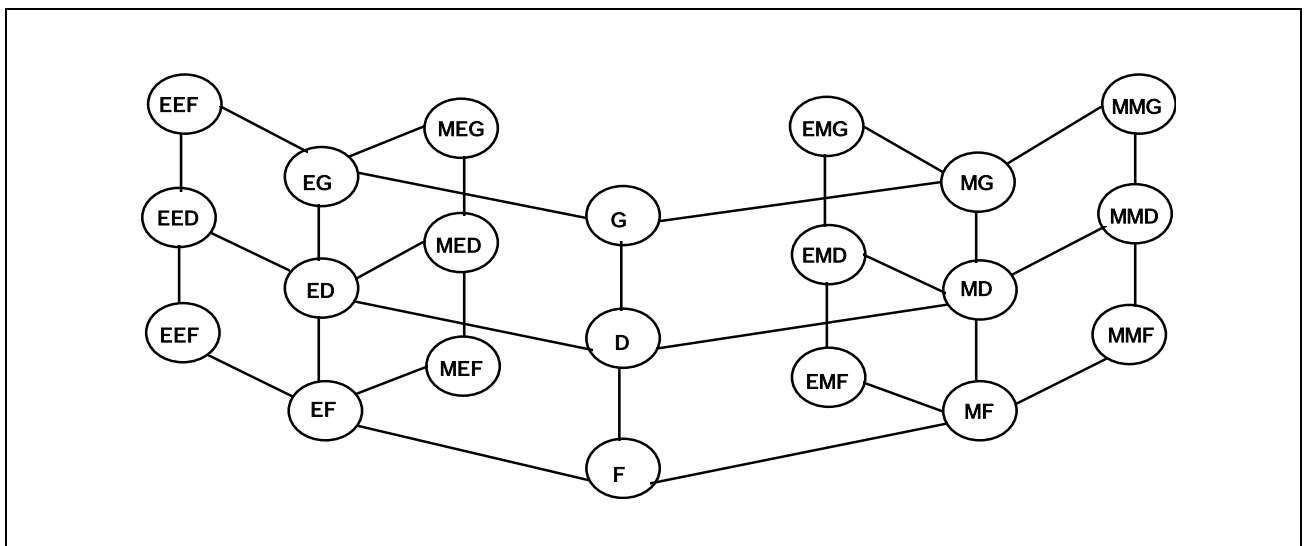


Fig.3. Algunos de los tipos básicos de sistemas epistemológicos (Klir, 1985).

VARIABLES: la tensión en bornas (V), la corriente que atraviesa el componente (I) y la resistencia eléctrica (R). Como variable de soporte tomamos el tiempo (t).

ESTADOS: La tensión y la corriente pueden ser cualquier número real, el resto sólo números reales positivos.

PROCEDIMIENTO: para ligar estas variables con el circuito real establecemos un procedimiento de medida con un polímetro para la tensión y la corriente, y los datos aportados por el fabricante para la resistencia.

Sistema de Datos: Consiste en establecer un conjunto de datos válidos para esas variables y esos estados. En nuestro caso, mediremos en diferentes momentos (diferentes valores de t) la tensión y la corriente (al aplicarle diferentes excitaciones en bornas). Estas medidas podrían representarse por medio de tablas (si las medidas se toman en instantes discretos) o de gráficas en función del tiempo (si se mide de forma continua). Los valores obtenidos constituyen el sistema de datos.

Sistema Generativo: Para el que elegimos una ecuación que representa el comportamiento genérico de una resistencia (ley de Ohm). Es un sistema generativo porque a partir de esta expresión podemos obtener los diferentes comportamientos (estados de las variables) del sistema para situaciones particulares (por ejemplo, otras excitaciones). El sistema de datos anterior puede obtenerse con gran aproximación resolviendo esta ecuación para valores concretos de tensiones, corrientes y resistencias.

Sistema-Estructura: Estará compuesto por varios sistemas generativos del tipo del hasta aquí analizado. Al interconectar de una determinada forma nuestra resistencia con condensadores, transistores, fuentes, etc., formando un circuito electrónico, obtendremos un sistema-estructura.

Metasistema: Son aquellos sistemas en los que la variación de una determinada variable determina diversos sistemas-estructura. En nuestro caso (circuito electrónico) hay un metasistema determinado por la variable tiempo. Para t pequeño, tenemos un estudio en régimen transitorio, mientras que para t grande, el circuito se considera en régimen permanente. Estos dos casos dan lugar a una definición diferente del sistema estructura. Así, los circuitos equivalentes y las simplificaciones que se pueden asumir en uno y otro régimen son diferentes, lo que hace que los sistemas estructura también lo sean.

3.3. Principios generales de la complejidad de sistemas.

Una vez vistos los diferentes tipos de sistemas que se pueden establecer, el siguiente paso es identificar la complejidad asociable a cada uno de ellos. Como los sistemas tienen muchas caras, la complejidad asociada a ellos tendrá también muchas caras. Pero dentro de esta diversidad se pueden establecer dos principios generales de la complejidad de los sistemas:

De acuerdo con el primer principio, la complejidad de un sistema de cualquier tipo debe ser proporcional a la cantidad de información necesaria para describirlo. Información en su sentido sintáctico, no semántico o práctico. Una forma de medir esta complejidad es considerar el número de entidades consideradas en el sistema (variables, estados, componentes) y las interdependencias entre ellos.

De acuerdo con el segundo principio, la complejidad de un sistema debe ser proporcional a la cantidad de información necesaria para resolver cualquier incertidumbre asociada con él. Información, de nuevo, en su sentido sintáctico. Las medidas de incertidumbre están muy desarrolladas (ver el capítulo correspondiente) y permiten establecer este tipo de complejidad de una forma muy clara.

4. R. Flood. Una nueva dimensión de la complejidad.

El punto de partida elegido por Flood es la siguiente proposición:

"En general, parece que asociamos la complejidad con cualquier cosa que encontramos difícil de entender".

De ella se deduce que la complejidad depende directamente de la relación que el observador establece con las cosas. Esto es lo que intenta representar la figura. Pero, para poder seguir avanzando, hay que definir primero qué es a lo que llamamos "cosas". Esto es lo que intenta representar la figura. Pero, para poder seguir avanzando, hay que definir primero qué es a lo que llamamos "cosas".

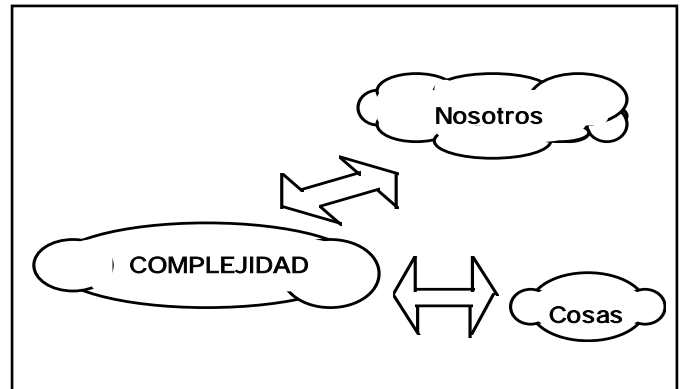


Fig. 4. La complejidad está relacionada tanto con "nosotros" como con las "cosas".

