

**TEORÍA
GENERAL
DE SISTEMAS

FUNDAMENTOS**

CARLOS ALBERTO OSSA OSSA
Profesor Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Ciencias Ambientales

**TEORÍA
GENERAL
DE SISTEMAS
FUNDAMENTOS**

**Teoría General de Sistemas
Fundamentos**

*Carlos Alberto Ossa Ossa
caossa@utp.edu.co
Primera edición 2004*

ISBN: 33 – 6163 - 1

*Carátula:
M. Magdalena Fernández B.*

*Armada electrónica
Juan Esteban Gaviria Arango*

*Impresión y encuadernación:
Editorial Gráficas Olímpica
Avenida de Las Américas # 23 – 91
PBX: 3210383*

Pereira – Risaralda - Colombia

*A: mis padres
Una vida, una formación.*

*a:
m. liliana herrera a.
una nueva visión de mundo.*

CONTENIDO

	Prefacio	10
Capítulo 1	CONCEPTO DE CIENCIA	12
	1.0 Introducción.	12
	1.1 Conocimiento y algunas formas de conocimiento.	12
	1.2 Objeto y objetividad.	14
	1.3 Método.	20
	1.3.1 Inducción. Deducción.	23
	1.3.2 Experimentación.	25
	1.4 Ciencia privada. Ciencia pública.	27
	1.5 La formalización de la matemática.	30
	1.5.1 Depuración del lenguaje matemático.	34
	1.6 La formalización en la ciencia.	35
	1.6.1 Un ejemplo formal en biología: las leyes de la herencia.	39
	1.6.2 Hipótesis en las ciencias sociales.	42
	1.7 Una clasificación de las ciencias.	44
	1.8 ¿Qué entendemos entonces, por ciencia?	47
Capítulo 2	TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS. LEYES DE LOS SISTEMAS.	53
	2.0 Reduccionismo.	53
	2.1 Holismo.	56
	2.2 La Teoría General de Sistemas.	58
	2.3 El concepto de sistema.	61
	2.4 Ciencia, tecnología y filosofía de sistemas.	64
	2.5 Patrón, estructura y proceso.	66
	2.6 Leyes de los sistemas.	67
	2.6.1 El concepto de ley.	67
	2.6.2 Sistema abierto. Entropía.	69
	2.6.3 Equifinalidad.	71
	2.6.4 Centralización (integración).	71
	2.6.5 Descentralización (mecanización).	72

2.6.6	Mecanización-centralización.	72
2.6.7	Mínima entropía.	73
2.6.8	Variedad obligada.	73
2.6.9	Emergencia.	76
2.6.10	Jerarquización.	76
2.6.11	Acoplamiento.	78
2.6.12	Totalidad.	78
2.7	Complejidad sistémica.	78

Capítulo 3	FORMALIZACIÓN DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS	85
3.0	Introducción.	85
3.1	Clasificación de los sistemas.	85
3.1.1	Keneth Boulding.	85
3.1.2	Russell L. Ackoff.	88
3.1.2.1	Clasificación de acuerdo con el comportamiento.	88
3.1.2.2	Clasificación desde una perspec- tiva organizacional.	91
3.1.3	P.B. Checkland.	93
3.2	Las leyes numéricas.	97
3.3	Axiomatizaciones de la T.G.S.	101
3.3.1	La propuesta de L.V. Bertalanffy.	102
3.3.2	La propuesta de O. Lange.	105
3.3.3	Jerarquización y cuasi-descomponi- bilidad en los sistemas.	110
3.3.4	Matemática de la complejidad.	112
3.3.4.1	Termodinámica irreversible.	113
3.3.4.2	Teoría de conjuntos difusos.	119
3.3.4.3	Teoría del caos. Teoría de catástrofes.	126
3.3.4.4	Teoría de fractales.	135
3.3.4.5	Hacia una lógica sistémica.	138

Capítulo 4	METODOLOGÍAS	141
4.0	Introducción.	141
4.1	Las ideas de C.W. Churchman.	146
4.1.1	Los objetivos del sistema.	148
4.1.2	Medidas de actuación.	149
4.1.3	Ambiente del sistema.	149
4.1.4	Los recursos del sistema.	150
4.1.5	Los subsistemas.	151
4.1.6	La administración del sistema.	153
4.2	A guisa de ejemplo.	154
4.3	El proyecto metodológico.	156
Capítulo 5	ALGUNAS METODOLOGÍAS	159
5.0	Introducción.	159
5.1	La programación lineal	162
5.2	La metodología de Jenkins.	165
5.2.1	Fases de la metodología.	167
5.2.2	Análisis del sistema.	168
5.2.3	Diseño del sistema (síntesis).	172
5.2.4	Realización.	173
5.2.5	Operación.	174
5.3	La dinámica de sistemas de J.W. Forrester.	174
5.3.1	Causalidad.	175
5.3.2	Lazo de retroalimentación.	176
5.3.3	Niveles.	178
5.3.4	Flujos.	179
5.3.4.1	Variables auxiliares. Parámetros.	180
5.3.5	Lazo de retroalimentación	181
5.3.6	Consideraciones adicionales respecto a flujos y niveles.	184
5.3.7	Ecuaciones matemáticas.	185
5.3.7.1	Ecuaciones de flujo.	187
5.3.7.2	Ecuaciones de nivel.	187
5.3.8	Un ejemplo.	191
5.4	La metodología de P.B. Checkland.	191
5.4.1	Generalidades.	193

5.4.2	Fundamentos.	197
5.4.3	El proceso metodológico.	202
5.4.4	La corriente de investigación basada en la lógica.	
5.4.5	La corriente de investigación basada en la cultura.	210

Capítulo 6	CRÍTICAS A LA TEORÍA DE SISTEMAS. DINÁMICA DE SISTEMAS BLANDOS.	218
6.0	Introducción.	218
6.1	Las críticas de D.C. Phillips.	218
6.1.1	Crítica a la filosofía de sistemas.	219
6.1.2	Crítica a la imprecisión del concepto de sistema.	222
6.1.3	Crítica a la debilidad de los ataques al reduccionismo.	223
6.1.4	Crítica al carácter científico de la Teoría de Sistemas.	224
6.2	Las críticas de Gall.	224
6.2.1	La sistemática y sus teoremas sistémicos	225
6.3	La dinámica de sistemas, en los sistemas blandos.	231
6.3.1	Lazos de retroalimentación. Demoras. Arquetipos sistémicos.	233
6.3.2	Límites del crecimiento.	238
6.3.3	Desplazamiento de la carga.	242
6.3.4	Erosión de metas.	244
6.3.5	Soluciones contraproducentes.	245
6.3.6	Escalada.	247
6.3.7	Tragedia del terreno común.	248
6.3.8	Éxito para quien tiene éxito.	248
6.3.9	Crecimiento y subinversión.	249
6.4	“Coda”.	250
Bibliografía		251

PREFACIO

Para algunos autores, la Teoría General de Sistemas, los estudios sobre la complejidad y particularmente el principio que los gobierna, el enfoque de sistemas, son una nueva forma de ver el mundo, de estudiarlo; una herramienta diferente y poderosa para una mejor comprensión de este mundo cada vez más complejo. Se espera que los problemas no resueltos aún por la ciencia tradicional, puedan ser tratados a través de la consideración de la totalidad, es decir, desde el enfoque de sistemas.

Otros consideran que tal teoría no es un procedimiento científico sino una utopía pues adolece de debilidades irresolubles en sus mismos fundamentos. Creen que la ciencia tradicional generará suficientes conocimientos para resolver las situaciones que actualmente escapan a su eficiente mano.

El trabajo que presentamos no pretende dar respuestas a tan importante polémica. Creemos que la discusión se presenta, en gran parte, por el desconocimiento de los procedimientos tradicionales de la ciencia, por la manera como establece sus leyes y principios y por una inadecuada interpretación del mundo de los sistemas.

Así que, para iniciar, hemos fijado ciertos criterios en lo relativo al término "ciencia", lo cual corresponderá al primer capítulo.

En el segundo capítulo nos ocupamos de una serie de ideas relativas a la Teoría General de Sistemas y a los sistemas en general.

El problema de la formalización de las teorías de sistemas y las propuestas que al respecto hacen Bertalanfy y Lange, las encontrará el lector en el capítulo tres.

El capítulo siguiente está dedicado a consideraciones generales sobre metodologías, las cuales son las herramientas que el enfoque de sistemas ha utilizado con el fin de llevar a la práctica sus propuestas teóricas.

En el capítulo cinco se hace una reseña de algunas metodologías con el fin de ilustrar diferentes enfoques que han sido propuestos para la aplicación de dicho enfoque. Para ello hemos escogido la programación lineal, la metodología de Jenkins, la de Forrester y la de Checkland.

El último capítulo presenta y analiza ciertas críticas que se han hecho a la teoría de sistemas. Y con el fin de plantear algunas soluciones,

presentamos las ideas de Senge respecto a la aplicación de la dinámica de sistemas a los problemas de la actividad humana.

La bibliografía es la realmente consultada. No se trata de enumerar los últimos artículos y libros sobre el tema, lo que puede obtener el lector fácilmente a través de consultas en la red. Por otra parte, las referencias a pié de página indican el autor, el título del libro y la página. La información completa se encontrará al final del texto.

Hemos utilizado el neologismo *sistémico* como relativo a *sistema*, ya que permite diferenciar este concepto del de *sistemático* cuya acepción es bien diferente a la que el primero quiere expresar. Lo *sistémico* se refiere a lo general, lo global, lo holístico; lo *sistemático* a lo secuencial, a lo clasificadorio.

Posiblemente se hallarán otras novedades idiomáticas; esperamos que el lector sepa entender. Creemos que así como es exagerado y va en contra del buen uso del lenguaje crear voces innecesarias, algunas veces se hace pertinente proponer algunas si el idioma no posee sinónimos para suplirlas. Nos referimos a términos como *propositoso* –purposeful– que quiere decir que puede desplegar propósitos y *falsabilidad* –falsifiability– (neologismo que de hecho no es creación nuestra y que podría traducirse también como “falsifiabilidad”), que se refiere al conocimiento que puede demostrarse que está equivocado y que evidentemente no es equivalente a *falso* o *falsificación*.

Son muchas las personas a las que debo agradecer. A los profesores y amigos de la Universidad de Los Andes de Mérida, Venezuela: Oswaldo Ramírez, amigo y guía; Wimal Gunawardene, Hernán López, Ramsés Fuenmayor y Jorge Dávila. A las orientaciones del Dr. George Klir, en SUNY, Binghamton, USA. A la profesora María Liliana Herrera por su ayuda en el campo filosófico y por la revisión del texto completo.

Nuestra gratitud a la Universidad Tecnológica de Pereira y a la Facultad de Ciencias Ambientales por el tiempo, equipos y software de los que pude disponer. Y finalmente, a la razón de ser de este trabajo: a mis estudiantes y a quienes va dirigido.

Las opiniones y posibles imprecisiones que este texto pueda tener son responsabilidad única del autor.

C.A.Ossa O.

Pereira, abril, 2004.

CAPÍTULO 1

CONCEPTO DE CIENCIA

1.0 Introducción. Aunque en muchos textos se pueden encontrar varias definiciones de ciencia (por ejemplo: “ciencia es aquello que posee método propio”, o “ciencia es el conjunto de conocimientos adquiridos a través del método científico”), es curioso que los mismos científicos se cuiden de ofrecer una definición de este concepto. Desafortunadamente, la prolijidad de libros-texto sobre lo que es ciencia, investigación y método científico ha provocado en los estudiantes extraños y diversos sentimientos respecto al conocimiento científico haciéndolo ver, de un lado, como algo fantástico y fundado en fórmulas matemáticas de las cuales se obtienen nuevas fórmulas o modelos que permiten explicar todos los fenómenos de la realidad natural y humana. También el término ciencia es usado indiscriminadamente para dar credibilidad tanto a una serie de seudoteorías como a una infinidad de productos comerciales, o en su defecto, es usado como un recetario mágico de pasos a seguir gracias al cual nos podemos convertir en investigadores científicos. Estas son algunas de las razones por las cuales el concepto ha perdido en el lenguaje de la vida diaria el significado real que a través de la historia ha ido adquiriendo. Es importante resaltar que aunque la definición definitiva no está dada, sí existen nociones y criterios que permiten establecer qué es un conocimiento científico y qué no lo es. Algunos de estos criterios son: conocimiento, tipos de conocimiento, objeto, objetividad, fenómeno, método, formalización y clasificación de las ciencias.

1.1 Conocimiento y algunas formas de conocimiento. Un primer criterio que hay que aclarar es el siguiente: ¿Qué es el conocimiento? ¿Qué es conocer? Y la respuesta, aunque muy amplia, podría darse en los términos siguientes. En primer lugar, en el conocimiento intervienen necesariamente dos elementos fundamentales: un sujeto que conoce y un objeto por conocer. Conocer significa, entonces, la aprehensión por parte del sujeto de un determinado objeto. Ello implica que sujeto y objeto mantienen una relación de copertenencia indisoluble. Pero ¿cómo

se da esta aprehensión? El objeto se encuentra en el sujeto a manera de una representación, es decir, no se aprehende el objeto como tal; lo que aprehendemos es el objeto en cuanto lo podemos representar en nuestra mente, cerebro o espíritu a través de la experiencia que tengamos de él o a través de sus cualidades. Esto significa que si el sujeto representa el objeto tal como él es, entonces la representación será verdadera.

Como podemos darnos cuenta, lo que acabamos de decir implica varias cuestiones bien problemáticas. Por ejemplo, ¿cuáles son los criterios para determinar qué es el objeto como tal para saber si la representación es verdadera, es decir, cómo sabe el sujeto que su representación concuerda con el objeto?; ¿quién determina lo que es el objeto independiente de la representación?; ¿cuál es el criterio de verdad de la representación?; ¿qué papel juegan los sentidos y el razonamiento en la aprehensión del objeto? Todas estas cuestiones hacen parte de una disciplina filosófica llamada alternativamente Teoría del Conocimiento, Gnoseología o Epistemología.

Ahora bien, hay muchas maneras de aprehender el objeto (es decir, de conocerlo, quererlo, sentirlo, interiorizarlo, etc.); de ahí que existan varios tipos de conocimiento. Veamos.

-*Conocimiento o saber del sentido común o vulgar*: este saber que todos compartimos es posible por la experiencia diaria de la vida, del mundo. Este saber se encuentra determinado por la educación que hemos recibido, por la cultura a la cual pertenecemos y por la experiencia particular. Lo anterior da lugar no sólo a asimilar como verdaderas una serie de opiniones y de prejuicios, sino también a lo que se conoce como *realismo ingenuo*, es decir, creer que los objetos, los fenómenos, las situaciones, en general lo que llamamos “realidad” es tal como aparece. Así las cosas, la opinión puede ser verdadera o no serlo. Hay que tener en cuenta entonces, que su limitación radica en el hecho de que ella no está fundada ni justificada racionalmente. De esta manera aseguramos que Pedro es el mejor amigo del mundo o que en cierta región la gente es de mal genio.

- *Conocimiento inmediato*: puede obtenerse por contacto, presencia directa o intuición. Obviamente, este tipo de conocimiento es totalmente subjetivo y es válido sólo para quien lo experimenta. Esto quiere decir, que no es posible hacer extensivo a otros lo que cada quien considera

como verdadero por haber tenido la experiencia directa de ello. Tal es el caso, por ejemplo, de la iluminación mística.

-*Conocimiento indirecto o mediato*: por lo general, se trata de un conocimiento por descripción y, como su nombre lo indica, se encuentra mediado por la tradición escrita, oral, o por experiencia indirecta (aunque este tipo de conocimiento puede dar lugar a un conocimiento fundado e incluso científico). La historia es un claro ejemplo. Lo que conocemos sobre los griegos, ha sido relatado por otros. También: sabemos que existe la muralla China, así nunca hayamos estado en ella.

- *Conocimiento científico*: de manera provisional digamos que el conocimiento científico es aquel que es racional (por oposición a lo místico, a lo irracional, etc.), experimental, metódico (en el sentido de que no es especulativo), falible (que se puede corregir, ampliar y perfeccionar) y finalmente, que puede predecir ciertos acontecimientos. Pero antes de desarrollar este tema es necesario hacer ciertas aclaraciones.

Algunas de las clases de conocimiento aquí referenciadas implican en general dos procesos: el de análisis y el de síntesis. Estas dos actividades mentales se presentan simultáneamente en los procesos cognoscitivos. En términos amplios, el *análisis* tiene que ver con la descomposición del objeto, fenómeno o situación en las partes que la conforman. Conocidas todas las partes, ellas deben recomponerse nuevamente, y este proceso tiene por nombre *síntesis*. Aunque más adelante hablaremos con detalle de esto, podemos decir aquí que estas dos maneras de abordar los fenómenos y que se encuentran íntimamente relacionadas, son fundamentales en muchos procesos del conocimiento científico, pero como métodos tienen sus limitaciones; no todo análisis, ni la síntesis que sigue a él, nos permite conocer la totalidad del fenómeno, sino sólo una parte del mismo.

1.2 Objeto y objetividad. Otro criterio es el de *objetividad*. Esta noción no sólo no cuenta con una definición única, sino que ha cambiado a través del transcurso de la historia de la filosofía y de la ciencia.

Cuando se habla de objetividad se está suponiendo una actitud muy particular por parte del sujeto respecto al otro elemento con el que siempre estará relacionado: el objeto. Pero ¿qué es el objeto? Veamos

primero su significación etimológica. *Objeto* viene el *objectum*, verbo *objicio* que significa “echar hacia delante” o “presentarse a los ojos”. La idea aquí es la de una separación entre el sujeto y el objeto, entre el observador y lo observado. ¿De qué tipo de separación se trata? Como lo habíamos dicho antes, el sujeto no aprehende el objeto como tal, sino que lo aprehende a través de una representación que podemos tener de él en su conciencia. Ahora bien, la relación sujeto-objeto y la naturaleza del objeto son las dos cuestiones que han creado las grandes discusiones respecto a lo que debe entenderse por conocimiento científico, ya que, según muchos tratadistas y filósofos de la ciencia, para que un conocimiento sea científico debe tener por requisito la objetividad. Hablaremos primero de qué es el objeto y, en segundo lugar, de la objetividad y de la subjetividad.

Ante todo, el objeto es aquello que nos es dado a nuestra conciencia para que sea conocido¹. Esto supone un proceso de “objetivación”, es decir, hacer de lo dado un objeto de conocimiento. Desde la modernidad, y particularmente para lo que tiene que ver con la ciencia clásica, se ha entendido el objeto como aquello que no reside en el sujeto, en contraposición a lo “subjetivo”. Por subjetivo habría que entender aquello que está en el sujeto. En resumen: objeto sería todo aquello que puede equipararse a “realidad”, y la realidad puede ser cognoscible o incognoscible. En lo que respecta al conocimiento científico, él debe ocuparse de realidades o fenómenos que sean susceptibles de ser conocidos, ya que existen ciertos objetos que no pueden conocerse científicamente, como por ejemplo, los que están relacionados con la religión, la magia, el mito, el misticismo etc.

La definición amplia que hemos dado de objeto contiene, por su generalidad, muchas clases de objetos. Así que podemos clasificarlos en tres categorías².

¹ Obviamente, hay muchos “objetos” que aparecen ante nuestra conciencia pero no necesariamente son “objetos de conocimiento”. Por ejemplo, los recuerdos, los deseos, las fantasías, etc. Por eso la definición que damos aquí la restringimos exclusivamente al problema del conocimiento y, puntualmente, al del conocimiento científico.

² Hay que aclarar que existen muchas clasificaciones y categorías. La que aquí ofrecemos se circunscribe a los objetivos y necesidades del presente texto y tiene un carácter operativo y didáctico.

- Objetos que tienen *existencia real*: son aquellos que están sometidos a las condiciones espacio–temporales y por ello mismo se encuentran regidos por el principio de causalidad. Son los objetos y fenómenos físicos referidos al mundo natural.
- Objetos *ideales*: son llamados así porque no están sometidos a las condiciones espacio–temporales. A esta clase pertenecen los objetos matemáticos y los de la lógica³.
- Objetos cuya naturaleza tiene que ver con la *actividad humana*: son los objetos sociales, culturales y morales. Por ejemplo, los sistemas de reglas, la economía, la psicología, el arte etc.

Según lo anterior podemos concluir que, en el contexto del pensamiento científico el objeto es todo aquello que puede ser susceptible de conocimiento.

La segunda cuestión planteada es la siguiente: ¿qué es la objetividad? Esta pregunta remite necesariamente a las siguientes: ¿cómo ser objetivo respecto a lo que se está conociendo?; ¿se puede identificar conocimiento objetivo con conocimiento verdadero? Para dar respuestas a algunas de estas preguntas haremos inmediatamente una ilustración sobre dos tipos de relaciones entre el sujeto y el objeto que en la historia del hombre se han establecido.

Pensemos en el hombre primitivo. Este hombre enfrentaba de una manera especial la naturaleza: no podía separarla de su propia existencia; uno y otra estaban íntimamente ligadas por lo que nada de la naturaleza podía ser explicado sin la inclusión del hombre. Él se vio entremezclado con la explicación. Esto lleva por nombre *animismo*: para el hombre primitivo el mundo no es inanimado; el mundo, sus fenómenos, tienen un alma y una voluntad análogas a las humanas pero más poderosas, las cuales se manifiestan precisamente así: por medio de fenómenos como las tormentas, los truenos, las sequías, etc. Así las

³ Puede extrañar al estudiante el término “ideal” y no se equivoca, ya que tiene varias acepciones. Puede significar un modelo al cual se aspira; también, una realidad inalcanzable –utopía– o algo perfecto en su propia naturaleza. Pero tiene además una significación referida a ciertas entidades como son las de la matemáticas y de la lógica.

cosas, la naturaleza era tratada como un “tu” y al enfrentársela, este “tu” revelaba su individualidad, sus cualidades y su voluntad: “A este “tu” no se le contempla sino que se lo experimenta como vida que se encara a la vida e implica las facultades del hombre en una relación recíproca. A esta experiencia se encontraban subordinados los pensamientos lo mismo que las acciones y los sentimientos”⁴. Esta manera de encarar el mundo lleva al primitivo a considerarlo como básicamente subjetivo, con carácter humano, y las explicaciones de los sucesos tomarán la forma de mitos.

En la evolución de la civilización, las explicaciones míticas de los fenómenos naturales fueron reemplazadas por explicaciones más “racionales”. Es decir, el hombre empezó a preguntarse por las causas naturales de los fenómenos. De esta manera, el hombre se separa de la naturaleza en lo que a su explicación se refiere y empieza a tratarla como un “ello”, un “objectum” que al estudiarse desde el punto de vista “natural” se mostraba como resultado de “leyes naturales”. Así nació la actitud objetiva frente a la subjetiva y lo que se llama “conocimiento objetivo o científico”.

La manera, pues, de encarar la naturaleza considerándola como un “objectum”, implicó una separación total entre el sujeto y el objeto. Aparentemente, para que un conocimiento fuera verdadero, el sujeto que estuviera conociendo un determinado fenómeno no debía intervenir en él. Debía considerarlo de manera imparcial, sin que su propia subjetividad, es decir, su ideología, sentimientos, emociones, afectaran al fenómeno en cuestión. Esta idea de objetividad fue la que caracterizó a la ciencia desde la modernidad hasta principios del siglo XX, cuando los hombres de ciencia comprendieron que la separación total entre sujeto y objeto no era posible. Volvamos por un momento a nuestro hombre primitivo. Su manera de conocer era directa, emotiva y no respondía a un método predeterminado, cosa que implicaba un compromiso con el fenómeno, la creación de un vínculo emocional. Esto es fácil de entender aún hoy en la vida cotidiana cuando para descalificar la “opinión” de alguien se la tilda de “subjetiva”, con lo que se

⁴ H. y H.A. Frankfort, J.A. Wilson, T. Jacobsen: *El pensamiento filosófico*. Cap. introductorio.

indica que el sujeto no está distanciado emocionalmente del fenómeno; sus propios prejuicios, sentimientos, intereses determinan su análisis o la comprensión del asunto. De ahí resulta que su opinión o las conclusiones a las que ha llegado respecto al fenómeno no serían verdaderas, acertadas o creíbles.

La característica del conocimiento científico radica, según lo anterior, en la separación del sujeto respecto al objeto. El sujeto es “indiferente”, como si no tuviera ninguna relación con el objeto, lo cual permite que él se le ofrezca en su naturaleza y verdad. Esta manera de caracterizar el conocimiento científico implicó la utilización de ciertos métodos que se revelaron insuficientes desde finales del siglo XIX y a los que nos referiremos más adelante. Por el momento podemos decir que los hombres de ciencia de la primera mitad del siglo XX llegaron a la conclusión que la separación entre el que conoce y lo conocido no es posible. Aunque para muchos la más importante virtud de la ciencia es la “objetividad”, ésta parece ser más bien un ideal, pues el sujeto se encuentra involucrado con el fenómeno a estudiar. En términos de Schrödinger:

... Esta obligada renuncia a una descripción puramente objetiva de la naturaleza es considerada hoy por la mayoría como una profunda transformación del concepto físico del mundo. Parece una dolorosa reducción de nuestra aspiración a la verdad y a la claridad, y diríase que nuestros signos y fórmulas –y los cuadros a ellos vinculados– no constituyen un objeto con existencia independiente del observador, sino que tan sólo representan la relación sujeto-objeto. Pero en el fondo, ¿no es esta relación la única verdadera realidad que conocemos? ¿No basta que encuentre una firme, clara e inconfundible expresión en la que se basa toda esperanza? ¿Por qué hemos de prescindir de nosotros mismos?⁵

Una de las causas por las cuales no hay separación sujeto-objeto se basa en la manera que tienen los hombres de conocer, es decir, en sus facultades cognitivas: éstas tienen límites. Así por ejemplo, la naturaleza de nuestros sentidos no nos permite observar todo lo que existe; de ahí que, en primera instancia, el fenómeno no se nos aparezca tal como él es. Nuestro conocimiento estará condicionado por dichos límites y, naturalmente, las conclusiones que se puedan obtener también estarán

⁵ E. Schrödinger: *¿Qué es una ley de la naturaleza?* Pg. 37-38.

condicionadas. Una segunda razón son las limitaciones culturales tales como los conocimientos adquiridos, los prejuicios y el mismo idioma. Una tercera razón para que no exista tal separación es la de las limitaciones tecnológicas. Los problemas que se presentan para conocer adecuadamente los fenómenos son en muchas ocasiones producto de la falta de tecnología avanzada. Tal es el caso del conocimiento del universo el cual se amplió sensiblemente con el descubrimiento y perfeccionamiento del telescopio.

De lo anterior debemos concluir, primero, que no es posible una separación entre el sujeto y el objeto tal que se pueda conocer éste último en su totalidad. Segundo, como necesariamente el sujeto se encuentra involucrado con el objeto, la noción de “objetividad” debe cambiar. Pero si no es posible obtener un conocimiento total y seguro del objeto ¿qué podría caracterizar a un conocimiento como científico? No hay que renunciar a la posibilidad de la objetividad; lo que debemos cambiar es nuestra idea de ella. Dijimos más atrás que la objetividad era una actitud que el sujeto asume frente a los fenómenos. El hombre hoy se ve obligado a aceptar que una actitud totalmente objetiva no es posible. Lo que sí es posible son las “aproximaciones”⁶ a los fenómenos. El hombre está en capacidad de corregir y ampliar sus propios conocimientos acerca del mundo. Según esto, la objetividad consistiría en un proceso de aproximación y corrección cada vez mayor. Esta idea implica también un cambio en la noción de “verdad”: en el conocimiento científico no habría verdad o falsedad, sino aproximaciones a la verdad más adecuadas o correctas que otras. Así lo afirma Capra:

Esto se puede ilustrar [...] con un simple experimento que se efectúa frecuentemente en cursos introductorios de física. El profesor deja caer un objeto desde una determinada altura y muestra a sus alumnos con una simple fórmula de física newtoniana cómo calcular el tiempo que tarda el objeto en llegar al suelo. Como la mayoría de la física newtoniana, los cálculos desprecian la resistencia del aire y no serán por tanto exactos. Efectivamente, si el objeto fuese una pluma de ave, el experimento simplemente no funcionaría. El profesor [...] puede avanzar un paso y tomar en consideración la resistencia del aire, introduciendo más datos en

⁶ Esto nos lleva al tema de la forma como representamos la realidad: los modelos. El perfeccionamiento del modelo es el que permite incrementar el conocimiento del fenómeno en estudio.

la fórmula. El resultado –la segunda aproximación– será más ajustado que el primero, pero no será aún exacto, ya que la resistencia del aire depende de su temperatura y presión. El profesor [...] propondrá una nueva fórmula, mucho más complicada, que tendrá en cuenta estas variables y dará como resultado una tercera aproximación. No obstante, la resistencia del aire depende no sólo de su temperatura y presión, sino también de la convección, es decir, de la circulación de las partículas de aire a gran escala dentro de la habitación. Los alumnos podrán observar que esta convección puede estar influida por una ventana abierta, por sus patrones de respiración, etc. Llegado a este punto, el profesor detendrá probablemente el proceso de mejora de las aproximaciones por pasos sucesivos.⁷

1.3 Método. La noción de método es otro de los criterios que pueden orientar una definición de ciencia. Hay muchos métodos pero no todos conducen a un conocimiento científico. No es inútil decir que la cuestión del método para obtener conocimiento objetivo no ha sido la misma en las distintas etapas históricas. La concepción de lo que él deber ser en la investigación ha cambiado de acuerdo con las diferentes concepciones sobre el universo y de las limitaciones que tales concepciones han mostrado.

Etimológicamente, método significa disponer de un camino para alcanzar un determinado fin. Respecto al saber científico, el método no es “natural”, es decir, es necesario determinarlo a través de las reglas que el investigador va a seguir para alcanzar el fin propuesto: ya sea que se trate de explicar un fenómeno o buscar la solución a un problema. Esto implica dos cosas: primero, la investigación científica parte necesariamente de una situación problemática; el investigador sabe qué es lo que quiere conseguir y para ello debe “planear” su investigación, considerar qué “caminos”, qué métodos, va a seguir. Segundo, el tipo de problema o fenómeno que se trata de solucionar, conocer o explicar determina la estructura del método, lo cual significa que no existe un método universal y único para llevar a cabo investigaciones de carácter científico⁸ (aunque los textos escolares de metodología de la investigación así lo hagan parecer), pues los

⁷ F. Capra: *La trama de la vida*, pg. 61.

⁸ Sin embargo, descubrir un método universal ha sido un ideal en las distintas épocas.

fenómenos susceptibles de investigación científica son, como se recordará, diferentes.

En el proceso del conocimiento de la naturaleza nuestro deseo es ir más allá de los hechos observables: deseamos establecer reglas generales, conexiones entre manifestaciones aparentemente aisladas, descubrir nuevos fenómenos no visibles en forma inmediata. Esto se logra mediante el principio de causalidad: “todo tiene una causa” o “no hay efecto sin causa”. Para establecer un panorama general bajo un contexto único el hombre de ciencia establece una *teoría*. Una teoría es un esquema conceptual que se propone para dar una explicación de ciertas manifestaciones. Para ir corroborando este esquema, generalmente se recurre al experimento. A través de él, las teorías se afinan y surgen nuevas preguntas y nuevos hechos. Este proceso toma un tiempo hasta que es posible proponer un cuerpo de doctrina coherente.

Cuando Torricelli lanzó la hipótesis de que el aire ejercía una presión sobre los cuerpos, la experiencia cotidiana parecía indicarnos lo contrario. Sin embargo, un simple experimento puede corroborar esta hipótesis. En efecto, si pesamos en una balanza que funcione correctamente un globo de caucho o cuero y luego la llenamos de aire, veremos que en la segunda ocasión el peso será mayor que el primero, demostrando, de esta manera, que el aire pesa. Este peso del aire ejerce, pues, una fuerza que a su vez es la causa de la presión atmosférica.

Como dijimos anteriormente, las relaciones lógicas entre los diferentes fenómenos se establecen al amparo del “principio de causalidad”. La historia del principio de causalidad, como tantas otras nociones surgidas a lo largo del pensamiento filosófico, ha sido compleja. La causalidad implica, claro está, una relación de X a Y y permite explicar por qué un cierto fenómeno se ha producido. Podemos entender la relación causal como la ley o leyes que rigen acontecimientos de una misma especie (de ahí que existan distintas clases de leyes). Según el principio de causalidad que dominó el largo período de la ciencia clásica, todos los fenómenos se suceden bajo una relación estricta de causa-efecto. Y aunque hay varios tipos de nexo causal y varios tipos de causas, baste aquí con lo siguiente: la causalidad indica una relación secuencial (uno detrás de otro) entre

Se puede decir que hay muchas clases de métodos. Ya mencionamos el análisis y la síntesis. También existe la deducción y la inducción, métodos que se encuentran estrechamente relacionados. El investigador no sólo lleva a cabo procesos que son al mismo tiempo analíticos y sintéticos sino que también puede mezclar los métodos de acuerdo con las necesidades y exigencias que se vayan dando en el transcurso de la investigación.

Respecto a la inducción y la deducción haremos las siguientes consideraciones.

1.3.1 Inducción. Deducción. Por inducción entenderemos el procedimiento mediante el cual sacamos conclusiones generales a partir de situaciones particulares. Es ir de lo particular a lo general. Por ejemplo, el hecho de observar que todos los días el sol sale por el oriente y se oculta por el occidente y según consta, ha sido así durante muchos siglos, nos lleva a concluir que el sol sale por el oriente y se oculta por el occidente. Debe quedar claro, que esta conclusión no tiene un carácter de verdad de la misma fuerza que si demostráramos, a partir de alguna teoría, que esto *debe* ser así.

Por el contrario, la deducción es un proceso a partir del cual se derivan ciertos enunciados (conclusiones) a partir de otros enunciados (premisas) de un modo puramente formal, es decir, regido por reglas de inferencia. Nos permite obtener conclusiones particulares a partir de proposiciones generales: es un proceso que nos lleva de lo general a lo particular. La afirmación: los números naturales son infinitos, nos lleva a la conclusión *lógica* que los números pares (por ser números naturales) son infinitos.

Para que un proceso deductivo pueda llevarse a cabo es necesario la creación de un cálculo: reglas de manipulación de símbolos de tal forma que a cada principio de deducción le corresponda una regla dada. El cálculo garantiza la veracidad de las conclusiones que parten de premisas verdaderas. En el caso de la matemática, las reglas del cálculo son abstractas y pertenecen al dominio de la lógica simbólica. En las ciencias empíricas, por el contrario, existen aspectos semánticos y sintácticos que deben ser tenidos en cuenta, como veremos mas adelante.

Un excelente ejemplo de deducción es el silogismo. Un silogismo está compuesto por dos premisas (proposiciones) y una conclusión. Un silogismo clásico es el siguiente:

Premisa 1: Todos los hombres son mortales.

Premisa 2: Sócrates es un hombre.

Conclusión: Sócrates es mortal.

Si admitimos las premisas, tenemos que admitir la conclusión. Por esto el razonamiento deductivo es el que debe seguirse en matemáticas⁹.

No obstante, muchas de las inferencias que hacemos en la vida diaria son de tipo inductivo; a menudo no necesitamos de evidencias deductivas. Nos contentamos con aceptar la conclusión como “bien fundada”, como “más probable”. En este tipo de razonamiento (razonamiento inductivo) no nos contradecemos si aceptamos las premisas y negamos la conclusión. No contradecirnos no implica que tengamos razón. Un buen ejemplo de razonamiento inductivo puede darse a partir del silogismo anteriormente propuesto. ¿Por qué aceptamos la premisa 1, “todos los hombres son mortales”, como verdadera? Podría ser que en un futuro próximo pudiera existir un hombre inmortal. Para aceptarla pudiéramos adoptar el siguiente procedimiento: usaríamos como premisas *evidencias* que sean ciertas, y a partir de ellas generalizaríamos la proposición. Podríamos decir:

premisa 1': todos los hombres nacidos antes de 1900 han muerto.

premisa 2': los hombres continúan muriéndose.

conclusión: “razonablemente” todos los hombres son mortales.

“Razonablemente” significa aquí, una alta probabilidad a favor del hecho. Por otra parte la verdad de las premisas no implica la verdad de la conclusión.

En resumen. El razonamiento inductivo es de amplia utilización en la ciencia. El científico emplea métodos inductivos, corazonadas e intuiciones para investigar el mundo que lo rodea y proponer

⁹ Desde el punto de vista de la lógica matemática, la operación básica es la implicación: $p \rightarrow q$; (p implica q)

afirmaciones de carácter general. Pero es la lógica deductiva la herramienta fundamental a la hora de proponer una teoría. Sin embargo, debe quedar claro que la generalidad y veracidad de las proposiciones que tienen la función de premisas están estrictamente ligadas al proceso inductivo que les dio origen. Como Braithwaite indica:

No existe línea divisoria tajante y fija que señale el punto en que la síntesis de la experiencia propia del sentido común se convierte en una ordenación científica dentro de un sistema de esta índole. Del mismo modo que si remontamos el pensamiento del sentido común, tanto en el individuo como en la raza humana, no hay un punto a partir del cual no se creyese en generalización alguna, rara vez existe en la historia de la ciencia una fecha histórica en la que se pueda decir que se dio a luz la primera hipótesis.¹⁰

Una de las formas de comprobar la validez de una premisa en el conocimiento científico es el uso del experimento. Ello merece una consideración especial.

1.3.2 La experimentación. Con lo expresado hasta ahora, existen áreas del conocimiento o del pensamiento humano que podrían considerarse como científicas. La misma filosofía utiliza procesos de razonamiento rigurosos, establece hipótesis basadas en axiomas, y obtiene conclusiones basadas en dicho razonamiento. Pero, no existe duda alguna en aseverar que la filosofía no pertenece a este tipo de conocimiento.

Podemos centrar en Galileo el énfasis en la experimentación como una base fundamental del conocimiento científico. El experimento generó la ruptura entre la ciencia antigua, Aristotélica, basada en aspectos cualitativos más que cuantitativos, apriorística (basada en el razonamiento puro y en principios preestablecidos e irrefutables) y la moderna, inductiva, experimental: se establece una teoría, basada en observaciones cotidianas. Posteriormente se diseña un experimento que, de forma contundente, compruebe las hipótesis propuestas. Una vez corroboradas éstas, la teoría toma más fuerza para establecer nuevas proposiciones que amplíen el campo de explicación.

