

COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Sr. D. Martín Aleñar Ginard
Teniente General (R) del Ejército de Tierra

Vocales

Sr. D. Eduardo Avanzini Blanco
General de Brigada Ingeniero del Ejército del Aire

Sr. D. Manuel Bautista Pérez
Dtor. General del Instituto Nacional de Meteorología

Sr. D. Carlos Casajús Díaz
Vicealmirante Ingeniero de la Armada

Sr. D. Luis García Pascual
Director de las Escuelas de Ingeniería del ICAI

Sr. D. Ricardo Torrón Durán
General de Brigada Ingeniero del Ejército de Tierra

Sr D. Alberto Sols Rodríguez-Candela
Ingeniero de Sistemas. Isdefe

Sra. Dña. M^a Fernanda Ruiz de Azcárate Varela
Imagen Corporativa. Isdefe



Isdefe

Ingeniería de Sistemas

c/ Edison, 4
28006 Madrid
Teléfono (34-1) 411 50 11
Fax (34-1) 411 47 03
E-mail: Monografias@isdefe.es

Monografías de Ingeniería de Sistemas

PRESENTACIÓN



0

MONOGRAFÍAS DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

“Con el fin de contribuir a la divulgación en España de los fundamentos de la ingeniería de sistemas, Isdefe patrocina el desarrollo de una serie de monografías. El objetivo es dar a conocer las características del enfoque sistémico y las principales metodologías y disciplinas de aplicación en el estudio de los sistemas. El desarrollo de esta serie, parte de las actividades emprendidas por Isdefe con motivo de la celebración del 10^º Aniversario de su constitución, está específicamente orientado a difundir la experiencia y los conocimientos adquiridos sobre ingeniería de sistemas durante esta década.”

ILUSTRACIÓN DE PORTADA
Máquina-herramienta: taladro de arco para hacer orificios.

CORTESIA

Madrid, 8 de noviembre de 1994

Desde que la Ingeniería de Sistemas se ha impuesto en la resolución de problemas multidisciplinares, la carencia de bibliografía en nuestra lengua ha sido un vacío detectado por todo el que se haya relacionado con ella.

Isdefe -empresa de Ingeniería de Sistemas para la Defensa- que desde hace diez años viene siendo pionera en nuestro país en su desarrollo, quiere aportar estas monografías con el ánimo de comenzar un camino que ayude a su difusión y generalización.

Con motivo del décimo aniversario de **Isdefe** que se celebra en este año que comienza, hemos querido patrocinar esta serie de publicaciones aspirando a ser precursores en un área bibliográfica que deseamos fecunda e interesante.

Nos complace haber podido contar con un elenco de autores de cualificada experiencia, que a lo largo de esta colección nos ayudarán a conocer y profundizar en esta rama de la ingeniería aplicada.

Agradezco desde estas líneas a todos ellos el esfuerzo que representa para cualquier profesional la dedicación extra, necesaria para la elaboración de estos textos. Asimismo, agradezco la inestimable colaboración de cada uno de los miembros del Comité de Redacción y en especial la de su Presidente sin cuya perseverancia no hubiera sido posible la tarea.

Confío que el esfuerzo de todos los que, de alguna manera, hayan colaborado en estas monografías se vea recompensado con el interés con que esperamos y deseamos reciban esta obra los lectores.



Antonio Flos i Bassols
Secretario de Estado para la Defensa
*Presidente de **Isdefe***

CORTESIA

PRESENTACIÓN

LA UBICUIDAD DE LOS SISTEMAS Y EL RELOJERO CIEGO

El hombre vive rodeado de sistemas. Pertenece a sistemas sociales y utiliza sistemas físicos y de información. A pesar de que el hombre los ha desarrollado, con demasiada frecuencia le es difícil explicar con precisión su comportamiento y más aún predecirlo. Esto se debe a las limitaciones con que el ser humano se enfrenta a la concepción de nuevos sistemas. En ocasiones el hombre se asemeja a un “relojero ciego”, incapaz de estructurar adecuadamente unos elementos en sistemas de comportamiento explicable y predecible.