Cuando observamos un objeto cualquiera, lo modelamos de alguna manera, abstraemos una cierta imagen de él. La características concretas de esta imagen dependen de nuestros conocimientos, de nuestros intereses particulares, etc. No hay dos personas que contemplando el mismo objeto saquen la misma idea de él. Por estas razones, parece lógico que centremos nuestro estudio en las características de estos modelos realizados por un observador, y no en los objetos "reales". Como dice Klir, no tiene sentido hablar de la complejidad como una propiedad intrínseca de los objetos, sino asociada a modelos, producto de la labor de observación y abstracción de un observador, modelos que será lo que consideremos como sistemas (hay que destacar el paralelismo del razonamiento de Flood y el de Klir).

El segundo punto en el que hay que detenerse es la caracterización de esta dualidad personas-sistemas, desde el punto de vista de la complejidad. Según Flood, esta caracterización tiene dos caras, las personas y los sistemas (las cosas), y estudia los factores que intervienen en la complejidad de cada uno por separado.

4.1. Complejidad y observador.

Para el observador, la complejidad está determinada por tres factores:

a. **Intereses.** A la hora de definir el modelo, el observador estará muy influenciado por los motivos que le mueven en ese momento. El sistema percibido depende en gran manera de los objetivos que persigue el observador. Para ilustrar este punto, Flood cita también el clásico ejemplo de Ashby del neurofisiólogo y el carnicero. Para el primero, el cerebro es algo extremadamente complejo, con su entramado de neuronas, sus complicados procesos bioquímicos... Para él, la transmisión de una descripción detallada del cerebro requeriría mucha información. Pero para el carnicero es algo bastante simple: sólo tiene que distinguirlo entre otros treinta tipos de carne.

b. **Capacidades.** Las capacidades del observador son determinantes respecto a la complejidad del modelo que creará en su mente. Si no tiene ciertos conocimientos, le será muy difícil comprender algunos fenómenos, con lo que para él serán muy complejos. Sin embargo, si los

tiene, podrá comprenderlos con mayor facilidad. La complejidad que perciba variará entonces según cómo domine el campo con el que se enfrenta.

La complejidad y los objetivos del observador

¿Es compleja una silla?. En principio, como ya hemos visto, esta pregunta no tiene sentido si no le asociamos un observador. Comencemos por considerar que este observador es una persona que se quiere sentar. Para ésta, la silla no es más que un mueble con cuatro patas y un respaldo, que conoce desde niño, y que sólo ve como una ayuda para no tener que estar de pie. En resumen, algo muy sencillo.

Pero, sin cambiar de observador, cambiemos el escenario. Esta misma persona quiere construir una silla (por ejemplo, porque es un entusiasta del "hágaselo usted mismo"). Ahora el modelo que se hace de ella es totalmente diferente. Probablemente, se ayude de papel y lápiz, calculará medidas, elegirá el tipo de madera (u otro material) que considere adecuado, etc. La silla, de repente, adquiere una complejidad bastante mayor.

Y no digamos si nuestro sufrido observador es contratado por una empresa de producción de sillas en serie, para que estudie la mejor forma de incluir un nuevo producto en sus cadenas de montaje.

Pues bien, entre los tres escenarios sólo cambia un parámetro: al elaborar el modelo de la silla, el observador está irremediamente condicionado por sus intereses en cada circunstancia. Esto le llevará a concebir modelos de muy diferente grado de complejidad.

c. **Percepciones.** Ya hemos constatado en este mismo capítulo que la forma como ven un mismo objeto dos personas diferentes es diferente. Cada una de ellas hará modelos distintos de la misma sólo por tener una forma distinta de percibir la realidad.

4.2. La complejidad en los objetos.

Una vez estudiada la parte "humana", tratemos ahora con los "objetos". ¿Qué características tienen en común los modelos que llamamos complejos?. O, dicho de otra forma, ¿cuales son las causas que provocan que aparezca la complejidad en los objetos?. En una primera aproximación podemos suponer que la complejidad está relacionada con el número de partes y las interrelaciones que forman un sistema, noción que ya recoge Klir en su definición y Flood lleva más allá utilizando para ello un trabajo de Yates [Yates, 1978]:

La complejidad aparece cuando existen una o más de las siguientes características:

- a) Interacciones significativas.
- b) Gran número de partes, grados de libertad o de interacción (multiplicidad).
- c) No linealidad.
- d) Asimetría.
- e) No holonomicidad.

Las dos primeras son las propiedades clásicas, por así decirlo. Las otras tres son propiedades muy interesantes que analizaremos brevemente.

4.2.1. Interacciones significativas.

En la naturaleza existen multitud de ejemplos donde un determinado objeto está compuesto de muchos elementos y sin embargo no entra claramente en la categoría de la complejidad. Uno de ellos es el de los gases. Un volumen cualquiera de gas contiene moléculas en un número que es una potencia bastante elevada de 10 (10^{24} para un mol). En razón a este número, un gas sería muy complejo pero no lo es. La razón para ello es que en un gas no hay interacciones significativas. Otra forma de decirlo es que se puede aplicar el principio de superposición de interacciones. En la ciencia que estudiamos se habla de gases "perfectos", adjetivo muy curioso que resalta el hecho de que se está considerando la naturaleza en unas condiciones ideales.

Cuando el objeto en cuestión no es "perfecto" el grado de complejidad reconocible es mayor, incluso mucho mayor. Esto sucede, por ejemplo, al describir el metabolismo de un ser vivo donde cada órgano ejerce una función concreta pero hay tal cúmulo de interdependencias que la descripción del comportamiento global no es trivial en absoluto.

4.2.2. Multiplicidad.

Esta es quizá la característica más clásica de un objeto complejo. El simple hecho de que algo esté compuesto por un gran número de partes dificulta su comprensión y su manejo. El ejemplo de los gases tiene un cierto truco. En cierta forma constituye un contraejemplo pero no es así pues el comportamiento del gas como un todo responde a una serie de pautas que son distinguibles en un determinado nivel de resolución. La multiplicidad está directamente relacionada con la variedad. A la escala de una molécula no tiene sentido hablar de presión, volumen o temperatura y esto es así hasta tal punto que las leyes de los gases "perfectos" no mencionan para nada las moléculas. En el sentido del estudio del comportamiento de una mole de granito frente a cambios de temperatura o presión a la misma escala que un gas nadie considera relevante el papel de las moléculas, la única diferencia entre el granito y el gas es el estado.

Podemos retomar el problema del sistema solar para ilustrar la complejidad originada por la multiplicidad. ¿Que hubiera sucedido si en lugar de 10 cuerpos, en tiempos de Newton se hubieran conocido 400 masas planetarias relevantes?. Muy probablemente la mecánica celeste hubiera tardado mucho más en descubrirse. Otro ejemplo son los arabescos, un tipo de decoración con la que se consiguen patrones complicadísimos a base de repetir unas pocas estructuras básicas muy sencillas.

