

De la Ingeniería de la Complejidad

En la frontera del conocimiento. Introducción a la Complejidad. Propiedades emergentes en sistemas complejos. Medida de la complejidad en un proyecto. La complejidad en la enseñanza. Finalmente, ¿qué es la complejidad?

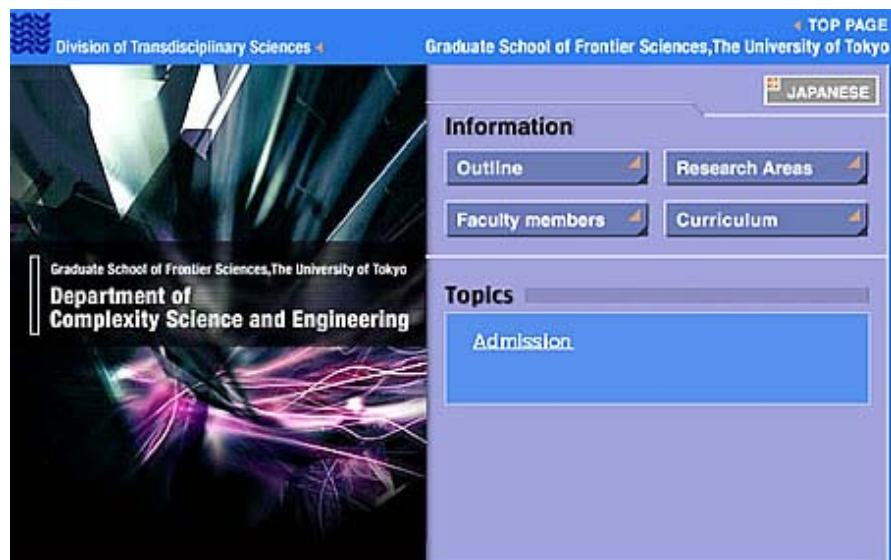
En la frontera del conocimiento

Referencia

The University of Tokyo. Graduate School of Frontier Sciences.

<http://www.k.u-tokyo.ac.jp/index/html.en>

En la Universidad de Tokio, la Escuela de Graduados de Ciencias en la Frontera Del Conocimiento, está organizada en los siguientes departamentos: en Ciencias Transdisciplinarias (Ciencias Avanzadas de Materiales, Energía Avanzada, **Ingeniería y Ciencia de la Complejidad**, Programa de Educación e Investigación en Fusión Nuclear, Programa Educativo para la Creatividad en Ciencias Transdisciplinarias), en Biociencias (Biociencias Integradas, Ciencias del Genoma Médico, Curso Bio-IP, Programa de Educación de Ciencias del Genoma Médico), en Estudios Ambientales (Estudios Ambientales Nacionales, Tecnología Política y Ambiente Oceánico, Sistemas Ambientales, Estudios del Ambiente Humano, Estudios Ambientales Socioculturales, Estudios Internacionales, Programa de Graduados en Ciencia Sostenible, Programa de Educación en Ciencias de la Salud, Programa de Educación en Gestión Ambiental, Programa de Diseño Ambiental Integrado, Programa de Entrenamiento para el Ingeniero Ambiental, Programa de Entrenamiento para el Administrador Ambiental).



El Departamento de la Ingeniería y Ciencia de la Complejidad

Tiene el propósito de investigar diversos problemas relacionados con la ciencia de la complejidad y la ingeniería de la complejidad, a través de un

enfoque integrado, así como de entrenar a científicos e ingenieros para crear nuevos paradigmas en esos campos.

En el tratamiento actual, los sistemas complejos se enfrentan con un enfoque reduccionista; esto es, descomponiéndolos en sus componentes, brindando un tratamiento lineal en sus propiedades y funciones, y luego, integrando el sistema por la superposición de sus partes. Este tratamiento está soportado por la creencia de que es posible estudiar los fenómenos por reglas simples y lineales, las cuales permiten la suma de las soluciones para obtener la solución o comprensión del fenómeno integrado.