Pero no todo experimento es de carácter físico. El experimento mental ha jugado a través de la historia de la ciencia un papel

¹⁰ R.B. Braithwaite: *La explicación científica*. Pg. 88.

determinante. Un bello ejemplo de este tipo de experimento lo da el mismo Galileo cuando refuta la aseveración de Aristóteles respecto a que el tiempo que tarda un móvil más pesado que otro en llegar al suelo cuando ambos se dejan caer desde la misma altura, es menor en el más pesado que en el más liviano.

Un peso determinado recorre una determinada distancia en un tiempo dado; un peso más pesado se mueve a la misma distancia en menos tiempo, siendo éste inversamente proporcional al peso. Por ejemplo, si un peso es doble, tardará la mitad de tiempo en recorrer la misma distancia.¹¹

Galileo indicó que si se tiene una piedra más pesada que otra, la primera, según Aristóteles, tardará menos tiempo en llegar al suelo que la segunda, si ambas se sueltan desde la misma altura. Ahora bien. Unamos ambas piedras mediante un pequeño hilo. Esta nueva piedra, más pesada, debe caer en un tiempo menor que cualquiera de las otras dos. Pero si lo pensamos bien, la piedra más pequeña, deberá frenar la caída de la más grande (ya que tarda más en caer); por otra parte la más grande forzará a la más pequeña a recorrer el espacio en menor tiempo. Esto implica que la “nueva piedra” deberá tener un tiempo de caída intermedio entre el tiempo más rápido de la más pesada y el más lento de la más pequeña. La única forma de resolver esta contradicción, concluye Galileo, es aceptar que en todos los casos el tiempo de caída es el mismo.

¿Y cómo se puede experimentar en las ciencias humanas? Comte fue un investigador que creyó firmemente en los preceptos utilizados por la ciencia física. Por lo tanto, estudió en detalle la manera como estos procedimientos podían llevarse a cabo en el campo de la sociología, su principal área de estudio. Para este filósofo, en las ciencias sociales el procedimiento de investigación debía basarse en la observación, la experimentación y la comparación¹².

La observación de los hechos sociales es directa y enmarcada en la teoría de los tres estadios. Esta teoría postula que la humanidad, al igual que el alma de los individuos, atraviesa tres estadios: el teológico, el

¹¹ Aristóteles: *De Caelo*, citado en Holton: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, pg. 117.

¹² G. Reale y D. Antiseri: *Historia del pensamiento filosòfico y científico*. tomo 3, Pg. 274.

metafísico y el positivo (la ciencia). El primero es un punto de partida necesario para la inteligencia humana; el tercero es un estadio final, definitivo; el segundo es sólo una fase de transición.

Por su parte, la experimentación se basa en el estudio de los casos patológicos que alteran la conexión normal de los acontecimientos cuando no es posible el experimento directo.

La comparación es un procedimiento que permite obtener analogías y diferencias entre diversas sociedades en sus respectivas fases de desarrollo. También caben aquí los recuentos históricos.

Otros hombres de ciencia, de diferentes áreas, tienen opiniones similares. Claude Bernard afirma:

No existe ninguna diferencia entre los métodos de investigación de la fisiología, la patología y la terapia. Siempre se trata del mismo método de observación y de experimento, que se basa, en todos los casos, en los mismos principios y que sólo varía en su aplicación, según la complejidad del fenómeno.

[...] El método experimental consiste en imponer una disciplina a la fantasía: elimina las hipótesis que sean incapaces de descubrir, explicar y prever un trozo o un aspecto del mundo real.¹³

1.4 Ciencia privada. Ciencia pública. A la altura de esta reflexión el estudiante podrá preguntarse entonces ¿qué es la ciencia? Hasta aquí sólo nos hemos referido a algunos criterios que pueden acercarnos a dicho concepto, criterios que, como bien puede verse, han cambiado en el transcurso del siglo XX. Si no existe un método como tal, si no existen recetas seguras a seguir en una investigación, ¿cómo determinar cuándo un conocimiento es científico y cuándo no? Aquí señalaremos un criterio fundamental para responder a esta pregunta. Se trata de la diferencia que hay entre “ciencia privada” y “ciencia pública”¹⁴. Por “ciencia privada” hay que entender el proceso que en el tiempo el investigador lleva a cabo para desarrollar sus hipótesis, descubrimientos y teorías. En este proceso no se siguen de manera rígida pasos o fases de un método, sino que en él intervienen muchos métodos,

¹³ En G. Reale y D Antiseri, *Op. Cit.* pg. 281-282.

¹⁴ Cfr. G. Holton: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas.* Pg. 275 y sgts.

circunstancias azarosas y situaciones inesperadas. Pero cuando el investigador ha llegado a un determinado fin, él debe presentar sus resultados ante su comunidad académica. Y esta presentación tiene dos condiciones: primero, la presentación es pública y generalmente se hace a través de las revistas científicas especializadas en los distintos temas. Segundo, la presentación escrita de las hipótesis, teorías y resultados debe hacerse siguiendo un procedimiento lógico deductivo o lógico inductivo que puede entenderse como “formalización”. Teniendo en cuenta estas dos condiciones, la investigación será debatida por la comunidad académica internacional quien dictaminará si la teoría es correcta científicamente o si es sólo especulación.

El proceso del conocimiento científico no es un proceso con fases o pasos que deban seguirse rígidamente. Éste tal vez es el más grave error que sobre este tema se tiene. Se dice que existe un “método científico”, un método exclusivo de la ciencia y que tradicionalmente se presenta en varias fases, la primera de las cuales es la proposición de una (o varias) hipótesis, seguida del desarrollo de una tesis, la comprobación y experimentación y finalmente la explicación o predicción de nuevos sucesos no explicados o conocidos previamente.

El investigador no sólo lleva procesos que son al mismo tiempo analíticos y sintéticos sino que también puede mezclar los métodos de acuerdo con las necesidades y exigencias que se vayan dando en el transcurso de la investigación. Pero si bien la investigación debe ser planeada metodológicamente, en ella juegan un papel fundamental aspectos como la fantasía, la creación, la intuición, el azar. El investigador debe ser altamente creativo para formular hipótesis y teorías y abrir caminos que lo puedan conducir a su verificación y que le permitan ir más allá de las apariencias; debe ser intuitivo para considerar en sus observaciones variables que parecerían sin importancia... porque aunque la investigación implica reglas de control de las distintas situaciones que concurren en un fenómeno, este control no puede ser absoluto; pueden darse situaciones inesperadas, el investigador puede cometer errores en el proceso que lo conduzcan felizmente a descubrimientos que no eran predecibles u otros errores y descubrimientos que pueden cambiar el rumbo de su investigación.

En la historia de la ciencia existen numerosos ejemplos de hombres de gran creatividad que han manifestado cómo durante las primeras

fases de su trabajo, no existía una forma clara de poder expresar o proponer la investigación. Era casi una intuición. Galileo intuyó que la aceleración uniforme podía (y luego demostró que debía) definirse con base en incrementos iguales de velocidad medidos en incrementos iguales de tiempo. Torricelli intuyó que el aire ejercía una presión sobre los cuerpos. Newton intuyó que los cuerpos caían debido a que las masas ejercen fuerzas de atracción entre sí. Einstein intuyó que la perspectiva del mundo, observado desde un haz de luz, debía ser diferente a la perspectiva cotidiana.

Lo anterior no debe conducirnos a pensar que estas primeras fases surgen de una imaginación sin límites, sin ninguna base de un conocimiento previo. Todo lo contrario. Ellas ocurrieron en estas mentes privilegiadas porque, aparte del don natural de su inteligencia, tenían profundos conocimientos de desarrollos anteriores sobre los temas que estaban estudiando y conocían las dificultades que estas teorías predecesoras habían encontrado para explicar ciertos fenómenos (lo que se conoce con el nombre de “anomalías”). Una poderosa combinación de inteligencia, perseverancia, suerte, intuición y conocimiento son las que permiten que una teoría científica llegue a feliz término.

Por otra parte, la palabra suerte (o azar) quizás genere alguna inquietud. Cierta o no, la caída de la manzana a la cual atribuyen algunos historiadores de la ciencia el inicio de la teoría de gravitación universal de Newton, es un buen ejemplo de cómo sucesos fortuitos pueden desencadenar procesos intelectuales de gran envergadura. Todos hemos visto caer objetos. Pero fue a Newton a quien este hecho llamó la atención y meditó sobre él. Arquímedes, con su famoso “Eureka”, desencadenó todo un proceso que permitió explicar, científicamente, que la corona del rey Hierón de Siracusa, no tenía el oro que había sido entregado al orfebre y además el por qué, y con qué fuerza, los barcos flotan. Un accidente durante los experimentos de Röntgen permitió el descubrimiento de los rayos X.

Pero esto no es suficiente para aceptar una teoría como científica. Podríamos pensar que cosas similares ocurren en la quiromancia, la astrología y otros conocimientos que no son considerados dentro del ámbito científico.

El aspecto al cual hemos hecho referencia como parte de la formación de un conocimiento científico podemos denominarlo “ciencia en formación” o “ciencia privada”. Es el momento del desarrollo y crecimiento; es la formación de un embrión, vulnerable en su forma pero potencialmente fuerte en sus posibilidades. Un roble, en su fase inicial de crecimiento es débil; fácilmente podemos destruirlo. Pero si dejamos pasar el tiempo y permitimos que madure y se forme, entonces obtendremos un árbol robusto, fuerte, lleno de vigor. Igual el conocimiento científico. Por esta razón, durante esta parte del proceso los científicos son muy cautelosos en dar a conocer sus descubrimientos. Sólo aquellos que están íntimamente ligados a la investigación en ciernes están al tanto de lo que ocurre. Pero es necesario llegar a un estado en el cual el conocimiento pueda ser estructurado; a un estado en el cual una teoría permita englobar los hechos observados y los experimentos realizados. Pasar de la idea de que el aire ejerce presión sobre los objetos en la tierra, a medir dicha presión, a predecir lo que pueda ocurrir, a explicar por qué la altura de la columna de mercurio no depende del área del tubo. Este aspecto es lo que se denomina “ciencia como institución” o “ciencia pública”. Es la que se da a conocer a la comunidad científica y a la humanidad en general.

¿Qué caracteriza a la ciencia como institución? ¿Cuáles son las exigencias que se le hacen a una teoría para poder hacerla pública? Esto corresponde al tema de la formalización de la ciencia. Veamos algunos conceptos.

1.5 la formalización de la matemática. Las consideraciones que siguen son tomadas de la forma como el pensamiento matemático ha ido estructurando su saber. Se ha escogido este tipo de pensamiento porque sin duda es el procedimiento más elaborado que ha desarrollado el ser humano. Casi estaríamos tentados a hablar de “perfección” sino fuera por la conclusión de Gödel cuando demostró, mediante el famoso teorema que lleva su nombre, que la matemática no es coherente¹⁵

¹⁵ El teorema de Gödel establece que en un sistema deductivo es posible que existan conclusiones (teoremas) pertenecientes al sistema y que no sean deducibles de los principios (axiomas) de base.

Uno de los aspectos que distingue a las matemáticas en general, es su carácter deductivo. Es fácil recordar cómo en geometría se descubrían nuevos teoremas (es decir, nuevas propiedades) a partir de otros ya conocidos. Sin embargo, no es posible que este procedimiento deductivo sea *ad infinitum*; en alguna parte debemos iniciar el proceso, sin exigirle a este comienzo ninguna deducción de premisas o verdades anteriores. A estas proposiciones iniciales se las denomina “axiomas” o “postulados”¹⁶. Como lo explicó Aristóteles, las ciencias demostrativas deben partir de principios indemostrables; de lo contrario los pasos de la demostración serían infinitos.

Para que una teoría matemática sea una “teoría formal” es necesario, aparte de disponer de un cuerpo axiomático, poseer un grupo de definiciones, de proposiciones y de operaciones así como un proceso de razonamiento deductivo.

Los axiomas y postulados son enunciados cuya veracidad no se discute. Ejemplos de axiomas son los siguientes:

- Si a cantidades iguales se agregan o quitan cantidades iguales, los resultados son iguales.
- Dos cantidades iguales a una tercera son iguales entre sí.
- Toda cantidad puede reemplazarse con su igual.

Ejemplos de postulados pueden ser los siguientes:

- Por dos puntos dados cualesquiera puede hacerse pasar una recta, y sólo una.
- Toda recta puede prolongarse en ambos sentidos.
- El camino más corto entre dos puntos es la recta que los une.

Los axiomas y postulados son el soporte de toda teoría matemática. A partir de ellos y utilizando un proceso lógico-deductivo se obtienen afirmaciones (proposiciones) cuya verdad o falsedad dependen únicamente de este proceso. Son los corolarios y teoremas.

¹⁶ Los axiomas son proposiciones que se consideran verdades que no necesitan demostración y que pueden utilizarse en cualquier campo del conocimiento. Los postulados son verdades específicas a un área del conocimiento determinada.

Para aclarar el tema de la formalización también es necesario establecer una serie de definiciones. Cualquier intento de definir una palabra en el idioma español, utilizando sólo palabras del español, termina en un círculo vicioso. Si queremos definir la palabra “tierra” encontraríamos una definición como: planeta en el cual habitamos. Al buscar “planeta” encontramos: uno de los nueve cuerpos que forman nuestro sistema solar. Al tratar de definir “sistema solar” encontraríamos: conjunto de planetas compuesto por el Sol, Mercurio, Venus, La Tierra, Marte, Júpiter, Urano, Neptuno y Plutón. Volvemos a la palabra “tierra” y dos veces encontramos la palabra “planeta”.

Las definiciones en matemáticas deben tener sentido y ser consistentes. Para ello es necesario recurrir a una propuesta similar a la de los axiomas: una teoría matemática debe disponer de un grupo pequeño de términos (conceptos) indefinibles, a partir de los cuales se pueden establecer definiciones. Así, en geometría se toman como palabras indefinidas a *punto* y *línea*. Con ellas podemos definir “segmento de línea”: porción de una línea contenida entre dos puntos dados sobre ésta. Ejemplos de definiciones son:

- Un conjunto A es un subconjunto de un conjunto B si y sólo si cualquier elemento de A es un elemento de B .
- Cuando una recta encuentra otra formando con ella ángulos adyacentes iguales, éstos se llaman ángulos rectos. (Esta definición supone que “ángulo adyacente” haya sido definido previamente).

Además de los axiomas y de las definiciones, en la matemática es necesario establecer *proposiciones*. Éstas son frases a las cuales se les puede aplicar uno y sólo uno de los términos *verdadero* o *falso*. Los términos *proposición*, *verdadero* y *falso* son palabras indefinidas. Podemos decir que los axiomas y los postulados son proposiciones. Ejemplos de ellas son:

- $7 + 5 = 12$ (verdadera).
- Dos ángulos opuestos por el vértice son iguales (verdadera).
- El cuadrado de cualquier número es par (falsa).

Finalmente es necesario establecer un conjunto de operaciones. Por ejemplo, en geometría el desplazamiento y la superposición de figuras

son dos operaciones permitidas que no alteran las propiedades de las mismas.

Una vez establecida una teoría matemática, la solidez de su construcción puede ser desmoronada por un único contra ejemplo. Dijimos anteriormente que el cuadrado de todo número entero es par. Aunque esto es cierto para $2^2 = 4$, y para $6^2 = 36$, no lo es para $3^2 = 9$. Esta proposición es por lo tanto, falsa. Más sutil es la afirmación: el cuadrado de todo número entero par, es par. Podemos observar que no importa el número par que propongamos, su cuadrado siempre será par. Pero ésta no es una demostración aceptable en matemáticas. Para ello debemos seguir un proceso lógico deductivo. Un número par se puede representar de la siguiente manera: $2n$ siendo n cualquier número entero. El cuadrado de este número es $4n^2 = 2(2n^2)$ que por definición es par, lo cual demuestra el teorema.

Podríamos representar esquemáticamente el proceso de formalización de una teoría matemática mediante el diagrama de la figura 5.

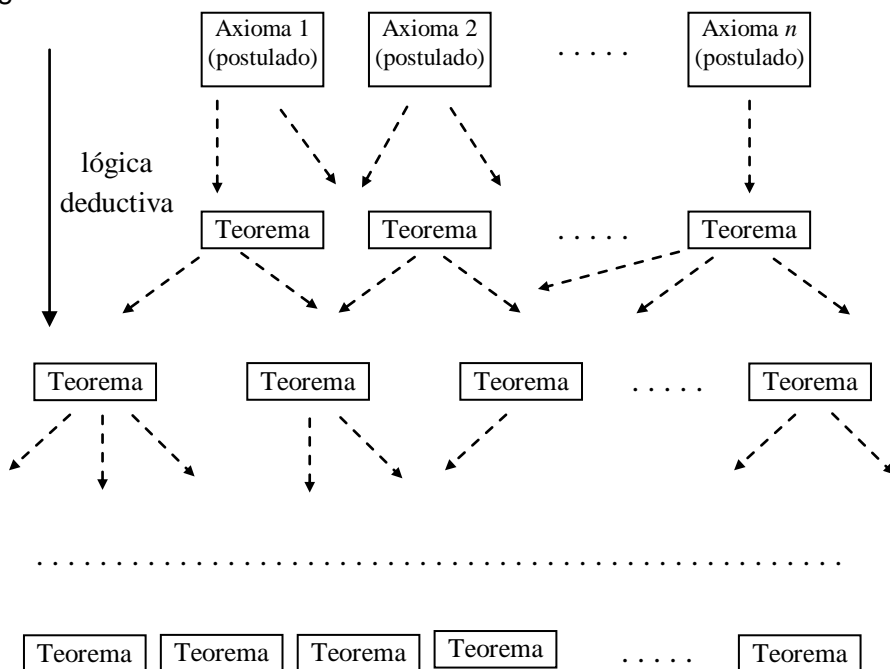


fig. 5

Como veremos más adelante, las ciencias naturales han tratado de copiar este esquema. Tal vez esta sea la razón por la cual se confunde la ciencia pública con el llamado “método científico”. Evidentemente hay un “método”, una forma que se exige para presentar el conocimiento científico. Pero, insistimos, no para adquirirlo. Más adelante retomaremos este tema.

1.5.1 Depuración del lenguaje matemático. Es importante aclarar que para que la matemática aumentara rigor y precisión, se requería una depuración de su lenguaje. A principios del siglo XIX grandes matemáticos intentaron sistematizar los conceptos de función, límite, continuidad; por otra parte, surgieron geometrías no Euclidianas en las cuales ciertos postulados fueron puestos en tela de juicio, particularmente el de las paralelas: por un punto exterior a una recta, sólo es posible pasar una paralela a dicha recta. Surgen las geometrías de Lobatchevski y Riemann. También los conceptos de número natural, número infinito y número real fueron analizados cuidadosamente, pues se descubrieron algunas contradicciones o anomalías que intentaban minar las bases mismas de la matemática. El primer paso fue el estudio del lenguaje. El edificio de la matemática se fue construyendo espontáneamente pese a su aparente rigor. El lenguaje de los fundamentos de la matemática descansaba en el lenguaje común que, aunque en ocasiones era riguroso y preciso, en otros era muy vago y confuso. La tarea de subsanar esta falla fue enorme y estuvo en manos de los grandes matemáticos del siglo XIX y del siglo XX.

Se hizo una importante distinción entre *lenguaje objeto* y *metalenguaje*. D. Hilbert, uno de los pioneros en esta distinción, sostenía que la afirmación “la aritmética no es contradictoria” era una afirmación no matemática; las discusiones sobre esta no-contrariedad se desarrollan no en un plano matemático, sino meta-matemático.

Le correspondió a Carnap aclarar que la *lengua-objeto* es la lengua que constituye el objeto de la investigación, mientras que el lenguaje que utilizamos para hablar acerca de la *lengua-objeto* es el *metalenguaje*. Así, la aseveración “para todo número real x , el cuadrado de $x - 3$ es igual al cuadrado de x , menos seis veces el valor de x , mas nueve”, tiene una expresión en la lengua-objeto de la matemática como sigue: $\{\forall x, x \in \mathfrak{R}, (x - 3)^2 = x^2 - 6x + 9\}$. Sin embargo, la afirmación “la

expresión anterior sirve para calcular fácilmente el cuadrado de ciertos números, por ejemplo $97=100-3$ ”, es una declaración que no pertenece a la matemática; es un meta-lenguaje.

Se podría decir que la formalización de un lenguaje L (o de una teoría) equivale a especificar mediante un metalenguaje L_1 la estructura de L. Se especifica mediante L_1 la forma de las expresiones de L¹⁷.

1.6 La formalización en la ciencia. El gran desarrollo y rigurosidad alcanzados por la matemática indujo a los hombres de ciencia a intentar un procedimiento similar para la presentación de las teorías científicas. Esta es la *ciencia como institución* o *ciencia pública* a la que hemos hecho referencia.

Fue la física la que, desde sus comienzos y gracias al uso de la matemática como su lenguaje, inició un proceso de formalización a la manera que hemos descrito en este texto. Pero las dificultades encontradas en este proceso fueron muy superiores a las halladas para el caso de la matemática. Por ejemplo, ¿qué es un axioma en el caso de la física? No podemos afirmar aquí que el axioma es una verdad indemostrable; no podemos proponer un axioma desligado de la realidad. En este aspecto los hombres de ciencia han recurrido a postulados que no son posibles de negar a la luz de la teoría expuesta. Un buen ejemplo es recordar cómo, a principios del siglo XX, se postuló que la naturaleza estaba compuesta de átomos; sin embargo, estos jamás habían sido vistos. Otro ejemplo es la postulación del “gen” como elemento transmisor de la herencia.

Por su parte, la veracidad de un axioma (o de una proposición) escapaba al hecho simple de la aplicación de una tabla de verdad. Carnap identificó diferentes tipos de proposiciones que dieron luz a esta dificultad: las tipo C, pertenecientes a la axiomática y a las reglas de inferencia, las tipo L, pertenecientes al significado (semántica) y las tipo F, pertenecientes a la verificación del hecho. De esta manera, las proposiciones en matemática son del tipo C-verdaderas o C-falsas. En cambio en las ciencias físicas no sólo la veracidad o falsedad son de tipo C, sino que dependen también del significado y de la confirmación del hecho. La proposición “los cuerpos en caída libre partiendo del reposo

¹⁷ Cfr. J. Ferrater Mora: *Diccionario de Filosofía*. Pg. 1815.

recorren un espacio igual al cuadrado del tiempo transcurrido multiplicado por la constante de gravedad ($h = 1/2gt^2$), debe ser demostrada, según reglas de inferencia, y comprobada.

Con respecto a las definiciones la situación no es menos complicada. ¿Cómo definir “puramente” masa, espacio, tiempo? En principio es posible considerarlos como elementos no definibles. Pero a medida que la teoría se va desarrollando no siempre es posible recurrir a este artificio.

En un intento de precisar el lenguaje se ha desarrollado la semiótica que es el estudio de los signos (diagramas, palabras, ideogramas...). La semiótica considera tres elementos básicos: el signo (S) como tal (vehículo signico), lo designado (D: designatum) y el intérprete (I). El signo @ por ejemplo es interpretado por algunos como “arroba”; para otros es parte de una dirección electrónica. En este caso $S = @$, $D =$ “arroba” (25 libras), $I =$ un persona en particular.

Estos elementos pueden combinarse de diversa manera. Para los semiotistas hay tres combinaciones que son de importancia para su estudio: la relación signo-designatum que da origen a la semántica (ciencia del estudio del lenguaje que se refiere a las relaciones de los signos con los objetos a los que son aplicables); la relación signo-signo que da origen a la sintaxis (ciencia del lenguaje que se refiere a las relaciones entre palabras, a la estructura gramatical de los arreglos de los elementos del lenguaje); la relación signo-intérprete que da origen a la pragmática.

Para el estudio del lenguaje matemático son necesarias y suficientes consideraciones de tipo sintáctico (que son fundamentales en la lógica); para el lenguaje de la física son necesarias además, consideraciones semánticas. Las proposiciones tienen relación con la experiencia.

En su intento de seguir el camino de la formalización matemática, la física encontró otro gran escollo. Si bien es cierto que en matemáticas un solo contraejemplo es suficiente para invalidar toda una teoría, esto no es cierto en las ciencias físicas. Si esto fuera así, no existiría ninguna teoría científica válida en la actualidad. La teoría geocéntrica del universo, defendida por los griegos y que fue válida hasta el siglo XVI presentó contraejemplos (anomalías) que fueron modificando el modelo propuesto hasta que finalmente cedió el paso a la teoría heliocéntrica. Un caso interesante de este proceso es el retroceso en el movimiento de

mercurio. Este planeta durante su movimiento en el firmamento presenta una “irregularidad” debido a que en ciertos períodos del año “se devuelve” en lugar de continuar su “trayectoria regular”. La figura 6 trata de ilustrar esta situación.

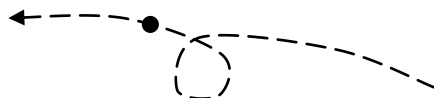


fig. 6

Este movimiento es inexplicable cuando las órbitas de los planetas son circulares. Como el sistema geocéntrico sostenía que la tierra era el centro del universo, y los demás planetas, incluyendo el sol, giraban alrededor de ella, Apolonio propuso lo que llamó los “epiciclos”. Mercurio no seguía un movimiento circular alrededor de la tierra; giraba alrededor de un centro, el cual giraba alrededor de la tierra. De esta manera surgía el movimiento observado.

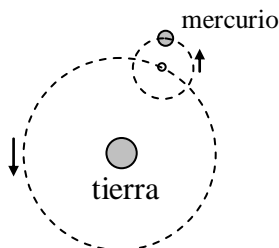


fig. 7

La refutación de una teoría científica es pues, algo más complicado que en el caso de una teoría matemática. Generalmente las teorías científicas se fundamentan en más de una hipótesis de nivel superior y, por lo tanto, ante la presencia de un contraejemplo lo que se piensa es que existe una falla en una o algunas de las hipótesis del nivel superior o de un segundo nivel y queda siempre la esperanza de reorganizar todo el sistema con el fin de salvar el cuerpo de doctrina principal de la teoría en cuestión. De hecho, la refutación completa así como la prueba completa de la totalidad de las hipótesis de una teoría científica no es

posible. Lo que ocurre es que ante la indiscutible evidencia de un gran número de contraejemplos, la teoría es desechada, y esto sólo sucede si se tiene a mano otra teoría que pueda reemplazar convenientemente a la anterior. O como dice Braithwaite:

En casi todos los sistemas es posible mantener cualquier hipótesis frente a datos o testimonios aparentemente contradictorios a costa de modificar a los demás.¹⁸

Finalmente queda otro escollo por salvar. Hay una amplia discusión sobre la forma en que la matemática ha desarrollado sus teorías. Una escuela de fuerte influencia sostiene que, en general, la matemática está ligada a la experiencia. Así, la operación de contar y calcular dio origen a la aritmética; la medición de las propiedades y la observación de los astros dio origen a la geometría; los problemas de la física y en particular el movimiento de la luna alrededor de la tierra, originó el cálculo infinitesimal; el estudio de las formas de la naturaleza dio origen a la teoría del caos. Otra escuela aboga en favor de que el conocimiento matemático pueda en principio desligarse de este vínculo con la naturaleza; de otra manera no se hubiera desarrollado la teoría de conjuntos, la teoría de matrices, el análisis funcional. En estos casos es sabio tomar una posición intermedia, aceptando que en ocasiones hay una relación naturaleza-matemática y en otras no. Pero cualquiera que sea la posición adoptada, sí es claro que en su formalización, la matemática es abstracta. Nagel y Newman dicen al respecto:

La concepción de la matemática como “ciencia de la cantidad” es inadecuada e induce a confusión. La matemática es la disciplina por excelencia que obtiene conclusiones necesarias a partir de cualquier conjunto de axiomas (o postulados) y la validez de las inferencias obtenidas no depende de ninguna interpretación particular que pueda atribuirse a los postulados.¹⁹

De esta forma la matemática está siempre adelante. Se desarrollan teorías que no necesariamente tienen una aplicación inmediata. Es en el futuro donde tal aplicación podrá encontrarse. La teoría de matrices por

¹⁸ R.B. Braithwaite, *Op. cit.* Pg. 36.

¹⁹ E. Nagel y J. Newman: *La demostración del teorema de Gödel.* Pg. 26.

ejemplo, fue desarrollada para estudiar los sistemas de ecuaciones. Sin embargo en la actualidad, su aplicación práctica es invaluable.

Para el caso de las ciencias empíricas diremos que los axiomas se convierten en hipótesis (propuestas) cuya validez es necesario demostrar. Estas hipótesis científicas son proposiciones o leyes que deben ser sometidas a contrastación mediante la experiencia, es decir, se debe corroborar si se trata o no de una ley científica. Aquí lo que constituye la experiencia son hechos que pueden observarse bien sea en forma directa o por medio de aparatos. Estos hechos son relativos a los objetos materiales, acontecimientos físicos, sensaciones y otras experiencias.

Incluso en la matemática la posición moderna llama la atención sobre el carácter de verdad evidente o auto evidente fuera de toda discusión de los axiomas o postulados. El desarrollo de las geometrías no Euclidianas surgió de la puesta en duda del quinto postulado de Euclides. Este postulado sostiene que por un punto exterior a una recta, sólo es posible trazar una recta que no corte a la primera. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, podemos asegurar que el axioma es válido dentro de la geometría plana, aunque no lo sea para las geometrías de Riemann y Lobachevsky. Este tipo de posición no es aceptable en una teoría científica. Los axiomas o postulados son pues, en fin de cuentas, puntos de partida, comienzos de un proceso de razonamiento. William Whewell lo dice así:

Las leyes y teorías científicas no son más que hipótesis inventadas por mentes humanas creativas, hipótesis que había que someter después a la prueba de los hechos.²⁰

Antes de continuar con nuestra discusión, ilustraremos lo aquí expresado.

1.6.1 Un ejemplo formal en biología: las leyes de la herencia. El siguiente ejemplo no obedece estrictamente a la manera como Mendel formalizó la teoría sobre las leyes de la herencia. Sin embargo, sirve para mostrar cómo, implícitamente, existe un procedimiento científico alrededor de dicho tema.

²⁰ G. Reale y D. Antiseri. *Op. cit.* Tomo 3, pg. 294.

Tradicionalmente se ha sostenido que la herencia biológica se transmite por la sangre. Expresiones como “hijos de la misma sangre”, “hermanos de sangre”, “sangre real” etcétera corroboran esta teoría. Podríamos entonces formalizarla de la siguiente manera:

Observación: los hijos se parecen a sus padres no sólo físicamente sino en ciertas actitudes y aptitudes.

Axioma: la herencia se transmite por la sangre.

Corroboración (fase experimental):

- Los hijos poseen características intermedias con respecto a las características de sus progenitores. Por ejemplo, si el padre es alto y la madre baja, el hijo tiene una estatura entre estas dos.
- Las familias de genios (Los Bach, Los Strauss, los Huxley ...).

Anomalías:

- Hijos más parecidos a los abuelos que a lo padres.
- Hermanos muy diferentes entre sí.

A pesar de los muchos ejemplos en contra de esta teoría, al no existir otra que pudiera reemplazarla, ésta primó por muchos siglos.

La teoría de Mendel. Mendel estableció el “gen” como unidad de transmisión de la herencia. Podríamos proponer los siguientes postulados:

Axioma 1: La herencia se transmite mediante una “unidad de la herencia”: el gen.

Axioma 2: Cada individuo posee múltiples genes, uno por cada característica.

Axioma 3: Existen genes dominantes y genes recesivos.

Corolario: Un individuo se caracteriza por la fórmula (Aa, Bb, Cc, \dots) en donde A es el gen dominante y a el gen recesivo, correspondientes a una característica dada.

Definiciones:

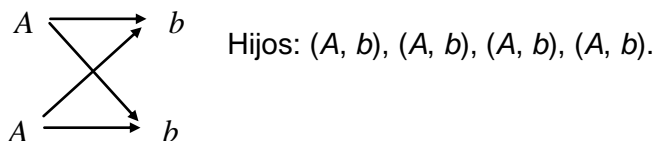
- Una raza es pura si siempre transmite el mismo tipo de gen (bien dominante, bien recesivo).

Reglas de operación:

- Un híbrido transmite tanto genes dominantes como recesivos.
- Los genes se combinan entre sí, independientemente.

“Teorema” 1: La primera generación de razas puras sólo presentan las características dominantes de los progenitores.

Demostración: Sea un padre de gen dominante A , y una madre de gen recesivo b . Las fórmulas son: Padre (A, A) y madre (b, b) (Por el corolario). Las combinaciones posibles, de acuerdo a las reglas de operación son:



Es decir, todos tienen la característica A como dominante. Esta generación ya no es pura: es híbrida.

“Teorema” 2: Los hijos de razas híbridas transmiten el gen dominante en la relación 3:1.

Demostración: De acuerdo con las reglas de operación, las combinaciones posibles de un padre (A, b) y una madre (A, b) son:

$$(A, A), (A, b), (b, A), (b, b).$$

El gen dominante está en tres de los cuatro casos.

El modelo explica:

- La semejanza en algunos rasgos entre padres e hijos.
- La semejanza en algunos rasgos entre nietos y abuelos.
- La enorme diversidad de las características de los seres vivos.

Esta teoría explica lo mismo que la de la sangre, y a su vez resuelve las anomalías encontradas en la primera. Por esta razón, la reemplaza. Aquí sólo hemos indicado una pequeña parte de la teoría. El lector interesado puede consultar obras especializadas al respecto.

La siguiente tabla muestra la variedad entre híbridos, de acuerdo con el número de genes diferentes que pueda tener cada padre:

Genes diferentes	Variedad entre híbridos
1	2
2	4
3	8
...	...
20	> 1 millón
...	...
30	> mil millones

Es bueno aclarar que los últimos avances en biología sobre genética molecular han creado herramientas poderosas para la comprensión y manejo de la herencia. No obstante la teoría de soporte sigue siendo el modelo de Mendel.

A la luz de la teoría moderna podemos decir que la “Genética Mendeliana” se ocupa de marcadores fenotípicos o morfológicos (genotipo y ambiente). La “Genética molecular” se ocupa de marcadores moleculares. Miden las diferencias entre individuos de una población con base en el ADN, diferencias sólo entre los genotipos, con exclusión del ambiente.

Actualmente el gen se traduce (o *transcribe*) en una proteína la que a su vez determina una característica. El gen es una molécula de *RNA mensajero* que se traduce en una proteína.

1.6.2 Como complemento del tema, indicaremos algunos ejemplos de “hipótesis en ciencias sociales.

Malthus estableció tres postulados:

Postulado 1: El alimento es necesario para la vida del hombre.

Postulado 2: La atracción entre los sexos es indispensable y se mantendrá siempre aproximadamente tal como es en la actualidad.

Postulado 3: La naturaleza es escasa y restringe el crecimiento.

Los postulados 1 y 2 implican crecimiento. El crecimiento de la población es infinitamente superior al poder de la tierra para producir alimentos. El primero obedece a una progresión geométrica, y el segundo a una progresión aritmética. La conclusión es clara: llegará un momento en el cual la humanidad no podrá disponer de alimento para su subsistencia.

David Ricardo postuló en el campo de la economía:

- 1) Únicamente el trabajo manual es productivo, ya que crea bienes materiales que poseen un valor objetivo intercambiable.
- 2) Los científicos, los políticos, los gobernantes, los profesores, en definitiva, todos los productores de bienes inmateriales, *quae tangere non possumus*, sólo colaboran indirectamente en la formación de la riqueza nacional, por lo cual la riqueza de una nación será tanto más grande cuanto menor sea el mundo de los ociosos.
- 3) Se alcanza la cumbre de la sabiduría cuando el Estado, dejando libre a cada individuo para que consiga el máximo de bienestar personal, asegure automáticamente el máximo bienestar a todos los individuos.²¹

En el campo del derecho, Cesare Lombroso sostenía que “los criminales no delinquen por un acto consciente y libre de voluntad perversa, sino porque tienen tendencias perversas, tendencias cuyo origen está en una organización física y psíquica diferente a la normal”²². De aquí se desglosa toda una teoría sobre el castigo: el derecho de la sociedad a castigar a los delincuentes no se basa en la responsabilidad o maldad del delincuente, sino en el hecho de que éste es peligroso para la sociedad; la ley le restringe las opciones para cometer el delito.

²¹ Cfr. G. Reale y D. Antiseri, *Op. cit.* Tomo 3, Pg. 284.

²² En *Ibíd.* pg. 309.

1.7 Una clasificación de las ciencias. Otro criterio que nos puede ayudar para la definición provisional de ciencia es el de su clasificación. Este tema se relaciona con lo expuesto más atrás sobre los tipos de conocimiento. Si no podemos decir qué es la ciencia, sí podemos decir que existen algunas áreas que no lo son. Por ejemplo, la religión y el arte son dos esferas fundamentales de la vida humana que no se encuentran en el ámbito científico, pues éste es tal porque se refiere a realidades que en principio pueden ser cognoscibles racionalmente, es decir, cualquiera puede acceder a ellas. En el caso de la religión, ésta se encuentra en el plano de la espiritualidad, de la creencia y la fe y su aceptación o no depende de que se crea o no en sus dogmas. Por ejemplo, alguien puede dudar de la existencia de Dios y otro ser un creyente fanático. Pero ninguno de los dos puede negar la ley de la gravedad. El creyente no podría decir que “no cree” en ella, pues ésta es una ley universal que puede ser estudiada en sus fundamentos matemáticos por cualquier persona y puede ser verificada también por cualquiera. Es decir, la gravedad es primero un fenómeno natural y, segundo, responde a una ley que puede ser verificada. Dios no es un fenómeno natural. A él se accede por creencia y fe: de la ley universal no se puede inferir que Dios no existe. Algo semejante sucede con el arte, la magia o el misticismo: ninguna de estas esferas puede ser sometida a condiciones de experimentación y verificación objetivas. Más bien, cada una de ellas depende o del talento individual o de experiencias estrictamente individuales.