4.2.3. No linealidad.

Un sistema no lineal es aquel que no cumple la propiedad de superposición. En el campo de las matemáticas esto significa que si suma una cantidad a la entrada, la salida no se modifica en esa misma cantidad. Estos sistemas son bastante más difíciles de comprender que los lineales. Gran parte de las matemáticas que se emplean en la física, por ejemplo, están encaminadas a evitar todo aquello que "huela" a no lineal. Con todos los avances en matemáticas hechos hasta ahora todavía somos incapaces, salvo poquísimas excepciones, de resolver no linealidades.

Una rama de la ciencia muy popular actualmente es el estudio del caos. El caos, un comportamiento aparentemente aleatorio, procede de no linealidades. Un ejemplo muy ilustrativo de lo que realmente representa encontrarse con una no linealidad es la siguiente ecuación:

$$Y = r * X * (1-X)$$

Esta ecuación es muy utilizada en el estudio del crecimiento de todo tipo de poblaciones de seres vivos. X representa la población en un momento dado e Y la población en el momento siguiente, r es un parámetro que se calcula en función de las condiciones del entorno. El término 1-X compensa a X para que la ecuación tienda a estabilizarse (sin él, sería creciente). Pues bien, resulta que, para una población inicial dada, según el valor de r ese sistema se estabiliza u oscila con período 2, 4, 8, 16, 32 ... o aparece el caos. Ya no es que el resultado sea mayor o menor, es que cambia la propia esencia de ese resultado. Una característica típica de las no linealidades, diferentes condiciones de partida, conduce a resultados totalmente diferentes y generalmente contra-intuitivos.

4.2.4. Asimetría.

La asimetría significa diferencia. Cuando un proceso es asimétrico las propiedades aplicables al principio no son las mismas que las que hay al final del mismo. Un árbol binario simétrico (como el de la figura 5) es sencillo de construir, siguiendo un procedimiento recursivo:

- 1.- Partir de un nodo inicial.
- 2.- Sustituir cada nodo terminal por una bifurcación terminada en otros dos nodos.
- 3.- Volver al punto 2.

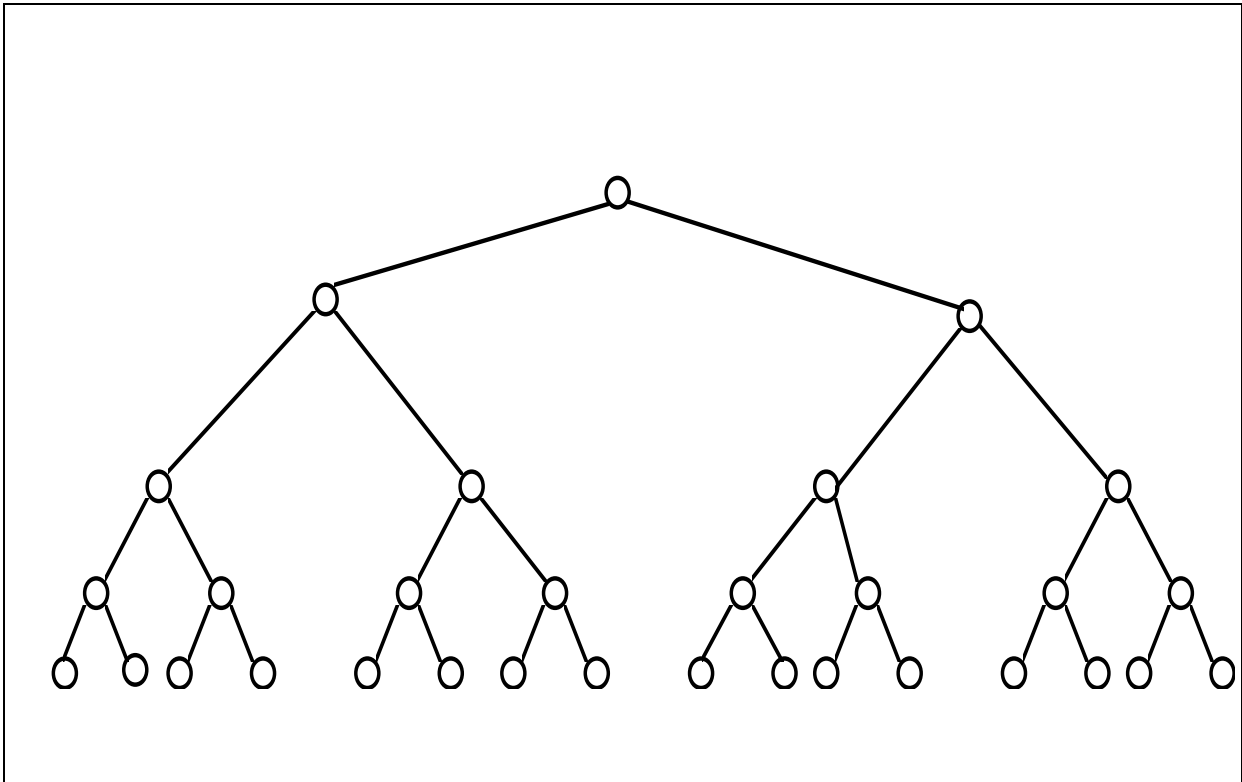


Fig.5. Arbol binario simétrico.

Si introducimos la más pequeña asimetría en ese árbol la descripción se complica mucho. Hay que especificar cada nivel y cada nodo en el que se produce una asimetría. La descripción es más compleja a medida que se introducen más asimetrías. Como ejercicio, trate el lector de establecer un algoritmo para construir el árbol de la figura 6. Y obsérvese cómo varía el algoritmo si introdujésemos aún más asimetrías. Lo mismo sucede en la teoría de grafos y redes. Para estructuras más o menos simétricas existe una teoría matemática completa y bien desarrollada. Cuando el grafo o la red se hace asimétrico, como sucede en la mayoría de los casos, las teorías son mucho más difíciles de formular y son incompletas.

