

ISIDORO G. GARCÍA VACA

ANATOMÍA DE SISTEMAS

Su análisis y su apoyo



Agradecimientos	IX
Introducción	XV
Siglas utilizadas	XVII

PRIMERA PARTE

Disponibilidad física de sistemas

1. Los sistemas	3
Generalidades	3
<i>Teoría general de los sistemas.....</i>	4
<i>Método sistémico.....</i>	4
Los sistemas de producción	8
Representación de los sistemas	11
<i>Diagramas funcionales.....</i>	11
<i>Árbol de Elementos Configurados (AEC).....</i>	13
<i>Diagramas de bloques de fiabilidad.....</i>	18
Utilidad y efectividad de los sistemas	19
Ciclo de vida	22
<i>Plan de uso.....</i>	25
<i>Coste del ciclo de vida</i>	30
<i>Métodos de estimación del coste del ciclo de vida.....</i>	36
<i>Optimización y análisis de sensibilidad del coste del ciclo de vida</i>	41
2. Configuración de sistemas	45
Generalidades	45
Configuración	47
Gestión de la configuración	49
<i>Identificación de la configuración</i>	49
<i>Registro de la configuración.....</i>	50
<i>Control de la configuración. Los cambios.....</i>	50
<i>Validación de la configuración. Auditorías.....</i>	51
3. Disponibilidad	53
Generalidades	53
Disponibilidad operativa	54

Asignación de la disponibilidad inherente	57
Cálculo de la disponibilidad inherente	58
4. Fiabilidad.....	61
Generalidades	61
<i>La fiabilidad como función del tiempo</i>	62
Ingeniería de fiabilidad.....	65
<i>Requisito de fiabilidad</i>	67
<i>Asignación de la fiabilidad</i>	67
<i>Demostración de la fiabilidad</i>	70
<i>Validación de la fiabilidad</i>	71
Fiabilidad de sistemas	72
<i>Cálculo de la fiabilidad</i>	73
<i>Diagramas de bloques de fiabilidad</i>	74
<i>Estructuras básicas en fiabilidad</i>	75
5. Mantenibilidad	79
Generalidades	79
<i>Métricas de mantenibilidad</i>	80
<i>Tiempos de reparación</i>	81
<i>Tratamiento estadístico de los tiempos de reparación</i>	82
Ingeniería de mantenibilidad	87
<i>Actuación sobre el diseño</i>	88
<i>Cálculo de la mantenibilidad</i>	91
<i>Asignación de la mantenibilidad</i>	92
<i>Predicción de la mantenibilidad</i>	94
<i>Validación de la mantenibilidad</i>	96
<i>Casos reales sobre ingeniería de mantenibilidad</i>	100
6. Soportabilidad	103
Generalidades	103
Estimación de la soportabilidad	106
Gestión del apoyo	109
Histórico de fallos y acción correctora	110
7. Seguridad	111
Generalidades	111
Sucesos catastróficos.....	111
Requisito de seguridad.....	115
Análisis por árboles de fallos.....	116
8. Ciclo RAMSS	119
Generalidades	119
Evaluación de RAMS.....	121

Simulación	121
<i>Modelo de programa de simulación</i>	122
<i>Informes de resultados del programa</i>	128

SEGUNDA PARTE

Apoyo logístico integrado

9. Apoyo logístico integrado (ALI)	133
Generalidades	133
Los elementos logísticos.....	134
El apoyo al producto.....	136
Plan de apoyo logístico integrado	139
10. Análisis de apoyo logístico	143
Generalidades	143
Configuración logística	144
<i>Identificación de la configuración logística</i>	144
<i>Nivel de descomposición física</i>	145
<i>Reglas básicas de descomposición</i>	146
<i>Clasificación de los elementos configurados</i>	146
<i>Elementos de significación funcional</i>	146
<i>Grado de esencialidad de los elementos configurados</i>	150
Análisis de modos y efectos de los fallos y su criticidad.....	152
<i>Causas, efectos y consecuencias</i>	154
<i>Criticidad</i>	156
Mantenimiento centrado en la fiabilidad.....	158
<i>Proceso de fallo versus tarea de mantenimiento</i>	163
<i>Las tareas de mantenimiento</i>	165
<i>Las tareas de mantenimiento correctivas</i>	166
<i>Las tareas de mantenimiento preventivo programadas</i>	169
<i>Las tareas de mantenimiento preventivo predictivas</i>	176
<i>Procedimiento de análisis de RCM</i>	183
<i>Planificación de las periodicidades de las tareas de mantenimiento</i>	189
<i>Codificación de las tareas de mantenimiento</i>	190
Análisis de las tareas de mantenimiento.....	192
<i>Índice de las tareas de mantenimiento</i>	192
<i>Descripción de las tareas de mantenimiento y su duración</i>	193
<i>Requisitos para la ejecución de las tareas de mantenimiento</i>	193
<i>Materiales empleados en la ejecución de las tareas de mantenimiento</i> .	194
Análisis del nivel de reparación.....	195
<i>Preguntas</i>	196
Base de datos logísticas	200