El *Homo Faber* y la Cultura del Yunque

Benjamin Franklin solía decir que el hombre es un animal que fabrica cosas, esto es, un *Homo Faber*. Los paleontólogos establecen la aparición del hombre fabricante hace 250.000 años, por el descubrimiento de guijarros tallados; el ser estos de diferentes tamaños y tener características comunes indicó claramente que se trataba de objetos fabricados. Habían sido producidos golpeando con una piedra sobre una base sólida, por lo que estas culturas primitivas son conocidas como culturas del yunque.

En las sociedades primitivas los sistemas existentes eran naturales y su entendimiento y control quedaban fuera del alcance humano. El hombre se adaptó a ellos, a pesar de su dificultad en comprenderlos, por la necesidad de sobrevivir en el entorno que le rodeaba. Poco a poco aumentó el conocimiento del hombre acerca del entorno en que vivía y con ello su capacidad de alterarlo. Ésta vino de la mano de lo que los filósofos de la antigüedad denominaban “las cinco grandes máquinas”: la rueda, el plano inclinado, la cuña, el tornillo y la palanca.

“Dadme un punto de apoyo y moveré la Tierra”

Esto dijo Arquímedes de Siracusa (287-212 a. de C.), el primero que sistematizó las máquinas simples y expuso la teoría de su funcionamiento. Y del dicho, al hecho. El rey Hiero II había ordenado la construcción del que sería el mayor barco de su época, el *Syrakosia*, que encalló al ser botado. Mandó llamar a Arquímedes y le desafió no a mover la Tierra, sino su barco. Arquímedes diseñó y construyó un sistema de poleas compuestas y palancas situadas en puntos estratégicos del casco, ofreciendo al rey el extremo de la última cuerda. Sin salir de su asombro, el soberano logró desencallar su barco con un simple tirón.

Paralelamente al desarrollo de las sociedades industrializadas fueron proliferando los sistemas creados por el hombre, orientados a facilitar su existencia. Sin embargo, a medida que la complejidad de esos sistemas iba aumentando, resultaba más difícil explicar y predecir su comportamiento; su estudio se convertía en un problema en sí. Se buscaron modelos que los explicaran, en general con escasos resultados. El principal problema no era la ausencia de conocimientos específicos en multitud de disciplinas, sino la incapacidad de estructurar de forma organizada los conocimientos existentes.

Las primeras ciencias fueron la astronomía, la física, las matemáticas y la filosofía. Durante siglos la acumulación del conocimiento

científico existió básicamente como un fin en sí mismo; las ciencias puras tuvieron poco impacto en general en el desarrollo profesional. El Renacimiento marcó la separación de ciencia, religión y filosofía, haciendo posible el enlace entre la física y las profesiones, que culminó en la Revolución Industrial y el comienzo de la Era de las Máquinas.

De la Era de las Máquinas a la Era de los Sistemas

A mediados del siglo XVIII se produjeron, fundamentalmente en Gran Bretaña, una serie de fenómenos de industrialización en serie y comercialización que marcaron el comienzo de la Revolución Industrial. Los estudios de Papin sobre la máquina de vapor, continuados por Newcomen y Watt, y la invención de la hiladora de algodón, entre otros, supusieron un aumento de la producción así como la disminución y especialización de la mano de obra.

Las dos ideas básicas a través de las cuales se trataba de entender el mundo en la Era de las Máquinas eran el reduccionismo y el maquinismo. El reduccionismo, o creencia de que todo puede descomponerse o reducirse en partes indivisibles, dio lugar al enfoque analítico como medio de obtener explicaciones y conocimiento de las cosas. El análisis consistía en dividir aquello a ser estudiado en partes, explicar el comportamiento de cada una de ellas y agrupar esas explicaciones parciales en una que explicara todo el conjunto. Las partes integrantes de un todo eran consideradas independientes unas de otras, lo que constituía una de las principales limitaciones del enfoque analítico. Por otro lado, la idea básica del maquinismo era que todos los fenómenos podían ser explicados a través de una relación causa-efecto. Un suceso era la causa de otro (su efecto) si era necesario y suficiente para éste; por ello no se consideraban nada más que las causas para explicar los efectos.