Teniendo en cuenta lo anterior, recordemos las distintas clases de objetos y fenómenos: hay objetos y fenómenos de existencia real, hay objetos ideales y objetos y fenómenos culturales. Según esto, podemos hablar de ciencias naturales y ciencias humanas. Los objetos y fenómenos de las primeras son, obviamente, objetos y acontecimientos de existencia real, como por ejemplo, los eventos que ocurren en la materia y que son estudiados por la física, o las transformaciones, reacciones y combinaciones de las sustancias que son objeto de estudio de la química. Los objetos y fenómenos de los que se ocupan las segundas, son también de existencia real, pero circunscritos a la realidad humana. Así la psiquis y el comportamiento son estudiados por la psicología; el hombre en su condición tanto natural como social es el objeto de estudio de la antropología, etc. Las ciencias humanas, pues,

comparten las características fundamentales de las ciencias naturales: se ocupan de fenómenos cognoscibles; utilizan la observación controlada y una cierta experimentación; pueden describir y explicar fenómenos y buscar soluciones a fenómenos problemáticos. En conclusión, tanto a las ciencias naturales como a las humanas las podemos denominar *ciencias empíricas*.

¿Y la filosofía? Ella es un caso especial dentro de las distintas ramas del saber. La filosofía no puede ser entendida, claro está, como una ciencia, aunque desde su nacimiento hasta la revolución científica ciencia y filosofía eran una sola cosa. A los naturalistas se les llamaba “filósofos naturales” y a la ciencia “filosofía natural”. A partir de la revolución científica, la ciencia se fue “especializando”; los distintos objetos de estudio empezaron a aislarse para su mejor conocimiento. Así nacieron las distintas ciencias (la física, la química, la medicina, la psicología, etc.). Desde entonces, la filosofía no tiene un objeto de estudio definido, (como lo son las transformaciones moleculares de la materia); puede ocuparse de fenómenos muy diversos aunque no siempre de “existencia real”; de ahí que ella pueda dividirse en varias ramas. Así, tenemos la filosofía moral y política, la filosofía del arte, la filosofía de la existencia, etc. Sin lugar a dudas se puede afirmar que la filosofía está ubicada allí donde la ciencia encuentra su límite.

Es importante anotar, sin embargo, que hoy ciencia y filosofía tienen una relación muy estrecha. El siglo XX ha asistido al nacimiento de una disciplina que lleva por nombre “Filosofía de la ciencia”, la cual se ocupa de reflexionar acerca de algunos problemas conceptuales que la ciencia presenta tales como la naturaleza de la ciencia, los criterios de verdad de una teoría, los métodos, la relación ética e investigación científica, etc. Pero también los resultados de las ciencias se convierten en el contenido de la filosofía para reflexionar sobre el mundo. Ampliaremos este tema en **1.8**.

Para nuestra discusión llamaremos “ciencia” únicamente a las ciencias empíricas (las ciencias de la naturaleza y las ciencias del hombre), excluyendo de tal clasificación a la filosofía, la matemática pura, la religión y el arte. La función primordial de la ciencia es el establecimiento de leyes generales de los fenómenos empíricos de que se ocupa, a la manera como Auguste Comte lo definió. En las ciencias con un desarrollo muy elevado (por ejemplo la física) las leyes forman

jerarquías que permiten establecer esquemas lógico-deductivos. En su estado inicial, una ciencia establece leyes que son generalizaciones clasificatorias²³ como por ejemplo en el caso de la biología cuando se dice que las ballenas son mamíferos, lo cual permite la generalización de una cualidad común a las ballenas y que las separa del resto de habitantes del mar.

Podemos asegurar que en el mundo moderno la clasificación de las ciencias es cada vez menos tajante. En realidad, la nueva manera de investigar hoy el mundo ha obligado a pensadores, científicos, tecnólogos y filósofos ha renunciar a la idea de clasificaciones rígidas. El mundo se muestra hoy de una complejidad tal, que es necesario estudiar los distintos problemas y fenómenos teniendo en cuenta sus interrelaciones con otros. A manera de ilustración, podemos pensar en los problemas ambientales que vive la totalidad del planeta. Estos problemas no pueden estudiarse desde una sola perspectiva. Un problema como el de la contaminación de los ríos no puede solucionarse solamente con la intervención de los expertos en química porque en él influyen además factores económicos, políticos y culturales que deben tenerse en cuenta cuando del estudio y la solución se trata. Actualmente se habla de bio-física, mecatrónica y astrofísica, así como de bioingeniería, bio-informática, redes neuronales etc. Esto nos muestra que las fronteras entre las distintas ciencias se hacen cada vez más difusas y que las clasificaciones esquemáticas hoy son anacrónicas.

En conclusión, hasta finales del siglo XIX la ciencia estaba dividida en varias ramas por la especialización que requirieron los distintos objetos de estudio. En este período el método tuvo un carácter reduccionista el cual se mostró insuficiente durante las primeras décadas del siglo XX. Los científicos se vieron en la necesidad de cambiar su concepción acerca del mundo y de buscar métodos más interdisciplinarios que dieran cuenta de la complejidad de los fenómenos, de sus distintas interrelaciones y de la responsabilidad humana en ellos. Así nace la Teoría General de Sistemas que intenta desde sus diferentes perspectivas encarar dicha complejidad. Es por esta razón que para fines metodológicos nuestra teoría tiene en cuenta una nueva clasificación de las ciencias, más general y por ello mismo más flexible.

²³ Cfr. R. B. Braithwaite, *Op. cit.* pg. 18.

Se trata de “las ciencias duras” y las “ciencias blandas” a lo que nos referiremos en el siguiente capítulo.

1.8 ¿Qué entendemos, entonces, por ciencia? Por lo expuesto hasta aquí, la definición de “ciencia” no es una tarea fácil. No poseemos herramientas que nos permitan asegurar de una manera rigurosa e inequívoca si en un momento dado una teoría pertenece o no al campo de la ciencia. En este sentido, la comunidad científica es bastante conservadora: se puede negar la validez de una teoría, ya que esto no compromete en mucho el que ella llegue después a ser considerada como tal. Pero no es fácil aceptar desde sus comienzos el carácter científico de un conocimiento; éste lo reconoce la misma comunidad científica después de cuidadosos análisis.

Hay un grupo de filósofos modernos que se han ocupado del tema. Entre ellos vale la pena destacar a Karl Popper, Thomas Khun y Paul Feyerabend.

La idea de ciencia en Popper está determinada por algunos conceptos tan fundamentales como el de falsación –por oposición al de verificación–, el de deducción –por oposición al de inducción– y con ello su método deductivo de la prueba. Se trata de “demarcar”, es decir, de diferenciar lo que es ciencia de lo que no lo es. Para este fin, Popper adelanta una crítica al principio de inducción como procedimiento científico: no podemos aceptar principios generales a partir de casos particulares tal como lo han admitido muchos teóricos de la ciencia. Para éstos, el principio de inducción puede conducirnos a la obtención de una conclusión general de alta probabilidad: si el sol sale todos los días por oriente, y así ha sido por milenios, se puede asegurar que existe una alta probabilidad de que el sol salga mañana por el oriente.

Para nuestro crítico, se trata de la *inducción por repetición y enumeración*: observaciones repetidas, pueden asentar una generalización que ha sido propuesta por una teoría. Así, “la lógica del descubrimiento científico sería idéntica a la lógica inductiva, es decir, al análisis lógico de procesos inductivos”²⁴.

¿Por qué este tipo de inducción no tiene validez? Porque ninguna cantidad de observaciones puede fundamentar de manera segura una

²⁴ K.L Popper: *The logic of Scientific Discovery*. Pg. 27.

generalización, ya que podría presentarse una sola observación contraria a las que se han hecho. Famoso es, en este caso, el ejemplo de los cisnes: ningún número de observaciones de cisnes blancos podrá establecer que todos lo sean, o que sea mínima la probabilidad de encontrar uno que no sea blanco.

Pero la crítica a la inducción hecha por Popper se extiende también a la *inducción por eliminación*. Se trata aquí de la idea de que eliminando las teorías falsas podría imponerse, al fin, la verdadera. El principal argumento en contra es, por un lado, que el número de teorías es infinito, y por otro, que el número de soluciones “lógicamente posibles” para cada problema también lo es.

A partir de esta crítica podemos ver hacia donde se dirige Popper con el criterio de falsación. Este criterio, que básicamente es de *demarcación*, nos afirma que una teoría para ser científica debe ser falsable, esto es, que debe ser posible demostrar que está equivocada. En este sentido, no se trata únicamente de su verificación; en realidad la falsación es un concepto opuesto al de verificación. La falsación no busca hechos y predicciones que verifiquen o confirmen la teoría, sino hechos que la desmientan o predicciones que no se cumplan. ¿Cómo se corrobora entonces una teoría? Cuando todos los esfuerzos por falsarla... ¡fracasan!

¿Qué es, pues, la ciencia para Popper? Podríamos decir que la ciencia busca la verdad, pero ésta no se predica de los hechos sino de las teorías. Lo anterior significa que una teoría será verdadera cuando se corresponda con los hechos, de tal manera que la ciencia busca teorías cada vez más cercanas a la verdad. Sin embargo ¿qué es la verdad? No existe un criterio para determinar con absoluta seguridad la verdad de una teoría (¡incluso si la encontráramos!). De ahí que Popper afirme que la verdad es más bien un “ideal regulador”; la ciencia consiste entonces en un proceso de aproximación que elimina “los errores de las teorías precedentes” sustituyéndolos “por teorías más verosímiles”²⁵.

La actividad del científico debe consistir en esa permanente falsación de las teorías y no simplemente en su verificación y ajuste de anomalías del *paradigma* vigente, lo cual conduce a la rutina, a la ineficacia y, en últimas, al estancamiento de la ciencia.

²⁵ G. Reale y D. Antiseri. *Op. cit.* tomo 3, Pg. 896.

De otro lado Kuhn, partiendo de la historia de la ciencia como elemento clave para la comprensión del desarrollo, justificación y validación de las teorías científicas, propone su concepción a través de las nociones de *ciencia normal* y *ciencia extraordinaria* ambas articuladas a la de paradigma²⁶.

De acuerdo con este filósofo, una comunidad científica es la que se crea alrededor de una teoría que es la dominante (el *paradigma*), al interior de la cual sus miembros desarrollan investigaciones. Esto es lo que Kuhn llama *ciencia normal*. Los investigadores determinan cuáles son los problemas más significativos para el paradigma, llevando a cabo una permanente confrontación entre el paradigma y los hechos, ampliando su ámbito de dominio. Es decir, la ciencia normal supone una continua solución de rompecabezas para así mantener la vigencia de la teoría. Cuando no se encuentran soluciones a ciertas anomalías, no es la teoría la que es puesta en duda, sino el investigador. A medida que el campo de aplicación de la teoría se extiende, surgen anomalías que ya no pueden explicarse por el paradigma, y éste entra en crisis. Aparece así el concepto de *ciencia extraordinaria*. Se trata de un período en el cual la teoría vigente es puesta en tela de juicio; y en el proceso de crítica y búsqueda se origina una revolución científica que da lugar al nuevo paradigma. Sobre la base de este nuevo modelo se iniciará, otra vez, el período de ciencia normal.

En estas revoluciones hay pues, un cambio de visión de mundo. Así aconteció con las teorías de Copérnico, Galileo, Newton y Einstein en lo referente a la concepción del universo. Sin embargo, los dos paradigmas permanecen vigentes simultáneamente durante cierto tiempo, tal como sucedió con las teorías geocéntrica y heliocéntrica.

Las anomalías pueden considerarse falsaciones pero no en la forma radical que propone Popper, ya que, a su vez, estas falsaciones son condiciones para la aparición de nuevas teorías que las eliminan.

Tenemos pues, una paradoja: Popper aboga por la revolución permanente como lo distintivo de la ciencia, mientras que Kuhn la distingue fundamentalmente por su fase de normalidad.

²⁶ Cfr. T. Kuhn: *La estructura de las revoluciones científicas*.

Es importante resaltar que ambos autores, pese a las diferencias, coinciden en varios puntos de interés para la ciencia. Kuhn lo ve de esta manera:

En casi todas las ocasiones en que Sir Karl y yo nos dirigimos explícitamente al mismo problema, sus puntos de vista acerca de la ciencia y los míos son muy aproximadamente idénticos [...] Ambos rechazamos el punto de vista de que la ciencia progresa por acumulación; en lugar de ello ambos ponemos el énfasis en el proceso revolucionario mediante el que una vieja teoría es rechazada y sustituida por una nueva, incompatible con ella, y ambos subrayamos con fuerza el papel en que en este proceso juega el eventual fracaso de la vieja teoría en hacer frente a los desafíos que le dirigen la lógica, la experimentación o la observación. Por último, Sir Karl y yo estamos unidos en oposición a algunas de las tesis más características del positivismo clásico [...]; y los dos insistimos en que los científicos pueden con toda propiedad tratar de inventar teorías que expliquen los fenómenos observados y lo hagan en términos de objetos reales, cualquiera que sea el significado que esta última frase pueda tener.²⁷

A su vez, Feyerabend considera el proceso del desarrollo científico por encima de su estructura. Igual que Kuhn, destaca la importancia de la historia de la ciencia como herramienta fundamental para la filosofía y comprensión del quehacer científico.

Feyerabend habla de una “teoría anárquica del conocimiento”. Señala la imposibilidad de que un número dado de reglas del conocimiento puedan ser capaces de explicar todas las interacciones que surgen en el proceso histórico de la ciencia. Tales reglas deberían llevarnos como de la mano, evitando caer en errores. Sin embargo el error debe ser parte del proceso científico. Debemos aprender a reconocerlo y a convivir con él y utilizarlo para mejorar la teoría.

La idea de un método que contenga principios científicos, inalterables y absolutamente obligatorios que rijan los asuntos científicos entra en dificultades al ser confrontada con los resultados de la investigación histórica. En este momento nos encontramos con que no hay una sola regla, por plausible que sea, ni por firmemente basada en la epistemología

²⁷ I. Lakatos, A. Musgrave: *La crítica y el desarrollo del conocimiento*. Pg. 81-82.

que venga, que no sea infringida en una ocasión o en otra. Llega a ser evidente que tales infracciones no ocurren accidentalmente, que no son el resultado de un conocimiento insuficiente o de una falta de atención que pudiera haberse evitado. Por el contrario, vemos que son necesarias para el progreso. Verdaderamente, uno de los hechos que más llama la atención en las recientes discusiones en historia y filosofía de la ciencia es la toma de conciencia de que desarrollos tales como la revolución copernicana o el surgimiento del atomismo en la antigüedad y en el pasado reciente (teoría cinética, teoría de la dispersión, esteroquímica, teoría cuántica) o la emergencia gradual de la teoría ondulatoria de la luz ocurrieron bien porque algunos pesadores “decidieron” no ligarse a ciertas reglas metodológicas “obvias”, bien porque las “violaron involuntariamente”.²⁸

Feyerabend considera que tal práctica liberal no es sólo un hecho de la historia de la ciencia, sino que es una necesidad para el desarrollo del conocimiento.

Esta libertad debe ser amplia. Hay que bajar a la ciencia y a la razón del pedestal en que han sido puestas. Este privilegio ha inmovilizado los impulsos creadores del ser humano. Ninguna teoría debe ser considerada como privilegiada. Debemos apostarle al pluralismo, a las alternativas y sobre todo, a la libertad. Los mitos y la metafísica son alternativas para la ciencia y pueden proporcionar un conocimiento que no esté contenido o aún sea negado por ella.

Podríamos intentar entonces una síntesis y definir ciencia como el conocimiento adquirido a través de un proceso basado en un razonamiento, bien sea de tipo inductivo o deductivo; debe ser lo más objetivo posible. En su fase más elaborada debe poder ser expuesto a la comunidad internacional en forma de un esquema formal, en lo posible deductivo, soportado por resultados experimentales. La teoría en cuestión no sólo debe explicar un amplio rango de fenómenos típicos de su interés, sino de predecir otros fenómenos no observados directamente. Tales comprobaciones deben poder ser realizadas por cualquier persona que conozca la teoría y disponga los experimentos en las situaciones descritas por la teoría. El lenguaje utilizado debe ser de la mayor precisión posible, siendo ideal el lenguaje matemático.

²⁸ Cfr. P.K. Feyerabend: *Contra el método*. Pg. 15.

Pero si estuviéramos obligados a dar una definición “concisa”, deberíamos decir que *ciencia es lo que hacen los hombres de ciencia*. En el fondo, ellos deciden cuándo una teoría puede considerarse o no como científica. La historia de la ciencia está llena de ejemplos pertinentes a este respecto.

Terminemos así este capítulo con la acotación de Brigman:

No existe un método científico como tal, pero la característica más vital de todo procedimiento científico ha sido siempre el realizarla con toda la potencia de la mente, sin poner barreras. Esto significa que no deben existir privilegios especiales acordados por la autoridad o la tradición, que se ha de tener especial cuidado en evitar los prejuicios personales y las predilecciones, que continuamente ha de comprobarse si se está cometiendo algún error, y que debe seguirse cualquier línea de investigación que parezca prometedora. Todas estas reglas son aplicables a cualquier situación de la que se quiera obtener una respuesta adecuada y no son sino manifestaciones de inteligencia.²⁹

²⁹ P.W. Brigman: *Reflections of a Physicist*. Pg. 301.

CAPÍTULO 2

TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS LEYES DE LOS SISTEMAS

2.0 Reduccionismo. Como lo mencionamos en el capítulo 1, en el procedimiento tradicional de la ciencia existe una manera muy particular de estudiar los fenómenos. Galileo lo llamó *resolución*: consiste en aislar el fenómeno en estudio de tal manera que sólo se tengan en cuenta las variables fundamentales. La física clásica, así como la química y otras ciencias lograron encontrar el tipo de fenómenos que permitían este tratamiento.

Un buen ejemplo puede ser el movimiento de un proyectil lanzado horizontalmente. Galileo concluyó que dicho movimiento está compuesto por dos movimientos *independientes*: uno horizontal que sigue el principio de inercia, y otro vertical que sigue la ley de la caída de los graves. La gráfica 2.1 muestra este caso.

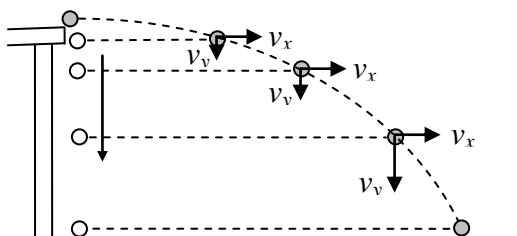


Fig. 2.1

Una pequeña esfera es lanzada desde una mesa mediante un fuerte impulso horizontal. La esfera describe una parábola durante su caída, resultado de dos movimientos independientes: uno horizontal, cuyo componente de velocidad es igual a la velocidad adquirida mediante el impulso inicial en ausencia de fricción; otro vertical, equivalente a la caída libre, sin fricción, de la esfera. Puede demostrarse que la distancia recorrida en un tiempo t –la distancia desde el punto en el cual la bola fue impulsada hasta su posición real en dicho instante– es:

$$s = \sqrt{(v_x t)^2 + (1/2 g t^2)^2}$$

En donde v_x es la velocidad con la que sale la esfera debido al impulso inicial. En este análisis sólo se han tenido en cuenta el tiempo, la velocidad inicial y la constante gravitacional g (es decir la fuerza de atracción que la tierra ejerce sobre la esfera). Ninguna otra influencia fue considerada. A esto se le llama *reduccionismo* y es una de las herramientas más poderosas para el desarrollo del conocimiento científico.

Si podemos aislar un fenómeno del resto del universo y considerar sólo las variables fundamentales que lo caracterizan, es posible subdividirlo en partes o subproblemas, por complejo que él sea. Éstos deben poderse resolver, o de lo contrario se subdividirán a su vez. Cuando todos los componentes se hayan resuelto, se habrá resuelto el problema inicial.

Se intentó entonces, buscar un elemento de base que facilitara la explicación. Por ejemplo, en física se consideraba que la parte fundamental a la cual se reducían todos los objetos era el átomo. En química, la tabla periódica de los elementos era la descripción de las partes fundamentales de los procesos químicos. En biología, la célula era el equivalente al átomo en la física. Y en forma similar en otras áreas del conocimiento humano.

Descartes (1596-1650), en su conocido libro *El discurso del método* describe el segundo y tercer precepto del método para adquirir conocimiento correcto, así:

[...] dividir cada una de las dificultades que examinase en tantas partes como fuera posible y como se requiriese para su mejor resolución.

El tercero, conducir ordenadamente mis pensamientos, comenzando por los objetos más simples y fáciles de conocer para ascender poco a poco, como por grados, hasta el conocimiento de los más complejos, suponiendo, incluso, un orden entre los que no se preceden naturalmente.³⁰

Poco tiempo después de la muerte de Descartes, Newton, en 1687, publica su famosa obra *Principios matemáticos de la filosofía natural*,

³⁰ R. Descartes: *El discurso del método*. Pg. 59-.

popularmente conocidos como los *Principia*. En esta obra se explican las leyes fundamentales que rigen el movimiento en cualquier parte del universo: era la mecánica celestial. Un gran optimismo se apoderó del mundo científico. Los secretos del universo serían por fin develados. Estas leyes permitirían, si en un momento dado todas las variables y sus valores fueran conocidos así como sus interrelaciones, predecir exactamente el futuro o explicar textualmente el pasado.

El otro impacto importante de la obra de Newton fue la convicción cada vez más fuerte de que todos los fenómenos de la física tenían su equivalente en la mecánica desarrollada por él. Rápidamente se inició en otras áreas del conocimiento un proceso similar. Por ejemplo, la presión de un gas, se explica por los choques de las moléculas que lo componen, contra las paredes del recipiente que lo contiene. Y la temperatura del mismo depende de la velocidad con que dichas moléculas se muevan. En sociología, John Locke (1632-1704) comparaba el estado de equilibrio de los átomos de un gas en reposo con el comportamiento de los individuos en una sociedad estable. Lo importante era descubrir las leyes naturales que la regían para poder gobernar, en lugar de imponer leyes para forzar un cierto equilibrio social. En psicología, Theodor Fechner (1801-1887) desarrolló la *sicofísica* en la cual propuso leyes del comportamiento humano similares a las leyes de la física. Esta tendencia a explicar los fenómenos naturales a partir de la mecánica newtoniana se conoce con el nombre de *mecanicismo*. La metáfora predilecta era el mecanismo del reloj. De hecho, por esta época fueron construidos ingenios prodigiosos que podían imitar incluso movimientos humanos complejos cuyo mecanismo interno era estructuralmente similar al de un reloj.

Es importante destacar, sin embargo, que desde que el reduccionismo, y su hermano, el mecanicismo, se convirtieron en paradigmas del pensamiento científico, hubo un grupo de intelectuales, especialmente filósofos y artistas, que criticaron duramente esta manera de pensar. El universo y el hombre no podían ser entendidos como una máquina. El universo, la naturaleza y el hombre se encuentran conectados y hacen parte de un todo orgánico –no mecánico– y vivo. Ahora las nociones de *relación*, *desarrollo* y *proceso* son las claves para comprender el mundo y reemplazan la noción mecanicista de *función*

–esa actividad particular que tiene cada órgano o sistema–. De alguna manera, se volvía hacia el pensamiento griego.

2.1 Holismo. La concepción del mundo que tenían los griegos contrasta fuertemente con la visión reduccionista y mecanicista que acabamos de describir. Los filósofos de la Grecia antigua creían que el universo era un todo integrado y que todo lo que acontecía en él era fruto de las diferentes interconexiones de los elementos que lo formaban.

En primer lugar, la tesis de que la tierra era el centro del universo (teoría *geocéntrica*, diferente a la de la ciencia actual que es *heliocéntrica*, es decir, con el sol como centro del sistema planetario del que hacemos parte), tenía como fundamento destacar la importancia del hombre como la obra más perfecta de la creación. Además, este hecho estaba de acuerdo con la experiencia cotidiana de saber que la tierra está en reposo y que son los planetas (el sol, la luna, etc.) los que giran alrededor de ella.

La materia estaba formada por *tierra, agua, aire y fuego*, los cuatro elementos fundamentales. La tierra tenía entonces cuatro esferas compuestas por estos elementos puros que la rodeaban en el orden descrito. El movimiento de los cuerpos obedecía a una tendencia natural a ocupar la esfera del elemento que poseía en mayor grado. Así, un leño tiende a caer –la primera esfera– porque su composición mayor es tierra. Cuando lo quemamos, el humo tiende a subir, ya que su mayor componente es el fuego, buscando la esfera superior, la formada por fuego. Las cenizas, por estar compuestas principalmente de tierra, deben caer.

Los planetas están contenidos en esferas –el sólido perfecto– y se mueven en círculos alrededor de la tierra, ya que ésta es la figura geométrica más perfecta del plano.

La música está íntimamente relacionada con la matemática. La matemática es el lenguaje de la naturaleza, enseñaba y demostraba Pitágoras. Los sonidos armónicos siguen proporciones expresables por fracciones de números enteros. Las esferas de los planetas, al girar, producen sonidos debido a la fricción con el éter, la materia incorrupta y

eterna que llena el universo. Las distancias de los planetas entre sí deben seguir las mismas reglas de la armonía.

El hombre sólo encuentra su sentido real como parte de la sociedad. Aristóteles decía que así como la mano sólo puede asir cuando forma parte del cuerpo, el hombre sólo es un ser superior cuando está integrado a la sociedad. Era tan importante la visión global que cuando algún acto de la naturaleza no concordaba con ella, se consideraba que éste era un hecho sin importancia. Primaba la teoría sobre la realidad. Un caso que vale la pena destacar es el de la caída de los cuerpos. Según la física Aristotélica, un cuerpo más pesado debía caer más rápido que uno liviano, ya que, al estar compuesto de tierra, la tendencia a su lugar natural debía ser mayor que la de uno más liviano, con menos elemento tierra. Más aún, si el peso de uno de ellos era el doble del otro, aquel debía caer dos veces más rápido que éste. No debe haber ninguna duda de que jamás se observó tal comportamiento en la caída de los graves. Sin embargo, tal anomalía no fue tomada en cuenta y la ley de Aristóteles primó hasta la aparición de Galileo Galilei.

La concepción de un todo interrelacionado recibe el nombre de *holismo*, de la raíz Griega *holon*, *el todo*. Aún durante la Edad Media (que se extiende hacia el siglo XIV) esta manera de ver el mundo en forma integrada tuvo su dominio. La fusión entre el dogma cristiano y el pensamiento Griego se inclinaron por un universo gobernado por las enseñanzas de Cristo, enseñanzas de carácter universal y que explicaban todos los procesos y fenómenos de la naturaleza, tanto física como humana.

En el siglo XVI aparece Galileo Galilei. En su famoso libro *Discorsi e dimostrazione matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica* (1638) da relevancia fundamental al experimento como método para aceptar o refutar la veracidad de un hecho. Son muy conocidas sus críticas a la física Aristotélica. Los experimentos de Galileo son de diversa índole: desde la comprobación física en sí hasta los sorprendentes *experimentos mentales*. Por ejemplo, Aristóteles sostenía que un cuerpo más pesado que el agua no podía flotar; Galileo hacía flotar agujas de hierro demostrando el error del Estagirita. Respecto a la caída de los graves, a la cual hicimos referencia anteriormente, Galileo demuestra, en un extraordinario experimento

mental, cómo dos cuerpos de pesos diferentes tardan el mismo tiempo en llegar al suelo.

A partir de este momento la ciencia experimental inicia su largo y fructífero recorrido. El experimento implica, de alguna manera, un aislamiento del fenómeno para poderlo controlar. No cabe duda que es a través de Galileo que la visión reduccionista se consolida como el método científico por excelencia.

2.2 La teoría general de sistemas. Gracias a los excelentes resultados del procedimiento reduccionista en el pensamiento científico, todas las demás ciencias (química, biología, economía, sociología, psicología...) empezaron a utilizarlo, en muchas ocasiones, con extraordinarios resultados. Sin embargo, y específicamente en el caso de las ciencias humanas, se notó cierta deficiencia cuando se trataron de explicar algunos fenómenos.

Como desarrollos teóricos de gran éxito podemos citar:

En física: la búsqueda del elemento fundamental (el átomo, los bariones, los quarks...).

En economía: la economía de la firma, la microeconomía.

En sociología: estudios empíricos del hombre, la familia, la sociedad.

En psicología: la física social de Fechner. La teoría del comportamiento de Skinner.

Como fenómenos cuya explicación escapaba al procedimiento tradicional y que necesitaron enfoques alternativos, podemos señalar:

En física: el esquema del universo de Newton; las ecuaciones de Maxwell.

En economía: "La riqueza de las naciones" de Adam Smith; la teoría general del empleo, el interés y la moneda" de Keynes.

En sociología: las ideas de Comte: relaciones entre las instituciones sociales, políticas, religiosas y educativas.

El método experimental destaca la importancia del *dato*. Los datos están allí para que sean develados y estudiados y así inferir teorías. De un mismo dato pueden surgir varias "direcciones" dependiendo del

conocimiento y formación de quien lo analice. De este modo, se inicia la especialización del conocimiento.

La universidad, que originalmente conservó una visión holística, inicia un cambio fundamental; pasa de las “facultades” a los “departamentos” dejando que la síntesis de los conocimientos la haga el individuo; él será responsable de la integración de los conocimientos adquiridos.

Esta manera de percibir el mundo, obligó a los investigadores a considerar, fundamentalmente, aquellos fenómenos que permitieran cierto “aislamiento” del medio en el cual se desarrollaban. La caída de los graves, estudiada por Galileo, podía ser comprendida a partir del cuerpo en consideración, de la fuerza que la tierra ejercía sobre él y de la altura en que era dejado libre. No era necesario tener en cuenta los demás efectos que el resto del universo pudieran ejercer sobre el móvil en cuestión. Cuando los investigadores se enfrentaban a problemas en los cuales las interacciones con el medio eran más fuertes, sólo les quedaba la alternativa de reducir drásticamente el significado real de su modelo o realizar el estudio ya no en el plano científico (al estilo de Galileo) sino en el filosófico o en el especulativo.

En el momento actual están confluyendo dos fuerzas que presionan para que se presente un cambio en la manera de adquirir el conocimiento. Algunos autores opinan que se están agotando los fenómenos estudiables mediante la técnica del *aislamiento*. Cada vez son más complejos (existen más interacciones) los fenómenos que el hombre estudia. Por otra parte, hay necesidad de darle un cierto sentido a todo el saber acumulado por el hombre, a este saber fragmentado; en cierta forma, la necesidad de volver a ese conocimiento holístico, aristotélico que daba tanto sentido a la vida. Su ausencia es posible que explique, al menos en parte, la tendencia a aferrarnos a ideologías que tratan de explicarnos a fuerza de doctrina lo que nuestros conocimientos no pueden darnos a fuerza de razón.

Es cierto que existen muchos fenómenos que son explicables por la mera interrelación de sus partes. Por complejo que sea un reloj, podemos comprender su funcionamiento total a partir de cada uno de los elementos que lo conforman. Esto explica el porqué un relojero puede repararlo cuando se daña. Pero existen otros fenómenos en los cuales este tipo de análisis no es conveniente. En estos casos las partes aisladas no son suficientes para la comprensión del todo; ni siquiera

ellas y sus interrelaciones. Existe un lazo tan estrecho entre partes, interrelaciones y todo, que la escisión no es posible, como sucede por ejemplo con los problemas estudiados por las ciencias sociales. En éstas, no es conveniente definir las partes (o subsistemas) para luego armar, como en un rompecabezas, el sistema total. La consideración global, holística, debe primar; y es el todo el que debe definir las partes. Este es uno de los temas centrales de las metodologías de sistemas a discutir en capítulos posteriores.

En 1937 L. Von Bertalanffy presentó oficialmente la idea de una *Teoría General de Sistemas*. La característica general de esta teoría es la de considerar el estudio de un fenómeno, no mediante la apreciación de hechos aislados, componentes del fenómeno, para luego sintetizarlos todos y explicar el hecho mediante la aglomeración de esas partes, sino mediante su consideración total tratando de encontrar leyes y relaciones que permitan la comprensión del mismo sin recurrir a estudios particulares.

Como destacaba Bertalanffy, el enfoque clásico de la ciencia en áreas tales como la química, la biología, las ciencias sociales y en general, cualquier aspecto del conocimiento humano, ha consistido en explicar los fenómenos mediante el estudio de elementos particulares (enzimas y compuestos químicos, sensaciones elementales, individuos libres) con la esperanza de que, al poner juntos tales elementos, se pueda explicar el fenómeno total (célula, mente, sociedad).

A este respecto Ashby escribía:

En la actualidad la ciencia se encuentra en una encrucijada. Durante dos siglos ha explorado sistemas que son intrínsecamente simples o susceptibles de ser analizados en componentes simples. El hecho de que un dogma como “varíense los factores de a uno por vez” haya podido aceptarse durante un siglo, demuestra que los científicos estaban absolutamente dedicados a investigar sistemas que *permitieran* el uso de ese método, pues con frecuencia resulta prácticamente imposible aplicarlo a sistemas complejos. Sólo luego de los experimentos realizados por Ronald Fisher en suelos agrícolas, en la década del 20, se advirtió claramente que hay sistemas complejos en los que no puede aplicarse el método de variar los factores uno por uno, pues estos sistemas son tan dinámicos e interconectados que la alteración de una variable actúa

inmediatamente como causa de variación de otras, de muchas otras, quizás.³¹

Queremos destacar que aquí estamos hablando de consideraciones globales del fenómeno en estudio, no de un perfeccionamiento en los procesos lógicos deductivos. Estamos hablando, pues, del concepto de *sistema*.

Debemos aclarar, sin embargo, que en la actualidad no existe una Teoría General de Sistemas sino una colección de conceptos generales, principios, metodologías, técnicas y problemas relacionados con los sistemas. Por ello se hace necesario distinguir de cuál teoría de visión general estamos hablando. La original se conoce como Teoría General de Sistemas y se refiere a las ideas de Bertalanffy y sus seguidores. Desarrollos posteriores como la Cibernética de Wiener, la dinámica de sistemas de Forrester, la teoría de autómatas celulares, la teoría de fractales, la teoría del caos, la teoría de los sistemas autopoyéticos y, más recientemente, la teoría de la complejidad, forman parte de esa amalgama de conceptos conocidos como teoría de sistemas. Muchos consideran que esta situación riñe con toda la conceptualización que hemos expuesto respecto a una teoría de sistemas y no hace más que corroborar el hecho de su imposibilidad. Tal vez en ello haya algo de verdad. Pero no debemos olvidar que en la historia de la ciencia esta situación ha antecedido a las grandes síntesis. La teoría del campo –marco unificador de la electricidad, el magnetismo, la gravedad y la luz– fue muy posterior a la generación de teorías específicas en cada una de estas áreas. Incluso antes de ella, se dieron ideas unificadoras previas como fue el caso de la teoría de Maxwell de los campos magnéticos.

2.3 El concepto de *sistema*. En el diccionario “sistema” tiene, entre otras acepciones, la siguiente: un conjunto de cosas que, ordenadamente relacionadas entre sí, contribuyen a determinado objeto. Esta definición, de carácter muy general, no es de mucha utilidad cuando queremos utilizarla en el desarrollo de una teoría de los sistemas.

³¹ R.Ashby: *Introducción a la cibernética*. Pg. 16-17.

Es necesario aclarar previamente que no es posible dar una definición de sistema que, como tal, satisfaga al mundo científico. Lo fundamental en una definición es su capacidad de diferenciación. Cuando definimos, la definición nos dice lo que lo definido es, y por lógica, lo que no es. Si consideramos una de las definiciones de sistemas más conocidas: *un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados*, por exclusión aquellos conjuntos que no estén interrelacionados no serán *sistema*. Difícilmente se puede encontrar en la naturaleza y en la sociedad elementos totalmente aislados, lo cual implica que prácticamente todo sea sistema.

En el capítulo anterior hicimos referencia a los conceptos y elementos no definibles para poder establecer una teoría formal. Pusimos como ejemplo el punto, la línea y el conjunto. Siguiendo esta misma línea de razonamiento, no es forzado ni anticientífico proponer que el concepto de sistema pertenezca a esta misma categoría. Para efectos de este curso consideraremos que *sistema* es un concepto indefinible, del cual todos tenemos, en mayor o menor grado, una idea.

De todas maneras es posible proponer una definición *operativa* cuando no se pueda dar una definición *nominal*³². Las definiciones operativas se basan en las *operaciones* que deben ser realizadas para obtener lo definido. El ejemplo más sencillo es la definición de *longitud*. Definirla en forma nominal no es posible. Sin embargo, todos los científicos están de acuerdo en que “definir la longitud de un objeto” es equivalente (o mejor aún, igual para todos los casos prácticos) a responder a la pregunta “¿cuál es la diferencia entre los números que aparecen en los extremos de lo que queremos medir, cuando colocamos un metro sobre este objeto?”

Este es el camino que tomaremos para dar una definición de sistema. Siguiendo a Beishon³³:

- Un sistema es un conjunto al menos de dos elementos.
- Este conjunto es de interés para alguien.

³² Es decir, exclusivamente referida a lo que un nombre o cosa es. En muchas ocasiones es necesario remitirse a definiciones en las cuales la semántica juega un papel primordial.

³³ Cfr. J. Beishon (compilador): *Systems*, pg. 11.

- El conjunto hace algo.
- La adición o sustracción de elementos modifica radicalmente el conjunto inicial.

De acuerdo con esta definición, una mesa podría ser un sistema; posee elementos (patas, clavos, tablas...) interrelacionados (mediante leyes físicas). El que “haga algo” podría interpretarse como la *función*, es decir, la finalidad para la cual fue hecha la mesa. Tal vez la persona interesada pueda ser un cliente y es claro que cualquier parte que se retire altera la mesa original. La teoría general de sistemas no tiene interés en este tipo de “sistemas”.

R. L. Ackoff propone una serie de definiciones que permiten hacer claridad en este tema³⁴. En el capítulo siguiente trataremos esto con más profundidad. Por el momento, digamos que un sistema puede tener metas, objetivos e ideales. La *meta*, en una situación particular, es un resultado preferido que puede ser obtenido en un intervalo específico de tiempo. Por su parte el *objetivo* es un resultado preferido que no puede ser obtenido en un intervalo específico de tiempo, pero sí en un intervalo mayor. El ejemplo típico es el estudiante que busca ganar cada año (sus metas) para lograr el objetivo final: su grado de bachiller. Sin embargo esta graduación podría ser una meta de un objetivo mayor: obtener un título profesional. El *ideal* es un objetivo que no puede alcanzarse en ningún período de tiempo pero al cual podemos acercarnos continuamente. En nuestro ejemplo el ideal podría ser la felicidad.