11. Mantenimiento	201
Generalidades	201
El proceso de mantenimiento	202
El mantenimiento, la disponibilidad y la seguridad.....	203
El mantenimiento y el apoyo logístico integrado	205
Concepto de mantenimiento	206
Los retrasos logísticos.....	209
12. Estrategias de mantenimiento	211
Generalidades	211
Mantenimiento basado en el fallo	212
Mantenimiento basado en la vida operativa.....	212
Mantenimiento basado en la condición.....	213
<i>La inspección</i>	215
<i>El examen</i>	216
<i>El control continuo de la condición</i>	216
Tecnologías avanzadas de mantenimiento preventivo.....	218
<i>Técnicas de vigilancia de la condición</i>	218
<i>Técnicas de ensayos no destructivos</i>	220
<i>Técnicas de diagnóstico mediante sistemas digitales</i>	221
Mantenimiento basado en la oportunidad	221
Mantenimiento adaptativo	222
13. Plan de mantenimiento	223
Generalidades	223
Contenido del plan de mantenimiento	223
Documentación de mantenimiento	225
Recursos y medios de mantenimiento	225
Ayudas informáticas para la gestión del mantenimiento	226
Mantenimiento del software.....	227
Externalización del mantenimiento.....	228
14. Costes del mantenimiento	231
Generalidades	231
Coste de la política de mantenimiento correctivo	231
Coste de la política de mantenimiento preventivo	232
Anexo A: modelo de captura de datos logísticos	235
Bibliografía	243

INTRODUCCIÓN

Transmitir conocimientos. Ese ha sido el principal motivo que me ha llevado a elaborar este manual. Conocimientos que he ido adquiriendo a lo largo de mi vida profesional tanto por mi participación en el diseño y construcción de sistemas complejos, como son los buques mercantes y de guerra, como por el desarrollo de una de las actividades que más curiosidad e interés técnico suscitó en mí y que además, dicha actividad, fue directamente mi responsabilidad en la empresa donde he desarrollado toda mi labor profesional como ingeniero naval: el diseño de planes de apoyo logístico integrado para dichos sistemas. Todo ello complementado con las reflexiones y especulaciones que me han sugerido, tanto mis experiencias ingenieriles y docentes, como la lectura de un conjunto variopinto de documentos, informes técnicos y libros.

De lo que transmito, poco es invención mía ya que, primero, no soy un científico ni un investigador, me considero simplemente un ingeniero aplicador de conocimientos y métodos científicos y técnicos, y segundo, siempre he creído que para la estructuración de cualquier tipo de conocimiento personal a transmitir, la pura invención tampoco existe, ya que siempre hay algún tipo de información (reflexión o pensamiento) precedente que nos inspira dicha estructuración. Por ello considero que lo que este manual contiene es, simplemente, una recopilación de los conocimientos e información adquirida por mí y estructurados con mi particular visión de los mismos. Por otra parte, el manual en sí tiene más carga divulgativa y práctica que profundidad tecnológica ya que las modelizaciones y formulaciones matemáticas, que en él aparecen, están presentadas en formatos simplificados, evitando excesivas complejidades matemáticas.

El contenido del manual va dirigido fundamentalmente a ingenieros en plena actividad de su profesión, a profesores de universidad que imparten conocimientos científico-técnicos y/o logísticos, y a estudiantes de cualquier carrera de ingeniería para los que introducirse en la realidad operativa de los sistemas artificiales y en el apoyo que necesitan para el desarrollo de su operación, es tan importante como el conocimiento de los métodos de desarrollo de las funcionalidades de los mismos. Es obvio que con ello pretendo acercarlos más a la realidad de los sistemas, a su vida operativa y a toda la serie de circunstancias que concurren en el transcurrir de la misma, ya que los conocimientos científicos y técnicos que se imparten en las universidades (me refiero a las españolas, que son las que conozco) van mucho más dirigidos al conocimiento de las funcionalidades del objeto o

sistema a diseñar y obtener, que a su anatomía o configuración física, por lo que se obvia informar sobre la necesidad de realizar análisis preliminares, durante la fase de diseño y construcción, sobre: a) su ciclo de vida y el coste asociado; b) las necesidades de apoyo requeridas por su anatomía y por su operatividad; y c) su comportamiento frente a requisitos o valores de mérito tales como disponibilidad, fiabilidad, mantenibilidad, etc.

Por otra parte, he creído oportuno impregnar toda la información que transmito de una base paradigmática sistémica. Pretendo, con ello, que el pensamiento sistémico de L. von Bertalamffy tenga tanta importancia como el pensamiento mecanicista de Descartes y Newton, en la estructuración del conocimiento científico y técnico actual.

SIGLAS UTILIZADAS

SIGLAS	ESPAÑOL	INGLÉS
AAL/LSA	Análisis de Apoyo Logístico	Logistic Support Analysis
Ao	Disponibilidad Operativa	Operational Availability
Ai	Disponibilidad Inherente	Inherent Availability
AEC	Árbol de Elementos Configurados	Configurated Items Tree
BPR	Reingeniería	Business Process Reengineering
BS	Estructura Ramificada	Breakdown Structure
Ca	Costes de Adquisición	Acquisitions Costs
CAD	Diseño Asistido por Ordenador	Computer-aided Design
CAE	Ingeniería Asistida por Ordenador	Computer-aided Engineering
CAM	Gestión Asistida por Ordenador	Computer-aided Management
CBS	Estructura Ramificada del Coste	Cost Breakdown Structure
CE	Ingeniería Concurrente	Concurrent Engineering
CIM	Fabricación Integrada por Ordenador	Computer Integrated Manufacturing
Co	Capacidad Operativa	Operational Capacity
CO	Costes de operación	Operational Costs
Cm	Costes de mantenimiento	Maintenance Costs
CSDB	Base de datos Común	Common Source Data Base
Cr	Costes de retirada	Disposal Costs
Do	Confiabilidad Operativa	Operational Dependability
DTD	Definición de tipo de Documento	Document Type Definition
EC	Elemento Configurado	Configurated Item
FMECA	Análisis de la Criticidad los Efectos y los Modos de los Fallos	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FTA	Análisis del Árbol de Fallos	Fault Tree Analysis
IETM	Manuales Electrónicos Interactivos	Interactive Electronic Technical Manual
I+D	Investigación y Desarrollo	Research and Development
ILS	Apoyo Logístico Integrado	Integrated Logistic Support
IT	Tecnologías de Información	Information Technologies