Sin embargo, hay que enfrentar la realidad de una variedad de sistemas naturales y artificiales complejos no lineales, y que no es posible estudiarlos de modo reducido. Conceptos como el caos y fractales, así como el incremento de la dinámica computacional, están contribuyendo a la comprensión de los sistemas complejos y a darle un significado importante en la ciencia y la ingeniería.

Para cumplir con sus propósitos, este Departamento de la Universidad de Tokio, utiliza dos aproximaciones principales: (1) la aproximación experimental y de observación de sistemas complejos en el mundo real como el plasma, los electrones fuertemente correlacionados, la superficie de los sólidos, la tierra y los planetas, el cerebro, y el genoma, y (2) una aproximación teórica usando modelos no lineales, caos determinístico, sistemas de control, computación de gran escala, grandes bases de datos, y sistemas gráficas en computadora.

Introducción a la Complejidad

Referencia

Grégoire Nicolis and Ilya Prigogine. *Exploring Complexity. An Introduction*. W. H. Freeman and Company. New York. 1998.

Según la referencia, nuestro mundo físico no está más simbolizado por la estabilidad y el movimiento periódico. La variedad y riqueza que muestra la naturaleza requiere de nuevos conceptos y herramientas que se exploran en términos de la complejidad.

En el texto, se abordan dos disciplinas en torno a la complejidad. La primera, es la **física del no equilibrio**. La segunda, es la **teoría de los sistemas dinámicos**. El eje central es la prevalencia de la inestabilidad: pequeños cambios en las condiciones de inicio, pueden conducir a grandes amplificaciones de los efectos de los cambios (pequeños movimientos en las placas tectónicas pueden derivar en grandes sismos, la amplificación sísmica en la corona de una ladera por un pequeño movimiento en la base, fuertes daños en la cresta de una chimenea por movimientos en la base, turbulencias en líquidos por variaciones desiguales de la temperatura, pandeo de columnas por pequeñas excentricidades).

Los periodos en que ocurren estas inesperadas irregularidades, son relativamente cortos como el caso de las fluctuaciones violentas del clima en comparación con las características temporales de la evolución del sol.

En resumen, nuevos o reformulados conceptos son demandados en el **vocabulario de la complejidad**. Estos son, según la referencia, los sistemas conservativos (en energía total, momento de traslación, momentos rotacionales), sistemas disipativos (e irreversibles, como es el caso de la carbonatación del concreto), equilibrio mecánico y termodinámico, restricciones del no equilibrio, diferentes tipos de estabilidad, la bifurcación, la pérdida de simetría, y el orden en el largo plazo.

¿Qué es la complejidad?

A juicio de los autores, *la complejidad es una idea que parte de la realidad*. En efecto, al observar fenómenos físicos típicos como la caída de un objeto por influencia de la gravedad, o el movimiento de un péndulo, los percibimos como *simples*. Pero al referirse al lenguaje o al cerebro, los percibimos como sistemas *complejos*, seguramente por la cantidad de elementos involucrados, y la imposibilidad de separarlos para su análisis aislado y posterior unión en el sentido clásico.

Propiedades emergentes en sistemas complejos

Referencia

Christopher W. Johnson (University of Glasgow, Scotland). *What are emergent Properties and How Do They Affect the Engineering of Complex Systems?* 2nd Workshop on Complexity in Design and Engineering. GIST Technical Report G2005-1. Department of Computing Science, University of Glasgow, Scotland. March, 2005.

Las *propiedades emergentes* pueden ser pensadas como comportamientos inesperados que surgen de la interacción de los componentes de un sistema y su ambiente. Pueden ser benéficos o dañinos. Pese a que las *propiedades emergentes* constituyen un tema central en sistemas complejos, todavía -a juicio del autor- no existe el nivel de consenso suficiente respecto a su naturaleza. Lo sintetiza el hecho de que el sistema es más que la suma de sus partes (o es inexplicable en la vía de descomposición de sus partes funcionales). El artículo resume varios puntos de vista en torno a la *emergencia*, a fin de tener mayor claridad sobre el término en su aplicación a sistemas complejos.