Las definiciones anteriores se refieren a un tipo de sistema que Ackoff llama *sistemas propositosos*³⁵. Estos sistemas poseen la capacidad de elegir entre diferentes metas y tienen la particularidad de poseer *voluntad*. Los sistemas a los que haremos referencia en la presentación de este texto son sistemas que poseen por lo menos un elemento con capacidad de voluntad: hablaremos pues –salvo indicación específica o

³⁴ Cfr. R.L. Ackoff: *Towards a System of Systems Concepts*.

³⁵ Ackoff distingue entre *propositivo* (purposive) y *propositoso* (porposeful). Estos neologismos tratan de mantener el significado de los términos originales: los sistemas propositivos persiguen diferentes metas que tienen una propiedad común, un propósito, pero éste no es fruto de la voluntad. Los propositosos voluntariamente buscan un propósito. Algunos traductores utilizan los vocablos *intencionales* e *intencionados*.

evidente por el contexto de lo discutido– de sistemas propositosos (intencionados).

En 1954 Kenneth Boulding (Economista), Anatol Rapoport (Biomatemático), Ralph Gerald (Fisiólogo) y Ludwig Von Bertalanffy (Biólogo), crean la “Sociedad para la investigación de sistemas generales” (Society for General Systems Research, SGSR). El programa de esta sociedad tenía como objetivos:

... Desarrollar los sistemas teóricos aplicables en más de un departamento tradicional del conocimiento: sus funciones principales son: (1) investigar los isomorfismos de los conceptos, leyes y modelos en diversos campos y ayudar para obtener transferencias útiles de un campo a otro; (2) crear el ambiente favorable para el desarrollo de modelos teóricos adecuados en los campos donde falten; (3) minimizar la duplicación del esfuerzo teórico en campos diferentes; (4) promover la unidad de la ciencia mejorando las comunicaciones entre científicos.³⁶

Aclaremos en lo que sigue el concepto de isomorfismo.

2.4 Ciencia, tecnología y filosofía de sistemas. Bertalanffy³⁷ considera que debemos distinguir tres aspectos diferentes cuando nos referimos al tema de los sistemas, aspectos que si bien son inseparables en su contenido, son distintos en su intención: el primero es la ciencia de los sistemas, el segundo la tecnología de sistemas y el tercero la filosofía de los sistemas.

Respecto a la *ciencia de los sistemas* podemos decir que busca una teoría científica de los sistemas en las distintas ciencias (física, biología, ciencias sociales) así como el establecimiento de una teoría general de los sistemas en cuanto un conjunto de principios aplicables a todos los sistemas. La idea es la búsqueda de *isomorfismos* en las ciencias. Entendemos por isomorfismos las similitudes de carácter estructural por contraposición a las similitudes de comportamiento. Por ejemplo, para efectos lúdicos infantiles, una muñeca y una niña son análogas: la muñeca es tratada como si fuera un bebé. Sin embargo, esta relación no va más allá de un simple juego; un comportamiento diferente, sería

³⁶ L. Von Bertalanffy: *General Systems Theory*. Pg. 13.

³⁷ Cfr. L. Von Bertalanffy: *Historia y situación de la Teoría General de Sistemas*. Pgs. 38-.

considerado como patológico. Por el contrario, cuando un Ingeniero diseña un edificio, utiliza una serie de ecuaciones que son válidas para cualquier construcción. Las leyes físicas son isomorfismos: sin importar el tipo de edificio el cálculo de una columna será siempre regido por las mismas ecuaciones fundamentales. Más aún, las leyes en cada ciencia son los isomorfismos por excelencia. De alguna manera, la Teoría General de Sistemas busca los isomorfismos (más generales) de isomorfismos (particulares). Como corolario de lo anterior, la ciencia de los sistemas pretende la creación de un vocabulario común como primer paso hacia la unidad de la ciencia. Actualmente puede decirse que gracias a los desarrollos de las teorías modernas sobre la complejidad, se ha logrado un avance importante en este aspecto.

La *tecnología de los sistemas* es la consideración de los problemas tecnológicos que surgen en la tecnología y la sociedad moderna. Existen grandes avances tanto a nivel de hardware (computadores de alto rendimiento, autómatas de gran complejidad, para citar sólo dos) como del software. Disciplinas como la Investigación de Operaciones, la teoría de la información y la cibernética han abierto nuevas perspectivas para el estudio de los sistemas, particularmente para aquellos en los cuales la complejidad ha sido su característica más notable. Actualmente se ha enriquecido este aspecto con el desarrollo de nuevas teorías matemáticas como son la teoría de los fractales, la teoría del caos y la teoría de los autómatas celulares. Los desarrollos tecnológicos han permitido avances importantes en ecología, sociología, teoría de la administración.

Por otra parte, la búsqueda de métodos globalistas ha planteado problemas filosóficos de gran envergadura, temas que estudia, claro está, la *filosofía de sistemas*. Para Bertalanffy son tres los aspectos que deben aquí ser considerados:

- i) La *ontología* de sistemas. Se trata de descubrir lo que se entiende por “sistema” y cómo éste se da en los distintos niveles de nuestro universo de observación. El problema de la Teoría General de Sistemas en su aspecto ontológico tiene que ver con lo que puede decirse respecto a los sistemas materiales, a los sistemas de información, a los sistemas conceptuales y a cualquier otro tipo de sistema vistos desde la perspectiva de su razón de ser, desde sus fundamentos.

- ii) La *epistemología* de sistemas. Por lo dicho anteriormente, estamos ante una nueva forma de conocer el mundo, una manera diferente a la de las epistemologías del positivismo lógico. A esta nueva manera se le ha llamado *enfoque de sistemas*: es la visión de las cosas consideradas como un todo. La realidad es vista como un todo jerarquizado (jerarquía de todos organizados, interrelacionados). No existen hechos totalmente aislados. No podemos obtener una concepción de las cosas mirándola desde sus componentes y con ellos conceptualizar el todo.
- iii) La *axiología* de sistemas. Se ocupa del problema de los valores, de la relación entre el hombre y el mundo. Nuestra situación en el mundo es distinta si nos consideramos parte de él (fruto de la concepción jerárquica del mismo) que si nos consideramos separados de él. El mundo de los símbolos, de los valores, las entidades sociales y culturales son tan reales como las realidades naturales. Debemos integrar las ciencias y las humanidades, la tecnología y la historia, las ciencias naturales y las ciencias sociales, hacer que nuestras dos partes cerebrales trabajen como un todo. Esto le daría una nueva perspectiva a nuestra posición como seres humanos y por lógica, a nuestra escala de valores frente al planeta y a la sociedad.

2.5 Patrón, estructura y proceso. Estos tres conceptos facilitan enormemente la comprensión y aplicación del concepto de sistemas a situaciones reales.

El *patrón* es la configuración de las relaciones entre los componentes de un sistema. Son las “leyes” generales que lo definen y regulan. Es la forma, el orden, lo que identifica al sistema. Un patrón general a cualquier sistema es la *red*, bien sea considerada desde su perspectiva matemática o bien desde una concepción intuitiva.

Por su parte, la *estructura* es la forma como el patrón se manifiesta y se refleja en sus componentes. Es la sustancia, la materia del sistema.

Cuando en un sistema sus elementos (partes) se modifican o cambian continuamente, cuando en el sistema hay un flujo de energía, de materia, de información, entonces a este flujo, a este cambio lo denominamos *proceso*, el cual se ocupa de la continua corporización del patrón. Los tres elementos están íntimamente relacionados y, para el

caso de los sistemas vivos o de la actividad humana, operan simultáneamente.

Usando un ejemplo de Capra, consideremos una bicicleta. El patrón “bicicleta” se caracteriza por dos ruedas, unidas por un marco y por un sistema que permite el uso de energía muscular. Esto diferencia a una bicicleta de un triciclo o de un automóvil. Este patrón puede tomar diferentes formas (estructuras): bicicletas todo terreno, extremas, de turismo, de competencia... No podemos utilizar el concepto de proceso, en este ejemplo, ya que la bicicleta, tal como la hemos analizado, no es un sistema dinámico.

Otro ejemplo: se dice que existen diferentes estilos de administración: los de tipo Fayol y Taylor, los basados en la burocracia, los sistemas de la reingeniería, los autocráticos etc. Todos ellos son maneras de administrar. Tienen pues algo en común: el concepto de administración que es el patrón; todos planifican, comunican, organizan y controlan. Sin embargo, este patrón se materializa en diferentes estilos de administrar: es la estructura. Por su parte para mantener un estilo administrativo dado es necesario un flujo de información, materia y energía que son particulares a cada uno de ellos. Son los diferentes procesos administrativos.

2.6 Leyes de los sistemas.

2.6.1 El concepto de ley. Dijimos anteriormente que las leyes eran un importante caso de isomorfismo. Toda teoría que pretenda ser científica debe, por lo tanto, establecer leyes. Discutamos un poco este concepto.

En un sentido estricto, la palabra “ley” se reserva, en el caso de las ciencias físicas, para aquellas proposiciones de generalidad fidedigna, expresadas por lo común en lenguaje matemático. Cuando estas relaciones son más bien de carácter cualitativo (como cuando se afirma que las moléculas de un gas se reparten proporcionalmente en todas direcciones), o cuando se utilizan modelos hipotéticos que ayudan a la comprensión de un fenómeno (por ejemplo, cuando se asegura que la presión de un gas sobre el recipiente que lo contiene se debe a la fuerza de choque de sus moléculas contra las paredes del mismo), se habla entonces de principios, postulados, hipótesis, teorías o reglas. No

haremos tal distinción y utilizaremos, salvo algunas excepciones que serán destacadas, el término ley como equivalente a los términos enunciados.

Siguiendo a Holton³⁸, distinguiremos tres tipos de leyes: *empíricas, de definición y derivadas*.

Una ley es empírica cuando surge de la observación continuada de determinado tipo de fenómeno. Para que esta regularidad posea cierta consistencia, es necesario que exista una medición, lo cual se refleja en lo que podemos denominar una “ley numérica”. En otras palabras, estamos hablando de mediciones que se representan mediante números, como cuando indicamos la velocidad de un automóvil precisando que va a “treinta kilómetros por hora” (tema que ampliaremos en el próximo capítulo). Este tipo de ley, desde un punto de vista lógico, no puede aceptarse como una verdad universal, ni siquiera general, pues es fruto de la inducción. Un buen ejemplo es la ley de Pareto³⁹.

Las leyes de definición se denominan así porque usualmente llevan consigo la definición de conceptos fundamentales. Es decir, son definiciones que se convierten en ley. Surgen de la observación de un principio regulador aplicable a una variedad de fenómenos aparentemente distintos mediante un proceso de inducción. La ley de Galileo del movimiento de proyectiles o la relación $F = ma$ de la física newtoniana. Estas leyes exigen la formulación de nuevos conceptos: en el caso de Galileo el principio de superposición (independencia de los componentes vertical y horizontal de la velocidad) y la definición de aceleración. En el caso de Newton, la definición de masa y en cierta forma, de fuerza. Son leyes de mayor alcance y confiabilidad que las empíricas –a pesar de que ambas son de tipo inductivo– debido a que poseen un mayor soporte teórico.

Las leyes deducidas siguen un esquema lógico-deductivo. Son deducciones generales de ciertos postulados o axiomas. Por ejemplo, la ley del movimiento pendular puede deducirse a partir de las tres leyes

³⁸ Cfr. G. Holton: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Pg. 234.

³⁹ La ley de Pareto nos dice que con respecto a la distribución del ingreso, el 80% de los ingresos están en manos del 20% de la población. Caso similar en un inventario: el 80% del costo de un inventario está en el 20% de los artículos. Etc.

del movimiento de Newton. Es posible deducir la ley de la caída libre de un cuerpo a partir de las definiciones de velocidad y aceleración promedio y movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Estas leyes son más “seguras” debido a su carácter lógico-deductivo. Sin embargo, lejos están de ser universales o eternas en sentido absoluto. No podemos garantizar que la ley de la gravitación universal ($F = Gm_1m_2/R^2$) sea válida para las relaciones intergalácticas, y necesita ciertos ajustes si queremos utilizarlas en el mundo subatómico. De todas maneras, este es el tipo de ley al cual aspira toda teoría cuando quiere ser lo más depurada posible. Una teoría es más poderosa y consistente en la medida en que sus leyes formen parte de una teoría general, y no dependa de observaciones particulares en campos aislados. Así, la ley de la gravitación universal no sólo explica las leyes empíricas –conocidas ya por los antiguos como era el caso del movimiento de la luna– sino que extiende su poder de aplicación a muchos planetas permitiendo encontrar peculiaridades no observadas antes.

Podemos decir que las leyes empíricas, válidas en un campo limitado, no tienen suficiente información para prevenir al que las utiliza irrestrictamente cuando las aplica a un campo nuevo. En el caso de las leyes deducidas esta limitación, aunque mucho menor, subsiste. A pesar de que han sido obtenidas deductivamente, ellas están ligadas a los axiomas que les dieron origen, y de acuerdo con lo discutido en el capítulo anterior, la validez de estos postulados están siendo sometidos continuamente a contrastación.

2.6.2 Sistema abierto. Entropía. Para una comprensión de los sistemas y sus propiedades, el concepto de sistema abierto es de primordial importancia.

En físico-química se dice que un sistema está *aislado* (o *cerrado*) cuando en él no puede entrar ni salir ningún tipo de energía o materia, ni se hace sensible ninguna influencia sobre ni desde el sistema en cuestión⁴⁰. En un sistema cerrado el sistema no puede realizar trabajo.

⁴⁰ En termodinámica se habla de sistemas aislados en lugar de cerrados. En teoría de control, un sistema cerrado es un sistema con retroalimentación. Si se conocen en cada campo del saber estas definiciones, no puede haber confusión al respecto.

Podemos indicar que fue Galileo quien le dio trascendencia a este concepto. Es el fundamento del reduccionismo. La primera ley del movimiento de Newton dice: *Todo cuerpo material persiste en su estado de reposo o movimiento uniforme (no acelerado) en línea recta, sólo si no actúa sobre él una fuerza resultante (no equilibrada).*

En este enunciado nada actúa sobre el cuerpo. El sistema está completamente aislado o cerrado. En los sistemas cerrados la suma de todas las formas de la energía permanece constante, aunque las energías del sistema puedan tomar distintas formas en el transcurso del tiempo. Esto es lo que ocurre, por ejemplo, en las colisiones de cuerpos perfectamente elásticos.

El concepto alterno es el de *sistema abierto*. Fue Bertalanffy quien llamó la atención sobre la importancia de estos sistemas en su Teoría General. Aquí lo que es considerado como sistema intercambia con el medio que lo rodea trabajo, materia, energía, información. Por ejemplo, en biología los organismos vivos son esencialmente sistemas abiertos: se mantienen continuamente en una interacción constante con su ambiente intercambiando energía y materia.

La interacción de los sistemas con su ambiente (medio que los rodea) hace que continuamente se genere un flujo de calor. Esta transmisión de energía térmica dio origen al concepto de *entropía*. En 1865 el Alemán Rudolf Clausius introdujo el término entropía (del griego *energeia* y *tropel*: transformación de energía). Ésta se define teniendo en cuenta el calor que se transfiere de un cuerpo a otro. Sea H el calor transferido de un cuerpo A que se encuentra a la temperatura T_A , a otro cuerpo B , que se encuentra a la temperatura T_B . El cambio en entropía, ΔS_A , resultante de la transferencia de calor H para el cuerpo A , es:

$$\Delta S_A = - H / T_A \quad (\text{II-1})$$

siendo T_A la temperatura en grados absolutos (grados Kelvin). Como la misma cantidad de calor la recibe el cuerpo B , el cambio de entropía de dicho cuerpo es:

$$\Delta S_B = H / T_B \quad (\text{II-2})$$

Si T_B es menor que T_A , el cambio total de entropía $\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B$ será positivo. Es decir, la entropía sólo puede aumentar. La entropía generada en un proceso térmico es pues, la energía disipada dividida por la temperatura a la que ocurre el proceso. La única forma en que no crezca es para el caso $T_A = T_B$, es decir cuando hay equilibrio térmico. Por ello, la segunda ley de la termodinámica establece que *la entropía del universo tiende a un máximo* ya que el universo es un sistema cerrado. Todos los cuerpos tenderán a un intercambio de calor que culminará con una temperatura igual. Por lo tanto, el universo tiene una tendencia hacia una entropía máxima cuya conclusión directa es que el tiempo no es una variable sin dirección; posee una dirección definida, apunta del pasado al futuro.

2.6.3 Equifinalidad. En un sistema cerrado, el estado final, es decir, el estado de equilibrio puede ser alcanzado sólo a partir de un conjunto dado de condiciones iniciales y a través de una trayectoria única. En un sistema abierto, por el contrario, puede llegarse al estado final por un número diferente de rutas y partiendo de diferentes condiciones iniciales. Tal es el caso del crecimiento de un niño con problemas nutricionales al cual se le administran dosis de alimentos con el fin de restaurar las condiciones normales de desarrollo. En condiciones favorables, es decir, aquellas que permitan una corrección del proceso, este niño alcanzará un estado estable igual al que hubiera logrado si desde el principio su nutrición hubiera sido la conveniente. Esta ley se le conoce también como *teleología* de los sistemas.

Los sistemas cerrados tienden a estados de equilibrio; los sistemas abiertos, a estados estables. En un estado de equilibrio el sistema no puede realizar trabajo. En un estado estable, por el contrario, el sistema está alejado del equilibrio y puede ejercer influencia sobre el medio que lo rodea. Un organismo vivo se mantiene en estabilidad y es por lo tanto un sistema abierto. Al morir, se convierte en un sistema cerrado alcanzando un estado de equilibrio: cesa todo tipo de transferencia de calor entre el cuerpo y su ambiente.

2.6.4 Centralización (integración). Como la característica básica de un sistema es la interrelación de sus partes, para que un sistema se comporte como tal a medida que crece, debe mantener sus elementos

relacionados entre sí. Por esta razón, se hace necesaria la existencia de un elemento “coordinador” o “dominante” que se encargue de tal función. Por ejemplo, la existencia de los gerentes garantiza el comportamiento como sistema de una organización. El cerebro humano hace un papel centralizador con respecto al resto del cuerpo.

2.6.5 Descentralización (mecanización). Paradójicamente, si la estabilidad de un sistema descansa en su capacidad de integración, su complejidad descansa en la división de funciones. Mientras más elementos diferenciados existan en un sistema, mayor será la complejidad de su comportamiento. En cierta forma, una ameba es un sistema perfecto ya que al ser unicelular, el todo, hace todo: traslación, alimentación, reproducción... Al dividirla lo único que se logra son dos amebas idénticas. Desde el punto de la supervivencia es lo máximo que puede desearse, pero el pago por esta propiedad es su simplicidad: cuatro o cinco funciones elementales es todo lo que puede realizar. Por el contrario, el ser humano al poseer órganos diferenciados, puede ejecutar una enorme cantidad de funciones ampliando enormemente la complejidad de su comportamiento. Los sistemas complejos tienden a una diferenciación o mecanización progresiva.

2.6.6 Mecanización-centralización. Las dos leyes anteriores se funden en una sola ley: ellas no son contradictorias sino complementarias. Ambas son necesarias y ambas se dan simultáneamente en muchos sistemas abiertos. Desde un punto de vista biológico, el estado primitivo es aquel en el cual el comportamiento del sistema resulta de la interacción de partes equipotenciales. Progresivamente ocurren subordinaciones a las partes dominantes. Fenómenos equivalentes se presentan en psicología y en sociología. En psicología, con la teoría de la percepción según el punto de vista del movimiento gestalt: percibimos todos integrados, no elementos aislados. En sociología, distinguimos una sociedad de otra por sus líderes (elementos centralizadores), etc. Cuando se inicia la concepción de un ser humano, las células son idénticas. Pasado un tiempo, empiezan a diferenciarse formando las diferentes partes de las que se compone: ojos, cabello, uñas, corazón, brazos... Un grupo de ellas se reserva para

la formación del cerebro el cual toma el comando del resto del organismo.

2.6.7 Mínima entropía. En los sistemas cerrados, como se indicó anteriormente, la entropía sólo puede aumentar. Esta es una manera alterna de definir un sistema cerrado: es aquel en el cual la entropía siempre crece. Por el contrario, en los sistemas abiertos, bajo ciertas características éstos se acercan a un estado independiente del tiempo, un estado estable. Dicho estado se mantiene a distancia del verdadero equilibrio, siendo capaz de realizar trabajo. Este estado estable, que no es otra cosa que un estado equifinal, se alcanza independientemente de las condiciones iniciales y está determinado únicamente por los parámetros del sistema. Aquí la entropía tiende a ser mínima. Los seres vivos luchan continuamente contra la entropía utilizando para ello la interacción con el ambiente que los rodea. Evidentemente, al final la entropía vence, pero durante un lapso de tiempo esta aparente violación de la ley de la entropía es la que permite que los sistemas abiertos puedan permanecer en estados estables, lejos del estado de equilibrio.

2.6.8 Variedad obligada. Ashby define la *variedad de un conjunto* como el número de elementos que pueden distinguirse (o como el \log_2 de este número). Así, el conjunto a, b, c, a, c, b, a de siete elementos tiene una variedad de tres. Esta definición implica que la variedad es relativa al observador: depende de su capacidad de diferenciación. Si, por ejemplo, disponemos del conjunto de elementos θ, I, O que tiene una variedad de tres y una persona no puede distinguir entre θ y O , entonces para esta persona la variedad de este conjunto es dos.

Por su parte, la *regulación* puede explicarse de la siguiente manera. Sea S un sistema, D un elemento perturbador de S , y F una protección de S con respecto a D . El siguiente diagrama (que Ashby llama *diagrama de efectos inmediatos*) explica la idea.

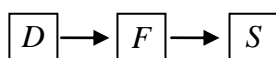


fig. 2.2

La fuente de perturbación tiene una variedad $v(D)$ de estados posibles. El sistema es un elemento que tiene una variedad $v(S)$ de estados posibles, S_1, S_2, \dots, S_n . De estos n estados, un subconjunto, $\eta = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ (no necesariamente los k primeros estados) son denominados *estados esenciales*; son estados que tienen cierto interés para el sistema (o su diseñador). F es un elemento que se encarga de permitir que D ejerza influencia sobre S , sólo en el rango de los estados esenciales.

Por ejemplo, consideremos un cuarto que se mantiene a temperatura constante gracias a un termostato. Aquí S_i son las diferentes temperaturas que puede tomar el cuarto. $\eta = [19^0, 21^0]$ es el rango de temperaturas permitido (deseado) en grados centígrados. D son todos los fenómenos que pueden cambiar la temperatura del cuarto: vientos fríos, vientos cálidos, lluvias, sol... F , el termostato, trata de minimizar los efectos de D en S manteniendo la temperatura en el rango deseado.

Un termostato perfecto es aquel que bloquea todas las variaciones de D y sólo entrega al sistema una temperatura entre 19 y 21 grados centígrados.

De acuerdo con lo anterior, queda claro que la variedad de η debe ser menor que la variedad de S . Un regulador es un elemento que disminuye la variedad de D con el fin de lograr una variedad de S igual a la de η . El regulador es un *bloqueador de transmisión de variedad*. Por ejemplo, un buen administrador, desde el punto de vista de la regulación, es aquel que consigue sortear todos los problemas económicos que rodean a su organización, y logra que dentro de ella esta situación no sea sensible pagando a tiempo sus deudas, a sus empleados y en general, haciendo que la entidad marche como si nada pasara en el ambiente externo.

Consideremos ahora un caso ligeramente diferente. Se trata de un conjunto de perturbaciones, D , que ejercen influencia sobre S a través de un sistema dinámico T (un ambiente). El diagrama de efectos inmediatos es:

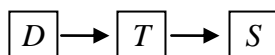


fig. 2.3

Frente a esta circunstancia, el sistema S puede generar otro sistema dinámico R que puede ser acoplado a T para formar, si todo sale bien, un todo F , de manera que el diagrama de efectos inmediatos sea el de la figura 2.4.

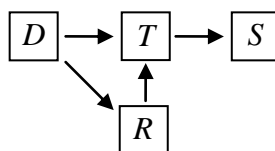


fig. 2.4

Según esto, el problema de la regulación puede enunciarse así: dados S , η , T y D , producir un mecanismo R de modo tal que R y T acoplados, actúen para conservar a S dentro de η .

R es ahora un canal de transmisión de variedad de información de D a T . La figura 2.4 nos dice que cuando se produce una perturbación particular en D , ésta actúa en R que la transforma en una respuesta. Simultáneamente D y R actúan sobre T para producir un resultado que puede ser un estado de S o que afecta a S ⁴¹.

Entre D y R es posible establecer una relación que permita conocer cuáles pueden ser los resultados de R cuando D toma ciertos estados. Bajo ciertas circunstancias es posible concluir que la variedad en el conjunto de los resultados no puede ser menor que:

$$\frac{\text{Variedad en } D}{\text{Variedad en } R}$$

Esto se conoce como la ley de la variedad obligada: la capacidad de R como regulador no puede exceder su capacidad como canal de comunicación.

⁴¹ Puede ocurrir que T comience a reaccionar antes que R termine su trabajo. En algunos casos R dispondrá de mecanismos adicionales que aceleren su respuesta. Pero si esto no es posible, se produce lo que se conoce con el nombre de "regulación por el error". Cf. Ashby *Op.cit.*

2.6.9 Emergencia. Los sistemas son algo más que la adición de sus elementos. Los sistemas poseen propiedades que ninguna de sus partes posee. Aristóteles había dicho que *el todo es más que la suma de sus partes*. Este aforismo no fue comprendido sino mucho después, cuando se hizo palpable la propiedad de la *emergencia* de los sistemas.

Un ejemplo clásico es el caso del compuesto “azúcar”. Ni el carbono, ni el hidrógeno, ni el oxígeno, que son sus componentes, tienen la propiedad de tener un sabor dulce. Pero el azúcar sí la tiene.

Ashby señala como durante años los físico-químicos habían tratado de descubrir por qué las moléculas del caucho son contráctiles. Se sabe ahora que estas moléculas no son inherentemente elásticas. Si se estira una, no sucede nada. “Estirar un caucho” no significa estirar una molécula. Como hay más de una, cada una de ellas ejerce una acción sobre las otras, y el resultado es que la longitud total del conjunto es menor que la máxima posible.

Esta ley riñe de alguna manera con los principios de la deducción. En un silogismo, la conclusión no puede tener ningún elemento que no esté contenido en las premisas, tal y como se indicó en el capítulo 1. El comportamiento emergente de un sistema, en principio, no está contenido en forma explícita en ninguna de sus componentes. E. Laszlo⁴² dice que existen ciertas propiedades de algunos elementos que sólo se manifiestan cuando entran en acción con otros elementos del sistema. Están latentes y son inobservables cuando estos elementos están aislados.

2.6.10 Jerarquización. Todo sistema está formado por subsistemas, y a su vez forma parte de sistemas que lo contienen. Por ejemplo⁴³, la universidad está compuesta por subsistemas: administración, docencia, investigación, extensión... Pero ella es a su vez subsistema de un sistema mayor: las universidades de la región. Estas universidades son a su vez parte del sistema educativo nacional,

⁴² Cfr. E. Laszlo: *Introduction to systems philosophy. Toward a new paradigm of contemporary thought*. Pg. 32.

⁴³ Obviamente esta es una de las formas de ver la universidad como sistema. Podríamos considerar como subsistemas, en otra apreciación, los diferentes programas (Ingenierías, medicina, bellas artes...), la administración en general, los laboratorios...

el cual está inmerso en el Ministerio de Educación, etc. La figura 2.5 ilustra esta idea.

Lo anterior nos lleva a considerar dos extremos: uno inferior compuesto por dos partículas, cada una de ellas irreductible y otro superior, todo el Universo. Esto crea un problema filosófico de fondo: en el extremo inferior tendríamos un “sistema” que si bien forma parte de sistemas superiores, es decir, está contenido en otros sistemas, no contiene a ningún sistema (subsistema). Violaría por lo tanto la ley de la jerarquización. Algo similar ocurre en el extremo superior: el Universo sería el gran sistema que los contendría a todos, pero que no sería contenido por ningún otro sistema. Ackoff lo plantea así:

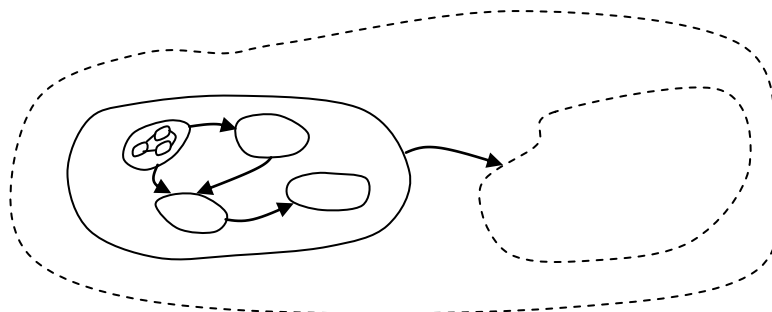


fig. 2.5

Si el comportamiento de un sistema debe explicarse con referencia al sistema que lo contiene (el suprasistema), ¿cómo debe explicarse el comportamiento del suprasistema? La respuesta es obvia: con referencia a un sistema más inclusivo, uno que contenga al suprasistema. Surge entonces la pregunta fundamental: ¿tiene fin este proceso de expansión?

... Hemos llegado a creer que la comprensión completa de cualquier objeto, dejando de lado la de todos los objetos, es un *ideal* al que uno puede aproximarse continuamente pero *nunca puede ser alcanzado*. Por lo tanto, no hay ninguna necesidad de suponer la existencia de un todo último que si es entendido produciría la respuesta última.⁴⁴

⁴⁴ R.L. Ackoff: *Nuestro concepto cambiante del mundo*, en *El paradigma de Ackoff*. Pg. 20

2.6.11 Acoplamiento. La definición de sistema nos indica que existe una interrelación entre sus partes. De acuerdo con este principio, todo sistema es reducible a acoplamientos entre sus subsistemas. Pueden ser de carácter matemático, como en el caso de la cibernética por ejemplo, o relaciones de tipo conceptual, como en el caso de la metodología de Checkland. Estos temas serán tratados más adelante. La figura 2.5 muestra el acoplamiento entre los diversos subsistemas.

2.6.12 Totalidad. Tal y como hemos venido subrayando, un sistema es un todo y como tal debe considerarse. Desde un punto de vista práctico esto presenta ciertas dificultades. El tema de las metodologías sistémicas se ocupa de este asunto, el cual desarrollaremos a partir del capítulo 4.

Podemos decir que hay dos posiciones respecto a la consideración de la totalidad. Algunos consideran que los todos y las partes pueden explicarse mediante sus interrelaciones. Ésta es la posición del enfoque de la cibernética y por lo tanto de la de Lange, Ashby y Wiener, por citar algunos. Otros investigadores sostienen que no es posible deducir las leyes del “todo” de las leyes de las partes. Polanyi y Nagel son de esta línea. De cierta forma estamos tocando asuntos relativos a la formalización de la teoría de sistemas, que será nuestra discusión en el próximo capítulo.

2.7 Complejidad sistémica. Entre 1950 y 1970 la Teoría General de Sistemas tuvo un importante desarrollo. Muchas disciplinas recibieron su influencia (ciencias de la administración, sistemas tecno-sociales, psicología, antropología, economía, sociología) y lograron cierto éxito con este enfoque. Sin embargo, tal vez porque no se obtuvieron leyes generales que cubrieran amplios campos del saber o porque las propuestas ambiciosas con que se inició su programa ante la comunidad científica no fueron alcanzadas, la T.G.S. sufrió una serie de críticas severas. Por suerte los trabajos sobre *autopoiesis* y *teoría de la complejidad*, que son “teorías generales de los sistemas”, revivieron la propuesta original de Bertalanffy y sus colaboradores. Una nueva tendencia para abarcar estos conocimientos condujo a proponer otro nombre: “Ciencia de los Sistemas”. Por esta razón, es necesario traer a colación este tema en forma más elaborada.

Existen más de treinta definiciones de *complejidad*, lo cual muestra las dificultades que el término encierra. Únicamente con el fin de ilustrar, indicaremos algunas:

- a) Calidad de complejo. Complejo: se dice de lo que se compone de elementos diversos /Complicado, enmarañado, difícil /Conjunto o unión de dos o más cosas.
- b) El grado de dificultad para entender y verificar un sistema o sus componentes con respecto a su diseño o aplicación.
- c) El grado de complicación de un sistema o de sus componentes, determinado por factores tales como el número e intrincación de sus interfaces o de sus ramificaciones condicionales, el grado de anidamiento y los tipos de estructuras de datos.
- d) Aquella propiedad de la expresión del lenguaje que hace difícil formular su comportamiento global, aún si se posee casi una información completa de sus componentes atómicos (básicos) y sus interrelaciones.
- e) Es la propiedad de un sistema del mundo real que se manifiesta en la inhabilidad de cualquier formalismo para capturar todas sus propiedades. Requiere que poseamos distintivamente diferentes maneras de interactuar con los sistemas. Distintivamente diferentes en el sentido de que cuando logremos modelos exitosos, los sistemas formales necesarios para describir cada aspecto distinto no se puedan derivar unos de otros.

Evidentemente algo similar ocurre con la definición de *sistema complejo*.

- f) Un sistema que está compuesto de un grupo de unidades relacionadas (subsistemas) para el cual el grado y naturaleza de sus relaciones es conocido de manera imperfecta. Su comportamiento emergente global es difícil de predecir, aún cuando el comportamiento de los subsistemas sea predecible. La escala del tiempo de varios de los subsistemas puede ser muy diferente. El comportamiento a largo plazo y a corto plazo pueden ser marcadamente diferentes y cambios pequeños en las

entradas o en los parámetros pueden producir grandes cambios en el comportamiento.

- g) Un sistema compuesto de un número generalmente grande de partes, procesos o agentes que interactúan en forma intensa y cuya comprensión requiere el desarrollo o el uso de nuevas herramientas científicas, modelos no lineales, descripciones diferentes a estados de equilibrio y la simulación mediante el uso de computadores.
- h) Un sistema que puede ser analizado a partir de muchos componentes con múltiples relaciones entre sí, de tal forma que el comportamiento de cada componente depende del comportamiento de las otras.
- i) Un sistema que incluye numerosos agentes que interactúan y cuyo comportamiento de comportamientos agregados debe ser entendido. Tal actividad de agregados es no lineal es decir, no puede derivarse simplemente de la suma de los comportamientos individuales.
- j) Un sistema con el cual podemos interactuar efectivamente de muchas maneras diferentes, cada una de las cuales requiere una forma diferente de descripción del sistema. Dicho de otra manera, un sistema complejo es aquel para el cual tenemos a nuestra disposición un gran número de instrumentos de medida, cada uno de los cuales permite una manera distinta de describir el sistema. También: es un sistema que nos permite obtener muchos subsistemas (maneras de ver el todo) y que depende de la manera como escojamos interactuar con el sistema.

Basar la definición de complejidad en su descripción –definición d)– trae como consecuencia la paradoja de saber si un objeto (un sistema) es su descripción o, por el contrario, la descripción es el objeto. Al no poder ser claros en este aspecto, la definición es difícil de aplicar.

Para este texto, la definición de sistema complejo dada en el literal j) es muy general y en cierta forma incluye otras. Desde un punto de vista intuitivo, un sistema es complejo cuando no podemos mediante un proceso mental (sin ayuda de otras herramientas distintas a nuestro raciocinio y memoria) predecir, ni a corto ni a mediano plazo, su comportamiento.

Un excelente ejemplo es el problema de la contratación de docentes en una universidad⁴⁵. Durante los últimos diez años, los profesores titulares vienen jubilándose a una tasa de 10 profesores por año. La universidad contrata inmediatamente 10 profesores novatos que inician su carrera docente inmediatamente y tardan 5 años en llegar a la categoría de titular. La planta de profesores titulares es de 50 docentes. No existen efectos aleatorios ni en la jubilación ni en la contratación. Repentinamente, en el año 11 se jubilan 15 profesores. Inmediatamente la universidad contrata 15 profesores nuevos para reemplazarlos, y esta situación continúa sin cambio durante los años siguientes. Se trata de predecir, sin ningún cálculo y utilizando sólo nuestra intuición y sentido común, cómo variará el número de profesores de planta a partir del año 11. La gráfica 2.10 sugiere algunas opciones.

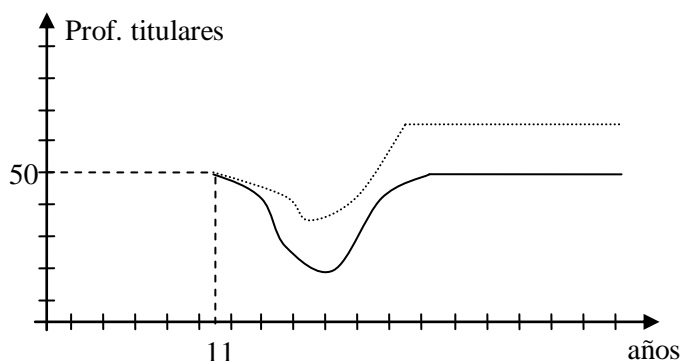


fig. 2.10

Se invita al lector a que luego de haber propuesto algún comportamiento (posiblemente diferentes a los sugeridos en la figura 2.10) haga los cálculos respectivos y observe el resultado.

En este ejemplo no hay efectos impredecibles ni un gran número de elementos; ni siquiera las relaciones son complejas, lo que permite

⁴⁵ Cfr. B. Richmond, S. Peterson: *An introduction to Systems Thinking*. Pg. 1-14.

diferenciar entre lo que se conoce con el nombre de *complejidad estática* y *complejidad dinámica*.