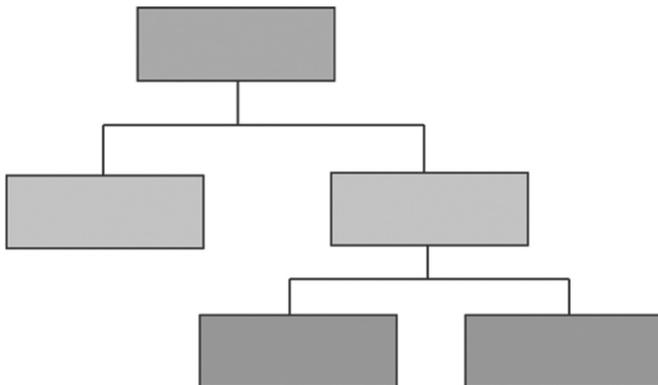
SIGLAS	ESPAÑOL	INGLÉS
LC	Ciclo de Vida	Life Cycle
LCC	Coste del Ciclo de Vida	Life Cycle Cost
LRU	Unidad de reemplazamiento en línea	Line Replaceable Unit
LSA/AAL	Análisis de Apoyo Logístico	Logistic Support Analysis
MC	Marca de Clasificación	Classification Code
MF	Marca Funcional	Functional Code
MLDT	Tiempo Medio de Retrasos Logísticos	Mean Logistic Delay Time
MTBF	Tiempo Medio Entre Fallos	Mean Time Between Failures
MTTR	Tiempo Medio De Reparación	Mean Time To Repair
MRP	Planificación de las Necesidades de Material	Material Requirements Planning
NC	Control Numérico	Numeric Control
PDM	Gestión de Datos del Producto	Product Data Management
QFD	Despliegue de la Función de Calidad	Quality Function Deployment
RAMSS	Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, Soportabilidad y Seguridad	Reliability, Availability, Maintainability, Supportability and Safety.
Ro	Apresto Operativo	Readiness
RL	Retrasos Logísticos	Logistic Delay
SE	Eficacia del Sistema	System Effectiveness
SGML	Norma ISO para el Lenguaje Marcado y Generalizado	Standard Generalized Markup Language
STEP	Norma ISO para el Intercambio de Datos del Producto	Standard for Exchange of Product data (ISO 10303)
TAR	Tiempo Activo de Reparación	Repair Active Time
TPM	Mantenimiento Total de la Producción	Total Productive Maintenance
TQM	Gestión de la Calidad Total	Total Quality Management
WBS	Estructura Ramificada de Actividades	Work Breakdown Structure

PRIMERA PARTE

DISPONIBILIDAD FÍSICA DE SISTEMAS

La aniquilación más completa de todo tipo de discurso consiste en separar a cada cosa de las demás, pues el discurso se originó, para nosotros, por la combinación mutua de las formas.

Diálogo “Sofista” de PLATÓN



LOS SISTEMAS

Sistemas por doquier

Si alguien se propusiera analizar las palabras y muletillas de moda, hoy por hoy, sería “sistema” una de las primeras de la lista. El concepto “sistema” ha invadido todos los campos de la ciencia y la tecnología y penetrado en el pensamiento y el habla populares y en los medios de comunicación de masas.

L. VON BERTALANFFY

GENERALIDADES

Los sistemas aparecen por doquier como naturales, sociales, artificiales, empresariales, complejos, etc. Pero además, todos los objetos que observamos en nuestro planeta pueden ser contemplados como sistemas, por lo que, conceptualmente, ¿cómo percibimos al sistema?

En la visión de la realidad que nos rodea, la unicidad existencial que asociamos a los objetos que vemos, contemplamos e incluso analizamos no debería ser un obstáculo para captar su complejidad. La enorme cantidad de partes e interrelaciones que intervienen en la estructura de cualquier objeto quedan ocultas frente a esa unicidad y es por ello por lo que en cualquier tipo de sistema su simplicidad o complejidad es siempre relativa a como lo contempla el observador. El elemento más simple que integra la materia, el átomo, es, desde un punto de vista de un científico, de una enorme complejidad, y para el vulgo es el elemento unitario que forma parte de la estructura de cualquier tipo de materia existente en la naturaleza.

El concepto de sistema es, por lo tanto, una abstracción que simplifica la realidad y que remite a un conjunto de elementos o partes que interaccionan dinámicamente entre sí y con el entorno que le rodea, que tiene una cierta permanencia dentro del espacio-tiempo y que intenta alcanzar un objetivo concreto.

Para describir adecuadamente el comportamiento de un sistema es necesario conocer, en el tiempo, su organización, es decir, la disposición de los elementos que la componen, como la parte más estática-espacial-estructural; y las interacciones o relaciones que se establecen entre ellos, como la parte más dinámica-funcional.

En este manual solamente trataremos de los sistemas artificiales (excluimos todo tipo de sistema social) y de estos exclusivamente la parte “espacial-estática-estructural”, es decir, su anatomía física y material.

Un sistema artificial lo podemos definir, de forma genérica, como:

“Conjunto integrado de personas, productos y procesos de cuyas interrelaciones y dinámica emerge una capacidad que permite satisfacer una necesidad o cumplir con un objetivo.”

Sin embargo y de cara a nuestros propósitos, entenderemos como sistema artificial a un conjunto de equipos/componentes organizados e interrelacionados, mediante elementos de interconexión, que tienen como fin desarrollar una determinada función. Dicho sistema, normalmente, estará incluido dentro de otro sistema de orden superior o de mayor complejidad, en el que coopera para un determinado fin.