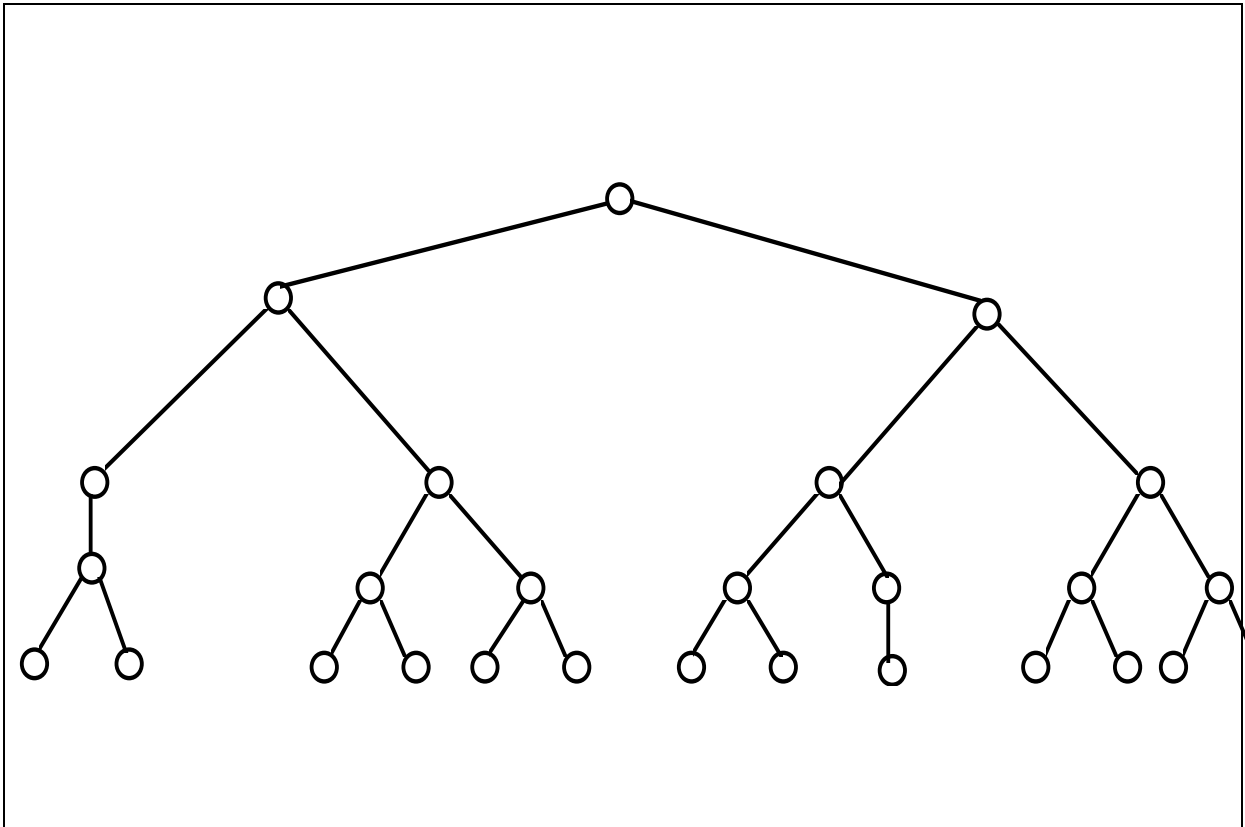


Fig. 6. Arbol con asimetrías.

4.2.5. No holonomicidad.

A pesar de la palabreja este concepto tiene un significado muy claro. Se refiere a las leyes (nomic) y al todo (holos). Cuando un conjunto se comporta de acuerdo con leyes de validez general hay una integridad, una cierta seguridad sobre qué va a pasar. Pero si, por el contrario, hay partes del todo que pueden quedar temporalmente "excluidas" de esas reglas y comportarse de acuerdo con patrones ajenos al conjunto aparecen estados transitorios de anarquía y, en consecuencia, una mayor complejidad. Este es un fenómeno común, por ejemplo, en electrónica digital: por circunstancias desconocidas aumenta la tensión en un punto y un bit cambia de estado repentinamente, esto puede ser un fallo leve o puede ser gravísimo según el bit afectado. A la hora de diseñar el sistema se atiende desde luego a esas reglas generales, al todo, pero también se prevén fallos de este tipo a través de redundancias y controles exhaustivos.

A partir de todo ello, Flood establece el marco conceptual que propone para definir la complejidad, este marco es el que se representa en la figura 7:

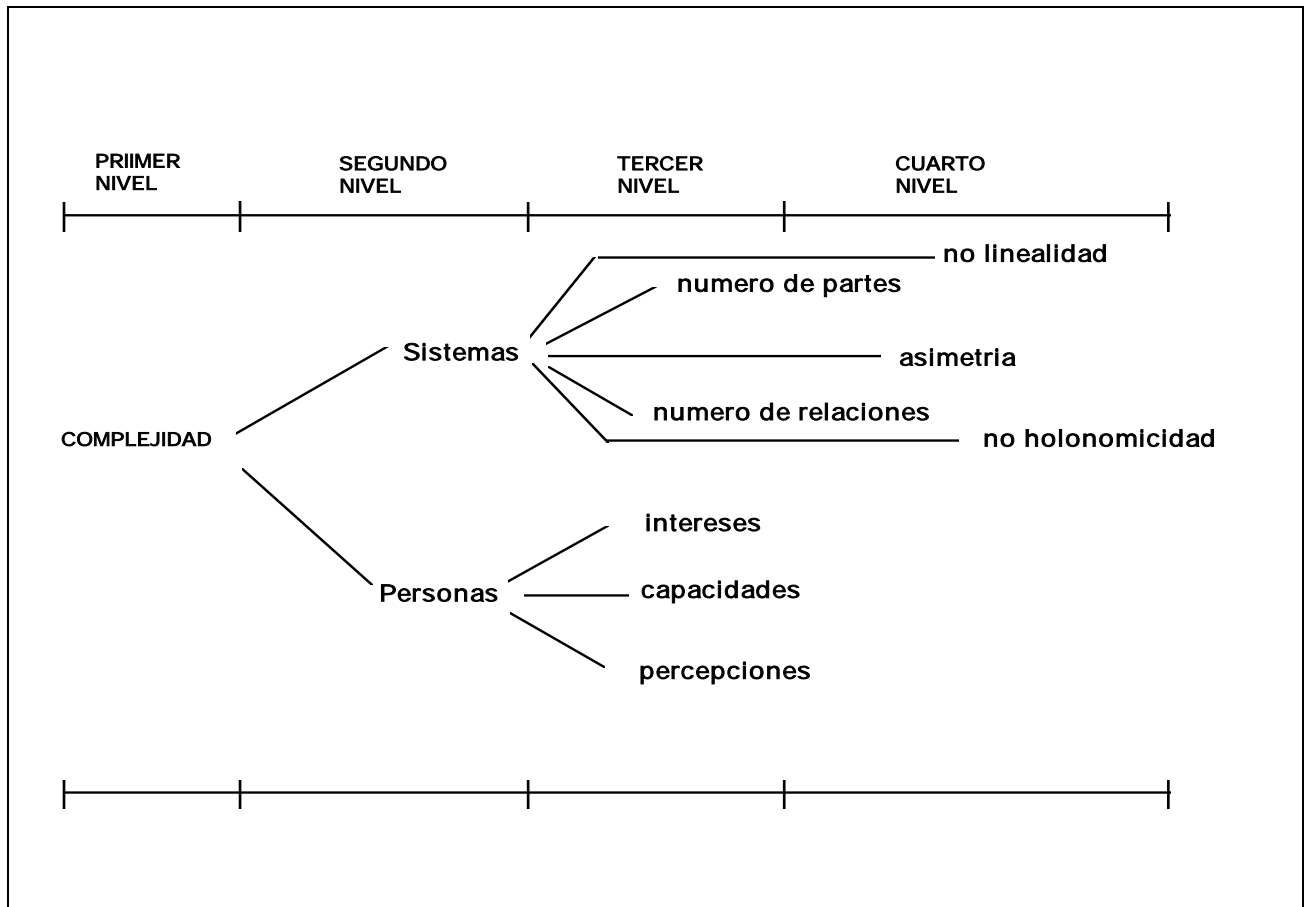


Fig. 7. Desensamblado de la complejidad, según Flood.