La complejidad estática tiene que ver con el manejo de un gran número de datos, generalmente fruto de muchas interrelaciones y elementos en el sistema. Es el primer tipo de complejidad con el que nos enfrentamos en diversas ocasiones cuando se estudia un sistema. Vemos un gran número de estados (situaciones de un sistema que podemos diferenciar, como por ejemplo, en el estudio de una universidad, el número de profesores, de alumnos, de personal administrativo, los promedios de graduación, el presupuesto etc.), y muchas variables (para cada profesor su hoja de vida, para cada estudiante datos como edad, sexo, lugar de residencia, materias que ya cursó con su respectiva nota, etc.). Por ejemplo, el número de neuronas del sistema nervioso central es de alrededor de 10^{10} . Estos sistemas pueden estudiarse o bien mediante el uso de las computadoras que permiten manipular todas estas variables de manera muy efectiva (así, los impuestos de un país) o “reduciendo la variable” mediante procedimientos estadísticos. La complejidad dinámica se refiere a procesos como el indicado en el ejemplo de la contratación de profesores.

De lo dicho anteriormente parece quedar claro que la complejidad no es necesariamente una propiedad inherente a los sistemas, sino más bien una propiedad relativa al observador.

Respecto a la relación entre tamaño y complejidad, es bueno aclarar que el tamaño de un sistema debe referirse al número de *distinciones* que es posible hacer: sea el número de estados disponibles o bien –si los estados están definidos vectorialmente– el número de componentes en el vector (es decir el número de sus variables o de sus grados de libertad). Ambas medidas están relacionadas, puesto que si todo lo demás es igual, la adición de variables adicionales también produce posibles estados adicionales. Además, desde nuestro punto de vista funcional también podemos agrandar un sistema sin cambiar el número de variables, midiendo ésta en forma más precisa y distinguiendo así un mayor número de estados⁴⁶.

⁴⁶ R. Ashby, *Op. Cit.* Pg. 90.

Desde el punto de vista de las interrelaciones, para medir en cierta forma el grado de complejidad de un sistema, consideremos dos casos extremos: un sistema compuesto por n elementos que no interactúan (lo cual realmente no es un sistema pero nos sirve de referencia) y uno en el cual todos sus n elementos interactúan. En el primer caso, el número de conexiones es 0; si consideramos ahora el caso más sencillo de “sistema” (una cadena abierta) el número de conexiones es de $n - 1$. Cuando todos los elementos están interconectados el total de conexiones es $n^2 - n$. En general, los sistemas no tienen todos sus elementos interconectados, lo cual hace que su complejidad disminuya. Se dice que un sistema es *reductible* si sus partes son funcionalmente independientes. La reductibilidad es, en cierta forma, una propiedad de los sistemas complejos.

Para formarnos una idea de cuanta reductibilidad se presenta en el mundo en que vivimos, comparemos su comportamiento ordinario con el que tendría si súbitamente perdiese su reductibilidad, esto es, si cada variable tuviese un efecto inmediato o retardado en las demás. El mero hecho de dar vuelta a la página de este libro, en lugar de ser eso y nada más que eso, podría originar un cambio en las luces, un movimiento en la mesa, un cambio en la velocidad del reloj y así similarmente en toda la extensión del cuarto. Si el mundo fuera realmente irreductible, la regulación sería tan difícil que resultaría imposible, y no podría existir ninguna forma organizada de vida.⁴⁷

Es importante considerar ahora la relación entre complejidad y no linealidad. Muchos autores relacionan en forma directa estos dos conceptos hasta el punto de definir la complejidad a partir de lazos de retroalimentación como lo hemos indicado en este mismo capítulo. Sin embargo, otros autores no aceptan este punto de vista. La definición de sistema complejo dada en el literal j) no hace referencia alguna ni a la linealidad ni a la no linealidad. Según este punto de vista el reduccionismo está tanto relacionado con la teoría de la linealidad como de la no linealidad, mas no con el manejo de lo complejo.

La complejidad requiere múltiples visiones del fenómeno en estudio. No existe un punto de vista único, absoluto, al cual se pueda reducir el

⁴⁷ R. Ashby, *Op. Cit.* Pg. 357.

sistema. Por ello en los capítulos que siguen abordaremos el tema desde el punto de vista matemático y desde el punto de vista metodológico.

CAPÍTULO 3

FORMALIZACIÓN DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

3.0 Introducción. Por lo discutido anteriormente, parece casi obligado asegurar que la posibilidad de formalizar una teoría sobre sistemas está sustancialmente ligada a la posibilidad de “matematizar” los conceptos sobre sistemas y sus aspectos operativos. Recordemos que la formalización de una teoría en su parte esencial implica la proposición de un grupo de axiomas, postulados o hipótesis, la existencia de ciertos conceptos indefinibles (desde el punto de vista de la teoría), la definición de ciertas reglas de construcción y la existencia de reglas de inferencia mediante las cuales podamos aseverar que una conclusión, basada en ciertas premisas, es correcta (verdadera en los sistemas abstractos), es decir, que no contradice sino que confirma los hechos observados en la realidad. Finalmente quedó claro que todo esto se logra si el lenguaje utilizado es el de la matemática.

Debemos indicar, sin embargo, que muchas teorías inician procesos de formalización con el esfuerzo, nada sencillo, de la clasificación de los fenómenos que le interesan; es el inicio del establecimiento de las bases teóricas que permitirán posteriormente ampliar la teoría y generar modelos.

Ya indicamos (capítulo 2), que no existe *una* teoría general de sistemas. Klir habla de una *polifonía de teorías*. En este capítulo daremos algunas ideas relacionadas con estos temas. Trataremos de abarcar aspectos clasificatorios, axiomáticos y metodológicos.

3.1 Clasificación de los sistemas. En la literatura existen varias clasificaciones respecto a los sistemas. Para efectos de este texto consideraremos la de K. Boulding, la de R.L. Ackoff y la de P.B. Checkland.

3.1.1 Keneth Boulding. Este autor aclara que existen dos caminos que se complementan para desarrollar un “sistema de sistemas”. Uno consiste en tomar fenómenos generales de diferentes disciplinas y tratar de construir un modelo general que los explique. Un buen ejemplo es el

estudio de los diferentes tipos de crecimiento: poblacional, monetario, de información y que dio como resultado una teoría general sobre el crecimiento. En otras palabras, la búsqueda de isomorfismos en diferentes áreas del conocimiento. El otro camino es encuadrar los campos empíricos en una *jerarquía de complejos organizacionales* partiendo de una unidad de comportamiento afín a cada nivel, y tratar de desarrollar un nivel de abstracción apropiado a cada uno. Este es el camino tomado por Boulding para proponer su jerarquización de niveles sistémicos. Nueve son los niveles propuestos por este autor. Haremos un resumen al respecto.

- El primer nivel es el de las estructuras estáticas. Es el *nivel de los marcos de referencia*. Es la anatomía y geografía del universo. Los patrones de los electrones alrededor del núcleo, los patrones de los átomos en una fórmula molecular, la organización de átomos en un cristal, la anatomía del gen, la célula, la planta, el animal, la cartografía de la tierra, el sistema solar, el universo astronómico. La descripción precisa de estos marcos es el inicio de un conocimiento teórico organizado en casi cualquier campo, ya que sin una relación estática precisa no es posible establecer una teoría funcional o dinámica aceptable.
- El segundo nivel es el de los sistemas dinámicos sencillos. Podríamos denominarlo el *nivel de los mecanismos de relojería*. El sistema solar es el gran reloj del universo desde el punto de vista del ser humano, y la exactitud en las predicciones hechas por los astrónomos da fe de la excelencia de este reloj. Máquinas sencillas como una polea, o más complejas como una máquina de vapor y las dinamos caen en esta categoría. Igual ocurre con gran parte de la estructura teórica de la física, de la química y aún de la economía. Cualquier sistema en equilibrio o en estado estable pertenece a este nivel.
- El tercer nivel es el de los mecanismos de control o sistemas cibernéticos. Es el *nivel del termostato*. Se diferencia de los sistemas sencillos en equilibrio ya que la transmisión e interpretación de la información es parte esencial del sistema. El sistema tiende a la estabilidad mediante procesos de regulación y control.

- El cuarto nivel es el de los *sistemas abiertos* o mejor aún de las estructuras que se *auto-mantienen*. Aquí la vida comienza a diferenciarse de lo que no es vida. Podríamos llamarlo el *nivel de la célula*. Los sistemas abiertos más sencillos, aunque interactúan con el ambiente, no poseen la propiedad de auto-mantenimiento ni la de auto-reproducción, las cuales están íntimamente relacionadas.
- El quinto nivel es de tipo genético-social. Es el *nivel de la planta*. En éste se presenta una diferenciación del trabajo entre las células para formar una sociedad celular con partes diferenciadas e interdependientes (raíces, hojas, semillas, etc.), y además, con una clara diferenciación entre los genotipos y los fenotipos, asociados con el fenómeno de equifinalidad.
- El sexto nivel es el *nivel del reino animal*. Se caracteriza por su movilidad, comportamiento teleológico y capacidad de estar alerta. Aparecen receptores de información especializados (ojos, oídos, etc.) que permiten organizar la información en una estructura cognitiva o de "imágenes".
- El séptimo nivel es el *nivel humano*. Es el individuo considerado como un sistema. Además de las características del nivel 6, el ser humano posee autoconciencia, que es diferente al simple estado de alerta: no sólo sabe, sino que *sabe que sabe*.
- El octavo nivel es el *nivel de las organizaciones sociales*. El ser humano es un ser fundamentalmente social. Es de mucha importancia el concepto de "rol" o papel. Como individuo, pertenece al nivel 7; al interactuar con otros individuos y asumir un papel, el concepto de organización toma cuerpo. El contenido y la significación de los mensajes, los sistemas de valores, el recuento de la historia, el arte y las emociones son aspectos distintivos en este nivel.
- Finalmente, el noveno nivel es el *nivel de los sistemas trascendentes*. Son los absolutos, los inasibles, los incognoscibles. Son las preguntas sin respuesta. El motor del pensamiento humano.

Boulding aclara que existen modelos teóricos que llegan al cuarto nivel. El conocimiento empírico es débil en casi todos los niveles. Para

aseverar esto último, bástenos con pensar en la gran dificultad que se presenta al catalogar libros, música, obras de arte. ¡Y esto corresponde al primer nivel!

3.1.2 Russell L. Ackoff⁴⁸. Hay dos clasificaciones conocidas de este autor. Para precisar las ideas que hay en ellas, debemos primero puntualizar algunos conceptos relativos a los sistemas.

3.1.2.1 En su artículo sobre conceptos de sistemas⁴⁹, este autor define, entre otros temas, lo que se entiende por evento, reacción, respuesta, acto y comportamiento.

Un *evento* es un cambio en una o más de las propiedades estructurales del sistema o de su ambiente, en un período específico. Por ejemplo, encender un bombillo cuando cae la noche. Aquí hay dos eventos.

Una *reacción* de un sistema es un evento o suceso para el cual otro evento que ocurra en el sistema o en el ambiente, es suficiente. Si para encender un bombillo es suficiente con accionar un interruptor, entonces el bombillo reacciona ante esta acción; sin embargo, esta acción puede no ser suficiente ya que si el bombillo está quemado, no se encenderá. Una *respuesta* de un sistema es un evento del sistema para el cual la ocurrencia de otro evento en el sistema o en su ambiente es necesario, pero no suficiente. Por lo tanto, una respuesta es un evento del cual el sistema mismo es coproductor. Una persona que enciende un bombillo en un cuarto oscuro responde al estímulo de la oscuridad, pero la sola intención no enciende el bombillo; al accionar el interruptor se produce la reacción necesaria para que esto suceda.

Un *acto* de un sistema es un evento del sistema para cuya ocurrencia no es necesario ni suficiente que existan cambios en el ambiente del sistema. Los actos son, pues, eventos auto-determinados por el sistema. Internamente los cambios son necesarios y suficientes para que ocurra el acto. Los actos pueden ser reactivos, “responsivos” (el lector excusará este neologismo) o

⁴⁸ Cfr. R.L. Ackoff: *Reflections on Systems and Their Models*.

⁴⁹ Cfr. R.L. Ackoff: *Towards a System of Systems Concepts*.

autónomos. Se puede programar una computadora para que efectúe cambios en su propio programa.

El *comportamiento* de un sistema es un evento (eventos) del sistema que es (son) necesario(s) y suficiente(s) para que ocurra otro evento en el sistema o en el ambiente. El comportamiento es un cambio en el sistema que desencadena otros eventos. Nótese que las reacciones, respuestas y actos son eventos del sistema cuyos *antecedentes son de interés*. El comportamiento consiste en los eventos del sistema *cuyas consecuencias son de interés*.

Ackoff propone una clasificación de los sistemas de acuerdo con su comportamiento. La siguiente tabla la resume.

Tipo de sistema	Comportamiento del sistema	Resultado del comportamiento
Que mantiene un estado.	Variable pero determinado (reactivo).	Fijo.
Que busca metas.	Variable y de escogencia (responsivo).	Fijo.
Que busca múltiples metas y es propositivo.	Variable y de escogencia.	Variable pero determinado.
Propositivo.	Variable y de escogencia.	Variable y de escogencia.

Un sistema que *mantiene un estado* es uno que 1) puede reaccionar sólo de una manera a un evento interno o externo pero 2) reacciona de manera diferente a eventos diferentes internos o externos, y 3) estas diferentes reacciones producen el mismo estado (resultado) interno o externo. En estos sistemas las reacciones están completamente determinadas por los eventos causales. Sin embargo poseen una función y es aquella de mantener un estado de diferentes maneras y bajo diferentes condiciones. Tal es el caso del termostato, una brújula o un regulador de voltaje.

Un sistema que *busca una meta* es uno que responde en forma distinta a uno o más eventos diferentes externos o internos mediante uno o más estados diferentes externos o internos, y que puede responder distintamente a un evento específico en un ambiente que no cambia para producir un estado particular (resultado); la producción de este estado es la *meta*. Pueden tener *memoria*, lo cual aumenta la eficiencia en el tiempo para lograrla, además puede *escoger* el comportamiento. Estos sistemas son responsivos pero no reactivos. Los sistemas con pilotos automáticos y la “rata electrónica” que aprende a moverse en un laberinto para poder salir, son ejemplos de ellos. A la secuencia de los comportamientos que constituyen un sistema y tiene la función de producir una meta se le conoce con el nombre de *proceso*.

Un sistema que *busca múltiples metas* es un sistema que busca una, en dos o más estados iniciales diferentes, externos o internos, y que busca metas diferentes en al menos dos estados diferentes; la meta queda determinada por el estado inicial.

Un sistema *propositivo*⁵⁰ es un sistema de búsqueda de metas múltiples que tienen una propiedad común. La generación de la propiedad común es el propósito del sistema. Este tipo de sistemas puede buscar diferentes metas pero no pueden seleccionar la meta a lograr; ella está determinada por los eventos iniciales; lo que sí escoge son los medios para lograrlas. Un computador que juega diferentes juegos tiene como propósito común, ganar. Sin embargo, el juego a desarrollar es escogido por el programador.

Un sistema *propositivo*⁵¹ es uno que puede producir el mismo resultado de maneras diferentes en el mismo estado (interno o externo) y puede producir resultados diferentes en el mismo y en diferentes estados. Estos sistemas pueden cambiar sus metas bajo condiciones constantes; puede seleccionar medios y fines y, por lo tanto, desplegar *voluntad*. Los seres humanos son el ejemplo más familiar de este tipo de sistemas.

⁵⁰ Como indicamos en el capítulo 2, el neologismo parece necesario. El sufijo “ivo” en español significa “que produce”.

⁵¹ El sufijo “oso” significa “lleno de”, “con capacidad de”.

3.1.2.2 Otra clasificación de los sistemas se deriva de la perspectiva organizacional. Se trata de una herramienta para la comprensión sistémica de la administración actual. Se consideran tres tipos básicos de sistemas que, a su vez, generan tres tipos básicos de modelos administrativos, y un cuarto tipo, un metasistema, que los contiene: el sistema ecológico. Los tres tipos básicos son:

1. *Deterministas*: son los sistemas y modelos en los cuales ninguna de las partes ni el todo son propositosos.
2. *Animados*: los sistemas y modelos en los que el todo es propositoso, pero las partes no.
3. *Sociales*: En estos sistemas y modelos tanto las partes como el todo son propositosos (intencionados).

La intención o propósito implica que existe una capacidad de decisión, un despliegue de voluntad. Estos tipos de sistemas son jerárquicos: los animados están compuestos de sistemas deterministas como partes que los componen, no a la inversa; similarmente, los sociales tienen sistemas animados como partes constituyentes, pero no lo contrario. Los ecológicos poseen algunas partes intencionadas pero el todo no tiene propósito.

Los anteriores sistemas pueden analizarse a la luz de ciertos aspectos tales como: funcionalidad o intencionalidad, reemplazo de las partes, capacidad de reacción o respuesta, manejo de la información y capacidad de adaptación.

En los *sistemas determinados* dijimos que no existe intencionalidad ni en el todo ni en las partes. El comportamiento está delimitado y posee funciones. Por ejemplo, un reloj es un sistema de este tipo. La función del reloj (para lo que fue construido) es dar la hora; sus partes también tienen funciones específicas; así algunas de ellas deben transmitir movimiento a otras partes a una velocidad angular dada. Éstos pueden ser cerrados, y en tal caso el ambiente no ejerce ninguna influencia sobre ellos, o abiertos en los cuales las propiedades no sólo están condicionadas por su estructura sino por el ambiente que lo rodea. Las plantas también forman parte de este tipo de sistema: ni ellas ni ninguna de sus partes tienen un propósito.

Las partes de estos sistemas, en general, pueden reemplazarse fácilmente. Además, reaccionan ante cambios que puedan afectarlos, pero no responden. Esto significa que la reacción obedece a leyes que gobiernan el sistema y no depende del sistema en sí. Tampoco manejan la información. Aunque existen interrelaciones (¡de lo contrario no serían sistemas!) la información que fluye no tiene otra consecuencia que mantener la función (o funciones ya que puede existir más de una) que lo caracteriza.

Los *sistemas animados* tienen finalidades que le son propias, pero sus partes no. Ha existido la tendencia a considerarlos como mecanismos complicados. Es el *mecanicismo* al que hicimos referencia en el capítulo 2. Reemplazar sus partes es mucho más complicado que en el caso de los sistemas deterministas: aún disponiendo de la parte, las interacciones entre ellas y las leyes que gobiernan el sistema así como la influencia del ambiente, dificultan esta operación. También sus partes reaccionan pero no responden; estas reacciones están muy interrelacionadas. No obstante, todo el sistema puede responder ya que puede desplegar voluntad. El flujo de información tiene como objetivo fijar la estabilidad del sistema a través de mecanismos de regulación y control.

Los *sistemas sociales* poseen propósito tanto en el todo como en algunas de sus partes. Generalmente su ambiente es otro sistema social. Queda claro que tanto el sistema como algunas de sus partes tienen propósitos. Esto hace que el reemplazo de sus componentes sea muy complejo hasta el punto de alterarlo seriamente ya que las partes pueden intervenir en forma activa y efectiva. La información es procesada y afecta el sistema puesto que está relacionada con su capacidad de respuesta. Han existido intentos de explicar estos sistemas mediante modelos mecanicistas y animados. Los modelos de J.W. Forrester en sistemas sociales son considerados un ejemplo de mecanicismo aplicado a ellos. Por su parte, el *organicismo* como metáfora de las organizaciones es un intento de modelar sistemas sociales a partir de modelos animados.

Finalmente, los *sistemas ecológicos* están formados por sistemas mecanicistas, organicistas y sociales, pero no poseen una finalidad por sí mismos. Son un ambiente fundamental para los otros. Pueden ser afectados por los comportamientos y las propiedades de los

sistemas que los componen, pero los efectos están determinados. Ackoff ejemplifica cómo los efectos de los fluoruro-carburos en la capa de ozono están determinados por leyes físico-químicas y no son un asunto de elección.

Una de las preocupaciones del autor y en la cual insiste es en el error, continuamente cometido, de aplicar modelos de niveles inferiores a niveles superiores. Esta misma observación es válida para la clasificación de Boulding, lo que no quiere decir que, en ocasiones y de acuerdo con ciertas circunstancias esto no pueda hacerse. En casos particulares, los modelos mecanicistas son buenas aproximaciones a casos animados, y modelos animados han sido útiles para explicar, en principio, algunos modelos sociales. Pero esto es la excepción, no la regla.

3.1.3 P.B. Checkland. En su artículo *A Systems map of the Universe*⁵² Checkland piensa que es razonable postular que cualquier disciplina intelectual descansa finalmente en alguna *propuesta* que debe ser “verdadera” si la disciplina es válida. Si la física es una disciplina, deben existir una serie de fenómenos que en su conjunto la forman; tales fenómenos están relacionados con los cambios de energía, momento, posición pero no de la forma molecular.

El estudio de los sistemas debe regirse por un postulado igual. La *propuesta* en este caso es que el universo, aparentemente caótico, es un complejo de sistemas que interactúan. Si los sistemas tienen objetivos definibles, entonces es posible estudiarlos, y hasta cierto punto, manejarlos.

Los sistemas básicos propuestos por este autor son:

- Sistemas *naturales*.
- Sistemas *físicos diseñados*.
- Sistemas *de la actividad humana*.
- Sistemas *abstractos diseñados*.
- Sistemas *trascendentales*.

La figura 3.1 muestra la jerarquización de estos sistemas.

⁵² Cfr. P.B. Checkland: *A systems map of the Universe*.

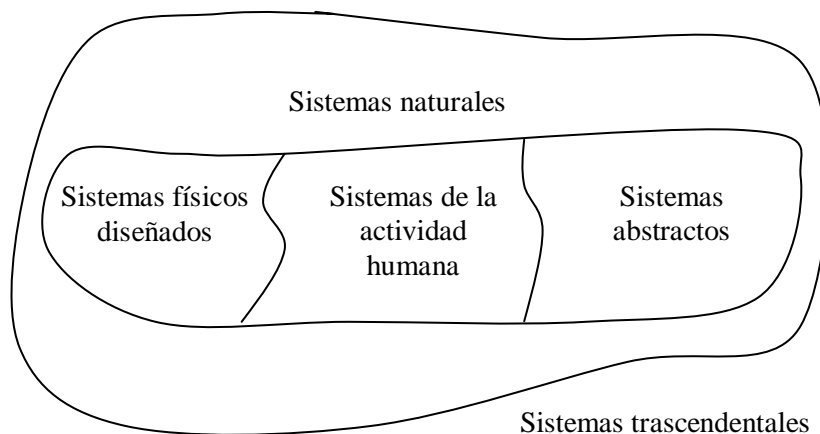


fig. 3.1

Los *sistemas naturales* son los sistemas físicos que constituyen el universo. Van desde los sistemas subatómicos (que dan origen a los sistemas de seres vivos y no vivos), pasando por los sistemas vivos hasta llegar a los galácticos. De éstos poseemos algún grado de conocimiento. En una jerarquía superior están los *sistemas trascendentales*, que están más allá de nuestro conocimiento actual. La figura 3.2 amplía estos conceptos.

Los *sistemas de la actividad humana* están integrados fundamentalmente por el ser humano, con su capacidad para hacer herramientas, crear mitos y modificar el ambiente. Éstos pueden mirarse desde dos perspectivas diferentes. Por un lado, pueden ser una colección física de componentes que definen el “conjunto estructurado” que hace al sistema. Por otro, y debido a la naturaleza del componente humano, pueden ser los sistemas de actividades relacionadas con su administración en el sentido más amplio. Esta distinción permite identificar lo que podemos entender por *estructura* y por *proceso* en los sistemas de la actividad humana.

Los *sistemas diseñados, físicos o abstractos* se relacionan con los sistemas de los metales y otros materiales, los cuales han originado las herramientas (desde las más primitivas como el martillo, hasta las más

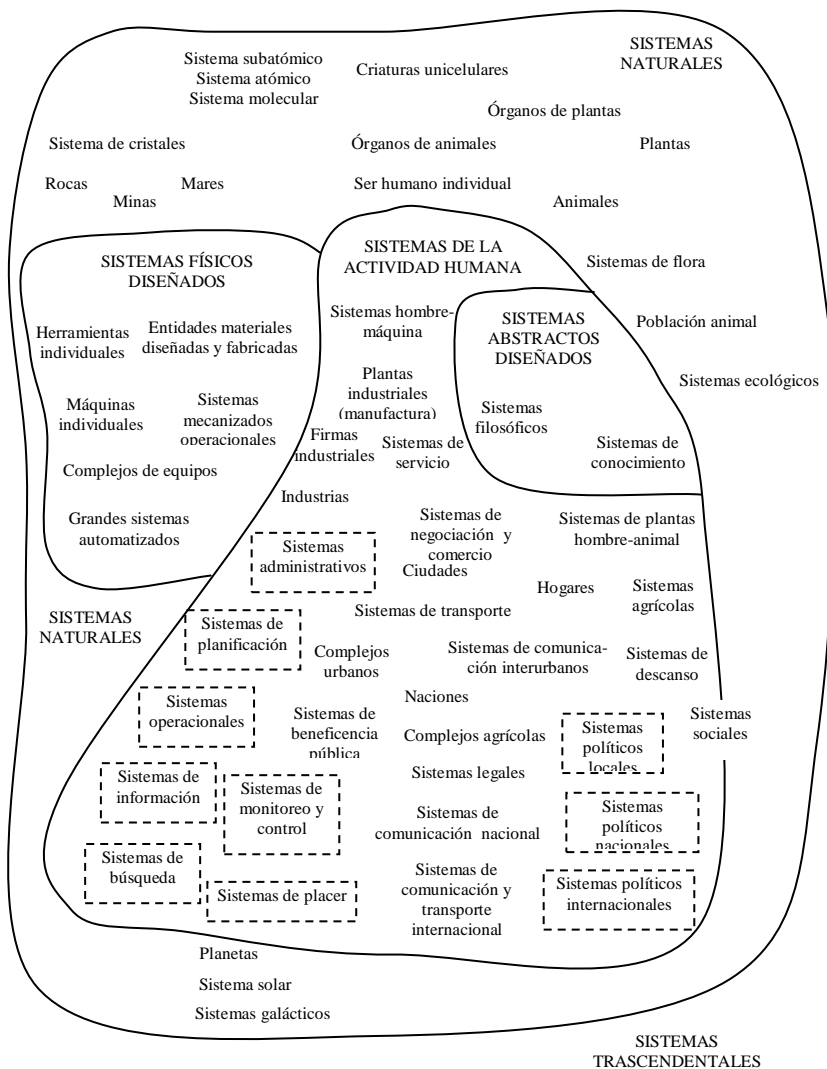


fig. 3.2

sofisticadas como los sistemas de control) con las cuales las civilizaciones han logrado su desarrollo. El diseño puede ser tanto físico como abstracto. En los segundos tenemos los sistemas filosóficos y los matemáticos, por ejemplo.

Los *sistemas sociales y culturales*. Éstos son un caso especial. Muchos sistemas de la actividad humana existen como o dentro de un sistema social. Pero por estar integrados por seres humanos de espíritu gregario y con necesidades básicas que satisfacer, pertenecen también al mundo natural. Están “a caballo” entre estos dos sistemas. Por esta razón son tan difíciles de comprender y son un reto muy importante para la ciencia de los sistemas. La figura 3.2 destaca este hecho.

Checkland tiene otra clasificación que es muy útil. Se trata de la distinción entre *sistemas duros* y *sistemas blandos*. Más que una dicotomía, se trata de un espectro en el cual estos dos tipos de sistemas forman sus extremos. La figura 3.3 da una idea al respecto.



fig. 3.3

Un *sistema duro* se caracteriza por tener objetivos claramente definidos, una estructura identificable y procesos de decisión que poseen medidas cuantitativas de comportamiento y están claramente identificados. Por el contrario, un *sistema blando* no tiene objetivos fácilmente definibles o identificables, su estructura es “difusa” y las decisiones son tomadas bajo condiciones de incertidumbre.

Clasificar un sistema como blando o duro no es, de ninguna manera, una decisión fácil. De hecho los sistemas no *son* duros o blandos. Nosotros los definimos como tales, según las circunstancias. Por ejemplo, construir un edificio dado parece corresponder al diseño de un sistema duro. El objetivo es exacto, pues el arquitecto entrega un proyecto en el cual el uso del espacio está clara y precisamente delimitado; además se conocen las leyes que rigen la resistencia de los materiales, así como las ecuaciones de las diferentes interacciones de los elementos de la estructura a levantar. El proceso de diseño y construcción está regido por reglas precisas, dictadas por la ingeniería. Pero construir un edificio implica también el manejo de operarios, compra de materia prima, reformas propuestas sobre la marcha por los interesados en la construcción. No siempre los materiales son de

primera calidad y en general existe una gran multitud de situaciones que van en contra de las *reglas precisas dictadas por la ingeniería*.

Cuando un sistema tiene características que lo sitúan hacia el extremo “duro”, el reduccionismo ha demostrado ser una manera bastante eficiente de encarar los problemas que se presentan en él. Sin embargo, a medida que nos movemos en el espectro hacia el lado “blando”, el enfoque de sistemas parece ser la opción más favorable.

Con estas clasificaciones podemos darnos una idea de la manera como los sistemas pueden ser enmarcados con el fin de proponer áreas de estudio y establecer principios para posteriores desarrollos. Pasemos ahora al estudio de algunas propuestas de carácter formal.

3.2 Las leyes numéricas. Anteriormente distinguimos entre tres tipos de leyes: empíricas, de definición y derivadas. A esta clasificación podemos añadir la característica de ser descriptivas (cualitativas) o numéricas (cuantitativas). La tabla de la figura 3.4 da algunos ejemplos de estas seis categorías.

Para que una teoría adquiera solidez debe pretender que sus leyes sean de tipo numérico y especialmente deducible o de definición. Esto no desconoce la importancia de las leyes descriptivas. Muchos enunciados que hoy en día son ejemplo de precisión y elegancia, fueron en sus orígenes observaciones empíricas de regularidades. Por ejemplo, las leyes de la reflexión y refracción de la luz fueron inicialmente leyes empíricas; posteriormente entraron a formar parte, como leyes deducidas, de la teoría del electromagnetismo de Maxwell. Otro tanto puede decirse de la ley de equifinalidad en los sistemas: inicialmente postulada como una regularidad empírica, hoy es posible deducirla cuando forma parte de algunos de los sistemas formales que han sido propuestos para la teoría de sistemas. Sin embargo, y esto es lo que nos interesa ahora, ellas no llegaron a formar parte de una teoría sólida sino hasta cuando pasaron a ser leyes numéricas. Por esta razón se hace necesario discutir con cierto detalle lo que se entiende por una ley numérica⁵³.

⁵³ Cfr. C.A. Ossa: *Some considerations about hard and soft Methodologies*.

	Descriptiva	Numérica
Empírica	La mecanización-centralización progresiva.	La densidad: $d = m/V$
De definición	La jerarquización de los sistemas.	La fuerza: es igual al producto de la masa por la aceleración obtenida. $F = ma$
Derivada	La equifinalidad (que puede ser deducida de la ley de entropía mínima).	La ley de Snell que puede ser deducida de las ecuaciones de Maxwell.

fig. 3.4

El establecimiento de una ley numérica lleva implícita la disponibilidad de un sistema de medición, es decir, la posibilidad de asignar un número a una propiedad dada. Conocemos (describimos) los objetos por sus propiedades. Algunas de ellas son “medibles”. Tal es el caso del peso. Cuando decimos que un cuerpo pesa 1.2 kilogramos, estamos asignando un número único a la propiedad *peso* de dicho objeto. Igual ocurre con la longitud y el tiempo. Pero otras propiedades no poseen esta cualidad. Por ejemplo, si nos preguntáramos por la belleza del objeto que hemos pesado (se trataba de un vaso de cerámica del siglo XVI) no estamos en la posibilidad de asignarle un número. La propiedad “belleza” no es medible. Adicionalmente, estamos acostumbrados a asignar números a propiedades en las cuales dicha asignación no es exacta o única. Por ejemplo, cuando un estudiante obtiene una nota de 2.1 en un examen, y otro obtiene 4.2, no podemos asegurar que éste sabe el doble que aquel. Otro profesor podría calificar al primero con 2.4 y al segundo con 3.8. Sin embargo, hay algo que se preserva: la relación de orden: el primero tiene un conocimiento menor que el segundo en lo relacionado con las preguntas hechas en el examen.

Algunos autores llaman “medición” a la asignación inequívoca de un número a una propiedad, y “cuantificación” a la asignación de números a propiedades cuando se guarda una relación de orden.

Existen mediciones de propiedades fundamentales (o directas): son aquellas que cambian por la combinación de cuerpos semejantes⁵⁴. Por su parte, las mediciones derivadas no poseen esta propiedad; son mediciones que se desprenden de la combinación de mediciones fundamentales. Por ejemplo, si tenemos una varilla de 12 centímetros de longitud y de densidad 7.8 gm/cm^3 (hierro), y otra de longitud 10 centímetros y de densidad 4.5 gm/cm^3 (titanio) y colocamos una a continuación de la otra obtendremos un objeto (“varilla”) de longitud 22 cm. (la propiedad se suma) pero no con una densidad de 12.3 gm/cm^3 (la suma) o de 6.15 gm/cm^3 (el promedio). La longitud es una propiedad fundamental; la densidad es derivada: es la relación entre la masa del cuerpo y su volumen.

Si observamos varios vehículos que viajan a distintas velocidades, podríamos establecer una relación tal que el número 1 fuera asignado al carro más lento, el número 2 al siguiente más lento y así sucesivamente. Con esto identificaríamos la rapidez con la que viajan: el vehículo 4 es más rápido que el 2 y más lento que el 7. Sin embargo, esta identificación no es única. Cualquier otra sucesión numérica creciente hubiera prestado el mismo servicio. ¿Podríamos encontrar una serie que, preservando la relación de orden, nos diera además una información única de la propiedad “velocidad”? La respuesta a esta pregunta es el fundamento de las mediciones derivadas. Si definimos la “rapidez” (que llamaremos indistintamente “velocidad”⁵⁵) como el cociente entre la distancia recorrida y el tiempo gastado en dicho recorrido, la cifra resultante será una medida de la velocidad que representará tal propiedad y a la vez preservará la relación de orden. Aunque no se suma (dos carros a 20 Km./h no dan un carro a 40 Km./h) sí preserva la relación de orden. El carro que va a 20 Km./h va más despacio que el que viaja a 30 Km./h. Y más aún, va a una velocidad que es 1.5 veces mayor, lo cual implica que tardará un 50% de tiempo menos en recorrer la misma distancia (todo esto si la velocidad es constante, naturalmente). Incluso si las unidades de medición cambiaran

⁵⁴ Cfr. N. R. Campbell: *Medición* (en James R. Newman compilador: *Sigma, el mundo de las matemáticas Vol.6*), pg. 187.

⁵⁵ La velocidad exige, además del valor de la rapidez, una dirección y un sentido: es un vector. La rapidez es un escalar. Sin embargo, en el lenguaje cotidiano usamos la una por la otra.

(de Km./h a millas/minuto), los análisis anteriores no se modificarían en absoluto a pesar de que los números asignados fueran diferentes.

Las leyes numéricas están íntimamente ligadas al concepto de medición derivada. Ellas buscan mediciones derivadas, invariantes a la modificación del fenómeno. Así, en el caso de la velocidad, si se aumentan las distancias al doble, el tiempo transcurrido deberá ser el doble de inicial, para que el vehículo conserve su misma velocidad. Aunque familiarizados con este hecho, esto no es evidente en sí. Es importante en este tipo de leyes que éstas partan de hechos experimentales: la búsqueda de una propiedad medible es un proceso experimental. Para demostrar que no es tan evidente, si bien no tenemos dudas al decir que un auto A, que va a una velocidad a la cual le corresponde el número 10, va más rápido que el B que le corresponde el número 7 y más lento que el C, al cual le corresponde el número 12, no podemos decir lo mismo cuando el jugador A le gana al jugador B y B le gana al jugador C. Nada garantiza que A le gane a C, y muchas veces es C quien le gana a A. No existe en este caso relación de orden y por eso la propiedad "ganarle a" no es medible.

¿Por qué en las leyes de la naturaleza se presentan este tipo de invarianzas en la medición? ¿Por qué podemos representar las leyes mediante el lenguaje matemático? ¿Por qué la suma y la resta se han podido relacionar con situaciones reales? ¿Por qué la multiplicación y la división han permitido hallar invarianzas en las propiedades de los hechos naturales? ¿Por qué el campo se ha extendido a otras operaciones como la potenciación, radicación, uso de los logaritmos, etc?

Este proceso de ampliación de las operaciones aritméticas más allá de la simple multiplicación y división, la consiguiente invención de nuevas reglas para relacionar cifras y derivar unas de otras y el estudio de las reglas una vez inventadas es, todo ello, asunto puramente intelectual. No depende de ningún experimento; el experimento no interviene más que cuando nos preguntamos si existe alguna ley experimental que contenga una de las relaciones numéricas inventadas o descubiertas entre propiedades. El proceso es en realidad parte de la matemática, no de la ciencia experimental; y una de las razones por las cuales la matemática es útil a la ciencia es que sugiere nuevas formas posibles de leyes numéricas. Los ejemplos que hemos dado son, desde luego, sumamente elementales, y la

matemática actual difiere grandemente de tales consideraciones simples; pero el descubrimiento de reglas de ese tipo lleva lógicamente, si no históricamente, a una de las grandes ramas de la matemática moderna, la Teoría de Funciones. [...] Esta teoría ha sido desarrollada por los matemáticos para satisfacer sus propias necesidades intelectuales, su sentido de claridad lógica y de la forma; pero aunque grandes sectores de ella no tienen importancia para la ciencia experimental, sigue siendo notable la frecuencia con la cual relaciones desarrolladas por el matemático para sus propios fines tienen al final una aplicación directa e inmediata a los hechos experimentales de la ciencia.⁵⁶

La matemática como lenguaje de la naturaleza permite, en primer lugar, afirmar que si un fenómeno natural es *expresado* mediante relaciones matemáticas, entonces automáticamente queda *explicado*. Por otra parte la abstracción de los fenómenos mediante el lenguaje matemático (paso del mundo real al mundo simbólico) posibilita avanzar desde ese mundo hipotético –en el que rigen las reglas de las matemáticas y que permiten la obtención de nuevos conocimientos (abstractos, simbólicos)– al mundo real, permitiendo corroborar la trascendencia y realidad de estos nuevos descubrimientos.