Un sistema complejo es todo sistema que, por sus dimensiones físicas, por la cantidad de especialidades científicas y tecnológicas que intervienen en su diseño y construcción, o por su coste, así se califica. Ejemplos: avión, barco, central nuclear, satélite artificial, factoría industrial, ferrocarril, etc.

Aunque todo sistema artificial complejo esté formado, en su parte “espacial-estática-estructural” por: a) un complemento físico (hardware), b) un complemento lógico (software), c) un complemento humano (operadores/mantenedores), y d) un complemento logístico (apoyo logístico), en el análisis que proponemos en este manual, solamente trataremos aspectos relacionados con los complementos físico y logístico.

Teoría general de los sistemas

Desde que en 1947, cuando Ludwing von Bertalanffy enunció y definió la Teoría General de los Sistemas, se puso de manifiesto que las interacciones entre los componentes que configuran los sistemas u objetos es el aspecto fundamental que, concurriendo en todo tipo de sistemas naturales y artificiales, ha provocado un cambio de visión sobre la naturaleza y sobre todo lo que se obtiene mediante la actividad humana.

Dentro del ámbito de la ciencia y la tecnología la visión estática de la realidad ha sido la imperante durante los siglos XVII-XIX y parte del XX, salvo raras excepciones, debido al *método mecanicista* desarrollado por Descartes en el siglo XVII, con su *Discurso del método*, y puesto en práctica tanto por Newton como por Galileo.

De forma metódica, Descartes, en su *Discurso del método para dirigir adecuadamente la razón e investigar la verdad en las ciencias* (1637), propuso los siguientes cuatro preceptos:

- *Reduccionista*. Dividir en partes cada problema complejo en estudio y superponer a continuación los resultados obtenidos en las partes analizadas para obtener la solución al problema.

- *Causalista*. Comenzar los estudios por los aspectos, o causas, más simples y fáciles de reconocer, aumentando posteriormente la dificultad para estudiar otros más complejos.
- *Exhaustividad*. Hacer una revisión de los aspectos del fenómeno analizado, tan amplia y general como sea posible.
- *Evidencia*. Nada debe ser reconocido como cierto a menos que se reconozca evidentemente como tal.

La teoría mecanicista de la ciencia y fundamentalmente mediante su precepto “reduccionista”, nos ha proporcionado métodos para conocer las partes que configuran los objetos, lo que ha supuesto una extraordinaria especialización en el conocimiento de la naturaleza y un entender los objetos y sistemas artificiales como un conjunto de funcionalidades independientes, lo que ha supuesto, a su vez, conocimientos de alta especialización. Este hecho tuvo tanta influencia en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el siglo pasado, que hasta la industria se ha visto afectada por él, y en la que su aplicación, proporcionó tantos éxitos al principio como fracasos posteriores y es que, como ya dijo Platón en su diálogo “Sofista”: *La aniquilación más completa de todo tipo de discurso consiste en separar a cada cosa de las demás, pues el discurso se originó, para nosotros, por la combinación mutua de las formas*, lo que nos permite asegurar que la separación de las partes rompe sus interrelaciones y ello supone no contemplar ni comprender plenamente el objeto o sistema.

Método sistémico

A partir de la década de 1960, año en el que se publicó la *Teoría general de los sistemas* del biólogo L. von Bertalanffy, un nuevo enfoque del conocimiento se añade al mecanicista ya existente y que sin invalidarlo se superpone a él y coopera en un mejor conocimiento de la realidad. Este nuevo enfoque de la ciencia se denomina *Método sistémico*.

Este método, en ciencia, propone entender toda la realidad de forma globalizada y a los objetos que la pueblan como conjuntos de componentes que se interrelacionan entre sí formando sistemas, sistemas que interactúan entre ellos, sistemas que forman parte de otros sistemas de orden superior, sistemas y más sistemas.

En el método sistémico es necesario destacar y comprender los siguientes aspectos que le caracterizan:

- *Interrelaciones*. Son los diferentes tipos de intercambio de materia, energía o información que se producen entre los componentes de los sistemas y de estos con el entorno. El conocimiento y análisis de estas interacciones, añadido al conocimiento exhaustivo de los componentes, nos permite comprender el porqué de las características emergentes de los sistemas.

La teoría general de los sistemas afirma que las propiedades de los mismos no pueden ser descritas significativamente en términos de sus componentes separados. La comprensión de los sistemas solamente se presenta

cuando, además, se estudian los sistemas globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus subsistemas y componentes.

- *Emergencias.* Características de los sistemas (o prestaciones en los sistemas artificiales para las que han sido concebidos) que emergen a causa de las interrelaciones entre sus componentes y las de estos con el entorno, las cuales no forman parte de las características de cualquiera de ellos. Estas características emergentes avalan el que un sistema es algo más que la suma de sus partes: “El todo es algo más que la suma de las partes” como ya afirmó, en su momento, Aristóteles en su *Física*.

Un ejemplo radical y sencillo: conjunto de moléculas de H₂O en un entorno que se mantiene en el intervalo de temperaturas [>0 ; <100], es un líquido, el agua; sin embargo las moléculas de sus componentes, H y O, en ese mismo intervalo, son gases.

- *Complejidad.* El proceso evolutivo de cualquier tipo de sistemas (naturales o artificiales), se debe siempre a la agregación de nuevos componentes, los cuales provocan nuevas interrelaciones, por lo que se produce un incremento de la complejidad del mismo. Este incremento de la complejidad supone, de facto, una transformación de la cantidad en cualidad por la aparición de nuevas emergencias o por mejoras en las capacidades y prestaciones, así como por un mayor control de la dinámica del propio sistema.