A modo de resumen, podemos decir que la complejidad es para Flood el resultado de la interacción entre las personas y las cosas y, por tanto, ha de ser descrita en función de esos dos elementos. Las personas influyen en la complejidad porque son los observadores que van a definir el sistema relevante sobre el que se va a percibir la complejidad y de ahí que los factores que introducen sean los intereses, las capacidades y las percepciones. En el lado de los sistemas, una vez establecidos por el observador, la complejidad va a estar influenciada en un primer término por lo que se ha venido considerando como factores clásicos de la complejidad: el número de partes y el número de relaciones. Estos dos factores forman un nivel estructural de la complejidad, en el sentido de que establecen una complejidad estática relativa a la organización del sistema. Pero no son los únicos factores a considerar ya que también hay una complejidad asociada al comportamiento y determinada por la asimetría, la no holonomicidad y la no linealidad.

El conjunto es una imagen muy completa de lo que es la complejidad y de los factores asociados a ella, que sirve, como veremos a continuación, de punto de partida para establecer lo que Flood llama una nueva dimensión de la complejidad.

4.3. Una nueva dimensión de la complejidad.

Checkland [Checkland, 1981] propone una clasificación de las ciencias desde la óptica de la complejidad, basada en la clásica distinción de Comte:

FISICA-QUIMICA-BIOLOGIA-PSICOLOGIA-SOCIOLOGIA

Esta clasificación es llamada en la literatura inglesa el "espectro hard-soft". Se considera que hacia la izquierda, comenzando por la Física, tenemos la "ciencia básica", con los conceptos primarios de energía, masa, movimiento... Desplazándonos hacia la derecha nos encontramos con disciplinas que se ocupan de campos cada vez más complejos. Así, las reacciones químicas, aunque se pueden explicar en cierta medida en función de fenómenos físicos, son "algo más" que eso. Cuando observamos que de la mezcla de hidrógeno y oxígeno, bajo ciertas condiciones, se obtiene agua, parece que estamos ante un fenómeno de un nuevo orden que "trasciende" la Física: emergen nuevos conceptos, aumenta la complejidad. Igual ocurre con la Biología respecto a la Química. Basta en pensar en el crecimiento de una planta a partir de una semilla, o de un animal a partir de una única célula. Y podemos seguir con la psicología y la sociología.

En todos estos casos se observa que los fenómenos que ocupan alguna parte de la secuencia no pueden ser explicados totalmente en términos de las ciencias que están más a su izquierda. Siempre hace falta introducir nuevos conceptos. Es cierto que la vida se basa en un conjunto de reacciones químicas. Pero este conjunto es tan vasto, y las relaciones dentro de él tan intrincadas, que aunque conozcamos con precisión el desarrollo de todas las reacciones, si no "cambiamos de escala" siempre se nos escapará la imagen total de lo que ocurre. Es algo parecido a un puzzle: cada pieza representa una porción de la imagen total, pero aunque las examinemos detenidamente por separado, no tenemos una visión completa hasta que no lo montamos entero y nos separamos un poco para contemplarlo.

Esta representación "tradicional" del espectro de las ciencias es claramente unidimensional. Sin embargo, cuando nos movemos en zonas donde el hombre es parte estudiada, parecen emerger nuevas dificultades. Estas pueden estar basadas en la "innata tendencia de los seres humanos a apreciar la 'misma' situación desde diferentes puntos de vista" [Flood, 1987]. Los motivos según los cuales actúan las personas son muy diferentes, y difíciles (si no imposibles) de predecir. Debido a esto parece que hemos encontrado un salto cualitativo en el tipo de complejidad con que nos encontramos en estos casos. Podemos plantearnos por tanto una nueva dimensión de complejidad, que se comenzaría a mostrar en disciplinas como la ecología, para hacerse clara con la psicología y sobre todo con las ciencias sociales.

Flood relaciona esta observación con los tres rangos de complejidad descritos por Weaver, estableciendo el esquema que se muestra en la figura 8.

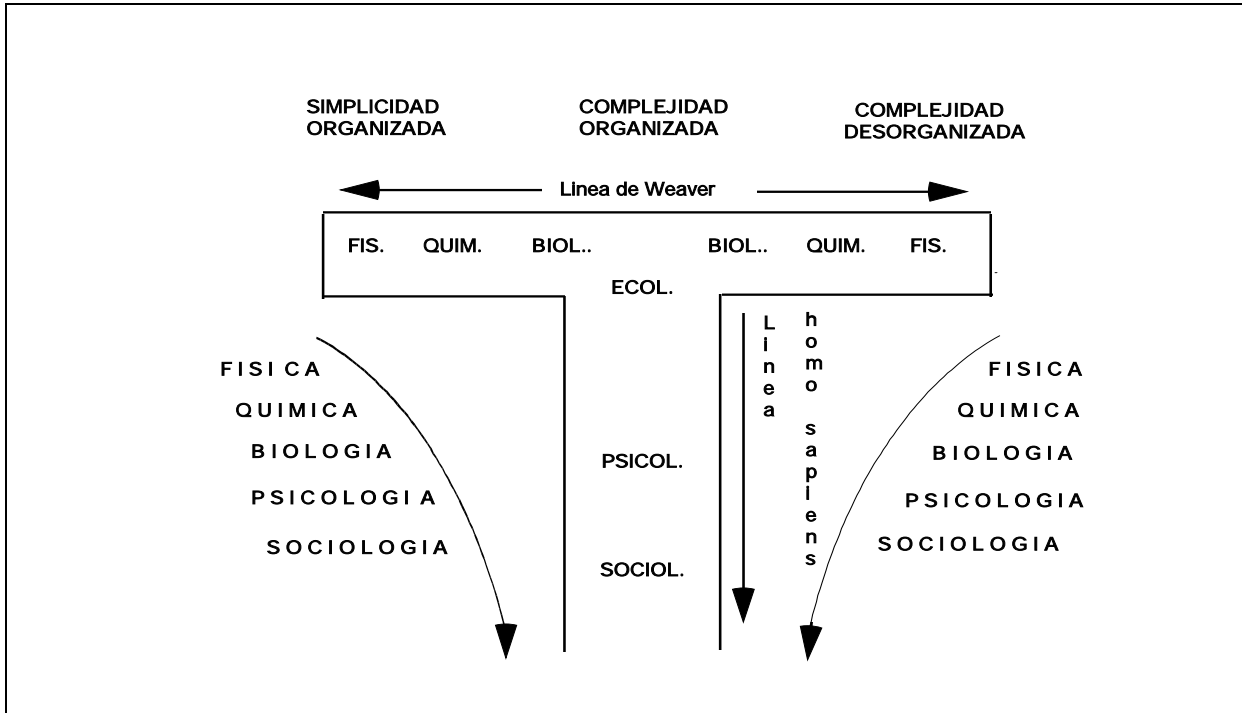


Fig. 8. Representación gráfica de la T de Flood.

En la parte horizontal de la T tenemos los tres rangos de complejidad de Weaver. Comenzando por la izquierda, los fenómenos de simplicidad organizada suelen ser tratados por la física (pocos elementos que se comportan determinísticamente), y en menor medida por la química. Parte de esta última, y más claramente, la biología, marcan la zona de transición hacia los problemas de complejidad organizada (aumenta el número de elementos, y la aleatoriedad, pero no demasiado). Y siguiendo hacia la complejidad desorganizada nos encontramos de nuevo con la química y, en el extremo, con la física (por ejemplo, la mecánica estadística). A esta línea la llama Flood "línea de Weaver".