Introducción

Diferentes acercamientos se han hecho en torno a los *sistemas complejos*. En términos generales, son difíciles de diseñar y comprender. Algunos los explican por contener muchos componentes y capas de subsistemas con múltiples relaciones no lineales difíciles de reconocer, manejar y predecir.

Parece claro que la complejidad se constituye en un reto creciente en la ingeniería de sistemas. Así lo ilustra la amplia gama de participantes en el diseño de un proyecto de ingeniería: público, clientes, equipo de construcción, diseñadores, financistas, administradores, agencias gubernamentales y de regulación, así como los cambios de requerimientos del propio sistema, y aquellos que surgen de las acciones tomadas.

Las propiedades emergentes

Las *propiedades emergentes* surgen de sistemas complejos a partir de aplicaciones que resultan complicadas. Se trata de un comportamiento inesperado fruto de la interacción entre las partes y con su ambiente (el deslizamiento imprevisto de un talud, o el colapso de una edificación). En su interpretación, hay quienes piensan que se trata de propiedades inesperadas. Otros, cuando estas propiedades no pueden ser identificadas a partir de la descomposición funcional.

También se presentan las propiedades emergentes vía la comparación entre cuerpos vivos y otros inorgánicos. Ambos están formados por partes, pero en los primeros ocurre el fenómeno de la vida que no encuentra analogía con la yuxtaposición de las partes físicas de los segundos.

En otros sin embargo, se distinguen fenómenos que pueden explicarse por la superposición de las partes, como el hecho de fuerzas actuando sobre un

objeto que pueden tener el mismo efecto que cuando son aplicadas en combinación o en forma separada. Las reacciones químicas son a su vez un ejemplo en que la suma de las partes no explica claramente la producción de resultados diferentes a los componentes.

Implicancias para la ingeniería

La percepción ingenieril de estas propiedades emergentes, se enfoca en términos pragmáticos. Por ejemplo, al considerar que las vulnerabilidades emergentes, provenientes de la interacción de componentes dispares y diseñados en forma independiente, resultan impredecibles en general. Para otros, estas dificultades surgen de la participación de disciplinas diversas que por lo especializadas tienen lenguajes y manejan conceptos diferentes (y a menudo sobrecargados de nombres).

Hay esfuerzos que se han orientado a elaborar modelos, generalmente matemáticos y necesariamente dinámicos, que muestran la aparición de una propiedad emergente. Otros, se destinan a averiguar las causas fundamentales de esta aparición.

Y una explicación que se aleja del discurso filosófico, considera que los cambios emergentes surgen por la divergencia entre los propósitos del diseño, y los errores de los requerimientos y las especificaciones, lo cual provocan equivocaciones entre los proveedores y dificultades en términos de recursos, programaciones y prioridades del proyecto.

Medida de la complejidad en un proyecto

Referencia

Khaled M. Nassar (University of Maryland Eastern Shore, Maryland) and Mohamed Y. Hegab (California State University, California). *Developing a Complexity Measure for Project Schedules*. Journal of Construction Engineering and Management. Vol 132, N° 6, June 1, 2006. ASCE.

Los autores reconocen que varios factores contribuyen a la **complejidad de programaciones de proyectos**, tales como: el número de actividades, el nivel de detalle, y la forma de la red del proyecto. Distinguen esta complejidad de aquella del proyecto mismo. Proponen una medida de la complejidad de la programación de proyectos, basada en la conectividad de las actividades (en su grado de interrelación). La medida es expresada como un porcentaje, y favorece por tanto la comprensión por parte de los administradores del proyecto. El trabajo incluye una herramienta de cómputo, elaborada como un agregado al MS Project.