La complejidad de los sistemas alcanza su límite cuando se supera el estado de equilibrio dinámico y aparecen síntomas de procesos de caos. La tendencia al caos es evitada por el efecto de la sinergia, es decir, por un incremento de intercambio fuerte de información.

La complejidad de los sistemas naturales, para cuyo estudio y análisis se requiere concurrencia de especialidades científicas y visión holística¹, es una extraordinaria fuente de conocimientos para el hombre como diseñador de sistemas artificiales.

- *Isomorfismo.* La teoría general de los sistemas ha puesto en evidencia la existencia de propiedades generales comunes similares entre los distintos tipos de sistemas naturales y artificiales. Estas similitudes permiten el desarrollo de modelos matemáticos de aplicación común que ponen de manifiesto el isomorfismo existente en los mismos.

Las modelizaciones fenomenológicas en distintos tipos de sistemas pretenden, por comparaciones sucesivas, una aproximación metodológica en las ciencias y, a la vez que facilitan la identificación de los elementos equivalentes o comunes, una constatación de la correspondencia biunívoca entre los métodos de análisis de las mismas.

- *Irreversibilidad.* El concepto de irreversibilidad en termodinámica se aplica a aquellos procesos que, como la entropía, no son reversibles en el tiem-

1 Holismo. Del griego *holos* = todo. Es una manera de conceptualizar la realidad, mediante la cual su análisis y su modelización deben tener en cuenta la multitud de interrelaciones que se dan en ella, tanto si son visibles y captables como si son ocultas e invisibles. El término fue acuñado por Jan Smuts en 1926 (Sudáfrica).

po. Desde esta perspectiva termodinámica, todos los procesos naturales son irreversibles. Nada es reversible en la naturaleza, la flecha del tiempo está ahí.

La energía de transformación que se activa cuando los componentes de un sistema interactúan entre sí al cambiarlo de un estado a otro, nunca es recuperada si el proceso se invierte, debido a la pérdida y disipación de energía calorífica.

Un sistema aislado es un sistema que no mantiene una relación con el ambiente ni con el resto de los sistemas que le rodean, por lo tanto no intercambia materia, energía o información con el entorno. No existen sistemas aislados en el universo, excepto quizás el universo en sí. A pesar de todo, la capacidad de nuestro pensamiento y con la ayuda de las matemáticas, desarrolla modelizaciones reversibles de procesos del mundo real, aunque ese mundo real material nos muestre a nuestros sentidos que nunca hay vuelta atrás.

- *Teleología.* Del griego *teleo = fin*, y *-logía*; es el estudio de los fines o propósitos de cualquier objeto, producto o sistema. Todo producto o sistema artificial es concebido, diseñado y construido con una finalidad y propósitos concretos, es decir, orientados a un fin. Son por lo tanto sistemas teleológicos.

La doctrina filosófica que ampara este concepto es la “doctrina de las causas finales”. Causa final: aquello para lo que existe un objeto. Tanto para Aristóteles como para muchos otros autores antiguos la causa final era muy importante para una explicación filosófica completa del universo; sin embargo, actualmente, no hay en absoluto acuerdo filosófico alguno en cuanto a la finalidad de los sistemas naturales o de la propia naturaleza.

- *Sinergia.* Es un efecto cuantificable del incremento en la capacidad y en la calidad de las prestaciones de los sistemas, como consecuencia de unas interacciones fuertes entre sus componentes, que suponen la maximización del aprovechamiento de las cualidades aportadas por cada uno de ellos. Es decir, en un sistema se produce sinergia cuando el efecto de varias causas es superior a la suma de los efectos de cada una de ellas.

El intercambio fuerte de materia, energía e información entre los componentes del sistema provoca la sinergia, pero fundamentalmente es la información la que mayor efecto tiene.

- *Jerarquización inclusiva.* Los sistemas se pueden combinar, o integrarse entre sí, para cooperar en un nuevo y determinado fin, el cual se cumple por las nuevas emergencias que aparecen con las interrelaciones que se generan.

Los sistemas y sus componentes, que generan sistemas de orden superior, se organizan jerárquicamente en procesos de inclusión.

- *Ciclo de vida.* Al concebir los sistemas con una determinada finalidad y para que la misma sea susceptible de ser cumplida, ello nos obliga a contemplar el mismo en toda su existencia (ciclo de vida), desde que nace

como concepto de producto que va a cubrir una necesidad, hasta que muere y es desechado como objeto operativo.

El análisis y estudio del ciclo de vida de un sistema teleológico es extraordinariamente importante en las primeras etapas de su proceso de obtención.

La aplicación de este método en diferentes ámbitos de la actividad humana ha provocado la aparición de una nueva forma de pensar y analizar la realidad denominada *Pensamiento sistémico*:

“El Pensamiento Sistémico es la actitud del ser humano que se basa en la percepción del mundo real en términos de globalidades para su análisis, comprensión y actuación, a diferencia del planteamiento del método científico clásico o mecanicista, que solo ha percibido partes de este y de manera inconexa.

El pensamiento sistémico es integrador, tanto en el análisis de las globalidades como en las conclusiones que nacen a partir de él, proponiendo soluciones en las cuales se tienen en consideración los componentes físicos, sus interrelaciones y la dinámica de las funciones desarrolladas por el objeto u organización al que definimos como “sistema”, así como también de todo aquello que conforma el entorno del sistema definido. La base filosófica que sustenta esta posición es el Holismo.