La tarea para formalizar una teoría de sistemas es clara. En lo posible deben establecerse unidades de medida y a partir de allí obtener definiciones operacionales. Muchas de las leyes conocidas deben poderse obtener por deducción. Y la teoría debe proponer nuevos hechos, no observables en principio.

En lo que sigue mostraremos dos propuestas, de varias que existen, que intentan lograr esta importante tarea.

3.3 Axiomatizaciones de la T.G.S. Dentro del grupo de teorías que pueden considerarse como basadas en axiomas o propuestas bajo un enfoque matemático podemos citar: la teoría de L. V. Bertalanffy (sistemas de ecuaciones diferenciales), la teoría de las máquinas de estado finito (teoría de autómatas determinísticos o probabilísticos), la teoría matemática de los lenguajes formales, la teoría de las máquinas

⁵⁶ N.R. Campbell: *Las leyes numéricas y el uso de las matemáticas en la ciencia* (en James R. Newman, compilador: *Sigma, el mundo de las matemáticas*), pg. 206.

de Turing, los enfoques cibernéticos (Lange, Winer, Ashby (1956)), la teoría de Wymore (1967) (basada en la teoría de conjuntos), el enfoque de J. W. Forreter, la teoría de G. Klir (1969), la teoría de los sistemas jerárquicos de Mesaroviç (1970), etc. Del otro lado, de las teorías basadas en hechos empíricos, podemos citar la *tectología* de Bogdanov (1940; 1975), la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy (1930)⁵⁷, las ideas sociológicas de Pareto, Spencer, Parsons y Durkheim (entre otros), las propuestas metodológicas de Ackoff, la metodología de P.B. Checkland, para sólo citar algunas.

Vamos a presentar brevemente las ideas de Bertalanffy y Lange en lo que se refiere a los aspectos formales. Para el caso de los sistemas de la actividad humana nos referiremos mejor al concepto de metodología, el cual desarrollaremos en los próximos capítulos.

En primer lugar, destaquemos que deben existir ciertos axiomas o postulados generales que cualquier teoría sobre el tema de los sistemas debe cubrir. Éstos son:

Axioma 1: el mundo es ordenado (o por lo menos, ordenable).

Axioma 2: el mundo puede explicarse (concebirse) como formado por sistemas.

Axioma 3: los sistemas son jerárquicos.

Por otra parte, exista o no una definición de “sistema”⁵⁸, se lo debe concebir como formado por elementos interrelacionados (posiblemente mediante mecanismos de información o mediante relaciones de causa-efecto) que tienen un fin (una meta).

3.3.1 La propuesta de L. V. Bertalanffy⁵⁹. Para una formalización de la T.G.S. este autor propone la siguiente definición de sistema: un

⁵⁷ El lector podrá sorprenderse que Bertalanffy aparezca en ambas clasificaciones. Bertalanffy propuso una teoría formal, matemática basada en ecuaciones diferenciales. Sin embargo, muchas otras consideraciones, conceptos, hipótesis, principios metodológicos y técnicas que no caben en su propuesta matemática deben ser consideradas aparte.

⁵⁸ Recordemos que se puede proponer la palabra “sistema” como indefinible en el caso de una teoría formal.

⁵⁹ Cfr. L. V. Bertalanffy: *General Systems Theory*. Pgs. 55, sgts.

conjunto p de n elementos, $p = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$ y un conjunto R de relaciones entre dichos elementos. Un sistema S se define entonces mediante la expresión:

$$S = \{p, R\} \quad (\text{III-1})$$

De acuerdo con esta definición, si en un sistema se cambian los elementos o las relaciones, el sistema cambia, lo que es consecuente con la definición que hemos dado en el capítulo 2.

Un sistema puede ser descrito por un sistema simultáneo de ecuaciones diferenciales ordinarias. Sea Q_i una medida del elemento p_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Para un conjunto finito de elementos el sistema puede definirse como:

$$\begin{aligned} dQ_1/dt &= f_1 (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ dQ_2/dt &= f_2 (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ &\dots\dots\dots \\ dQ_n/dt &= f_n (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{aligned} \quad (\text{III-2})$$

Este sistema de ecuaciones es lo suficientemente general para indicar conjuntos en los cuales los elementos se influyen entre sí. Por esta razón, aquél se encuentra muy difundido en múltiples ciencias: problemas demográficos, cinéticos, procesos celulares etc. Esta definición no es la única. Un sistema de ecuaciones diferenciales parciales sería más general e igualmente un sistema de ecuaciones integro-diferenciales abarcaría un espectro más amplio. Sin embargo, para las consideraciones de este texto, (III-2) es suficiente. Del sistema de ecuaciones (III-2) es posible deducir muchas de las leyes de los sistemas indicadas en el capítulo 2. Pero no será tratado aquí. Veamos entonces, un par de ejemplos de esta manera de concebir los sistemas.

En la naturaleza, el crecimiento es un fenómeno común a varias disciplinas: crecimiento de un individuo o crecimiento de colonias, crecimiento de un capital puesto a interés, crecimiento de la población de una ciudad. Sea un sistema compuesto de un solo tipo de elementos, por ejemplo una colonia de bacterias: el crecimiento de esta población está íntimamente relacionado con el número de elementos (bacterias)

existente en un momento dado. Esta es la propiedad medible. La ecuación que describe este hecho es:

$$dQ/dt = f(Q) = kQ \quad (\text{III-3})$$

Lo que nos dice la ecuación es que la tasa de cambio de Q (número de bacterias) es directamente proporcional al número de bacterias presentes en el instante t .

La solución de esta ecuación es:

$$Q = Q_0 e^{kt} \quad (\text{III-4})$$

Si k es positivo, la colonia crecerá exponencialmente. Si es negativo, decrecerá hasta la extinción. La gráfica de la figura 3.5 ilustra el caso para una población de bacterias inicial de 10000 individuos, con una tasa de reproducción del 1% mensual.

¿Qué ocurre ahora cuando existen dos sistemas, uno compuesto por predadores y otro por presas?

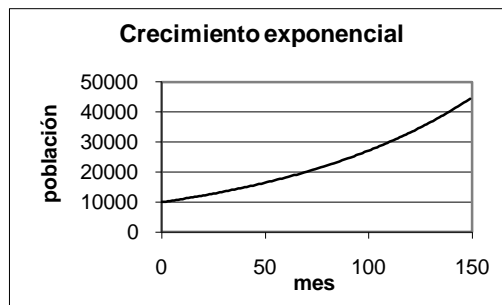


fig. 3.5

En este caso llamaremos Q_p al número de individuos predadores en un momento dado, y Q_v al número de presas (víctimas) en el mismo instante. Podemos postular que los predadores viven mientras existan presas, y las presas mueren por la acción de los predadores. Esta muerte (y su equivalente en nacimientos de los predadores) se supone que depende del número de encuentros entre ambas especies. Matemáticamente es el producto de las poblaciones por un “factor de encuentro” que indicaremos por K . Los nacimientos de las presas se

calculan dependiendo del número de individuos presentes en ese momento, tal y como se describió en el caso anterior, siendo T_v su tasa de nacimiento. La muerte de los predadores dependerá de una tasa de muerte que designaremos por T_p .

Las ecuaciones respectivas son:

$$\begin{aligned} dQ_v/dt &= T_v Q_v - K Q_p Q_v \\ dQ_p/dt &= K Q_p Q_v - T_p Q_p \end{aligned} \quad (\text{III-5})$$

Un comportamiento típico se muestra en la figura 3.6. Observemos cómo oscilan ambas poblaciones. Cuando hay abundantes presas los predadores crecen rápidamente; al comenzar a extinguir la población de presas, los predadores empiezan a perder individuos. Al disminuir los predadores, las presas aumentan su población para oscilar nuevamente.

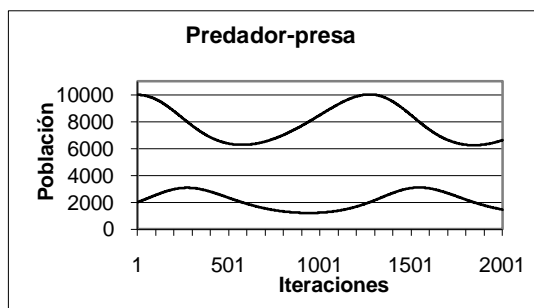


fig. 3.6

De este esquema es posible deducir la ley de equifinalidad. Para ello es necesario suponer que existe un estado estacionario Q_j^* . La demostración está fuera del alcance de este texto. Consideraciones iguales existen para las leyes de mecanización y descentralización; todas ellas se presentan como leyes deducidas.

3.3.2 La propuesta de O. Lange⁶⁰. Este autor sostiene que un sistema está compuesto por un conjunto de “elementos activos” que

⁶⁰Cfr. O. Lange: *Los todos y la partes. Una teoría general de conducta de sistemas.*

interactúan entre sí. Un elemento activo posee por lo menos una entrada y una salida, y no puede influirse a sí mismo. Es la menor división a la que se puede llegar en un sistema dado. La figura 3.7 muestra el elemento activo E_r , con m entradas representadas por el vector $\mathbf{X}^{(r)} = [x_1^r, x_2^r, \dots, x_m^r]$ y n salidas representadas por el vector $\mathbf{Y}^{(r)} = [y_1^r, y_2^r, \dots, y_n^r]$.

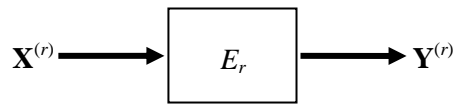


fig. 3.7

Existe, pues, una relación medible entre los estados de entrada y los de salida del elemento activo E_r mediante una transformación $\mathbf{T}^{(r)}$. Podemos escribir, como relación válida para la figura 3.7:

$$\mathbf{Y}^{(r)} = \mathbf{T}^{(r)} (\mathbf{X}^{(r)}) \quad (\text{III-6})$$

A partir de este momento haremos un resumen de la propuesta de Lange. De todas maneras nada puede ser superior a la lectura de la obra ya citada.

Es posible establecer acoplamientos entre elementos activos, de tal manera que algunas (o todas) de las salidas de uno de ellos se acople a algunas (o todas) las entradas del otro. Para este fin se define una matriz de acoplamientos entre componentes (salidas y entradas), matriz compuesta de ceros y unos, según que una componente de la salida de un elemento activo E_r , se convierta en la componente de una entrada de otro elemento activo E_s . La figura 3.8 ilustra este hecho.

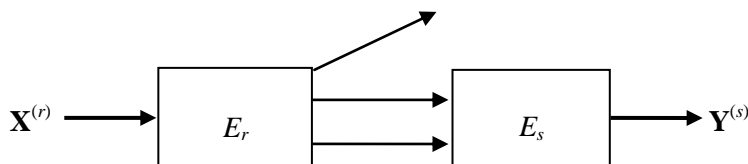


fig. 3.8

Nótese que no todas las salidas de E_r se convierten necesariamente en entradas de E_s . Esta “matriz de acoplamiento” (que será cuadrada y tendrá como número de filas el máximo número de componentes de los vectores de entrada de E_s o de salida de E_r) se designará por \mathbf{C}_{rs} . Las relaciones entre las salidas de E_r y las entradas de E_s se expresan mediante la ecuación:

$$\mathbf{X}^{(s)} = \mathbf{C}_{rs} \mathbf{Y}^{(r)} \quad (\text{III-7})$$

Cuando un elemento activo no se conecta con otro, por ejemplo el elemento E_j no se conecta con el elemento E_k , entonces \mathbf{C}_{jk} es igual a la matriz nula (una matriz cuyas componentes son todas cero). Con esta convención cualquier sistema, con un número finito de elementos, se podrá representar con respecto a sus acoplos mediante una matriz \mathbf{S} , que denominaremos “matriz estructural del sistema”:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} & \cdots & \mathbf{C}_{1N} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{23} & \cdots & \mathbf{C}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{C}_{N1} & \mathbf{C}_{N2} & \mathbf{C}_{N3} & \cdots & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

siendo N el número de elementos activos del sistema en cuestión. Por definición de elemento activo, $\mathbf{C}_{ii} = \mathbf{0}$.

Definamos ahora tres matrices más, que llamaremos \mathbf{T} , \mathbf{R} y \mathbf{P} . \mathbf{T} es la matriz de todas las transformaciones de los diferentes elementos activos. \mathbf{R} , compuesto por elementos \mathbf{R}_{ij} , permite relacionar (calcular) las entradas del elemento activo E_j con las entradas del elemento activo E_i , y \mathbf{P} está formada por submatrices \mathbf{P}_{ij} que relaciona las salidas de E_j con las salidas de E_i .

Es posible obtener, a partir de las consideraciones anteriores, el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{TS} \\ \mathbf{P} &= \mathbf{ST} \end{aligned} \quad (\text{III-9})$$

Si los elementos activos son acoplados, entonces el resultado de este acoplamiento viene dado por las relaciones:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= \mathbf{TS}(\mathbf{X}) \\ \mathbf{Y}' &= \mathbf{ST}(\mathbf{Y}) \end{aligned} \quad (\text{III-10})$$

en donde \mathbf{X}' y \mathbf{Y}' son los nuevos estados de las entradas y salidas debido al acoplamiento.

Lange dice:

Como puede verse, el modo de acción del sistema depende tanto de la matriz \mathbf{T} de modos de acción de los elementos, como de la matriz estructural \mathbf{S} del sistema. Para poder determinar el modo de acción del sistema, no es suficiente conocer los modos de acción de los elementos, los cuales son expresados matemáticamente por la matriz \mathbf{T} , sino que es necesario conocer también la matriz estructural \mathbf{S} del sistema, la cual representa la red de acoplamientos de los elementos.⁶¹

La transformación de los estados de entrada y de salida de los elementos crea una “ley de movimiento” del sistema formado por elementos activos. De este análisis puede observarse cómo los mismos elementos, con modos de acción iguales pero acoplados de manera distinta, constituyen un sistema diferente con un modo diferente de acción del sistema (la matriz \mathbf{S} será diferente). Nótese que el comportamiento (modos de acción) de los “todos” (del sistema global) no son deducibles de los modos específicos de acción de los elementos individuales. Los “todos” son simplemente “conjuntos de elementos acoplados”; en otras palabras, “sistemas”. Sus modos de acción constituyen el resultado combinado de los modos de acción de los elementos individuales y de la estructura del sistema, por ejemplo, de la red de acoplamiento de los elementos que componen el sistema.

El análisis anterior supone que el “tiempo de reacción” entre los efectos que causa la entrada en la salida, es instantáneo. Pero si existe un tiempo dado para tal reacción, entre cada componente de salida y cada componente de entrada, se podría extender el análisis a tal situación, con conclusiones similares a las anteriores. Si θ es el máximo

⁶¹ O. Lange, *Op. Cit.* Pg. 39.

valor entre todos los tiempos de reacción de las diferentes componentes de un elemento activo, entonces:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{t+\theta} &= \mathbf{TS}(\mathbf{X}_t) \\ \mathbf{Y}_{t+\theta} &= \mathbf{ST}(\mathbf{Y}_t) \end{aligned} \quad (\text{III-11})$$

El análisis es extensible al caso de reacciones sucesivas bien sea de tipo discreto o continuo.

Lange continúa su propuesta estudiando el caso del equilibrio y la estabilidad de los sistemas así descritos. Demuestra que en este caso el sistema debe tener por lo menos un acoplamiento en retroalimentación; es decir, algún elemento activo que esté acoplado directa o indirectamente a otro elemento activo, recibe de él, como parte de sus entradas, algunas salidas (o todas), además de cumplir ciertas propiedades matemáticas que no es del caso discutir aquí.

Finalmente, Lange estudia las condiciones para que se dé la equifinalidad (ergodicidad es el término técnico utilizado en matemáticas). Para Lange la existencia de procesos ergódicos de autoconducción del desarrollo de sistemas explica los fenómenos que han originado las interpretaciones denominadas como "vitalismo metafísico". La estabilidad de un sistema, y la ergodicidad de un proceso de desarrollo son el resultado del modo de acción de los elementos del sistema y de los acoplamientos de los elementos, es decir, de la estructura del sistema.

Desde un punto de vista teórico, la concepción de un sistema como un conjunto de elementos activos cuyas interrelaciones son definibles mediante una matriz \mathbf{S} , y su comportamiento individual mediante una matriz de transformación \mathbf{T} , brinda un cuerpo teórico de una gran coherencia, en el cual es posible explicar y analizar las principales leyes sistémicas: jerarquización, totalidad, centralización- descentralización, mínima entropía, emergencia, complejidad etc. Además permite una reconciliación entre los "todos" y las "partes". Queda por discutir hasta qué punto esta propuesta puede llevarse a los sistemas complejos de las ciencias humanas.

La gran dificultad, en el caso de los estudios de sistemas humanos es la identificación de los elementos activos y las mediciones exigidas para la definición de \mathbf{S} y \mathbf{T} . Por esta razón, se han desarrollado metodologías,

más que teorías, para enfrentar este tipo de sistemas, asunto que, como dijimos anteriormente, será analizado en detalle en los próximos capítulos. De todas maneras, Lange ha demostrado que sí es posible proponer un cuerpo teórico para el estudio y descripción de los sistemas en general.

3.3.3 Jerarquización y cuasi-descomponibilidad en los sistemas.

Antes de terminar la visión cibernética de los sistemas vale la pena destacar la forma en la que es posible utilizar estas ideas para explicar el concepto de evolución de los sistemas propuesto por H. Simon⁶².

Lange hace referencia a los “sistemas de orden superior”⁶³. Este tema no es otro diferente al de la jerarquización de sistemas.

Cuando dos sistemas \mathbf{S}_1 , \mathbf{S}_2 se acoplan, se crea un nuevo sistema, generándose una nueva matriz estructural \mathbf{S}' , definida como:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{12} \\ \mathbf{S}_{21} & \mathbf{S}_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{III-12})$$

\mathbf{S}_{11} es la matriz estructural de \mathbf{S}_1 , y \mathbf{S}_{22} , la matriz estructural de \mathbf{S}_2 , definidas de acuerdo a (III-8). Por su parte, \mathbf{S}_{12} es la matriz estructural de los acoplamientos entre elementos de \mathbf{S}_1 con elementos de \mathbf{S}_2 , y \mathbf{S}_{21} es la matriz estructural de los acoplamientos entre elementos de \mathbf{S}_2 con elementos de \mathbf{S}_1 . La idea se puede extender fácilmente a sistemas de orden mayor. Simon define un sistema complejo como aquel que está compuesto de un gran número de partes que actúan entre sí no de manera sencilla⁶⁴; estos sistemas evolucionan mucho más rápidamente a partir de sistemas simples cuando existen unas formas intermedias estables que cuando no se hallan éstas. Entre las formas complejas posibles, las jerarquías son las únicas que tienen tiempo de evolucionar.

Partiendo de este concepto de jerarquización, el profesor Simon define como “sistema jerárquico descomponible” aquel en el cual las interacciones intersistémicas son nulas. En términos de (III-12), el

⁶² Cfr. H.A. Simon: *La arquitectura de la complejidad*, (en: *Las ciencias de lo artificial*).

⁶³ O. Lange, *Op. Cit.* Pg. 30-.

⁶⁴ Cfr. H.A. Simon, *Op. Cit.* Pg. 127.

sistema es descomponible si $\mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{21} = \mathbf{0}$ (matriz nula). Es evidente que esto no ocurre en la naturaleza, sino que acaece en forma ideal. El triunfo del reduccionismo ha estado cimentado en el descubrimiento de fenómenos en los cuales esta descomponibilidad se cumple. La "exactitud" de una ley natural, dependerá en gran medida de que la interacción intersistémica no sea importante.

Y esto nos da una segunda oportunidad para el estudio de las jerarquías: la de los sistemas "cuasi-descomponibles" donde las interacciones entre sistemas son leves pero no nulas.

Si aplicamos la definición dada en (III-12) para M sistemas acoplados, \mathbf{S}' puede escribirse:

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1M} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{M1} & S_{M2} & S_{M3} & \cdots & S_{MM} \end{bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

Un sistema será cuasi-descomponible si disponiendo de una medida de interacción entre sistemas, los valores encontrados para \mathbf{S}_{ij} , en donde el sistema \mathbf{S}_i está interactuando con el sistema \mathbf{S}_j que le precede o antecede, son menores que los hallados en \mathbf{S}_{ji} o en \mathbf{S}_{ij} y si los valores de S_{kl} ($k, l \neq i, j$) son nulos. Podemos ver la gran similitud entre estos conceptos y la reductibilidad de Ashby definida en el capítulo 2.

Un ejemplo sencillo lo brinda la organización formal. Allí cada superior inmediato está "conectado" con un número reducido de subordinados, y a su vez lo está con un superior inmediato. Desde luego, todos sabemos que existe una organización informal en donde aparecen otros canales de comunicación diferentes a los establecidos por las líneas de autoridad y responsabilidad. Pero aún así, la mayoría de estos canales conducen, de un individuo particular a un número muy limitado de superiores suyos así como de subordinados y asociados. Ejemplos similares se presentan en teoría de calor, dinámica económica y sistemas físico-químicos. Por ejemplo, las fuerzas intermoleculares, en las sustancias orgánicas, son generalmente más débiles que las fuerzas moleculares y éstas más débiles que las nucleares.

¿Por qué se presenta esta cuasi-descomponibilidad? No es arriesgado postular que en la naturaleza, incluyendo en ella los seres humanos, las fuerzas de interacción obran sólo dentro de ciertos límites. Para el ejemplo dado sobre la administración, la capacidad de un individuo para interactuar simultáneamente con otros está limitada a un cierto número. Posiblemente factores psicológicos, sociológicos o fisiológicos (o de otra índole) puedan explicar este hecho. Lo cierto es que es observable y no sólo para el ejemplo aquí citado. Miller⁶⁵ ha sugerido que el ser humano puede manejar simultáneamente un número de conceptos o variables que oscila entre 5 y 9. De alguna manera esto viene a corroborar la conjetura antes expuesta.

La cuasi-descomponibilidad juega un papel importante para comprender los sistemas. Gracias a ella muchos sistemas complejos que poseen estructuras jerárquicas cuasi-descomponibles, pueden ser comprendidos y descritos.

Si en el mundo hay importantes sistemas que son complejos sin ser jerárquicos, es posible que hasta cierto punto escapen a nuestra observación y comprensión. El análisis de su comportamiento supondría unos conocimientos y unos cálculos tan detallados de las interacciones de sus partes elementales, que puede afirmarse que, sin duda, están fuera del alcance de nuestra capacidad de recordar o de calcular.⁶⁶

No podemos terminar este capítulo sin hacer referencia a las nuevas tendencias en la teoría matemática que están abriendo nuevos campos al tratamiento de los sistemas. Nos referiremos brevemente a la termodinámica reversible, a la teoría de conjuntos difusos y a la lógica polivalente, a la teoría de fractales y a la teoría del caos, por citar algunas.

3.3.4 Matemática de la complejidad. Como se indicó anteriormente, la Teoría General de Sistemas tuvo un período de receso que afectó notablemente el impacto que venía ejerciendo en las diferentes ramas del conocimiento. Esto se debió fundamentalmente a la falta de herramientas adecuadas que permitieran representar, en un lenguaje

⁶⁵ Cfr. G.A. Miller: *The Psychology of Communication*.

⁶⁶ H. Simon, *Op. Cit.* Pgs. 155-156.

matemático, muchas de las ideas y observaciones que se habían realizado y planteado como elementos fundamentales de esta teoría. Se identificaron los patrones pero no su representación abstracta.

El gran reto era la no linealidad de los sistemas complejos. El primer intento novedoso que trascendió el uso de los sistemas de ecuaciones diferenciales vino de parte de la cibernética con el estudio formal de los lazos de retroalimentación. Sin embargo, sólo hasta después de la segunda mitad del siglo XX se vino a desarrollar un conjunto de teorías matemáticas que dieron como resultado una visión nueva y sorprendente de los sistemas tanto naturales (incluyendo la vida misma) como de las organizaciones sociales. Esto no implica que ya se pueda hablar de *una* Teoría General de Sistemas. Lo que en la actualidad se posee es una serie de modelos de diferentes vertientes que estudian y explican la complejidad.

Un primer gran aporte vino del estudio de la termodinámica irreversible, desarrollado por Ilya Prigogine. Posteriormente, Lofty Zadeh publica un artículo sobre lo que el llamó “conjuntos difusos”; el impacto que ha ejercido este nuevo enfoque del concepto de conjunto ha sido de gran importancia para el desarrollo de la ciencia en general. La teoría de los fractales y la teoría del caos añaden nuevos enfoques y manera de entender los sistemas y su organización. El concepto de patrón toma forma en el lenguaje abstracto de las matemáticas.

3.3.4.1 Termodinámica irreversible. Una de las formas en que puede expresarse la primera ley de la termodinámica es la siguiente: *la energía del Universo es constante*. Otra forma común nos dice que la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. Esta ley está referida sólo al intercambio de calor y de energía mecánica. No obstante lo anterior, podemos imaginarnos procesos “imposibles”. Por ejemplo, si dos cuerpos, uno caliente y otro frío se ponen en contacto, no es posible que el cuerpo caliente adquiera más calor, y el frío se enfríe más. Y sin embargo esto no viola la primera ley.

Cuando se iniciaron estudios serios sobre la conversión del calor en trabajo, lo cual dio origen a la máquina de vapor, se observó que aunque todo el trabajo puede convertirse en calor (la conversión de trabajo en calor es fácilmente observable al frotarnos las manos cuando hace frío),

no todo el calor puede convertirse en trabajo; de hecho las primeras máquinas de vapor eran muy ineficientes.

Para poder comprender bien estos procesos de intercambio es necesario definir lo que entendemos por *equilibrio termodinámico*. Un sistema está en equilibrio termodinámico cuando:

1. El sistema se encuentra en un estado de equilibrio mecánico, es decir, la suma de las fuerzas, tanto internas como externas que actúan sobre él, es cero.
2. El sistema está en equilibrio térmico, es decir, todas las partes del sistema están a la misma temperatura e igual a la temperatura ambiente.
3. El sistema está en equilibrio químico, es decir, no hay una tendencia a cambios espontáneos en la estructura química del sistema.

La medición del estado de equilibrio termodinámico se especifica dando los valores de algunas pocas cantidades tales como temperatura, masa, presión y densidad. Estas propiedades, junto con algunas otras (como tensión y composición), componen el *estado termodinámico del sistema*.

Si cambiamos el estado de un sistema variando una o varias de sus propiedades, éste alcanzará un nuevo estado de equilibrio. Sin embargo, durante el proceso de cambio el sistema pasará por estados sucesivos que no se encuentran en equilibrio térmico. Por ejemplo⁶⁷, supongamos que tenemos un pistón con un gas que tiene un cierto volumen, una cierta presión y una temperatura dada y se encuentra en equilibrio termodinámico. Repentinamente reducimos su volumen a la mitad. Después de un cierto tiempo se alcanzará una nueva temperatura y una nueva presión, lográndose un nuevo estado de equilibrio. Pero durante el proceso, la temperatura variará continuamente debido a la fricción; se presentarán cambios químicos tales como condensaciones; se ejercerán fuerzas moleculares debido al cambio de presión. Durante el proceso no existe pues equilibrio termodinámico.

⁶⁷ Cfr. Halliday & Resnick: *Physics for Students of Science and Engineering*. Pg. 533.

Para evitar la complejidad de estos procesos de cambio, la termodinámica propuso su explicación como si se produjera mediante una sucesión de subprocesos en estado de equilibrio. La idea es la siguiente. Supongamos que en nuestro ejemplo anterior, en lugar de hacer el cambio de volumen en forma rápida iniciamos el proceso con un pequeño cambio en el movimiento del pistón. Esto induciría a cambios de temperatura, presión, cambios de fase también pequeños. Entre más pequeño sea el cambio en el volumen, menor serán las diferencias entre el estado inicial y el nuevo estado. Repitiendo el proceso a partir del nuevo volumen en forma sucesiva hasta llegar a la mitad del mismo con respecto al volumen inicial, habremos logrado un cambio similar al original pero a través de procesos en estado casi de equilibrio termodinámico. Finalmente, si los cambios son infinitesimales, el proceso total sería explicado por procesos intermedios en estado de equilibrio. A esto se le conoce como *proceso reversible*. Estos procesos se explican en forma precisa mediante el uso del cálculo diferencial e integral.

En la práctica es posible obtener procesos ideales casi reversibles mediante un cambio lento de las condiciones externas al sistema. Es reversible porque podemos devolvemos cuando se consideran los cambios infinitesimales.

Anteriormente se indicó que las primeras máquinas de vapor que fueron construidas eran altamente ineficientes. Aún cuando los diseños se mejoraron, no todo el calor podía convertirse en trabajo: siempre se perdía una parte de aquel. ¿Acaso no podría construirse una máquina que, tomando calor de un recipiente lo convirtiera en trabajo, y dado que este trabajo es convertible en calor, retomara el calor y realimentara la máquina, logrando así un movimiento perpetuo?

La imposibilidad de estos procesos fue establecida por la *segunda ley de la termodinámica*. Esta ley nos dice que es imposible que el calor fluya de un cuerpo frío a uno caliente. Esta transferencia de calor se hace en una sola dirección, del cuerpo más caliente al cuerpo más frío; por lo tanto, el proceso es irreversible. R. Clausius expresó esta ley de la siguiente manera: *es imposible para cualquier máquina autónoma transportar calor en forma continua de un cuerpo a otro que esté a temperatura mayor*. Tal transferencia es posible sólo si se añade trabajo externo al sistema. Por esta razón los refrigeradores necesitan un motor.

Como vimos en el Capítulo 2, otra forma de expresar la segunda ley es: *la entropía del universo tiende a un máximo* (el universo es un sistema cerrado). Todos los cuerpos tenderán a un intercambio de calor que culminará con una temperatura igual. Por lo tanto el universo tiene una tendencia en el tiempo: apunta del pasado al futuro en un proceso irreversible.

El establecimiento de la segunda ley le dio al tiempo una dirección. En la física Newtoniana el tiempo no tiene una dirección definida. El concepto de antes, ahora y después son conceptos relativos al momento en el cual un fenómeno se está describiendo.

Es posible encontrar procesos irreversibles que no están en equilibrio pero que aún se les puede especificar propiedades termodinámicas relativas a los estados de equilibrio. Estos procesos están caracterizados por propiedades que no varían con el tiempo, sino en el espacio, de punto a punto del sistema. De tales procesos se dice que están en un *estado estable*. Un ejemplo sencillo⁶⁸ es considerar una barra de metal, por ejemplo cobre, la cual se conecta entre dos recipientes que difieren en una cantidad finita de temperatura (esto le da el carácter de irreversibilidad al proceso)⁶⁹. La figura 3.9 ilustra el caso.

La temperatura en cada punto de la barra, cuando el sistema alcanza un estado estable, no cambia con el tiempo. Sin embargo sí cambia a lo largo de la barra como lo muestra la gráfica de la figura 3.9.

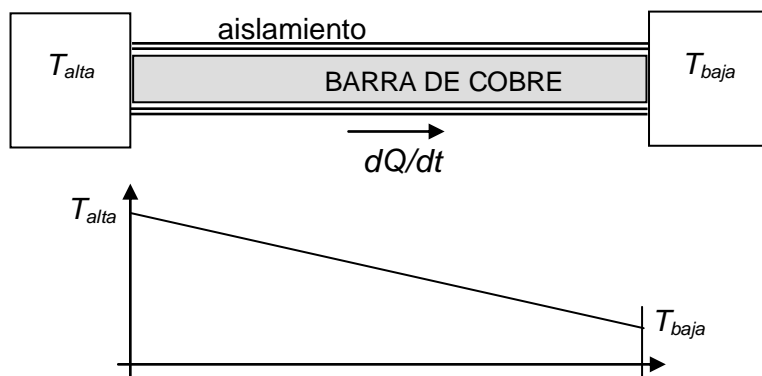


fig. 3.9

⁶⁸ S.M Lea y J.R. Burke: *Física: la naturaleza de las cosas*. Vol. 1, pg.733.

⁶⁹ Los recipientes calóricos mantienen la misma temperatura en todo momento.

La barra de cobre puede considerarse como un sistema abierto que posee un estado estable alejado de la posición de equilibrio –que sería en este caso, una temperatura igual a lo largo de la barra–. Sin importar la temperatura con la cual se inicia el proceso, el estado estable se alcanza invariablemente, siendo pues un estado equifinal. Incidentalmente estas son las características que identifican a muchos organismos y a los seres vivos como sistemas abiertos. No obstante, hay diferencias importantes entre el proceso aquí descrito y los seres vivos. Una de ellas es que, en el caso de la barra, el estado equifinal *debe* alcanzarse; en los sistemas abiertos, *puede* alcanzarse. Hay además, otra diferencia importante.

Si consideramos la entropía como una cantidad que “fluye” a través de la barra conductora, entonces tendremos que entra más entropía en la parte derecha de la barra que la que sale de la parte izquierda de la misma. La diferencia en entropía puede pensarse como generada en el conductor. Todos los flujos de estados estables, irreversibles, incluyen el valor dS_{irrev}/dt , que es positivo, término que se denomina *tasa de generación de entropía*. Se observa pues, un aumento de entropía. Pero en los organismos vivos, en el cual el proceso es irreversible, el sistema tiende a *disminuir* la entropía. Esto se logra mediante la importación de *neguentropía* (entropía negativa). Prigogine explica esto mediante la función expandida de la entropía. En los sistemas abiertos, el cambio total de entropía puede escribirse:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (\text{III-14})$$

en donde $d_e S$ es el cambio en la entropía que se importa, y $d_i S$ la producción de entropía debida a los procesos irreversibles en el sistema, tales como reacciones químicas, difusión, transferencia de calor, etc. $d_i S$ es siempre positivo, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica; $d_e S$, la entropía que se transfiere, puede ser positiva o negativa; esta última se logra mediante la importación de materia que lleva energía libre. En otros, la entropía negativa es la información recibida por el

sistema⁷⁰. Precisamente, esta relación es la que permite identificar la entropía como la tendencia al desorden. El desorden debe entenderse aquí como la ignorancia que tenemos para poder identificar un estado dado del sistema. El desorden mayor se alcanza cuando todas las probabilidades de los estados posibles es la misma, es decir, cuando nuestra ignorancia es máxima.

Prigogine desarrolló la teoría de las *estructuras disipativas* con el fin de explicar los fenómenos termodinámicos alejados de los estados de equilibrio. De acuerdo con esta teoría, es posible encontrar estados de orden sin contradecir la segunda ley de la termodinámica. La entropía total del sistema sigue aumentando, pero esto no implica que no se puedan crear “islas” ordenadas. El orden y el desorden son procesos que se dan simultáneamente, alimentándose entre sí. Como afirma Capra:

Esta nueva percepción de orden y desorden representa una inversión de las visiones científicas tradicionales. En la perspectiva clásica, para la que la física es la principal fuente de conceptos y metáforas, se asocia orden con equilibrio –como, por ejemplo, en cristales y otras estructuras estáticas–, mientras que el desorden se identifica con situaciones de no-equilibrio tales como turbulencias. En la nueva ciencia de la complejidad – que se inspira en la trama de la vida– aprendemos que el no equilibrio es una fuente de orden. Los flujos turbulentos de aire y agua, si bien aparentemente caóticos, están en realidad altamente organizados, exhibiendo complejos patrones de vórtices dividiéndose y subdividiéndose una y otra vez a escalas cada vez menores. En los sistemas vivos, el orden emergente de no-equilibrio resulta mucho más evidente, manifestándose en la riqueza, diversidad y belleza del mundo que nos rodea. A través del mundo viviente, el caos es transformado en orden.⁷¹

Las estructuras disipativas se ocupan, por lo tanto, de la descripción de los sistemas autoorganizados. La matemática necesaria para explicar estas estructuras es del tipo no-lineal y permite analizar los sistemas

⁷⁰ La ecuación que describe la entropía desde el punto de vista de la física cuántica y la ecuación que describe la cantidad de información de un sistema es la misma: $-\sum p_i \log(p_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, para el caso de un sistema con n estados diferentes.

⁷¹ F. Capra: *La trama de la vida*. Pg. 202.

lejos de su estado de equilibrio. Los estudios iniciales partieron de lo que se conocía entonces como la *inestabilidad de Bénard*. Este es un fenómeno que se presenta por convección térmica cuando una fina capa de un líquido es calentada uniformemente desde abajo. El flujo de calor que se genera se transmite por conducción hacia arriba, dejando el líquido en reposo. Cuando la diferencia de temperatura entre el fondo y la superficie alcanza un cierto valor crítico, se generan corrientes de convección que producen un movimiento de moléculas. De alguna forma empiezan a aparecer patrones de células hexagonales, en las cuales el líquido caliente asciende por el centro de las mismas y el más frío desciende por sus paredes. El sistema se autoorganiza. Capra⁷² cita otro ejemplo interesante de los llamados *relojes químicos*, que también caen en el grupo de los sistemas autoorganizados.

En esta nueva visión del mundo, la conclusión general es que la disipación es una fuente de orden.

3.3.4.2 Teoría de conjuntos difusos. En 1965 Lofty Zadeh publicó un artículo que se convirtió en piedra angular del desarrollo de la teoría de conjuntos difusos⁷³. El fundamento de esta teoría es la definición de un concepto de conjunto diferente al de la matemática clásica.

La teoría matemática tradicional de los conjuntos (conjuntos clásicos, nítidos o “crisp sets” en la nomenclatura Anglosajona) parte de un concepto intuitivo de “conjunto”: un grupo de elementos relacionados por una o varias características comunes. Podemos definir, por ejemplo, el conjunto formado por los padres de familia de los estudiantes de nuestra universidad, o el conjunto de los números enteros pares. Estos conjuntos nítidos se definen bien sea enumerando sus elementos o bien describiendo las propiedades que los distinguen. Para nuestros dos ejemplos, escribiremos:

$A = \{\text{Padres de los estudiantes de la U.T.P.}\}$

$B = \{\text{Números pares}\}$, o $B = \{2, 4, 6, \dots\}$, o $B = \{x/x \in \text{números pares} > 0\}$,

⁷² Cfr. *Ibíd.* Pg. 105.

⁷³ La traducción “difuso” para fuzzy es la más difundida. Nosotros preferiríamos el término “borroso”, pero no lo utilizaremos aquí por respeto al uso corriente.

en donde " $x \in$ " se lee: "x pertenece a" y " $x \notin$ " se lee: "x no pertenece a".