Introducción

El artículo recoge como definición de complejidad: **la propiedad de difícil expresión en el lenguaje, para formular el comportamiento total, aún cuando se disponga de información casi completa respecto a los componentes de detalle y a sus interrelaciones.**

La o las medidas de complejidad de la programación de proyectos pueden ser usadas para tomar decisiones en torno a la planeación, la coordinación y los requerimientos de control de un proyecto. Puede influir directamente en la selección de la forma más apropiada de organización. Igualmente, puede afectar los objetivos del proyecto en términos de tiempo, costo y calidad, e incluso para la asignación de recursos.

La medida que se propone en este estudio, considera el grado de interconectividad entre las actividades en la programación del proyecto, calculando los números mínimo y máximo de las relaciones en la programación con n actividades.

Número de actividades en la programación

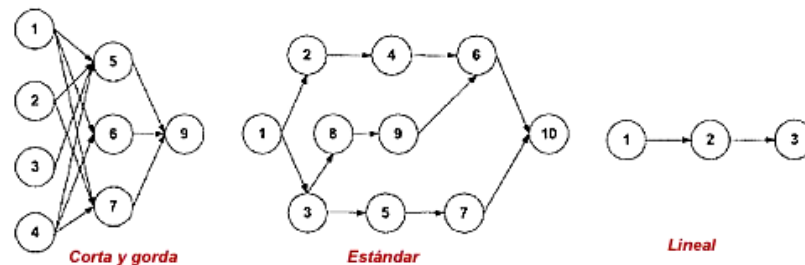
Muchas de las especificaciones de programación establecen un número mínimo de actividades en la red (algunas fijan este número según el costo de la obra, otras limitan la duración de actividades individuales o de su costo).

Número de actividades recomendadas por tamaño de proyecto (adoptado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos)

Costo de construcción del proyecto (en millones US\$)	Número de actividades de construcción recomendado
Menos de 1	150 aprox
De 1 a 2	150 a 200
De 2 a 5	200 a 1000
De 5 a 10	1000 a 2000
Más de 10	2500 aprox

De otra parte, es importante tener claro el nivel de detalle de la programación, el cual es dependiente de la naturaleza, tamaño y complejidad del proyecto.

De la medida de la complejidad



TIPOS BÁSICOS DE REDES CONECTADAS

Los **modelos de redes** de programación de un proyecto tienen las tres principales formas de la imagen previa: **corta y gorda**, **estándar**, y **lineal**. La lineal se utiliza en procesos repetitivos como en la construcción de edificios muy altos o en carreteras. La estándar es la más común en construcción de edificios. La red corta y gorda es propia de proyectos que involucran relaciones complejas entre actividades.

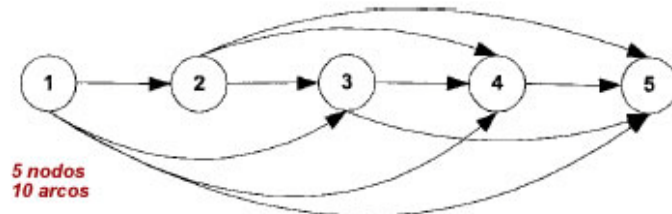
Uno de los atributos más importantes de la complejidad de una red, es la **conectividad** o interdependencia entre las actividades del proyecto. A mayor conectividad, mayor complejidad. El número de actividades y rutas críticas, es otro aspecto en la complejidad del proyecto.

Aunque subsiste el debate si la razón de la complejidad está en el proyecto, en la red, o en la forma de análisis de una red en particular, es evidente la utilidad de una medida de la complejidad (están en juego múltiples requerimientos y recursos, múltiples actividades y sus duraciones, así como conflictos de objetivos y prioridades). En construcción también

está asociada al control del mismo y a los costos (una red compleja puede dar lugar a continuas reprogramaciones).