La realidad es única para todos los seres vivos y se presenta ante nosotros del mismo modo, sin embargo la forma en que la vemos, la interpretamos y la entendemos, depende del parámetro espacio-temporal en el que nos movemos y del entorno social y cultural en el que estamos inmersos. Bajo la perspectiva del enfoque sistémico, la realidad que concibe el observador que aplica esta disciplina se establece mediante una relación muy estrecha entre él y el objeto observado, de manera que su “realidad” es producto de un proceso recurrente entre él y el objeto observado, en un espacio-tiempo determinados, constituyéndose dicha realidad en algo que ya no es externo al observador y común para todos. La consecuencia de esta perspectiva sistémica es que hace posible ver al objeto, u organización, ya no como que tiene un fin predeterminado (por alguien), como lo plantea el esquema tradicional, sino que dicho objeto, u organización, puede tener diversos fines en función de la forma cómo los involucrados en su destino lo vean, surgiendo así la variedad interpretativa del mismo.

Debido a esa variedad de enfoques interpretativos y en relación con los objetos creados por el hombre, surge la necesidad de una concurrencia multidisciplinaria para la correcta definición de los mismos, máxime si, además, tenemos en cuenta la variedad de funcionalidades que concurren en su diseño, obtención y utilización.”²

LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Dentro del ámbito de los sistemas artificiales, los sistemas de producción forman un gran conjunto y con un amplio espectro de complejidades. Al tener estos una gran importancia para el desarrollo de la vida del hombre, consideramos que el conocimiento y la aplicación de los análisis que se proponen en este manual, para ser aplicados a la configuración física de los mismos, tienen una gran importancia

2 Recopilación de textos procedentes de diversos documentos encontrados en Internet.

de cara al cumplimiento de la vida útil esperada de los mismos. Conozcamos algo más de este gran conjunto de sistemas comenzando por el principio.

El hombre, a lo largo de su existencia, trata de obtener productos que satisfagan las necesidades que continuamente le surgen, o mejor, como dijo A. Einstein: “Todo lo que la raza humana ha realizado y pensado está relacionado con la satisfacción de necesidades y el alivio del dolor”. Si focalizamos este pensamiento solo en el ámbito mercantil nos encontramos con que una gran cantidad de necesidades son satisfechas por productos; productos que el hombre obtiene mediante los *sistemas de producción*. Un sistema de producción es, por lo tanto y en principio, un bien de explotación que nos va a servir para satisfacer la necesidad de producir bienes o servicios, con un determinado nivel de rentabilidad, durante el periodo de su vida útil.

Sobre lo dicho por A. Einstein, los que estamos involucrados en el estudio de los sistemas, necesitaríamos ampliar algo más su frase para entender y aclarar el efecto que causa el tiempo en el hecho de la satisfacción. Es decir que, tanto si los productos son bienes de uso y consumo como si son bienes de explotación, la satisfacción y/o alivio la deben dar durante la mayor cantidad de tiempo posible del periodo de vida útil esperada de esos bienes, utilizados o a utilizar. Por ello, la vida útil, debe ser un factor previsible que debemos tener muy presente en toda las decisiones a tomar durante las fases de obtención del producto, ya que el que esa vida previsible no se cumpla con la satisfacción esperada quiere decir, en la mayoría de los casos, que se han cometido errores en la toma de esas decisiones preliminares.

(Antes de avanzar es necesario tener claro que, en el ámbito de los sistemas de producción, un mismo sistema es un “sistema producto” durante las fases de obtención del mismo –diseño y construcción– y es un “sistema de producción” en su vida útil u operativa, ya que durante la misma permite, a su vez, obtener nuevos “sistemas producto” o simplemente productos. Esta realidad nos remite al bucle recurrente de *sistemas de producción* → *productos*, véase Figura 1.1).

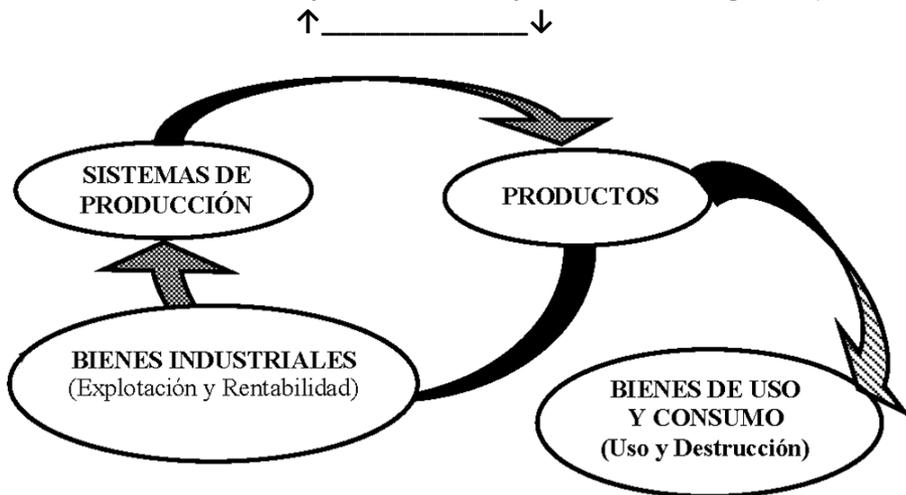


Figura 1.1. Bucle recurrente.

Para que esa vida previsible pueda ser alcanzada, es fundamental que el sistema esté compuesto y organizado, en su parte “espacial-estática-estructural” (es decir, su configuración física), de elementos que permitan dicho objetivo, lo que significa que esos elementos han de tener a su vez una vida igual o superior a la prevista para el sistema del que forman parte y si ello no es así debe ser posible sustituirlos cuando convenga, a fin de que el objetivo de la vida prevista del sistema se cumpla.

Por otra parte, y esto es común a todos los sistemas creados por el hombre, la satisfacción de las necesidades (la rentabilidad, para los sistemas de producción) se debe a que mediante la realización de sus funciones (funcionalidad) bajo unas condiciones especificadas (condiciones operativas o entorno operativo), suministran las prestaciones (o rentabilidad) requeridas. Por consiguiente, se deben reunir los aspectos de *funcionalidad*, *entorno operativo* y *prestaciones* a fin de obtener una imagen completa del sistema que satisfaga la necesidad. Véase Figura 1.2.