Mientras tanto, en la parte vertical, dentro del ámbito de la complejidad organizada, nos movemos en la "línea homo sapiens". Cuanto más hacia abajo dentro de ella, más marcados están los sistemas por la actividad humana, con esa diferencia cualitativa de la que ya hemos hablado. A medida que nos movemos por esta línea vertical, los problemas se van transformando en "messiness", algo que es "más que un problema", debido a los diferentes valores, intenciones, etc, que introducimos las personas en los sistemas.

Esta es la nueva dimensión de la complejidad que propone Flood, una complejidad que está más allá de la considerada tradicionalmente por la ciencia y que tiene su origen en los sistemas de actividades humanas, en la línea "homo-sapiens", en la que el hombre es el sujeto principal y fuente indiscutible de complejidad.

5. F. Sáez Vacas. Modelo de tres niveles de complejidad.

5.1. Complejidad. Definición por extensión.

Ante la dificultad de definir una idea se pueden escoger varias soluciones. Una de ellas es intentar dar una panorámica lo más amplia posible de su significado, estableciendo una especie de catálogo de las situaciones que conducen a ella. Este es el objetivo de la definición amplia de complejidad de Sáez Vacas [Sáez Vacas, 1990]:

Complejidad es el nombre que damos a la condición de los seres humanos, objetos, fenómenos, procesos, conceptos y sentimientos cuando cumplen uno o varios de estos requisitos:

- A.- Son difíciles de entender o explicar.
- B.- Sus causas, efectos o estructura son desconocidos.
- C.- Requieren una gran cantidad de información, tiempo o energía para ser descritos o gestionados, o un esfuerzo muy amplio y coordinado por parte de personas, equipos o maquinaria.
- D.- Están sujetas a varias percepciones, interpretaciones, reacciones o aplicaciones que, frecuentemente, son contradictorias o desconcertantes.
- E.- Producen efectos deseados y no deseados (o difíciles de controlar).
- F.- Su comportamiento, dependiendo del caso, puede ser impredecible, extremadamente variable o contraintuitivo.

Esta definición de complejidad intenta presentarla como un concepto amplio que abarca muchos otros. Cada uno de los puntos que recoge la definición trata un aspecto diferente de la complejidad, a saber:

- 1.- Epistemología de la complejidad. A partir de un objeto complejo es más difícil obtener un modelo que recoja todas sus características y sea representativo de su comportamiento. Este punto está directamente relacionado con el punto D, que puede considerarse como una consecuencia de éste.
- 2.- Estructura y complejidad. Más que desconocerse totalmente, lo que sucede en realidad es que en un objeto o sistema complejo no se pueden llegar a conocer todos los factores que influyen en su comportamiento o en qué medida lo hacen (causas), de ahí que tampoco se conozcan los efectos que producen. En cuanto a la estructura, la existencia de múltiples interrelaciones entre los elementos o la multiplicidad de elementos imposibilita obtener una imagen completa de la organización interna del sistema.
- 3.- Información y complejidad. La multiplicidad de elementos característica de los sistemas u objetos complejos implica un crecimiento exponencial en el número de relaciones y por tanto en la cantidad de información requerida para describir el sistema. Se puede pensar en utilizar la teoría de la información (como propone Ashby) para intentar desarrollar un tratamiento formal de la complejidad.
- 4.- Ambigüedad y complejidad. La dificultad para establecer un criterio válido de interpretación de un objeto o sistema complejo implica que va a haber diferentes formas de verlo. Este punto resalta la importancia del observador.

5.- Complejidad y control. Relacionado con el punto 2. En los sistemas complejos es frecuente no poder optimizarlos sino limitarse a soluciones de compromiso en las que se intentan equilibrar distintos efectos. Esto implica una complejidad adicional pues indica que el sistema puede, en un momento dado, comportarse de forma opuesta a lo que sería deseable.

6.- Predicción y complejidad. Una consecuencia de los puntos 2 y 5. Dado que no conocemos exactamente la estructura de un sistema complejo y tampoco podemos asegurar que se controlan todos los parámetros que sobre él influyen, el comportamiento será, en consecuencia, sorprendente cuando entre en juego uno de los factores que no se han considerado.

5.2. Complejidad y sistemas artificiales.

Los trabajos sobre complejidad de Sáez Vacas están básicamente orientados a su aplicación en la informática y en las tecnologías de la información. Estas, como sistemas artificiales que son, presentan una problemática distinta a la que se deriva de los sistemas naturales. El modelo de tres niveles del que nos ocuparemos más adelante refleja este sesgo intencionado en la interpretación de Sáez Vacas, para quien el problema del estudio de la complejidad en los sistemas artificiales se puede articular sobre cinco preguntas:

- A.- ¿De qué factores depende?
- B.- ¿En qué formas se encuentra?
- C.- ¿Cuáles son sus consecuencias?
- D.- ¿Cómo evoluciona?
- E.- ¿Qué se puede hacer para medirla o gestionarla?

A.- Es decir, ¿cómo surge la complejidad?, ¿es posible distinguir una serie de elementos o causas cuyo efecto inmediato es la aparición de la complejidad?. Es importante conocer cómo se presenta la complejidad y cuál es su origen para poder tratarla.

B.- ¿Es posible encontrar diferentes categorías o tipos de complejidad?. En el caso de disponer de un mapa de los tipos de complejidad existentes también podríamos pensar en una clasificación de los métodos de tratamiento de la complejidad facilitando así la tarea de tratarla. El primer paso sería establecer si existen efectivamente diferentes categorías o si, por el contrario, se puede hablar de una complejidad única y genérica que aparece en todo aquello que calificamos como complejo. El modelo de 3 niveles establece este tipo de categorías de complejidad.

C.- En este caso, ¿cuáles son las consecuencias de la complejidad en las tecnologías de la información o, en general, en cualquier sistema artificial. Para poder tratar un problema debemos conocer cuáles son sus consecuencias y los efectos que de él se derivan, para ello es fundamental poder definirlo con claridad (punto A) y, si es posible, categorizarlo dentro de una serie de problemas reconocibles (punto B).

D.- Un problema muy interesante, sobre todo en las tecnologías de la información, pues, como Sáez Vacas demuestra, la complejidad no es estática sino que es el producto de una dinámica de interacción entre diversos conceptos. Una dinámica que hay que conocer para poder tratar la complejidad a largo plazo.

E.- Y, finalmente, un punto controvertido en cuanto a la complejidad. Existen muchas teorías al respecto y casi nadie se pone de acuerdo en cómo se puede medir la complejidad y lo mismo se puede decir de cómo gestionarla. Prácticamente cada autor propone un método o un modelo para ello, métodos y modelos que son más o menos válidos dentro del campo de interés para el que están pensados.

Estas preguntas trazan todo un campo de investigación dentro del estudio de la complejidad, con el objetivo de buscar una cierta unidad a la interpretación de diferentes tipos de complejidad, entre los cuales cabe citar a los siguientes, que, de una u otra forma, tendrían relación con las tecnologías de la información:

- a. Complejidad del sistema.
- b. Complejidad del programa.
- c. Complejidad computacional.
- d. Complejidad epistemológica.
- e. Complejidad organizativa.
- f. Complejidad interpretativa ("complex thinking").