La medida de la complejidad

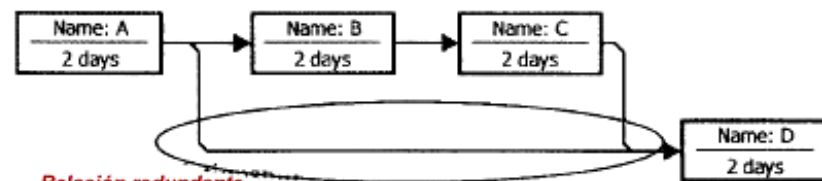
El estudio considera un tipo de red en las cual todas las actividades forman parte de la misma. Es posible representar esta red como un grafo en el cual las líneas o curvas tienen una dirección sin la existencia de ciclos repetidos. Esta es la característica básica en las redes de programación de proyectos.



5 nodos
10 arcos

MÁXIMO NÚMERO DE ARCOS Y REDUNDANCIA

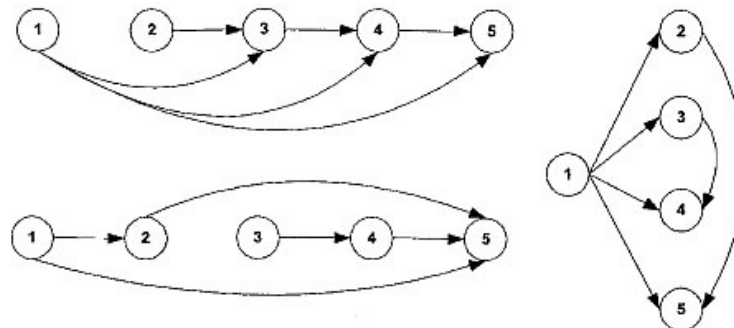
El máximo número de arcos de una red de este tipo, con n nodos, está dado por $n(n-1)/2$. Pero si en el caso de la figura, las actividades sólo son 5 (representadas cada una de ellas por un nodo), entonces los otros arcos indican relaciones de dependencia, superfluas o *redundantes*. Se califican como redundantes: *los arcos que describen precedencias directas entre dos nodos son redundantes, si ya está establecida una precedencia indirecta*. En el caso del MS Project, no están permitidos estos arcos redundantes.



Relación redundante

CASO DE RELACIÓN REDUNDANTE

Estas relaciones redundantes suelen aparecer en la elaboración de diagramas CPM por ejemplo, y hay que dedicar mucho cuidado en minimizarlas en mérito a la facilidad de revisión y reprogramaciones del proyecto.



EJEMPLOS DE REDES MÍNIMAS

La búsqueda del máximo número de relaciones no-redundantes conduce en el estudio, al uso del algoritmo de Warshall, iterativo y dependiente de n^2 . El artículo presenta los siguientes resultados.

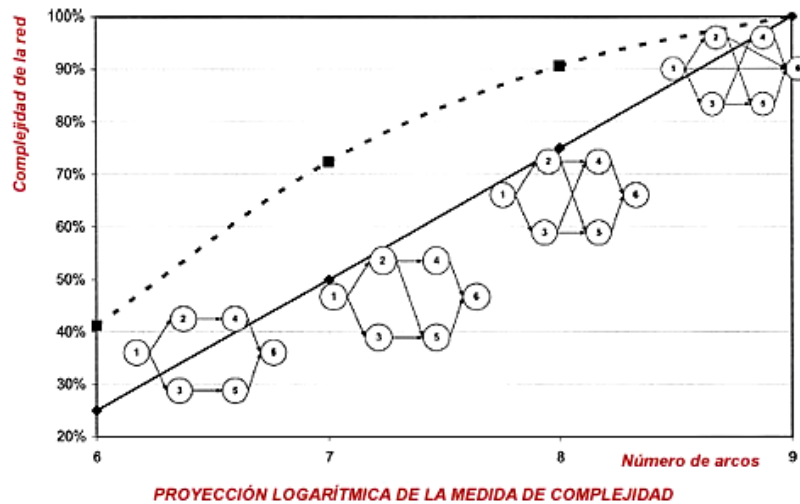
Máximo número de enlaces:

$$\begin{cases} \left(\frac{n^2 - 1}{4}\right) & \text{si } n \text{ es impar} \\ \left(\frac{n^2}{4}\right) & \text{si } n \text{ es par} \end{cases}$$