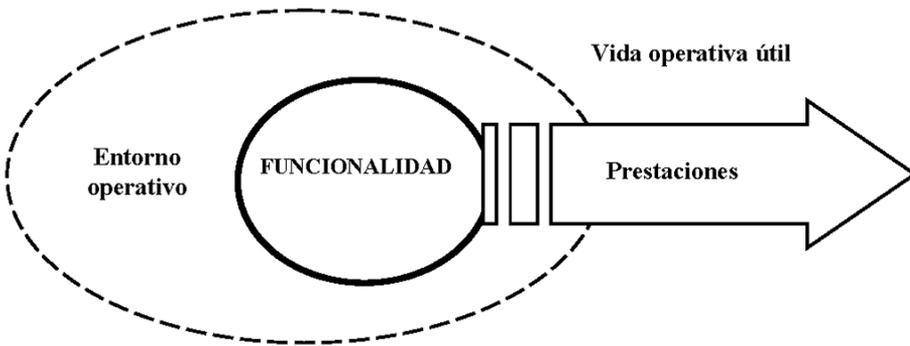


Figura 1.2. Operatividad de los sistemas.

La cualidad inherente de los sistemas que reúnen dichos aspectos se denomina *operatividad*. Por ello decimos que un sistema está *operativo* si dispone, en el momento que estamos considerando, de dicha cualidad y decimos que está *inooperativo* si ocurre lo contrario.

El hecho de que sea prácticamente imposible diseñar sistemas que dispongan permanentemente de la cualidad de la operatividad, implica la necesidad de realizar determinadas acciones para devolverles dicha cualidad cuando la han perdido. La capacidad que tienen los sistemas de recuperar la operatividad se debe a que sobre los mismos inciden hechos y aspectos tales como fallos, averías, fiabilidad, mantenibilidad, mantenimiento, seguridad, adaptabilidad, etc.; conceptos que entran de lleno en la Ingeniería de Sistemas³ y en el ámbito de los conocimientos y análisis que se proponen en este manual.

3 Ingeniería de Sistemas. Se trata de un nuevo enfoque interdisciplinar de diseño de sistemas complejos con el propósito finalista de optimizarlos. Es una ingeniería que aplica tecnológicamente la Teoría General de los Sistemas o paradigma sistémico.

REPRESENTACIÓN DE LOS SISTEMAS

Cuando se pretende construir un objeto o sistema que deba satisfacer a una necesidad surgida, el primer paso a dar es definirlo mediante un conjunto de datos e información que nos van a permitir tener una idea muy clara de cómo va a ser su anatomía en la realidad y de cómo esperamos que sea su comportamiento dinámico durante el periodo de su vida útil.

Dentro de esa información, los procedimientos de diseño que utilizamos para su representación permiten contemplar fácilmente aspectos tales como las interrelaciones que se van a dar entre los distintos componentes del sistema, la influencia que tienen y ejercen unos sobre otros y sobre el sistema en su conjunto, etc. Veamos los procedimientos de diseño y representación de los sistemas que nos interesan para el objeto de este manual.

Diagramas funcionales

La más genuina y normal representación de los sistemas es mediante su diagrama funcional (también denominado esquema funcional). Este consiste en representar todo el sistema en uno o varios diagramas, en los que se visualizan todos los componentes físicos del mismo, representados por figuras geométricas, símbolos o iconos, y todas las vías de intercambio de materia, energía o información.

El objetivo principal de esta representación es el conocimiento exhaustivo de todas las interrelaciones que se van a desarrollar entre los componentes de la anatomía del sistema y también las interrelaciones del mismo, en su conjunto, con el entorno. Además, y por definición, son las interrelaciones las que permiten definir a un conjunto de elementos agrupados como sistema.

Veamos algunos ejemplos de diagramas, sacados de Internet (Figuras 1.3-1.4).

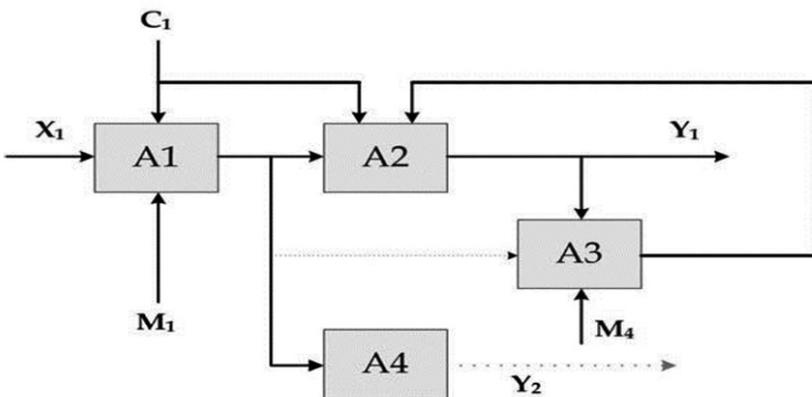


Figura 1.3. Diagrama funcional 1.