La Revolución Industrial trajo la sustitución del hombre por la máquina como fuente de trabajo físico. Se desarrollaron máquinas para facilitar el trabajo pero, sin embargo, el trabajo de sus operarios era en

la mayoría de los casos cada vez más rutinario. La deshumanización del trabajo fue en muchos casos la ironía de la Revolución Industrial.

La percepción de que la combinación de varias máquinas de funcionalidades complementarias daba lugar a una funcionalidad resultante, superior a la mera adición de las funcionalidades aisladas de las máquinas empleadas, marcó un punto de inflexión en la capacidad existente de análisis y explicación del comportamiento de las máquinas. La agrupación de varias de ellas suponía un incremento sustancial en la complejidad de los problemas a analizar. La capacidad de explicar un todo a partir del conocimiento de las características de los elementos que lo integraban empezaba a ser seriamente cuestionada.

En el siglo XX, a principios de la década de los 20, un grupo de biólogos comenzó a establecer serias objeciones al reduccionismo. Propugnaban el desarrollo de ideas relativas al organismo como conjunto, en vez de referirse a sus elementos por separado. Uno de los biólogos, Ludwig von Bertalanffy, consideró que las ideas desarrolladas podían ser aplicadas a conjuntos de cualquier naturaleza, que fueron denominados sistemas, a partir del término griego “*systema*” o conjunto organizado.

En la década de los 40 se produjeron una serie de cambios en la forma de entender los sistemas que marcó la transición de la Era de las Máquinas a la Era de los Sistemas. Trabajos como *Cybernetics* de Norbert Wiener (1948), *General Systems Theory* de Ludwig von Bertalanffy (1951), e *Industrial Dynamics* de Jay Forrester (1961), entre otros, supusieron un esfuerzo por crear una teoría interdisciplinar de los sistemas, capaz de proporcionar modelos y métodos de aplicación en todos los campos.

Las características de los sistemas modernos requirieron una evolución de la visión analítica tradicional a una visión sistémica. La visión analítica explicaba un todo a partir del comportamiento de las partes integrantes, mientras que en la visión o enfoque sistémico algo

a ser explicado es considerado como parte integrante de un todo superior –sistema– y es descrito en términos de su relación con éste, de las propias partes integrantes y de las interacciones entre éstas.

Una de las grandes paradojas de la Era de los Sistemas es que, a pesar de la velocidad con que se producen los avances tecnológicos y se desarrollan los conocimientos básicos, la resolución de problemas contemporáneos no se ha vuelto más sencilla. La principal razón es la excesiva especialización, es decir, la tendencia de los profesionales a reducir su ámbito de conocimientos y la tendencia de los científicos a compartimentar sus conocimientos. Los resultados inevitables han sido una duplicidad de esfuerzos e investigaciones en las diferentes disciplinas y una tendencia excesiva a diferenciar resultados más que a contribuir a la unidad de la ciencia.

El principio básico de la Era de los Sistemas establece que un “enfoque sistémico” puede ser satisfactoriamente empleado en el análisis de cualquier sistema. Este enfoque reconoce la necesidad inevitable de establecer compromisos entre los diferentes elementos de un sistema, permitiendo la selección de la mejor alternativa en cada caso. A través del proceso de creación de modelos y de análisis de escenarios, permite la predicción del futuro comportamiento del sistema.

La resolución satisfactoria a un problema requiere encontrar la solución adecuada y en general depende más del enfoque que se le dé al problema que del estado de la ciencia. Una de las principales diferencias entre el enfoque sistémico y el tradicional es la interpretación de los problemas. El enfoque tradicional es inadecuado porque se basa en una metodología orientada al conocimiento y no al problema en sí, a diferencia del enfoque sistémico.

Sin embargo, tampoco la Era de los Sistemas está exenta de su ironía particular. A pesar de la intención de establecer una ciencia holística o general de los sistemas, en las décadas de los 60 y los 70 se produjo una fragmentación de la pretendida visión unificadora de los

sistemas, desarrollándose diferentes metodologías. No obstante, trabajos recientes pretenden volver a establecer una visión interdisciplinar de la ciencia de los sistemas.