Una propiedad de los conjuntos nítidos es aquella que identifica un elemento como perteneciente o no perteneciente a él. Así, para el conjunto A, un profesor de la universidad o es padre de familia de un alumno o no lo es. Para el conjunto B, "3", al no ser un número par, no pertenece al conjunto B.

La dicotomía "pertenece o no pertenece" es el fundamento de la lógica bivalente: una proposición o es verdadera o es falsa; no hay otra alternativa.

En el estudio de la complejidad, la matemática clásica se vio complementada con la teoría de conjuntos y la teoría de probabilidades. Sin embargo, muchos sistemas no pueden ser descritos, matemáticamente en forma conveniente con ninguna de estas teorías. En ellos se presenta una gran dificultad al intentar medir los parámetros que definen los elementos del sistema y sus relaciones; se plantea una especie de "principio de incompatibilidad": una gran precisión es incompatible con una gran complejidad.

La teoría que vamos a esbozar aquí pretende acercar el análisis matemático a los sistemas complejos abandonando los altos estándares de precisión y rigor, útiles cuando de sistemas muy estructurados se trata, a cambio de una mejor aproximación a la naturaleza del sistema.

Definamos lo que se entiende por *conjunto difuso*. Recordemos que un *conjunto nítido* es aquel en el cual sus elementos son reconocidos sin ninguna duda. Por ejemplo, el conjunto: $C = \{\text{tiza, tablero, apuntes}\}$ permite asegurar que la tiza es uno de sus elementos, mientras que una silla no lo es. Propongamos ahora otro conjunto nítido X : $X = \{\text{todos los elementos necesarios para dictar una clase}\}$. Evidentemente, C es una parte de X . Decimos que C es un subconjunto de X .

En este contexto, si pensamos en C como el "conjunto formado por algunos elementos necesarios para dictar una clase", entonces el elemento "silla" podría ser incluido en C . La idea de poder formar parte de un conjunto con cierto "grado de pertenencia", es el eje central de los conjuntos difusos.

Un conjunto difuso es un conjunto en el cual la pertenencia o no de un elemento, tiene un valor entre 0 y 1. Entre más próximo esté el grado de pertenencia al valor de 1, más pertenecerá el elemento al conjunto

difuso. Si X es el conjunto universal de referencia, y A es un subconjunto de X , tendremos que un conjunto difuso A , se define como el par:

$$A = \{(x, m_A(x)), x \in X\}. \quad (\text{III-15})$$

Por ejemplo, si la silla tiene cierta importancia para formar parte de los elementos necesarios para dictar una clase (conjunto X), podemos decir que su grado de pertenencia es 0.8. De esta manera queda definido un nuevo conjunto C , difuso, del cual la silla forma parte con un grado de pertenencia de 0.8: $m_C(\text{silla}) = 0.8$.

Para los conjuntos nítidos:

$$\begin{aligned} m_A(x) &= 1, \text{ ssi } x \in A. \\ m_A(x) &= 0, \text{ ssi } x \notin A. \end{aligned} \quad (\text{III-16})$$

“ssi” significa “si y sólo si”.

El conjunto universal X es un conjunto nítido. Todo conjunto difuso debe ser un subconjunto de X .

El concepto de juventud es uno que pertenece a los conjuntos difusos. Es evidente que “juventud” es un concepto relativo (¡no es nítido!). Podríamos decir que una persona de 20 años o menos, es, sin duda, una persona joven; sin embargo, a medida que su edad se aleje de 20 años, será considerada cada vez menos joven. Si se preguntara a diferentes personas, podríamos establecer la gráfica de la fig. 3.10 como

FUNCIÓN DE PERTENENCIA DEL CONJUNTO "JOVEN"

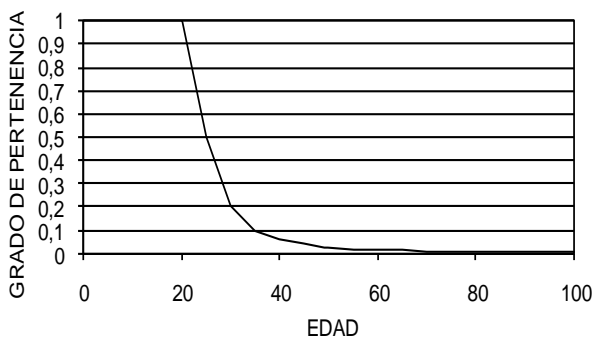


fig. 3.10

medida de la “función de pertenencia” de una persona al conjunto J , “personas jóvenes”. En este ejemplo, $X=[0, 100]$ representa el total de años a considerar. Es obvio que la gráfica dependerá de las personas entrevistadas para definir la función de pertenencia.

De acuerdo con la figura 3.10, una persona de 30 años, pertenece al conjunto J con un grado de pertenencia de 0.2. Escribiremos, entonces:

$$m_{\text{joven}}(x=30)=m_J(x=30)=0.2.$$

Sin embargo, es necesario hacer la siguiente aclaración. En ningún momento esta expresión puede ser interpretada como si una persona de 30 años *tuviera una probabilidad de 0.2* de pertenecer al conjunto J . La función de pertenencia no cumple con los axiomas requeridos por la teoría de probabilidades; la única coincidencia es el rango $[0,1]$ ⁷⁴.

Consideremos ahora el conjunto difuso $V: V=\{x/x \text{ es vieja}\}$. De nuevo, una persona de 20 años en ningún momento puede considerarse vieja, por lo que su grado de pertenencia al conjunto V , es sin duda de valor 0.

La fig. 3.11 es una posible representación de la función de pertenencia del conjunto V .

Según esta gráfica, una persona de 80 años tiene un grado de pertenencia de 0.97 con respecto al grupo de las personas viejas:

$$m_{\text{vieja}}(x=80 \text{ años})=m_V(x=80)=0.97.$$

De lo anterior es posible definir una serie de operaciones como la igualdad, la unión, la intersección, el complemento etc., entre conjuntos difusos.

⁷⁴ La teoría de probabilidades se sustenta en las siguientes consideraciones: sea U un espacio muestral $U=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Sea $p(e_i)$ la probabilidad asociada a un evento de U . Para que p sea una *distribución de probabilidad* deben cumplirse las siguientes condiciones:

- i) $\forall e_i, 0 \leq p(e_i) \leq 1.$
- ii) $\sum p(e_i)=1, i=1,2, \dots, n.$
- iii) Si $A= e_1 e_2 e_3 \dots e_n$ entonces $p(A)= \sum p(e_i), i=1,2, \dots, n.$
- iv) $p(\emptyset)=0.$

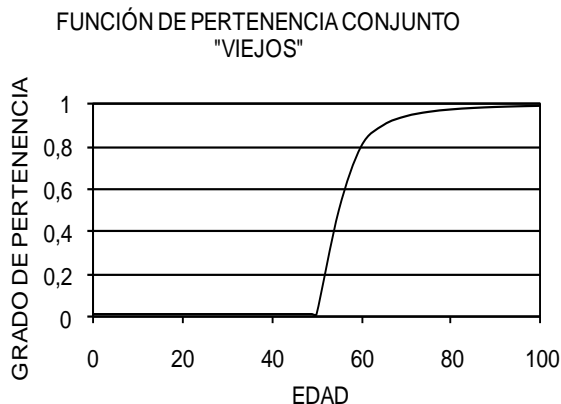


fig. 3.11

Como simple ejemplo, digamos que dos conjuntos difusos A y B son iguales si y sólo si:

$$\forall x \in X, m_A(x) = m_B(x). \quad (\text{III-17})$$

En la lógica tradicional, al pertenecer o no un elemento a un conjunto, se legitimaba la conocida *ley del tercero excluido*. En la lógica tradicional, íntimamente relacionada con los conceptos de la teoría de conjuntos, si una proposición es verdadera, por ejemplo la proposición P = "Juán es alto", entonces la proposición S = "Juán no es alto" es necesariamente falsa, y viceversa. Para el caso de los conjuntos difusos esto no es necesariamente cierto. Un elemento puede pertenecer ¡a ambos conjuntos! Así, de acuerdo con el ejemplo del conjunto difuso de los jóvenes, una persona de 55 años tiene un grado de pertenencia de 0,02 a este conjunto, y un grado de pertenencia de 0,1 al conjunto de los viejos.

A partir de la teoría de estos conjuntos es posible definir el concepto de *número difuso* lo cual permite realizar mediciones difusas. Se habla entonces del número difuso 7: es el "conjunto de números reales aproximadamente iguales a 7". Se ha desarrollado toda una matemática alrededor de estos números.

Para analizar las relaciones entre los diferentes elementos de un conjunto, la teoría ha definido operaciones para las llamadas *relaciones difusas*. Una relación difusa típica es: “ x es de mucha más edad que y ”. Es posible llevar esta frase a términos matemáticos a partir de los cuales puedan desarrollarse diversos cálculos y establecerse modelos.

También las restricciones caen bajo la consideración de esta teoría. Un buen símil es una maleta que se deja expandir. Decidir lo que cabe allí o no, no es un asunto “nítido”. A veces retirando un elemento se puede acomodar otro, permitiendo que la maleta quede un poco más voluminosa.

El concepto de *variable difusa* permite ampliar el dominio de aplicación de esta teoría. Volviendo al ejemplo de la maleta en la cual queremos llevar diversos objetos que tienen cierto grado de facilidad de ser acomodados, es posible asignar a cada objeto un “grado de facilidad” y decidir qué es lo más conveniente de llevar y qué no.

Todo esto lleva a la propuesta de una *lógica difusa* (o lógica polivalente). En la lógica tradicional, el hecho de que un elemento pertenezca o no a un conjunto, permite definir una serie de operadores lógicos los cuales a su vez establecen reglas precisas de razonamiento. De manera similar a la simbología de la lógica tradicional (lógica bivalente), en la lógica difusa es necesario definir un número mínimo de operadores lógicos: negación (\sim), disyunción (\wedge) y conjunción (\vee). Como existen varias formas de definir estos operadores aquí se da la particularidad de proponer varias formas de lógica difusa. Esta ampliación de las reglas de razonamiento permite modelar de manera muy acertada, el razonamiento humano. Por esta razón, hemos dicho que con esta nueva matemática, el modelado de ciertos sistemas complejos se ha facilitado enormemente.

Un buen ejemplo son las modernas máquinas lavadoras que son “inteligentes”⁷⁵. Ellas poseen la capacidad de decidir según el peso, tipo de ropa, temperatura, etc., el ciclo de lavado más efectivo.

También es posible hablar de *conjuntos posibilísticos* para los conjuntos difusos, así como se habla de *conjuntos probabilísticos* para los conjuntos nítidos.

⁷⁵ Se conocen como máquinas con *fuzzy logic*.

El concepto de *variable lingüística*, cuyo valor no es un número sino una palabra o frase, es otro elemento que amplía el marco de aplicación de esta teoría. Evidentemente, son valores menos precisos que los valores numéricos. De aquí que encuentren en los conjuntos difusos su natural definición. Decir “Juan es joven” es, obviamente, menos preciso que decir “Juan tiene 25 años”. El “rótulo” o identificador “joven” puede ser considerado como un *valor lingüístico* de la variable *edad* y que juega el mismo papel que el valor numérico “25”, pero en forma menos precisa y de hecho, menos informativa. Otros valores que podríamos proponer son: “extremadamente joven”, “menos joven”, “no muy joven”, etc., como contraste con valores numéricos tales como “15”, “35”, “38”, etc.

Las variables lingüísticas generan los *lenguajes* y las *gramáticas difusas*, que son los fundamentos para desarrollar los lenguajes computacionales (*algoritmos difusos*), y que permiten llevar al computador los conceptos de lo que pudiera denominarse en forma genérica, la matemática difusa.

Una herramienta muy valiosa de este tipo de tratamiento es la posibilidad de modelar los lenguajes naturales. Zadeh ha desarrollado un procedimiento que llama PRUF (Possibilistic Relational Universal Fuzzy) que permite tal modelado. En esta representación, frases como “Ricardo es alto” es traducida en términos de distribuciones de posibilidades de la variable “Alto(Ricardo)” que asocia a cada valor de la variable un número en el intervalo $[0,1]$, lo cual representa la posibilidad de que “Alto(Ricardo)” pueda tomar el valor en cuestión.

Sólo con el ánimo de dar una ilustración consideremos la frase: “Kent was walking slowly toward the door”. En PRUF esto se escribirá:

WALKING[Name=Kent; $\pi_{\text{speed}}=\text{SLOW}$; $\pi_{\text{time}}=\text{PAST}$; $\pi_{\text{direction}} =$
TOWARD (Object=DOOR)].

En la aplicación de las ideas básicas de la matemática difusa se han seguido dos caminos. Uno de ellos considera los sistemas difusos como una generalización de los sistemas considerando “difuso” las indeterminaciones inherentes a ellos; el sistema permanece en su noción clásica y es su tratamiento el que se modifica. Fruto de esta línea de investigación son los desarrollos en la teoría de autómatas difusos,

en los sistemas difusos en tiempo discreto, en los sistemas de control difuso, en los polisistemas de topología difusa (que surgen de los polisistemas dinámicos de control óptimo), en la teoría de grafos difusos y en la teoría de decisiones difusas, todos ellos como una extensión natural de modelos probabilísticos. Si se considera la “difusidad” de los números o valores, entonces surgen modelos y teorías como la investigación de operaciones difusa, el ruido difuso y los sistemas difusos lineales.

La otra dirección es un enfoque lingüístico de los sistemas difusos. En este contexto, un modelo difuso es considerado como una descripción lingüística mediante proposiciones lógicas difusas. De esta línea son, por ejemplo, la síntesis de controladores de Mamdani y Assilian y la teoría de razonamiento aproximado. Este enfoque exige la aplicación de la teoría de conjuntos difusos a la de los lenguajes formales. Se generan así los lenguajes difusos y las gramáticas difusas con las que se definen los algoritmos difusos.

Los pocos ejemplos aquí consignados permiten vislumbrar el poder que este tipo de matemáticas tiene para el modelado de los sistemas complejos.

3.3.4.3 Teoría del caos. Teoría de catástrofes. Algunos definen la *teoría del caos* como “la ciencia de los sistemas no lineales dinámicos y complejos”. *Caos*, en griego, significa *desorden*. El desarrollo actual de esta teoría ha logrado demostrar que en el aparente desorden de muchos procesos, subyace un orden muy sutil y complejo difícil de percibir a simple vista. Esta teoría no trata, pues, del estudio del desorden. Todo lo contrario. Se ha podido demostrar que en el caos se encuentra el origen del orden. Aquí el concepto de orden se une con el de patrón. Por complejo que sea el comportamiento de ciertos sistemas y por impredecible que sea un estado particular a partir de ciertos datos, su comportamiento global es fácilmente identificable; su patrón de conducta puede ser modelado y conocido.

Fenómenos de muy diverso tipo, antes considerados fortuitos, caen dentro del estudio del caos:

... el movimiento de un péndulo influido por varios imanes, la turbulencia creada por el flujo de un líquido o gas a altas velocidades, las inexplicables

fallas de una red de telecomunicaciones para el rastreo satelital de vehículos de carga, la arritmia de las células cardíacas que conducen a la fibrilación de un corazón o marcapasos, la variabilidad climática junto con la formación de nubosidades y vientos, el comportamiento de la economía tanto global como local a través de los mercados de valores o hasta el simple goteo aperiódico de un grifo de agua.⁷⁶

Todos ellos tienen una característica común: una pequeña diferencia en un estado del sistema puede producir profundos cambios posteriores. La conocida metáfora de Lorenz: *el tenue aleteo de una mariposa en Hong Kong puede convertirse en el tornado que devastará a Kansas*, aclara lo antes dicho.

La gran dificultad en el manejo de la dinámica de las ecuaciones que explican los fenómenos que caen bajo el dominio de ésta teoría, frenó enormemente su avance. Entre algunos de sus predecesores están George Cantor, con la teoría de los conjuntos transfinitos, Stanislav M. Ulam, con el desarrollo del método de Monte Carlo como herramienta para la solución de problemas complejos de la teoría de la fusión atómica, Robert Hooke, con sus estudios de los péndulos cónicos y su relación con la fuerza de gravedad, Guiseppe Peano, con sus estudios sobre las curvas que poseen infinitas tangentes en diferentes segmentos. Ninguno de ellos dispuso en su tiempo del computador moderno, herramienta fundamental para este tipo de estudios. En efecto, es con base en gráficas (resultados numéricos representados en lo que se denomina *espacio de fase*) que es posible identificar los patrones que muestran las estabilidades en estos sistemas aparentemente inestables.

Una particularidad que sorprende en esta teoría es que se trata de *sistemas dinámicos deterministas*. Las ecuaciones son en general ecuaciones de diferencia o ecuaciones diferenciales en las cuales no existe ningún proceso aleatorio. En otras palabras, es posible conocer, exactamente el comportamiento del sistema a “corto plazo”. Sin embargo, lo que pueda ocurrir más adelante escapa a toda predicción. Este es un golpe mortal a la esperanza laplaciana de poder predecir el futuro de cualquier sistema con solo disponer de los datos del presente.

Consideremos la siguiente ecuación:

⁷⁶ C. M. Olivares: *Teoría del Caos*. Pg. 6.

$$x_{n+1} = kx_n (L - x_n) \quad (\text{III-18})$$

(III-18) es la manera de expresar en forma discreta, lo que la ecuación (III-3) expresa en forma continua.

Ella describe el crecimiento de una población que está limitado no sólo por un parámetro L sino por la población misma. Cuando la población inicial es pequeña, el término $(L - x_n)$ tiene poca influencia; pero a medida que el valor de la variable x crece, este término influye fuertemente en los nuevos valores, y todo el sistema tiende al límite L . Este límite es impuesto por la misma naturaleza y explica porqué una población no puede crecer indefinidamente (la equifinalidad). Los valores de k son generalmente menores que la unidad, pues representan las tasas de crecimiento. Pero ¿qué ocurre si estas tasas toman valores superiores a la unidad?

Olivares⁷⁷ propone los cálculos indicados en la tabla de la figura 3-12, para diferentes valores de k , $L = 1$ y $x_0 = 0.39999$ o $x_0 = 0.40000$, según el caso. Para una interpretación más fácil, los resultados han sido graficados en la figura 3.13.

Las figuras 3-13 muestran tendencias a límites diferentes. En la primera, se observa la tendencia al valor 0.5, para los valores iniciales 0.400000 y 0.39999. 0.5 es un *punto de atracción*. En la segunda figura superior se observa una tendencia a un ciclo que se da para los valores iniciales 0.400000 y 0.39999 alrededor de 0.500000 y 0.809017. La tercera figura muestra el comportamiento general cuando $k = 4.0$. No se ve un patrón de límite hacia el cual tienda la serie.

Este ejemplo ilustra no sólo el concepto de patrón de comportamiento y el de *atractor*, sino que además muestra cómo una pequeña diferencia en los datos iniciales puede producir cambios muy sensibles en el proceso. Lo últimos valores de las columnas tres y seis así lo demuestran.

⁷⁷ Cfr. C.M. Olivares, *Op. Cit.* Pg. 28.

$k=2,0$	$k=1+\sqrt{5}$	$k=4,0$	$k=2,0$	$k=1+\sqrt{5}$	$k=4,0$
0,400000	0,400000	0,400000	0,399999	0,399999	0,399999
0,480000	0,776656	0,960000	0,480000	0,776656	0,959999
0,499200	0,561333	0,153600	0,499200	0,561334	0,153603
0,499999	0,796844	0,520028	0,499999	0,796843	0,520036
0,500000	0,523867	0,998395	0,500000	0,523867	0,998394
0,500000	0,807174	0,006408	0,500000	0,807174	0,006413
0,500000	0,503676	0,025467	0,500000	0,503676	0,025487
0,500000	0,808973	0,099273	0,500000	0,808973	0,099351
0,500000	0,500087	0,357670	0,500000	0,500087	0,357921
0,500000	0,809017	0,918969	0,500000	0,809017	0,919254
0,500000	0,500000	0,297860	0,500000	0,500000	0,296904
0,500000	0,809017	0,836557	0,500000	0,809017	0,835009
0,500000	0,500000	0,546917	0,500000	0,500000	0,551077
0,500000	0,809017	0,991195	0,500000	0,809017	0,989564
0,500000	0,500000	0,034909	0,500000	0,500000	0,041306
0,500000	0,809017	0,134761	0,500000	0,809017	0,158401
0,500000	0,500000	0,466403	0,500000	0,500000	0,533241
0,500000	0,809017	0,995485	0,500000	0,809017	0,995580
0,500000	0,500000	0,017978	0,500000	0,500000	0,017601
0,500000	0,809017	0,070621	0,500000	0,809017	0,069164

fig 3.12

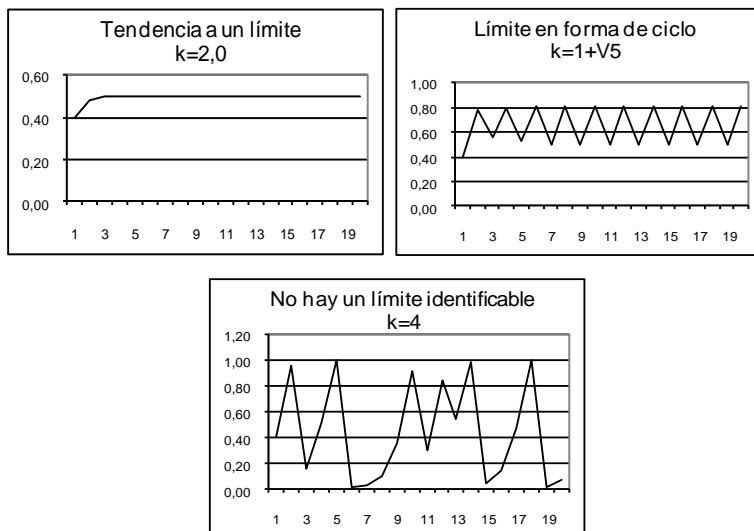


fig. 3.13

Mientras que para $k=2.0$ y para $k=1+\sqrt{5}$ los resultados son iguales con seis cifras decimales para una diferencia en los valores iniciales de $0.400000-0.399999 = 0.000001$, la diferencia para $k=4.0$ es sensiblemente mayor: ya la segunda cifra decimal es diferente.

Un tercer tipo de atractores es el de los *atractores extraños*. Son los atractores que realmente interesan a la teoría del caos. El patrón resultante es complejo y altamente organizado y no son producto del azar. Estos atractores tienen la característica de poderse representar en espacios de dimensionalidad pequeña, independientemente de si el fenómeno posee una gran cantidad de variables.

En 1972, René Thom publicó su obra *Stabilité Structurelle et morphogénese (Estabilidad estructural y morfogénesis)*. Su idea central era la explicación de las diferentes formas de la naturaleza mediante estructuras matemáticas. Thom partió del hecho de que muchos fenómenos de la naturaleza presentan discontinuidades tales como la división de una célula (que parece darse en forma abrupta), la caída de un puente en donde no parece haber solución de continuidad entre las condiciones que lo mantienen unido y las que lo colapsan, o las fronteras entre dos tejidos. Las matemáticas tradicionales, representadas en su forma más depurada por las ecuaciones diferenciales tienen como fundamento la continuidad. Pero, a pesar de los inmensos aportes que han recibido por parte de los grandes matemáticos de los últimos tiempos, son muy limitadas para la construcción de modelos biológicos y sociales. No sólo estos modelos presentan discontinuidades (al menos aparentes) sino que no siempre se dispone de la precisión en la medida de las variables exigidas por los modelos matemáticos del continuo. Thom denominó su propuesta *Teoría de catástrofes*.

Esta teoría se refiere, pues, al estudio de las discontinuidades en los fenómenos que estudia sin tener en cuenta a los mecanismos que las generan. Un ingenio sencillo, que muestra el concepto de *catástrofe*, es la máquina de Zeeman⁷⁸ (figura 3.14).

Se trata de dos bandas elásticas de aproximadamente la misma longitud, la cual se tomará como unidad cuando no están estiradas. Se corta un disco de cartón resistente de diámetro igual a la unidad y se fija

⁷⁸ En P. T. Saunders: *Una introducción a la teoría de catástrofes*. Pg. 4.

por su centro O en una base adecuada. Cerca de su borde se fija un alfiler, por ejemplo en Q . A una distancia de aproximadamente dos unidades y sobre un eje vertical se fija una de las bandas elásticas (punto R en la figura). La otra punta, así como una de las puntas de la banda restante, se fijan en el punto Q . El otro extremo de la banda quedará libre (punto P en la figura 3.14).

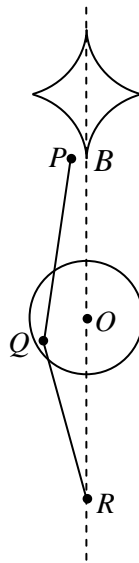


fig. 3.14

Al mover lentamente el extremo P en el plano, se observará que cuando se dan pequeños cambios la máquina se mueve lentamente. Pero ocasionalmente salta de repente. Las posiciones de P en las cuales se producen los saltos se presentan sobre el perímetro de un rombo curvilíneo. Sin embargo al cruzar el rombo, no se presentan saltos. En cuanto a posiciones de equilibrio estable, existe sólo una fuera del rombo. Dentro del rombo se encuentran dos posiciones de este tipo, en una de las cuales Q está a la derecha y en la otra, a la izquierda. Hay una tercera posición de equilibrio dentro del rombo pero es altamente inestable.

Zeeman ha sugerido cinco propiedades para esta máquina. La primera es la existencia de *saltos repentinos*. La segunda es la

histéresis: al mover P alternativamente cruzando el rombo curvilíneo, los saltos que ocurren cuando se va de izquierda a derecha no ocurren en los mismos sitios que cuando se mueve de derecha a izquierda. Una tercera propiedad es la *divergencia*: si iniciamos los movimientos de P cerca del eje o sobre éste, pero fuera del rombo, y lo movemos hacia dentro del mismo, el hecho de que Q quede a la derecha o a la izquierda depende únicamente del lado de B por el que haya pasado P , de tal manera que dos trayectorias cercanas que unan puntos iguales puedan producir comportamientos significativamente diferentes. Otra propiedad es la *bimodalidad*: para algunas posiciones de P hay dos posibles posiciones estables para Q . Finalmente está la *inaccesibilidad*: si P está más arriba o más abajo del rombo y si nos movemos en una línea perpendicular al eje, el movimiento del disco puede detenerse. Pero a nivel del rombo hay algunos momentos en los que no es posible lograr un equilibrio estable.

Esta máquina nos aclara varios puntos relativos a esta teoría. En primer lugar, su construcción pudo haberse realizado con dimensiones diferentes. Saunders propuso las aquí indicadas para poder llevar a cabo cálculos matemáticos –que de otra forma hubieran sido difíciles de realizar– para explicar su comportamiento. Con esto resaltamos que lo importante en la teoría no es el análisis cuantitativo sino el cualitativo. Los resultados referentes a puntos sobre un rombo curvilíneo son válidos para cualquier máquina que se construya con dimensiones diferentes. El patrón de comportamiento se conserva, y esto es lo que realmente vale la pena destacar. Por otra parte, queda claro que es posible encontrar, en comportamientos aparentemente regulares (continuos), saltos o discontinuidades mediante la desaparición de estados estables. El estudio de tales estados es la idea fundamental de la teoría de catástrofes.

Para explicar estos saltos o discontinuidades, R. Thom propuso siete catástrofes elementales. Lo interesante es el reducido número de patrones de comportamiento que son necesarios para explicar situaciones altamente complejas.

La herramienta básica de Thom es la representación gráfica de los estados estables como un conjunto de puntos (líneas o superficies) que se denomina *espacio de comportamiento* (o *superficie de equilibrio*). En estos puntos, el comportamiento de un sistema es continuo, pero

cuando abandona esta línea o superficie, se presentan inestabilidades que fuerzan al sistema a puntos, en muchas ocasiones, alejados del lugar donde antes se encontraba.

Las siete catástrofes son: *El pliegue*, *la cúspide*, *la cola de Milano*, *la singularidad umbílica elíptica*, *la singularidad umbílica hiperbólica*, *la mariposa* y *la singularidad umbílica parabólica*. Sólo ilustraremos una de ellas⁷⁹.

Mediante ciertas transformaciones matemáticas, las coordenadas x , y y del plano se transforman en u , v . Este nuevo plano se denomina *espacio de control*. Al variar sus valores, los puntos generados en este plano se denominan *trayectoria de control*. Cuando se dan variaciones regulares en las variables u y v generalmente se dan variaciones regulares en la variable x , salvo cuando la trayectoria de control cruza el *conjunto de bifurcación*: puntos en los cuales se presentan las inestabilidades (el rombo curvilíneo de la máquina de Zeeman). El *espacio de fase* (espacio tridimensional de las variables x , u y v) para la máquina de Zeeman es la *cúspide*, cuya representación está indicada en la figura 3.15.

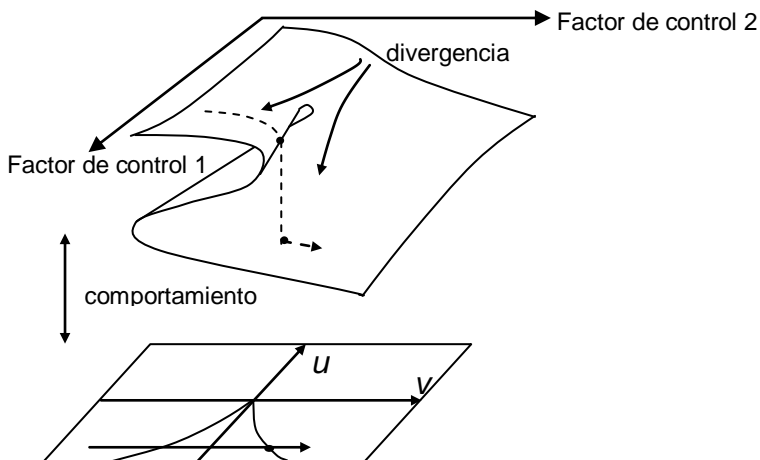


fig. 3.15

⁷⁹ Cualquier texto sobre el tema tiene las figuras relativas a estas siete catástrofes.

El cambio repentino se presenta cuando la trayectoria, que se encuentra en la superficie de equilibrio tropieza con un pliegue que lo obliga a “caer” a otra parte de la otra hoja; es decir, refleja el salto de la variable x .

En cuanto a las aplicaciones de esta teoría, son muchas y muy importantes. Seguiremos en este tema A. Woodcock y M. Davis⁸⁰. En física y química, la teoría ha permitido modelar procesos que sólo eran explicables en casos ideales. Por ejemplo, en óptica ha permitido la comprensión de las líneas *cáusticas* que se presentan en la reflexión y refracción de la luz en muchos fenómenos naturales (como la formación del arco iris); en resistencia de materiales para la comprensión del fenómeno de la ruptura cuando se aumenta la tensión en una estructura; en la transición de fases del agua. En bioquímica se ha estudiado el fenómeno de la *desnaturación*, un proceso mediante el cual las moléculas de proteína cambian de forma debido a cambios de la temperatura, acidez o algún otro factor de control (así, la cocción de un huevo que es endurecido porque el calor desnatura la albúmina, permitiendo que esta proteína forme nuevos eslabones). En biología, esta teoría se ha aplicado en varios niveles, desde la bioquímica hasta la genética, la embriología y la teoría de la evolución. No olvidemos que el libro de Thom se refería explícitamente a la morfogénesis: aparición de las distintas formas características del organismo y sus partes constituyentes.

En el comportamiento animal, la teoría se ha aplicado a la lucha de las especies por la territorialidad. Los modelos tradicionales consideran un número reducido de especies bajo condiciones en cierta forma ideales (por ejemplo la ecuación III-5). Los modelos basados en la teoría de catástrofes no sólo incluyen los recursos de los cuales los animales dependen sino el costo de defender el territorio, es decir, la energía necesaria para detener o luchar contra la competencia.

En Sociología y en Economía la teoría ha analizado los procesos de socialización y desorden durante períodos de peligro, las relaciones entre el estatus social y el matrimonio, la competencia y la fijación de

⁸⁰ Cfr A. Woodcock, M. Davis: *Catastrophe Theory*. Pg.s 76 y sgts. Saunders, *Op. cit.* tiene también excelentes ejemplos.

precios, las expectativas económicas y la inflación. Incluso, se han hecho análisis sobre el ascenso y caída del Imperio Romano, las revoluciones políticas, los conflictos entre el desarrollo nuclear y la ecología. En psicología hay modelos para la incapacidad de aprendizaje bajo estrés, la esquizofrenia reactiva y la anorexia nerviosa.

La teoría del caos y la de las catástrofes se encuentran en el concepto de *atractor extraño* y *bifurcación*; la teoría de catástrofes ha hecho grandes contribuciones para desarrollar y comprender este concepto.

3.3.4.4 Teoría de fractales. Por la misma época en que se desarrollaba la teoría del caos, una nueva geometría hacía su aparición, y posteriormente jugaría un papel importante en la teoría del caos al explicar lo denominados atractores extraños. Fue Benoit Mandelbrot el creador de este nuevo lenguaje matemático que se conocería como *geometría fractal*⁸¹. Su origen está en el intento de Mandelbrot de explicar los fenómenos irregulares presentes en la naturaleza. Aunque algunas de sus formas se asemejan a ciertas figuras de la geometría tradicional, como por ejemplo hojas que son triangulares o elipsoides, montañas que asemejan conos, no menos cierto es que son pocas las opciones de representación con esta visión y, de todas maneras, es bastante imprecisa.

Un *fractal* es un objeto geométrico de estructura irregular que está presente en muchos comportamientos y formas de la naturaleza. Es un objeto en el que cualquiera de sus partes se asemeja al conjunto. Es fruto de la repetición infinita de un proceso geométrico bien especificado, generalmente sencillo, que da como resultado una estructura extraordinariamente compleja.

Se puede citar como trabajos previos al desarrollo de Mandelbrot, los estudios de Cantor (el llamado *conjunto de Cantor*⁸²) y los de Hausdorff relacionados con ciertos conjuntos de puntos de la recta, cuya medida

⁸¹Cfr. B.B. Mandelbrot: *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Traducción de la obra original en francés de 1975.

⁸² Es el conjunto resultante de tomar un segmento de recta y dividirlo en tres partes iguales, eliminándose el segmento central. Con los segmentos restantes, esta operación se repite indefinidamente.

de Lebesgue es nula pero que poseen ciertas propiedades geométricas, aritméticas y analíticas.

Un ejemplo de fractal, muy citado, es la curva de Koch. Se toma un segmento de recta y se divide en tres partes. Se reemplaza el segmento central por dos lados de un triángulo equilátero. La figura 3.16 muestra el procedimiento.

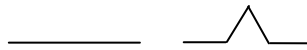


fig. 3.16

Cuando este algoritmo se aplica a un triángulo equilátero, la figura tiende a la forma de un cristal de nieve. Una propiedad importante es que la curva de Koch, en el límite, es de longitud infinita (fig. 3.17).

La complejidad, de por sí ya grande, puede aumentarse en forma impresionante si los modelos incluyen en su planteamiento matemático los números complejos. Las series de Gaston Julia fueron los primeros estudios de Mandelbrot en este campo.

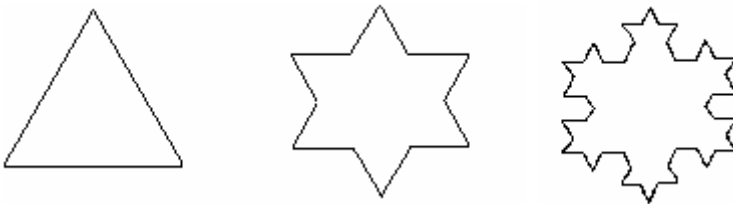


fig. 3.17

Si z es una variable compleja y c un número complejo, la serie de Julia se puede representar mediante la relación:

$$z_{k+1} = z_k^2 + c \quad (\text{III-19})$$

Dando diferentes valores iniciales a z , para un valor de c dado, algunos harán tender la serie al infinito y otros no. Las series de Julia

son el conjunto de valores de z , (puntos en el plano complejo⁸³) que mantienen la ecuación (III-19) en valores finitos. Estos valores, al representarse en el plano complejo, forman patrones también muy complejos pero definidos. Al ampliar una parte de alguno de los patrones obtenidos, se logra un patrón similar, lo cual muestra cómo estas series son fractales geométricos.

En la naturaleza hay muchos procesos que generan formas irregulares. Sin embargo, vale la pena destacar tres que son muy comunes: procesos de *separación de fronteras*, de *ramificación* o formación de árboles y de *formación de porosidad*⁸⁴.

La frontera de separación se refiere al hecho de que, miradas desde cualquier escala, siempre se observan incursiones de un medio en el otro, por lo que al aumentar el grado de resolución del fractal, sus medidas aumentan indefinidamente. Es el caso de la longitud de la curva de Koch indicada más arriba.

La ramificación se refiere al hecho de que parte de la geometría inicial se “abre” en nuevos brazos siguiendo una regla repetitiva. En la curva de Koch la bifurcación se realiza al reemplazar el segmento central por dos lados de un triángulo equilátero, de longitud igual al segmento suprimido.

La formación de “poros” se refiere a la exclusión de ciertas zonas que no cumplen con las reglas de formación propuestas. En las curvas de Julia indicamos que el fractal resultante no incluye los puntos en los cuales la serie se hace infinita. Aquí se ocasionan “islas” o poros que dan forma particular al patrón respectivo; de lo contrario, todo el plano complejo quedaría incluido.

Como herramienta para el estudio y comprensión de la complejidad, la teoría de fractales permite proponer modelos matemáticos que se aproximan bastante bien a los objetos reales que tratan de modelar.

Un primer ejemplo es el uso de los fractales para describir costas, bordes de una nube, superficies de montañas, o fronteras entre países. También es posible modelar un río y sus afluentes, el sistema arterial y redes capilares.

⁸³ Recordemos que en este plano, el número complejo ($a + ib$) se representa con el real a en el eje x , y el imaginario b , en el eje y .

⁸⁴ Cfr. M. de Guzmán et al.: *Estructuras fractales y sus aplicaciones*. Pg. 2-.