Mínimo número de enlaces:

$$n - 1$$

Proyección logarítmica



El artículo propone una proyección logarítmica como medida de la complejidad, asumiendo que ella puede tomar en cuenta los incrementos no lineales que resultan de agregar relaciones entre actividades. Para n actividades, y a arcos, de la siguiente manera, en porcentaje.

$$C_R = \begin{cases} 100 \left\{ \frac{\text{Log}\left[\frac{a}{n-1}\right]}{\text{Log}\left[\frac{n^2-1}{4(n-1)}\right]} \right\} & \text{si } n \text{ es impar} \\ 100 \left\{ \frac{\text{Log}\left[\frac{a}{n-1}\right]}{\text{Log}\left[\frac{n^2}{4(n-1)}\right]} \right\} & \text{si } n \text{ es par} \end{cases}$$

Discusión

Según se asume en el artículo, la calidad de una medida de complejidad puede ser valorada según los siguientes seis criterios: validez, confiabilidad, ser calculable, ser fácil de implementar, independencia, y percepción intuitiva. La simplicidad de un porcentaje abona en la bondad de la propuesta, y su interpretación puede dar lugar a las siguientes recomendaciones.

Medida de la complejidad y recomendaciones

Medida de la complejidad, % Recomendaciones

70 a 100

Considere seriamente en revisar la programación

Medida de la complejidad y recomendaciones

Medida de la complejidad, %	Recomendaciones
-----------------------------	-----------------

50 a 69	Considere el revisar la programación
---------	--------------------------------------

30 a 49	Satisfactorio, pero podría mejorar
---------	------------------------------------

0 a 30	Aceptable
--------	-----------

Finalmente, los autores indican que la validez del método es local; esto es, para el análisis de un mismo proyecto a la vez.

La complejidad en la enseñanza

Referencia

Theodore E. Djaferis (University of Massachusetts in Amherst). *An Introduction to Engineering: Complexity in Engineered Systems*. 43rd IEE Conference on Decision and Control. December 14-17, 2004. Atlantis, Paradise Island, Bahamas. IEEE 2004.

A juicio del autor, muchos de los problemas de muy difícil tratamiento hasta ahora, son multidisciplinarios comprendiendo aspectos socio-económicos, de ingeniería, y de la ciencia. Involucran un gran número de componentes, lo cual los hace inherentemente complejos. La enseñanza tradicional de la ingeniería de pre-grado, no está apropiadamente estructurada para enfrentar estos retos. Las innovaciones curriculares deben incluir aspectos multidisciplinarios, enfatizar los puntos de vista de sistemas, e introducir problemas de ingeniería, principios, prácticas y soluciones desde muy temprano en la enseñanza. Existe la necesidad de vincular horizontal y verticalmente los cursos entre sí y con los problemas de ingeniería. Las bases de esta aproximación deben descansar en el primer año de estudios. Este artículo se enfoca en el primer año y propone un curso introductorio con el tema *complejidad en sistemas de ingeniería*.

Introducción

Un examen de muchos de los sistemas curriculares revela que la educación en ingeniería es unidireccional y no multidisciplinaria. La aproximación es de *abajo - arriba*, donde en los primeros ciclos se aprende lo fundamental y se trabaja con los componentes por algunos años. La conexión con los problemas de ingeniería recién es en los últimos años. Contrasta con la opción *arriba - abajo* donde primero se expongan los problemas de ingeniería, después se fraccionen en sus componentes, y luego se presenta el material para encontrar las soluciones. Una aproximación *balanceada* parece ser una mejor alternativa.