Aunque dispone actualmente de medios más sofisticados que aquellos de las primitivas culturas del yunque, el hombre sigue y seguirá siendo un *Homo Faber*.

EL ENFOQUE SISTÉMICO

De entre las múltiples características del enfoque sistémico podrían destacarse siete como esenciales. En primer lugar, permite generar conocimiento acerca del comportamiento de los sistemas, lo que facilita a los gestores información de las consecuencias previsibles de sus diferentes líneas de actuación. Esa capacidad de profundizar en éste conocimiento sin necesidad de afrontar específicamente la resolución de ningún problema en concreto, es una de las características esenciales del enfoque sistémico.

En segundo lugar, existe una consideración teleológica o de las causas finales de los sistemas; es decir, los sistemas desarrollados por el hombre están basados en un propósito u objetivo. Este viene determinado por la necesidad a satisfacer, que constituye la base para la especificación de los requisitos del sistema.

En tercer lugar, el concepto de realimentación se considera esencial en los sistemas teleológicos. La dependencia mutua del comportamiento de las partes de un sistema demanda la realimentación como mecanismo que refleja los efectos que tienen los cambios en las prestaciones de las partes o en las características del entorno que lo rodea sobre el comportamiento del sistema.

En cuarto lugar, los sistemas son multidisciplinarios; ningún sistema es dominio exclusivo de una única disciplina, y su análisis exige un estudio desde tantas perspectivas como disciplinas involucre. Los

análisis monodisciplinares llevan inevitablemente a visiones parciales y sesgadas de los sistemas.

En quinto lugar está el ciclo de vida del sistema, que es considerado desde las etapas iniciales de su concepción y diseño. La consideración durante el diseño de los procesos relacionados con la fabricación, la utilización, el mantenimiento y la retirada del servicio, se conoce como ingeniería concurrente.

En sexto lugar, los sistemas se consideran dinámicos en esencia; el tiempo es un factor esencial que altera el propio entorno del sistema, las prestaciones de las partes integrantes y las relaciones de éstas entre sí y del sistema con su entorno.

Por último, y debido a la creciente limitación de recursos, se considera de forma explícita la relación eficacia/coste como indicador de la utilidad de los sistemas. La eficacia es la medida en que el sistema satisface la necesidad para la que fue diseñado y el coste es el gasto total que el sistema representa para su usuario. En función de la naturaleza de la necesidad, el usuario está dispuesto a aceptar un determinado coste por un cierto nivel de satisfacción de la necesidad.

CARENCIA DE CULTURA DE SISTEMAS

La carencia de una adecuada cultura de sistemas en España se debe, fundamentalmente, a una formación basada en el estudio de las partes y no del todo, así como a la escasa divulgación e intercambio de ideas y experiencias sistémicas.

Una de las principales deficiencias de los sistemas educativos es la enseñanza de las diferentes disciplinas como entes independientes, cuando ningún problema real puede considerarse monodisciplinar. La falta de visión global y de integración de las disciplinas se traduce en una limitada capacidad para el análisis de los modernos sistemas.

Por ejemplo, la adquisición de un sistema complejo es mucho más que un ejercicio de viabilidad económica; un nuevo sistema podrá repercutir sobre el funcionamiento y requisitos del resto de sistemas del usuario, podrá implicar cambios de organización y procedimientos, etc.

Aunque existe abundante literatura de calidad, en inglés fundamentalmente, acerca de la ciencia de los sistemas, no ocurre lo mismo en otros idiomas. La escasez de publicaciones técnicas en castellano referentes a ingeniería de sistemas y a disciplinas relacionadas dificulta la divulgación del conocimiento sobre estas materias.

En línea con lo anterior, la escasez de foros profesionales en España relacionados con la ingeniería de sistemas contribuye a la escasa divulgación de sus fundamentos entre las personas relacionadas con la planificación, adquisición, diseño y explotación de sistemas.