El programa de esta investigación consiste en poner de manifiesto área por área (software, arquitectura de ordenadores, redes, etc.) cómo se ha respondido y cómo se puede responder a algunas (o a todas) de esas cinco preguntas.

5.3. Modelo de tres niveles.

Esta teoría fue propuesta inicialmente para su aplicación a la informática y su propósito era categorizar la complejidad que caracteriza a los entornos de este tipo. Si extraemos de esa teoría todo lo relacionado con la informática, nos quedamos con la esencia del razonamiento, que es bastante independiente del campo de aplicación. Y muy ilustrativa de cómo se puede interpretar la complejidad [Sáez Vacas, 1983].

Su autor distingue tres niveles de complejidad. El primero de ellos abarca la complejidad de los objetos aislados; en el caso de la informática, es la complejidad de circuitos, algoritmos, programas, etc, tratados como objetos separados de otros. Este es el tipo de complejidad con que se enfrentan todos los especialistas en estas tecnologías y es, en general, la que percibe todo el mundo. En un sentido más amplio, ésta es la complejidad de cada uno de los diferentes elementos que componen un sistema, considerados en sí mismos y no como referencias interiores de un todo. Evidentemente, ellos a su vez podrían ser enfocados como un todo, puesto que pueden estar formados por otros elementos, hecho del que nos ocuparemos un poco en breve.

El segundo nivel de complejidad aparece porque, en general, y en la informática en particular, los objetos nunca están aislados, sino que forman un grupo de elementos interconectados con un determinado objetivo. Surge aquí la noción de sistema que lleva aparejada una complejidad diferente y de orden superior a la del primer nivel y que es por lo habitual de naturaleza **metadisciplinar**, en el sentido de estar situada más allá de la mera especialización. La llamaremos complejidad sistémica. En informática los ejemplos son numerosos: un sistema operativo, una red de ordenadores, un ordenador aislado o incluso un circuito integrado VLSI, etc. Es un nuevo nivel de complejidad, porque ya no se está tratando con un simple conglomerado de objetos, sino que de la unión de éstos emerge un conjunto de propiedades diferente a la mera suma de las propiedades de sus componentes. En concreto, surge una serie de interrelaciones que antes no existían o que no interesaban, pero que ahora son fundamentales para definir el comportamiento del grupo.

Finalmente, el tercer nivel de complejidad surge de la interacción (a veces choque) de los sistemas tecnológicos y los sistemas sociales, dando lugar a la complejidad antropotécnica, que se manifiesta específicamente por fenómenos relacionados con el desorden, la incertidumbre, la desorganización, la inestabilidad, la entropía, la borrosidad..., algo que está a la orden del día en la informática práctica. Es una clase de complejidad de carácter **multidisciplinar** y metatecnológico.

En nuestro estudio este nivel es de primordial importancia pues es aquí donde se expresa toda la problemática de las interfaces, de la aceptación de la tecnología, de la adaptación humana, etc. La formulación de este nivel genera un salto cualitativo importante en la concepción de la complejidad, pues ahora no se limita su percepción al aspecto puramente técnico, hasta cierto punto formalizable y estructurable, sino que se introduce de lleno la perspectiva humanística, aspecto importantísimo de la tecnología. Entre otras cosas, pone de manifiesto la importancia del observador, un agente activo, fundamental, parte del propio sistema, que interactúa y evoluciona con él.

Por otro lado, como ya se ha mencionado, un objeto puede considerarse desde varios puntos de vista. Un elemento puede considerarse como tal, si lo que interesa es un sistema mayor del cual forma parte, en este caso estaremos ocupándonos de la complejidad del segundo nivel, o puede considerarse como un sistema en sí mismo, si lo estudiamos como un objeto aislado, en cuyo caso estaremos ocupándonos de la complejidad del primer nivel. Todo dependerá de nuestro punto de vista y de nuestro interés en cada momento. Veamos un ejemplo.

Un ordenador personal puede verse como un objeto de complejidad grande, compuesto de muchos elementos y dedicado a una aplicación concreta. En esta caso, el ordenador se estudia como un objeto cuya complejidad está en el segundo nivel, el ordenador es un sistema, sus propiedades de complejidad han de buscarse en la clase de complejidad sistémica. Las diferentes partes de que se compone el ordenador, tarjetas de procesamiento, de memoria y gráficas, discos de almacenamiento, fuente de alimentación, monitor, etc., son objetos cuya complejidad está en el primer nivel, donde se pueden estudiar por separado, aisladamente.

Es importante comprender que, en la versión anterior, el ordenador personal se considera como un sistema formado por muchos componentes y su complejidad emerge a partir de una determinada interconexión de las complejidades del primer nivel de sus componentes. Por el contrario, en una red de ordenadores, el ordenador pasa a ser un objeto de primer nivel, su complejidad interesa ahora considerarla como la de un objeto aislado, mientras que el sistema, la red, pasa a definir la

complejidad de segundo nivel, la complejidad que surge al considerar la conexión e interrelación de diversos objetos 'simples', en este caso, ordenadores. Considerar el ordenador en un nivel o en otro depende, como se ve, del punto de vista que adoptemos, el de diseñador de redes de comunicación, en cuyo caso manejaremos ordenadores como elementos, o el del diseñador de ordenadores personales, en cuyo caso el ordenador pasará a ser el sistema de orden superior que se intenta construir a partir de una serie de elementos.