Un curso introductorio

◆ Resultados que se esperan

- Conocimiento de matemáticas avanzadas y de ciencias físicas, y la capacidad de aplicarlos a los campos de la ingeniería que competa.
- Capacidad para diseñar y conducir experimentos, así como para analizar e interpretar datos.
- Experiencia de trabajo productivo en equipo, en problemas diversos ambientales y técnicos.

- Capacidad para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.
- ◆ **Objetivos del curso**
- Introducir un número de problemas de ingeniería (incrementando el nivel de complejidad).
- Introducir los conceptos básicos, los principios de ingeniería, las prácticas y las soluciones.
- Demostrar las ventajas de una *aproximación de sistemas* a la solución.
- Mostrar que las soluciones son obtenidas con el empleo de la teoría, simulación computacional, y experimentación física.

Finalmente, ¿qué es la complejidad?

Referencia

Edmons, Bruce. *What is complexity? The philosophy of complexity per se with application to some examples in evolution*. Kluwer Academy Publishers. Printed in The Netherlands. 1999.

Introducción

El autor enfoca el concepto de complejidad como una herramienta para el análisis. Para clarificar el concepto, y hacerlo más útil, presenta diferentes percepciones de la complejidad, según su evolución.

Complejidad como un paradigma

Algunos autores usan el concepto de complejidad como una suerte de holismo. Abandonan el modelo reduccionista de análisis introduciendo nuevas técnicas y aproximaciones. Este punto de vista establece diferencias cerradas entre lo simple y lo complejo, y a juicio del autor, considera que presumiblemente hay una transición de lo simple a lo complejo. Pero el énfasis crucial de su opinión es puesto en lo siguiente: *la definición de complejidad no puede ser genérica, para ser útil, debe referirse a un sistema en la realidad*. Es más, puede variar según el aspecto que interese a quien está efectuando el análisis. Así, él restringe el concepto a su aplicación, y lo asocia al lenguaje de representación que el analista concibe.

Algunos conceptos relacionados con la complejidad

◆ El tamaño

Aquí el tamaño expresa la dificultad general para tratar con el sistema, y se ve como un potencial para un sistema complejo. No se toman en cuenta varios factores. Por ejemplo, que las partes integrantes (en un complejo de edificios, digamos) pueden no estar integradas. O que objetos o sistemas muy pequeños pueden ser realmente complejos (como un microprocesador, o la micromecánica del concreto).

◆ La ignorancia

El rechazo a estudiar un sistema por desconocer sus elementos y relaciones es asociado por algunos a la complejidad. Ciertas enfermedades todavía consideradas incurables. O la predicción de sismos. No necesariamente, - para el autor- la ignorancia sobre un sistema conduce a la afirmación de su complejidad.

◆ Tamaño mínimo para descripción

Esta es una definición interesante de la complejidad. El calificativo de complejo se asigna según el tamaño de la descripción en algún *lenguaje* (no necesariamente verbal, ni necesariamente alfabético, también pueden ser diagramas). Este parecer está asociado a las etapas de comienzo de las computadoras, las cuales no podían manejar expresiones muy largas. Hay confusión por lo tanto, entre información y complejidad, pues también se le asocia a la cantidad de información que es necesaria para describir un sistema.

◆ Variedad

Se asocia lo complejo a la cantidad de formas que puede adquirir un objeto, o a la cantidad de formas que lo componen. Nuevamente, esta diversidad no necesariamente significa que las partes estén firmemente relacionadas entre sí (en un complejo urbanístico, por ejemplo).

◆ Orden y desorden



La calificación de complejo en este caso está influenciada por la percepción, y también por la facilidad o dificultad para describir el objeto con algún lenguaje.

Propuesta

Para el autor, la complejidad es *aquella propiedad de una expresión de lenguaje la cual es difícil formular para expresar el comportamiento total, aún cuando se cuente con la información completa respecto a sus componentes atómicos (o mínimos) y su interrelación.*