SERIE DE MONOGRAFÍAS SOBRE INGENIERÍA DE SISTEMAS

Con el fin de contribuir a la divulgación en España de los fundamentos de la ingeniería de sistemas, **Isdefe** patrocina el desarrollo de una serie de monografías. El objetivo es dar a conocer las características del enfoque sistémico y las principales metodologías y disciplinas de aplicación en el estudio de los sistemas. El desarrollo de esta serie, parte de las actividades emprendidas por **Isdefe** con motivo de la celebración del 10º Aniversario de su constitución, está específicamente orientado a difundir la experiencia y los conocimientos adquiridos sobre ingeniería de sistemas durante esta década.

Esta serie de monografías puede ser de utilidad a un amplio espectro de profesionales. De una parte va dirigida a los altos niveles de dirección, para quienes la ingeniería de sistemas es la base del análisis de situaciones y de la toma de decisiones. Por otra podrá beneficiar a quienes ocupan los niveles intermedios entre la gestión y la especialidad técnica; a ellos les proporcionará una mayor perspectiva de los sistemas como entes multidisciplinarios complejos, a la vez que una mayor comprensión de algunas de las principales disciplinas

asociadas a la ingeniería de sistemas. Finalmente, interesará a los especialistas en las diferentes disciplinas, para quienes les resultará positiva y enriquecedora una visión más amplia de la naturaleza de los sistemas y de las metodologías existentes.

AUTORES Y TEMAS DE LAS MONOGRAFÍAS DE LA SERIE

Los autores de las monografías son profesionales de reconocido prestigio en sus respectivas disciplinas y con demostrada capacidad de transmitir y comunicar sus ideas y conocimientos. El carácter divulgativo de la serie requería de expertos en las diferentes materias, capaces de sintetizar y exponer de manera clara y amena y no menos rigurosa sus fundamentos. Han sido seleccionados catedráticos de universidades españolas y extranjeras, cuyos departamentos o programas figuran entre los más acreditados internacionalmente, y que han destacado especialmente por su labor docente y su capacidad de crear escuela. La elección de los autores fue especialmente importante, identificándose para cada monografía los mejores especialistas en las correspondientes materias y determinándose de entre ellos el más idóneo en cada caso. Todos los autores cuentan con importantes publicaciones en su haber y participan activamente en foros relacionados con la ingeniería de sistemas.

El primer bloque de monografías de la serie da una visión de carácter generalista, con el fin de mostrar la evolución en el tiempo del concepto de sistema, el enfoque sistémico actual y las posibilidades y ventajas de aplicación de la ingeniería de sistemas a la planificación, adquisición y operación de sistemas modernos. El resto de las monografías de la serie abarcan temas más específicos y, por tanto, de carácter más especializado.

La primera monografía, *Ingeniería de sistemas*, establece los fundamentos de dicha disciplina y sirve de marco de referencia para el resto de monografías de la serie. En ella se define explícitamente la ingeniería de sistemas, se detallan sus características y se enumeran

sus aplicaciones potenciales. El proceso de ingeniería de sistemas es descrito en detalle y se abordan aspectos de organización, planificación y gestión. Es una monografía de corte generalista, orientada a establecer las bases para el resto de la serie.

La *Teoría general de sistemas*, segunda monografía, presenta la evolución del concepto de sistema hasta nuestros días, poniendo el énfasis en las características o aspectos más relevantes de cada enfoque. Entre otros, menciona la mecánica racional, la cibernética y la teoría general de los sistemas. Además, da un repaso sucinto a herramientas de modelado de sistemas tales como la lógica fuerte, la lógica difusa, la algorítmica, la matemática discreta y la investigación operativa.

La tercera monografía de la serie, *Dinámica de sistemas*, describe una de las principales metodologías surgidas en la Era de los Sistemas, caracterizada fundamentalmente por la consideración explícita de los mecanismos de realimentación y del tiempo como factor determinante en las características o prestaciones de los sistemas. Es especialmente útil en el análisis de problemas multidisciplinares y en la generación de conocimiento del comportamiento de sistemas, orientado fundamentalmente a la toma de decisiones.

La monografía *Dinámica de sistemas aplicada* muestra, a través de una serie de ejemplos seleccionados, la variedad de entornos a los que puede aplicarse con éxito el enfoque sistémico. Entre los ejemplos destacan aplicaciones militares, industriales, de planificación de desarrollo, sistemas de transporte, etc.