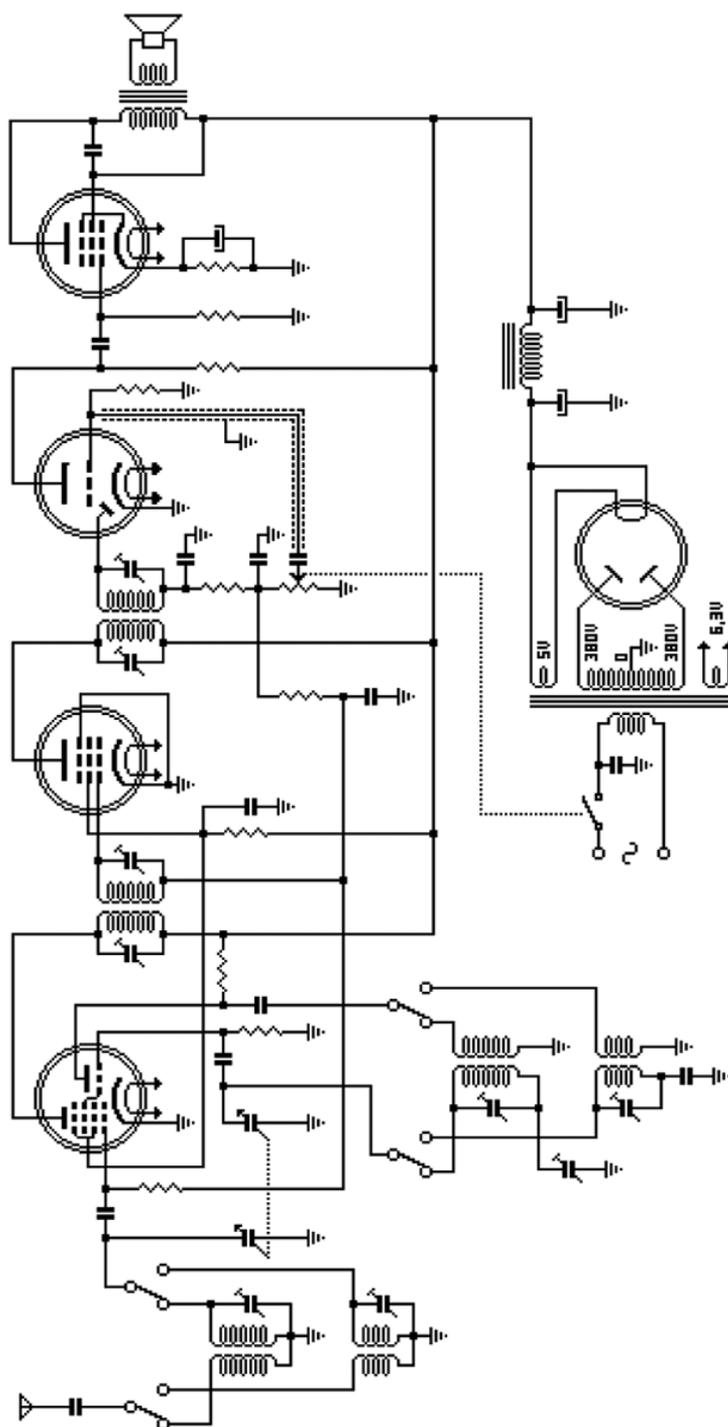


Figura 1.4. Diagrama funcional 2.

Como podemos ver, es fácil intuir el que los ejemplos presentados han debido de ser desarrollados mediante diversos procedimientos de diseño manual o con ayuda de programas CAD (*Computer Aid Design*).

En la actualidad, la creación de estos diagramas se realiza mediante la ayuda de diversos procedimientos computarizados normalizados. Algunos de esos procedimientos están basados en la norma FIPS PUB 183 *Integration Definition For Function Modeling* (IDEF), publicada en el año 1993, que permite conocer y aplicar los métodos IDEF (*Integration DEFinition language*), tanto para el desarrollo de los diagramas funcionales (o de actividades) de complicados procesos empresariales, como para el diseño funcional de sistemas complejos.

Para mayor información y conocimiento de los procedimientos IDEF que se han desarrollado hasta la fecha se puede visitar la dirección de internet: www.idef.com.

Un ejemplo de cómo se puede ir desarrollando un proceso o sistema complejo, mediante la aplicación de este tipo de procedimientos normalizados, lo podemos ver en el diagrama de la Figura 1.5.

Árbol de Elementos Configurados (AEC)

Cuando el objetivo principal de la representación del sistema es conocer la jerarquización de su configuración física, la metodología del árbol de elementos configurados es la más adecuada, ya que nos permite conocer cómo se va desglosando en componentes de orden inferior, subsistemas, grupos funcionales, equipos, módulos desmontables y piezas, lo que supone una visión de dicho sistema de “arriba-abajo” (*top-down*).

Pero también podemos contemplar esa representación con una visión “abajo-arriba” (*bottom-up*) en la que los elementos que lo componen están incluidos e integrados formando grupos funcionales, que a su vez forman subsistemas, los cuales, por último, terminan formando el sistema completo objeto de nuestro estudio. Esta visión del sistema nos permite definir a la jerarquización aquí descrita como *jerarquización inclusiva*. La inclusión o agregación es el principio de la complejidad.

Para el caso de sistemas empresariales, este tipo de representación se denomina organigrama, el cual presenta gráficamente la jerarquización competencial (funcional o departamental) en forma piramidal o de árbol invertido.

Durante las primeras fases de diseño de un sistema, esta representación debe ser iniciada comenzando por desarrollar el AEC de todas las funciones que se van a realizar dentro del sistema, es decir, mediante una jerarquización funcional. Conocida esta, podemos pasar a conocer el AEC de la configuración física del sistema por la simple sustitución de las funciones configuradas por los elementos físicos (órganos/equipos/componentes) que las ejecutarán en la realidad. Veamos en las Figuras 1.6 y 1.7 lo que proponemos.

Para ver y entender con mayor facilidad este método de representación veamos cómo podemos desarrollar el AEC de un sistema muy sencillo:

Sea el sistema un simple recipiente hermético de líquidos. En primer lugar, desarrollemos su jerarquización funcional (Figura 1.8).