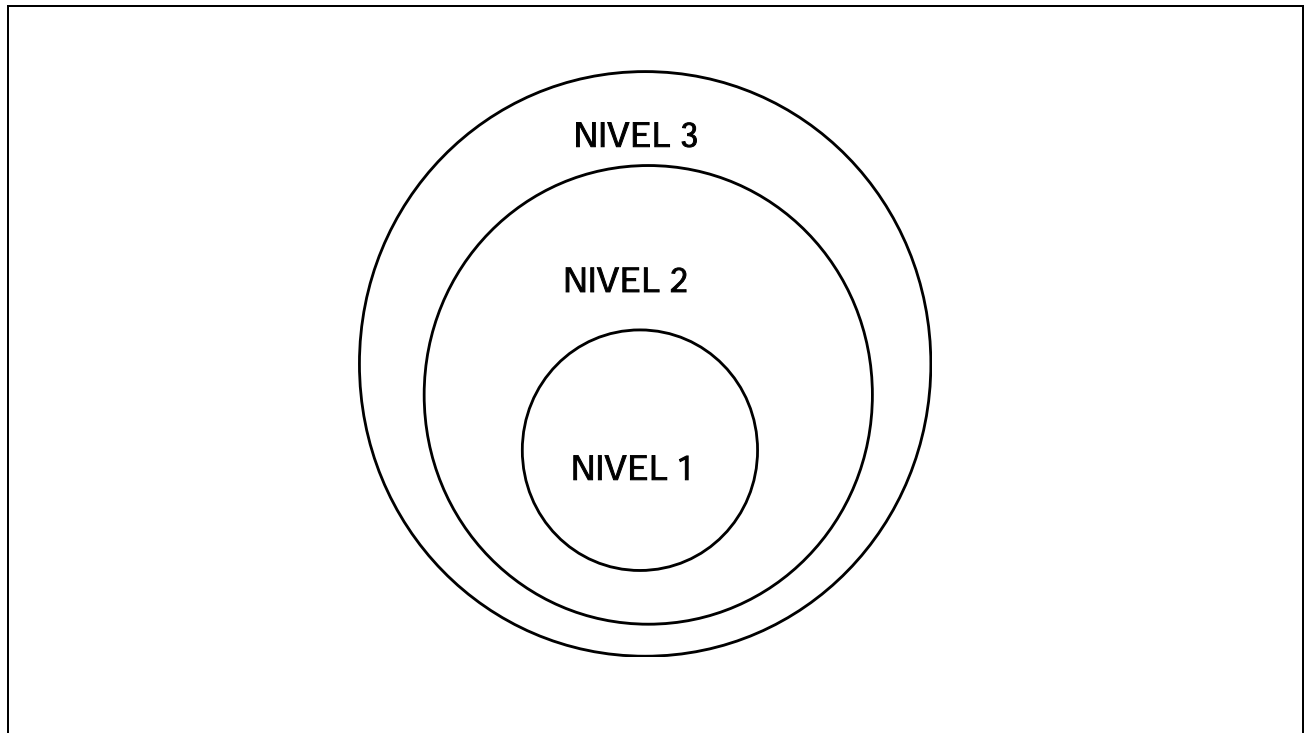


Fig. 9. Modelo de tres niveles de complejidad (F. Sáez Vacas, 1983).

Por último, hay que destacar que a un nivel superior también existe la complejidad del inferior. Esto en el ejemplo anterior se ve muy claramente, una red presenta una complejidad característica, de orden superior a la de los ordenadores que la forman, pero al mismo tiempo también contiene la complejidad asociada con esos ordenadores. Esto es lógico si consideramos que un sistema está formado por sus elementos y las relaciones entre ellos.

En términos cibernéticos, dejando la informática de lado y a modo de resumen, lo que se plantea en este modelo de complejidad son tres niveles distintos de la misma, dependientes, como siempre, del observador. Para cada nivel, las consideraciones, técnicas y conceptos relevantes son diferentes y específicos, si bien, desde un punto de vista constructivo (partiendo desde la tecnología) todo nivel está incluido en el superior.

Complejidad de los objetos aislados: **Complejidad Individual.**

Complejidad de los objetos interconectados: **Complejidad Sistémica.**

Complejidad de la interacción tecnología-sociedad: **Complejidad Antropotécnica.**

Si nos fijamos, el nivel de complejidad antropotécnica es el equivalente en el campo tecnológico al concepto de complejidad línea homo-sapiens, elaborada años después por Flood [Flood, 1987].

El modelo de los tres niveles representa un enfoque sistémico ascendente en cuanto que el punto de partida constructivo del sistema es la tecnología. Sin embargo, en lo que se refiere a sus objetivos de diseño o verificación es descendente (top-down): el tercer nivel incluye al segundo y éste, al primero.

6. Resumen.

La **clasificación de los sistemas** según Weaver se hace en función de su **número de elementos** y de su grado de **aleatoriedad**. Estos criterios dan lugar tres rangos de complejidad: **simplicidad organizada, complejidad desorganizada y complejidad organizada**.

Klir relaciona la complejidad de un objeto con el **número de partes** que lo componen y de **interrelaciones** entre esas partes. También se menciona la importancia del **observador**. De la interacción entre el observador y el objeto surge la idea de **sistema**: la imagen que del objeto tiene el observador. De aquí la importancia de establecer un marco conceptual para tratar con los sistemas, que se concreta en la **jerarquía epistemológica** que propone: sistema-fuente, sistema de datos, sistema-generativo, sistema-estructura, metasistema,... También se enuncian dos principios generales de la complejidad de los sistemas: la relación de la complejidad con la **información que describe** el sistema, y con la necesaria para resolver su **incertidumbre**.

Flood, partiendo también de la relación de la complejidad con el **objeto** y con el **observador**, analiza los factores que en cada uno de estos dos elementos están relacionados con ella. Para el observador serán los **intereses**, las **capacidades** y las **percepciones**, y para los sistemas el **número de partes**, de **relaciones** (ambas ya mencionadas por Klir), la **no linealidad**, **asimetría** y **no holonomicidad**. También clasifica las ciencias de una forma que extiende la clasificación de sistemas de Weaver al introducir la **línea homo-sapiens (T de Flood)**.

Sáez Vacas, intentando dar una visión general del campo que abarca la complejidad, aporta su definición, que supera el concepto de complejidad descriptiva de un objeto, para abarcar toda clase de operaciones o **situaciones de complejidad** con un objeto por parte de toda clase de observadores. También elabora un **modelo en tres niveles**, a saber: complejidad **individual**, complejidad **sistémica** y complejidad **antropotécnica**. Y distingue, ya dentro del campo de las tecnologías de la información, seis **tipos de complejidad**: del **sistema**, del **programa**, **computacional**, **epistemológica**, **organizativa** e **interpretativa**.

Bibliografía.

Dividida en dos apartados. En Notas Bibliográficas se comentan 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 artículo de Klir "**Complexity: some general observations**" [Klir, 1985], ofrece, entre otras cosas, unas interesantes consideraciones sobre el papel del observador y el objeto en la complejidad, una descripción de la jerarquía epistemológica de tipos de sistemas, unas notas sobre los tres rangos de complejidad de Weaver y un estudio sobre la complejidad computacional.

Flood, en "**Complexity: a definition by construction of a conceptual framework**" [Flood, 1987], desarrolla un marco conceptual donde encajar diferentes aspectos relacionados con la complejidad y expone su ampliación de la "línea de Weaver" (la "T de Flood").

En "**Facing informatics via three level complexity views**" [Sáez Vacas, 1983], expone Sáez Vacas su modelo de tres niveles de complejidad aplicándolo esencialmente en el campo de las tecnologías de la información.

Referencias bibliográficas

Checkland, P.B. (1981): "**Systems thinking, systems practice**", John Wiley, Nueva York.

Klir, G.J. (1985): "Complexity: Some General Observations", **Systems Research**, vol.2, núm.2, pp.131-140.

Flood, R.L. (1987): "Complexity: a definition by constructing a conceptual framework", **Systems Research**, vol.4, núm.3, pp.177-185.

Orchard, R.A. (1972): "On an approach to general systems theory", editado en **Trends in general systems theory**, John Wiley & Sons, Nueva York.

Pippenger, N. (1978): "Complexity theory", **Scientific American**, 238, 6, 1978, pp.90-100.

Sáez Vacas, F. (1983): "Facing informatics via a three level complexity view", **X international Congress on Cybernetics**, Namur, Bélgica, pp.30-40.

Sáez Vacas, F. (1987): "**Towards a conceptual remodeling of information technologies based on a broad consideration of complexity**", 31st Annual Meeting of the International Society for General Systems Research, Budapest, 1-5 junio.

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

Wagensberg, J. (1985): "**Ideas sobre la complejidad del mundo**", Tusquets, Barcelona.

Weaver, W. (1948): "Science and complexity", **American Scientist**, núm.36, pp.536-544.

Yates, F.E. (1978): "Complexity and the limits to knowledge", **American J. Physiol.**, núm.4, pp.201-204.