La *Ingeniería logística*, última monografía de carácter generalista, define el concepto de apoyo logístico integrado, identifica los elementos de apoyo logístico, y detalla las principales actividades relacionadas con cada elemento en las diferentes fases del ciclo de vida. Describe además la integración de los aspectos logísticos en el proceso de ingeniería de sistemas.

Una vez situados en el entorno de la ingeniería de sistemas, las siguientes monografías profundizan en algunos de los aspectos más importantes de los sistemas, tanto desde el punto de vista de su operación y mantenimiento como de los costes asociados. En concreto, entre otros se tratan temas tales como *fiabilidad, mantenibilidad, simulación y CALS/ingeniería concurrente*.

Thomas Carlyle dijo que el libro que no mejore con sucesivas lecturas no merece la pena ser leído. Esperamos que estas monografías sean releídas una y otra vez.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackoff, R. L.:** *Redesigning the Future*. New York: Wiley, 1974.
- Ashby, R.:** *An Introduction to Cybernetics*. London: Methuen, 1964.
- Athey, T. H.:** *Systematic Systems Approach: an Integrated Method for Solving Systems Problems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1982.
- Beam, W. R.:** *Systems Engineering*. New York : McGraw Hill, 1990.
- Blanchard, B. S. & W. J.Fabrycky:** *Systems Engineering and Analysis*, 2nd edition. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1990.
- Blanchard, B. S.:** *Systems Engineering Management*. New York: Wiley, 1991.
- Chase, W. P.:** *Management of Systems Engineering*. New York: Wiley, 1974.
- Checkland, P. B.:** *Systems Thinking, Systems Practice*. Chichester, U. K.: Wiley, 1981.
- Chestnut, H.:** *Systems Engineering Methods*. New York: Wiley, 1967.
- Churchman, C. W.:** *The Systems Approach*. New York: Dell Publishing Co., 1968.
- Emery, F. E. (ed.):** *Systems Thinking: Selected Readings*. Harmondsworth, U. K.:Penguin, 1969.
- Flood, R. L. & M. C. Jackson (eds.):** *Critical Systems Thinking: Directed Readings*. Chichester, U.K.: John Wiley, 1991.
- Forrester, J. W.:** - *Principles of Systems*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press, 1968.
- *Urban Dynamics*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press, 1969.
- *World Dynamics*. Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press, 1971.
- Hall, A. D.:** *A Methodology for Systems Engineering*. Princeton, N. J.: Van Nostrand, 1962.
- Jackson, M. C.:** *Systems Methodology for the Management Sciences*. New York: Plenum, 1992.
- Kuhn, T. S.:** *The Structure of Scientific Revolutions*, 2nd edition. Chicago: University of Chicago Press, 1970.
- Machol, R. E. (ed.):** *Methodology of Systems Engineering*. New York : McGraw Hill, 1965.
- Meadows, D. L. D. H. Meadows, J. Randers & W. W. Behrens:** *Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972.
- Popper, K. R.:** - *Conjectures and Refutations : the Growth of Scientific Knowledge*. New York: Harper and Row Co., 1963.
- *Objective Knowledge: an Evolutionary Approach*. New York: Harper and Row Co., 1972.
- *The Logic of Scientific Discovery*. New York: Harper and Row Co., 1976.
- Sandquist, G. M.:** *Introduction to Systems Science*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1985.
- Von Bertalanffy, L.:** *General Systems Theory*. New York: George Braziller, 1968.
- Wiener, N.:** *Cybernetics*. New York: Wiley, 1948.
-

*Este folleto de
PRESENTACIÓN
a la serie de
monografías sobre
INGENIERÍA de SISTEMAS,
se terminó de imprimir el día
30 de noviembre de 1994.*

Diseño:
HB&h Dirección de Arte y Edición.

Infografía de portada:
Salvador Vivas.

Fotomecánica:
Microprint, S.A.

Impresión:
Gráficas Marte, S.A.

Depósito Legal:
M-35741-1994