Más sofisticadas son las aplicaciones al estudio del movimiento Browniano⁸⁵ en donde se identifica este movimiento con un *fractal aleatorio*⁸⁶. Al concepto de *ruido blanco* (asociado al ruido que sigue una ley de probabilidad de tipo normal o gaussiano) que, según los autores citados, se puede definir como *la derivada de un movimiento browniano unidimensional*. Estos conceptos se han extendido a los llamados *paisajes fractales* que se asemejan sorprendentemente a paisajes reales.

3.3.4.5 Hacia una lógica sistémica. De alguna manera, gran parte de lo discutido hasta aquí está basado en la lógica tradicional, con excepción de la lógica polivalente derivada de los conjuntos difusos. Algunos autores abogan por un enfoque diferente, argumentando que la lógica del todo está lejos de poder ser comprendida y postulada en términos de una lógica tradicional, bivalente.

A. Angyal⁸⁷ hace notar que nuestro conocimiento científico actual consiste primordialmente en la manipulación de la lógica de relaciones. En general, las proposiciones tradicionales de la matemática son del tipo “x está relacionada con y mediante la propiedad *P*”. Algunos tratadistas de sistemas insisten en que la estructura de los “todos” no puede ser descrita en términos de relaciones. Los términos a utilizar deben ser ciertas unidades lógicas distintas. Tal unidad, según Angyal, es el “sistema”: es la unidad lógica que permite el tratamiento de los “todos”.

La tarea de llevar a cabo la construcción de esta nueva lógica es titánica, no sólo por la dificultad que toda tarea novedosa implica sino por el hecho adicional de obligarnos a pensar en términos lógicos diferentes a los que estamos habituados. Podemos sin embargo dar una idea de algunas características de esta nueva lógica usando como medida de comparación la lógica bivalente tradicional. La razón de incluir el tema aquí no es la de disponer de una herramienta alterna para el estudio de los sistemas, pues ya hemos dicho que tal lógica aún no existe; pero es de suma importancia analizar sus razones y fundamentos

⁸⁵ Es el movimiento aleatorio de partículas de polen suspendidas en solución acuosa, que se observa bajo el microscopio.

⁸⁶ M. de Guzmán, *Op. Cit.* Pg. 60.

⁸⁷ Cfr. A. Angyal: *A Logic of Systems*. (En F.E. Emery: *Systems Thinking*).

ya que esto nos da una comprensión mayor del tema de los sistemas y de la importancia de su estudio.

Una primera distinción entre la lógica tradicional y la lógica de los sistemas descansa en que la lógica de las relaciones requiere sólo dos elementos para establecer la relación. Las relaciones más complejas son siempre reducibles a relaciones entre pares de elementos⁸⁸. Para el caso de los sistemas, esto no es posible. Un sistema no es un complejo de relaciones. Es imposible decir qué relación debe haber entre a y b , b y c , c y d , etc. para que a, b, c, d, \dots sea un sistema lineal. Es la consideración global lo que lo define. La figura 3.18 ilustra el caso.

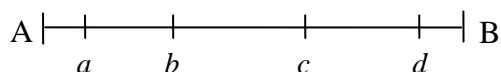


fig. 3.18

Otra distinción sustancial parte del hecho de que las relaciones entre objetos se refieren a cualidades inmanentes a los mismos, a sus atributos. Así, ellos se relacionan por su peso, longitud o cualquier otra propiedad (o propiedades pero que en conjunto obran como una sola) que les sea común. Antes de poder establecer una relación entre elementos es necesario especificar cuáles aspectos de los elementos servirán de base a la relación. Podríamos decir que se trata de un aspecto “externo”. Por el contrario, los miembros de un sistema no llegan a ser constituyentes del sistema gracias a sus cualidades inmanentes, sino por medio de su distribución o arreglo dentro del mismo. Ellos participan en él, no por una propiedad inherente sino por su *valor posicional en el sistema*. Volviendo a la figura 3.9 poco importa si sus elementos son letras (a, b, c, d, \dots), puntos, cruces u otros objetos, siempre y cuando el arreglo de sus valores posicionales permanece igual, para definir un sistema lineal. Una vez logrado un valor posicional para los constituyentes de un sistema, pueden establecerse “relaciones secundarias” no basadas en las propiedades inmanentes de los elementos, sino en valores posicionales secundarios.

⁸⁸ Esto se verá en detalle cuando estudiemos la metodología de Forreter, en el capítulo 5.

Una tercera distinción surge de una característica común a las relaciones y a los sistemas: la multiplicidad de objetos es posible sólo en algún tipo de “dominio dimensional”. Tal es el caso de los dominios espacio y tiempo. No podemos hablar de *dos* objetos, salvo si están puestos en diferentes puntos del espacio o en diferentes puntos en el tiempo, o en general si es posible definir algún tipo de *distancia* para alguna otra clase de dominio dimensional. Aunque tal dominio es necesario tanto para las relaciones como para los sistemas, su función es diferente en estos dos tipos de géneros lógicos. Para el caso de las relaciones, el papel del dominio dimensional es sólo de separación (individualización) de los elementos. Su función termina allí. El dominio en sí no entra en las relaciones. Para el caso de los sistemas, el dominio está íntimamente ligado en su formación. El sistema es dimensional: es *una distribución de miembros en un dominio dimensional*.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍAS

4.0 Introducción. Dijimos en capítulos anteriores que un *método* es una manera, un procedimiento, unas reglas que nos permiten llegar a un fin o a una meta propuesta de antemano. No puede existir un método basado únicamente en el azar puesto que esto no conduciría con confianza al fin propuesto. Por lo tanto el método implica cierta regularidad en su aplicación. Otra característica importante es que un método puede abrirse en el sentido de que puede alcanzar otros fines no propuestos inicialmente y otros tipos de conocimiento.

Los métodos están muy ligados a las realidades que tratan de conocer. Aunque intentan cierta universalidad (sentido de generalidad en el campo en que se aplican), no es posible, en la mayoría de los casos, utilizar los métodos que son efectivos en un campo del saber, en otro.

Ferrater⁸⁹ aclara la diferencia entre método y demostración: esta última consiste en hallar la razón por la cual una proposición es verdadera; el primero, en cambio, trata de hallar la proposición verdadera. Esto no implica que un método no pueda incluir la demostración de la verdad.

Existe una diferencia entre los métodos más generales y los más especiales. Los métodos más generales son, entre otros, el análisis, la síntesis, la inducción y la deducción. Los más especiales son determinados por el objeto a investigar o las proposiciones a descubrir. Por su parte, las metodologías se ocupan de los principios utilizados en los métodos, es decir, describen y cuestionan los métodos que deben ser empleados en alguna actividad. La metodología está en un nivel superior al de los métodos y, por lo tanto, al de los procedimientos, herramientas y técnicas que deben ser tenidos en cuenta para que ella cumpla su cometido. Podemos decir que las metodologías son el patrón que regula los métodos y sus procedimientos. A su vez, el estudio de las metodologías pertenece al campo de la meta-metodología: ésta se hace

⁸⁹ Cfr. J. Ferrater Mora: *Diccionario de Filosofía*.

necesaria cuando las metodologías se cuestionan en forma global y es necesario recurrir a niveles superiores del lenguaje.

Como un ejemplo se pueden citar cuatro metodologías en el campo de la investigación de los sistemas sociales: la funcionalista, la interpretativa, la emancipatoria y la postmoderna⁹⁰. Cada una de ellas tiene sus propias herramientas, técnicas, modelos y métodos.

Siguiendo a Jackson, una metodología debe estar incorporada en un *marco conceptual* que permite expresar las ideas relacionadas con el fenómeno en estudio. En este marco existe una metodología que utiliza varias herramientas, técnicas y métodos de manera apropiada al marco conceptual. Existe además un área de interés que puede ser una disciplina particular o un problema de la vida real. La figura 4.1, propuesta por Checkland, ilustra la idea.

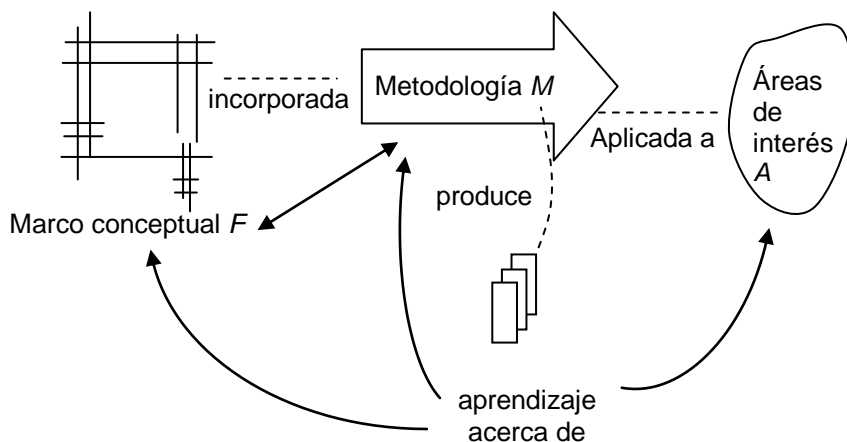


fig. 4.1

Este esquema permite analizar diferentes tipos de investigación. Cuando se estudia un fenómeno “a la manera académica”, generalmente lo que se analiza está localizado (o se localiza) en una

⁹⁰ Según Burrell y Morgan existen cuatro paradigmas que soportan los estudios sociales: el humanismo radical, el estructuralismo radical, la escuela interpretativa y la funcionalista. Cfr. M.C. Jackson: *Systems Approaches to Management*. Pg. 11.

disciplina conocida; el marco conceptual F queda determinado por ésta, así como la metodología M a aplicar.

Una segunda manera de realizar investigación es la utilizada por la ciencia tradicional. Se plantean hipótesis que intentan explicar un aspecto del mundo real, hipótesis que están fundamentadas en el marco conceptual F , de la ciencia respectiva. La metodología M de la ciencia utilizada, indica los experimentos y observaciones que deben llevarse a cabo en el mundo real, A , con el fin de constatar o rechazar las hipótesis propuestas. El proceso conduce a un mayor conocimiento de F , M y A . Este procedimiento se ha utilizado también en las ciencias sociales, como se indicó en el capítulo 1.

Estos dos procedimientos se centran más en F que en A . Son los controlados por la comunidad académica que buscan ser los guardianes de F . En cierta forma el tipo de problemas a analizar quedan condicionados por el marco conceptual. A este tipo de modelos Gibbons *et al.* los llama *modo 1*. En el capítulo anterior hicimos referencia al sistema formal de Bertalanffy y el de Lange; ellos pertenecen al modo 1 de investigación.

El *modo 2* es un tipo de investigación en el cual se privilegia el mundo real, A . En este caso no siempre existe una disciplina que permita un F único, haciéndose por lo tanto necesaria la interdisciplina (Jackson habla de *transdisciplina*). El marco referencial que surge no es generalmente transferible a otras situaciones. Las deficiencias en F son compensadas por un intento de mejorar la metodología, M . Aquí podemos enumerar la Investigación de Operaciones y el Análisis de Sistemas. Cuando la herramienta no es de tipo "ingenieril" sino la aplicación del pensamiento sistémico a situaciones de la vida real, podríamos hablar de un tercer tipo de investigación. La metodología de Sistemas Blandos y la Planeación Interactiva serían dos de las herramientas a usar.

Un cuarto tipo de investigación pertenece a lo que se conoce como *investigación en la acción (investigación activa)*. Su origen se encuentra en Kurt Lewin quien criticaba la forma en que la sociología y la psicología tradicional trasladaban a un laboratorio los fenómenos de interés. Se debe confrontar la teoría con la acción. Checkland llama a este proceso *investigación activa interpretativa*. La idea es destacar el hecho de que no se busca la objetividad tan deseada por el enfoque positivista tradicional al que hicimos referencia en el capítulo 1. Aquí se acepta que

cualquier investigación de un sistema humano o social produce un cambio en el sistema estudiado y en la teoría misma. Así pues, no se busca “solucionar problemas”; más bien mejorar situaciones.

Queda claro que toda metodología *M* está subordinada, en general, a una teoría. En el modo 1 de investigación, la teoría pertenece a un paradigma oficial; en el modo 2, es el vehículo mediante el cual los marcos de referencia son llevados al mundo real. Se espera que en este proceso la teoría salga fortalecida. Existe, sin embargo, otra manera de realizar investigación desarrollada en el campo sistémico que ha sido de poco interés para los sociólogos: la investigación activa. Las ciencias sociales son fuertes en teoría pero débiles en la práctica. Por el contrario, el pensamiento sistémico, particularmente la investigación activa, aunque intenta desarrollar marcos conceptuales, está más centrado en el mundo real.

En el capítulo anterior dijimos que si no se dispone de un cuerpo teórico estructurado para aplicar un conocimiento dado, los métodos y sus metodologías asociadas son un camino útil para lograrlo. Pero ¿es posible aplicar conocimientos que no han sido sólidamente establecidos? ¿Cómo llevar a la práctica aspectos cuya comprensión y explicación aún no son claros? Si no podemos medir, por ejemplo la equifinalidad ¿cómo podemos usar el criterio de una manera científica en la vida real?

En verdad sí es posible usar y aplicar conocimientos aunque éstos no estén aún sólidamente planteados. El campo de la ingeniería nos ha enseñado a hacerlo. Una interesante y atrevida mezcla de conocimiento formal, sentido común, ingenio y osadía. No se necesitó disponer de una teoría perfeccionada de la luz para la creación de aparatos ópticos. Evidentemente, el perfeccionamiento de los mismos, por el contrario, necesita de teorías mucho más estructuradas que aquellas que dieron origen a los primeros artefactos.

Otra lección que hemos aprendido es la importancia de los comportamientos –entendidos como descripciones generales– en lugar de medidas exactas, sobre todo en los sistemas complejos. La nueva matemática utilizada en los sistemas destaca este hecho.

El primer reto que debe enfrentar cualquier metodología sistémica es la definición del *sistema en estudio*. Ya hemos discutido el tema en páginas anteriores, y sabemos que, aún partiendo de una definición

operativa, dos personas ajenas la una a la otra y conocedoras de los conceptos teóricos de los sistemas, difícilmente podrán identificar y definir de la misma manera el “sistema” en cuestión.

Toda definición de un sistema tiene dos aspectos. Uno *externo*, el cual se refiere al sistema en consideración, y otro *interno*, referente a la persona que lo define. El primer aspecto es “el sistema”. El otro, surge cuando la persona “limita” el sistema que va a considerar. Cada cual con sus conocimientos, su cultura, su idiosincrasia, aplica las nociones sistémicas y decide qué incluir y qué excluir. Esto no es ninguna novedad en la ciencia, sólo que para el caso de la físico-química, si bien no es un asunto trivial tal elección, cuando esta limitación se descubre, es única. El sistema se vuelve idealmente descomponible. O en términos más precisos, es posible encontrar un modelo descomponible, ideal, el cual pueda explicar muchos fenómenos relacionados que no son ideales, pero este modelo pertenece a los sistemas cuasi-descomponibles.

Un segundo aspecto metodológico es la consideración de la jerarquía de los sistemas. Ya hicimos referencia al problema que se presenta con los “dos sistemas extremos que no parecen ser sistemas”. Los sistemas cuasi-descomponibles nos permiten soslayar esta situación. En tales casos sí es posible un aislamiento del sistema, es decir, una “ruptura” de la jerarquización, ruptura que, por las características ya indicadas no afecta sustancialmente el comportamiento del sistema que queremos definir. En todo sistema es necesario identificar los suprasistemas que lo contienen. Pero no es necesario remontarnos hasta el universo ni subdividir los subsistemas hasta sus elementos primitivos.

Existe un tercer aspecto íntimamente relacionado con la jerarquización: la manera como deben definirse los *subsistemas* o “partes” del sistema. También se debe poder definir el *ambiente del sistema* –el *sistema mayor*– que tiene como uno de sus subsistemas al sistema en estudio.

Un cuarto aspecto es que toda metodología debe indicar la manera de identificar las relaciones existentes entre los elementos del sistema y los del ambiente con el fin de especificar las influencias respectivas (y medirlas si es posible).

Todas deben plantear modelos que sirvan para estructurar, comprender y proponer acciones que puedan mejorar situaciones que deseen modificarse.

A este respecto Ackoff dice:

En el pensamiento analítico el objeto por explicar se trata como un todo que debe separarse. En el pensamiento sintético la cosa por explicar se trata como una de las partes de un todo contenedor. El primero *reduce* el centro de atención del investigador; el segundo lo *expande*.⁹¹

Finalmente, deben ser cíclicas, es decir, que las fases sugeridas no sean una secuencia rígida a seguir; por el contrario, debe existir una interacción entre ellas, modificándose las acciones y proposiciones a medida que se avanza en la solución del problema.

Una de los campos en los cuales el enfoque de sistemas ha sido de mucha ayuda es en el área administrativa. Consideremos algunas de las ideas que C. West Churchman tiene al respecto.

4.1 Las ideas de C. W. Churchman. En su libro *El enfoque de sistemas*⁹² Churchman hace referencia a cuatro estilos de administración cuando se considera en ellos la manera de *enfocar al sistema*, es decir cuando se miran a través de la forma como el concepto de sistema es utilizado: 1) los *eficientes*, 2) los *humanistas*, 3) los *científicos*, y 4) los *opositores* (o anárquicos).

Los primeros son los administradores que basan sus decisiones en las teorías de Fayol y Taylor. Es la administración basada en la eficiencia y parte del principio según el cual siempre habrá una manera correcta de hacer las cosas. Aseguran que el mejor enfoque de sistemas es la identificación de las áreas problemáticas y en especial en los lugares donde hay desperdicio, por ejemplo, costos elevados innecesariamente, para luego proceder a eliminar la ineficiencia. Como reacción a esta escuela surgió la de los humanistas, en la cual se destaca la importancia del ser humano, por encima de su eficiencia. Aquí el enfoque del sistema se centra en los valores humanos: libertad,

⁹¹ R.L. Ackoff: *Op. cit.* pg. 17-18.

⁹² Cfr. C.W. Churchman: *El enfoque de sistemas para la toma de decisiones*.

dignidad y privacidad. Pero sobre todo, sostienen que el enfoque de sistemas deberá evitar la imposición, por ejemplo, de planes de cualquier tipo de intervención. El tercer estilo, el de los científicos, no debe confundirse con la administración científica, que fue uno de los nombres con que se conoció la escuela basada en la eficiencia de la producción. Los científicos de la administración favorecen el empleo de la ciencia para llegar a un sistema construyendo un “modelo” que describa perfectamente su funcionamiento. Se utilizan la matemática, la economía o las ciencias del comportamiento humano (psicología, sociología...). Por su parte, los opositores aseguran que no es posible una teoría de la administración; que gran parte de este proceso se da sobre la marcha. El administrador debe estar en capacidad de adaptarse a los cambios y tomar las decisiones que considere las más acertadas utilizando la astucia y la experiencia. Según ellos, cualquier intento de establecer planes específicos y racionales es ingenuo y peligroso. El verdadero “enfoque” del sistema es vivir el sistema, reaccionar en términos de la experiencia de una persona y no tratar de modificarlos mediante un esquema grandioso o un modelo matemático. Casi podríamos hacer una comparación con los estilos de investigación a los que hicimos referencia en el numeral 4.0.

En lo que sigue nos centraremos en la visión del enfoque de sistemas científico. En esta visión, contraria a la de la teoría clásica que considera a las organizaciones como sistemas cerrados, el sistema es abierto.

Para que un sistema cumpla con su plan, Churchman asegura que en la aplicación del enfoque de sistemas se deben incluir, como un componente, las actividades que determinan el objetivo general y la justificación de cada uno de los subsistemas, además de ciertas *medidas de actuación* (que miden la capacidad de los subsistemas para llevar a cabo una función dada), y los estándares en términos del objetivo general. De esta manera, el conjunto completo de subsistemas y sus planes, y sus medidas de actuación constituirán un *enfoque de sistemas* del problema a resolver. El objetivo general prevalece de tal forma que los demás elementos del sistema deben obrar conforme a él, y los grados de actividad de los subsistemas son considerados a través de las medidas de actuación en cada caso.

Un subsistema inherente a todo sistema administrativo es el *subsistema administración*. Es el subsistema que considera el plan

general. Éste puede llevar un monitoreo y un control continuo sin esperar que se presente la crisis. Cada paso del plan se justifica en términos del objetivo general, lo cual no implica que el proceso sea rígido y cerrado. Poseer un objetivo (u objetivos) definido e interrelaciones claras entre los subsistemas y este objetivo, permite tomar decisiones sobre la marcha en forma acertada.

Por lo anterior, Churchman considera cinco características básicas que debe tener un científico cuando razona acerca del significado de un sistema. Se enumeran a continuación, pero aclaremos que no están en un orden predeterminado. De alguna manera, ellas operan simultánea, “sistémicamente”.

1. La definición de los objetivos del sistema, considerado como un todo, y específicamente, sus mediadas de actuación.
2. El ambiente del sistema y las restricciones fijadas.
3. Los recursos del sistema.
4. Los subsistemas o componentes del sistema, sus actividades, metas y medidas de actuación.
5. La administración del sistema.

4.1.1 Los objetivos del sistema. Un hecho que debe tenerse en cuenta es saber que no es fácil hallar los verdaderos objetivos del sistema. A menudo existen declaraciones sobre los fines de una organización, pero en el fondo tales fines no son los verdaderamente considerados. En muchas empresas y dependencias gubernamentales, tales declaraciones, generalmente vagas, son llamadas *objetivos*. Pero para el científico éstas son obviamente imprecisas y, por lo tanto, engañosas. La prueba de fuego para conocer si una declaración dada es uno de los objetivos del sistema consiste en conocer si el sistema, con pleno conocimiento, tiene la determinación de sacrificar otras metas para poder lograr ese objetivo. Cuando una entidad declara que su objetivo es la protección de sus afiliados, pero no está dispuesta a invertir más dinero en su bienestar social porque disminuiría su margen de utilidades, queda claro que el objetivo económico prima sobre el de bienestar. Churchman ejemplifica:

Un error común al señalar objetivos es el recalcar lo que es obvio. Por ejemplo, considérese un laboratorio médico en donde se examinan las muestras que los doctores les envían. ¿Cuál es el objetivo del laboratorio? Una respuesta obvia es que el objetivo es hacer un examen lo más exacto posible. Pero el verdadero objetivo no es la “exactitud”, sino para qué sirve la exactitud: mejorar el diagnóstico del doctor. Una vez que vemos hacia adelante el resultado concreto y deseado, dice el científico, entonces podremos preguntarnos a nosotros mismos cuán importante es realmente el objetivo. En algunos casos, mejorar la exactitud puede superar el costo de su obtención, o sea, el sacrificio de otros objetivos.⁹³

4.1.2 Medidas de actuación. Para ser precisos en la definición de los objetivos es necesario dar una *medida de actuación* del sistema. Churchman ilustra esta idea diciendo –a propósito de un cuidadoso estudio de colegios y universidades– que no es una sorpresa encontrar que la verdadera medida de actuación no está en función de la educación sino en función del número de estudiantes que se gradúan.

La búsqueda de medidas de actuación, coherentes y precisas, es una valiosa herramienta para identificar el objetivo u objetivos del sistema. Como veremos más adelante, esto es válido también cuando consideremos los subsistemas y sus actuaciones.

4.1.3 Ambiente del sistema. Todo sistema forma parte de un sistema mayor. Por lo tanto, hay algo que lo “envuelve”. A este suprasistema (o sistema ampliado) se le conoce con el nombre de *ambiente del sistema*. La separación entre ambiente y sistema se logra indicando qué elementos están “fuera” del sistema que no son alterados por cambios en los elementos de éste. El ambiente integra las cosas y personas que en cierta forma no son afectadas desde la perspectiva del sistema. Uno podría preguntarse, por ejemplo, si el presupuesto de un sistema forma parte del mismo o del ambiente. Si dicho presupuesto no puede modificarse mediante alguna actividad del sistema, entonces el presupuesto es una restricción impuesta por el ambiente. Pero, por otra parte, si alguno de los elementos del sistema pudiera influir en el presupuesto, entonces algo del proceso presupuestal (podría ser todo) pertenecería al sistema.

⁹³ C.W. Churchman. *Op. cit.* Pg. 49.

El ambiente no es sólo algo que está fuera del control del sistema sino algo que determina su operación. Lo anterior se ve claramente en los mecanismos de control, por ejemplo, en el termostato. Éste debe adaptarse a los cambios de temperatura del exterior. El sistema “termostato” está condicionado por los cambios de temperatura del ambiente y no puede hacer nada para modificar o controlar tales cambios.

Insistamos. La prueba clave para decidir si algún elemento es parte del sistema o del ambiente es la siguiente: si cambios en un elemento afectan a otros elementos, pero cambios en éstos no afectan al primero, entonces este primer elemento forma parte del ambiente; de lo contrario es parte del sistema.

4.1.4 Los recursos del sistema. Son los medios que forman parte del sistema y de los que él dispone para llevar a cabo sus procesos. Pueden ser modificados por el sistema en su propio provecho. Se miden generalmente en dinero, horas-hombre, equipo, capacidad de trabajo, etc.

Debe hacerse un balance muy cuidadoso de los recursos. No es una simple enumeración que se convierte rápidamente en historia pasada, ya que puede transcurrir un tiempo prudencial entre el estudio y el conocimiento del sistema. Además, tales listas de recursos no consideran situaciones tan importantes como la disponibilidad de personal en términos de la educación y capacidades individuales. Tampoco hay una historia de las experiencias pasadas. No debe desdeñarse la importancia del error y las equivocaciones –verdaderas lecciones sobre oportunidades perdidas– las causas de los fracasos, la deficiencia en el uso de los recursos. Es necesario construir un sistema de información con un enfoque administrativo en donde asuntos como los relacionados, sean tenidos en cuenta.

También son recursos los desarrollos tecnológicos. No se trata de conocer bien lo que se tiene, sino la forma en que estos recursos puedan aumentarse o modificarse con el fin de utilizarlos para crear mejores recursos en el futuro, bien sea mediante la investigación y desarrollo de equipos o tecnologías, o mediante el entrenamiento y la educación del personal.

4.1.5 Los subsistemas. Son las partes o elementos que llevan a cabo las acciones necesarias para alcanzar los objetivos del sistema como un todo; para ello se valen de los recursos del mismo.

Los componentes deben estar íntimamente relacionados con el sistema. Se dice que en la teoría de sistemas, es el sistema el que define las partes y no éstas al todo. El enfoque tradicional nos enseñó que el todo está determinado y explicado por las partes. Sin embargo, en los sistemas organizacionales esta visión lleva inevitablemente a consideraciones equivocadas de muchos de los aspectos administrativos. Desde esta perspectiva, los componentes de un sistema organizacional no son los que la división funcional, tradicional designa como tales. En el caso de las empresas industriales, por ejemplo, son típicos los departamentos de producción y de mercadeo. No obstante, el proceso de distribución no es función sólo del departamento de mercadeo. En general, la función de distribución en las empresas debe concebirse como parte del componente de producción, ya que es casi imposible imaginarse cómo pudiera ocurrir la distribución del producto de modo independiente de la forma como se fabrica. También suele ocurrir que muchos departamentos de producción hacen contactos directos con algunos clientes para satisfacer sus pedidos. Es por esto que el administrador científico piensa en función de *misiones*, *tareas* o *actividades básicas*, tomándolos como los elementos racionales de las labores que el sistema debe realizar. Esta identificación por misiones permite definir los componentes del sistema. Obviamente, las reacciones no tardan en hacerse sentir. Como explica Churchman:

Puede ser que la matemática y la filosofía sean ampliamente estudiadas y practicadas en todos los campos del aprendizaje, pero *los* departamentos de matemáticas y filosofía definen lo que éstas *realmente* significan, o sea, lo que en realidad son para el verdadero matemático y filósofo.⁹⁴

Para el administrador científico es muy importante hacer de lado las ambiciones políticas y personales que influyen en la delimitación de tal o cual función. Esto obliga a proponer funciones más generales e

⁹⁴ C.W Churchman, *Op. cit.* Pg. 59.

identificables con las medidas de actuación que permitan conservar la integridad del sistema.

La identificación de las funciones más generales (o misiones) permite con mayor facilidad asignar un peso a la actividad en relación con los objetivos del sistema como un todo. Cuando las funciones quedan relegadas a las partes tradicionales (en nuestro ejemplo, los departamentos), no es fácil distinguir cuánto de cada una de ellas es responsabilidad en la tarea total. Se debe disponer de medidas de actuación que permitan evaluar las responsabilidades de cada actor en la consecución del objetivo (u objetivos) global.

Hemos insistido en que debemos mirar el sistema como un todo. ¿Por qué, entonces, la persistencia en definir los subsistemas? La verdad es que no disponemos de herramientas para la comprensión global de los sistemas. Tal vez sea un asunto de nuestra capacidad de comprensión que nos fuerza a mirar todos y partes sin poderlos desligar. Se hace necesario disponer de elementos “individuales” a partir de los cuales obtengamos suficiente información para poder saber si el sistema está actuando en forma correcta. Esta subdivisión se ha hecho tradicionalmente sin tener al sistema como referente, sino bajo la consideración de aspectos económicos o políticos, o generados por la división tradicional del trabajo. Churchman analiza de la siguiente manera los asuntos de gobierno:

[...] Desafortunadamente hasta la fecha, en la mayoría de los gobiernos municipales y estatales no existe un análisis adecuado de sistemas del sistema total, en términos de componentes reales; por razones tradicionales, los gobiernos municipales y estatales están divididos en departamentos y divisiones que no tienen relevancia con los verdaderos componentes del sistema. Como consecuencia, dice el científico, la administración de nuestros grandes sistemas de gobierno estatales y municipales, se hace cada año más difícil. Debido a que la toma de decisiones que gobierna las diferentes misiones no está centralizada, las verdaderas misiones del estado, por ejemplo, en términos de salud, educación, recreación, saneamiento, etc. no podrán llevarse a cabo debido a que no tienen administración. Uno de los peligros más graves del diseño de componentes es la rigidez que se ha presentado tan a la medida en el diseño político de las ciudades y estados. La asignación de responsabilidades se fija por ley y resulta imposible quebrantarla. Lo que

ocurre es un tipo de endurecimiento de las arterias de la comunicación, y la enfermedad que invade es bastante conocida por los administradores. Aún los planes más obvios para las diversas misiones de la ciudad y estado no pueden llevarse a cabo, simplemente porque no existe ningún camino para destruir la rigidez del sistema que se ha formado por razones políticas.⁹⁵

El análisis de los componentes debe indicarnos en cuáles de ellos las medidas de actuación están relacionadas verdaderamente con la medida de actuación del sistema total. El problema de medir la actuación de un subsistema no es fácil de resolver. Hay dificultades no sólo al nivel de la medición como tal sino en la fase que le antecede, en la de decidir cuál es esa medida de actuación, y es aquí en donde se generan conflictos en los objetivos buscados. Si un departamento de una universidad tiene como objetivo primordial buscar la excelencia académica, esto puede reñir con la política presupuestal puesto que dicha excelencia implica mayor inversión en profesores, equipos y áreas de trabajo. Y la pugna sería mayor si el objetivo real fuera el de graduar más estudiantes. Existiría un conflicto entre el departamento, la división financiera y la misma universidad.

Una regla que sirve para resolver estas dificultades es la siguiente. Si al aumentar el valor de la medida de actuación escogida –suponiendo que todas las demás cosas permanecen iguales– se observa o se deduce que la medida de actuación del sistema total aumenta, entonces la elección es correcta y el subsistema estará contribuyendo verdaderamente a la actuación del sistema. De lo contrario, será necesario revisar el subsistema y su comportamiento, así como la medida escogida.

4.1.6 La administración del sistema. La coordinación de lo anterior, es decir, la búsqueda de un equilibrio entre las actividades de los subsistemas y los resultados globales, es lo que se relaciona con la administración del sistema. El subsistema administrativo tiene como funciones la planificación, comunicación, organización y control de los elementos del sistema que administra. Todas estas funciones tienen

⁹⁵ C.W. Churchman, *Op. cit.* Pg. 61.

como finalidad que las partes trabajen coordinadamente para que el todo logre sus objetivos reales. La administración debe establecer las metas de los subsistemas, asignar los recursos y controlar la actuación del sistema.

Surge ahora una pregunta importante. Si el administrador científico llega a un conocimiento tan profundo del sistema que estudia ¿debe ser él quien lo administre? El científico, tarde o temprano, se verá involucrado en los aspectos administrativos del sistema, particularmente en los políticos. Tendrá que “negociar” para beneficio del sistema. De alguna forma entrará a formar parte de él. Esta consideración tiene el mismo carácter de imposibilidad que tiene la objetividad en el estudio y tratamiento de los problemas sistémicos. Las metodologías de sistemas que estén relacionadas con los sistemas de la actividad humana deben tener maneras de afrontar este hecho.

4.2 A guisa de ejemplo. Consideremos una organización que de alguna manera nos es familiar: una universidad. Intentemos reflejar las ideas expuestas para definirla y tratarla como un sistema. Durante este ejercicio es muy importante tener presente una institución en particular, no el concepto general de universidad.

Si un arquitecto quisiera realizar algún trabajo para el que fue llamado, podría considerar que la universidad, como sistema, está definida por lo que se conoce como el “campus universitario”. Aún en el evento de que poseyera sedes en otros lugares alejados, la delimitación sería clara. El ambiente del sistema, en principio, sería todo aquello que, arquitectónicamente, no está en el interior del campus. La definición del sistema y su ambiente es, aparentemente, muy sencilla de identificar.

Para definir los subsistemas sería necesario conocer para qué tipo de trabajo fue contratado nuestro arquitecto. Si se trata de la refacción de los edificios existentes con el fin de mejorar su apariencia y mantener el estilo de construcción original, los subsistemas son inmediatos: edificaciones, parques y senderos existentes. El objetivo del sistema es claro y es fácil la identificación de sus componentes.

Como recursos podemos identificar las condiciones exigidas por el estilo arquitectónico, el presupuesto disponible, los obreros y sus conocimientos para este tipo de trabajo, el tiempo que se haya fijado para la entrega del proyecto terminado, etc.

La medida de actuación del sistema como un todo es la exactitud con que la obra final se asemeje a las construcciones originales. Para cada subsistema se puede establecer una medida de actuación similar.

El subsistema administrativo tendrá un subsistema que dependerá del arquitecto y otro de la dirección de la universidad. Ambos deberán estar coordinados para que las fechas, presupuestos y estilos se cumplan a cabalidad.

Como puede verse, en este caso podemos decir que el sistema es "duro": objetivos fácilmente identificables, toma de decisiones bajo certidumbre y estructura del sistema claramente delimitable.

¿Cuál sería la situación si al arquitecto se le solicitara modificar la universidad existente con el fin de adaptarla a los tiempos modernos?

La primera gran dificultad ahora es definir con exactitud cuál es el objetivo (u objetivos) de esta nueva universidad. Se dice que este tipo de instituciones debe desarrollar investigación, formar profesionales (docencia) y generar extensión (o servicio a la comunidad). ¿Será la investigación el objetivo primordial? O a pesar de las declaraciones oficiales, ¿quizás lo más importante sea establecer vínculos con la comunidad a través de las asesorías y del servicio social? ¿Y si lo que se busca sea tal vez la graduación de un gran número de profesionales que puedan ocupar puestos destacados con el fin de que la universidad logre una buena posición en la comunidad?

No queda duda de que cualquier institución universitaria tiene de alguna manera estos tres objetivos. Pero ¿será alguno de ellos más importante que los otros dos? La aclaración de este punto es de vital importancia si se desea que las nuevas edificaciones cumplan su verdadera función. También debe ser evidente que la definición del ambiente dependerá del objetivo primordial. Situación igual se presentará al tratar de definir los componentes (subsistemas) del sistema, los recursos y el subsistema administrativo.

En los capítulos que siguen indicaremos algunas metodologías con el fin de ilustrar la manera cómo los conceptos de sistemas han sido considerados y llevados a la práctica por los diferentes investigadores de los sistemas. La escogencia tanto de las metodologías como del número es, en cierta forma, arbitraria. No se trata de privilegiar ninguna de ellas. Simplemente se ha buscado cubrir diferentes formas de aplicar los conceptos de sistemas.

4.3 El proyecto metodológico. Es importante establecer una distinción entre el desarrollo del estudio de sistemas como *ciencia de los sistemas* –es decir– como el establecimiento de sistemas formales con profundos arraigos teóricos, y la *aplicación del pensamiento de sistemas* que corresponde al campo de las metodologías.

Jackson y Keys⁹⁶ han propuesto un esquema general para analizar la evolución del pensamiento sistémico y que han denominado *sistema de metodologías sistémicas* (*System of Systems Methodologies: SOSM*), ilustrado en la figura 4.2.

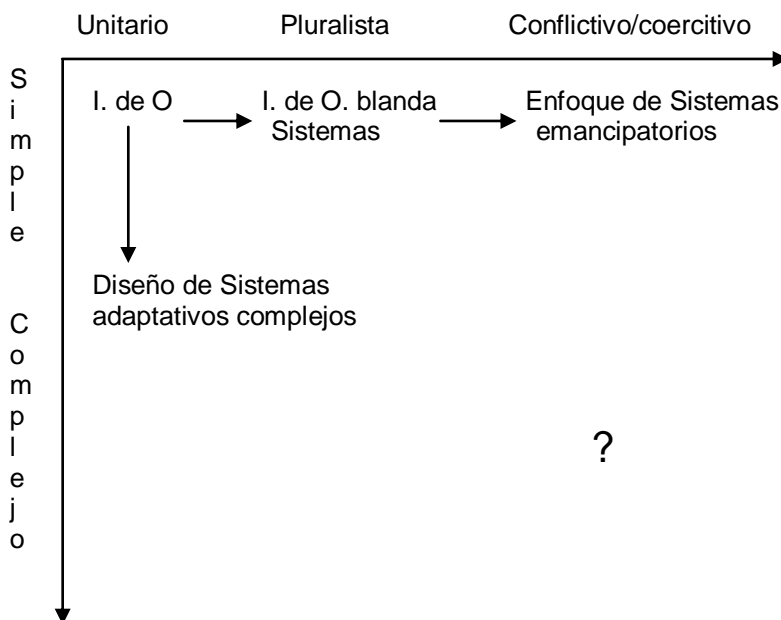


Fig. 4.2

Éste consta de dos ejes. El eje horizontal está relacionado con las divergencias entre objetivos, valores e intereses de los individuos de un sistema cualquiera. Su rango va desde los sistemas que tienen objetivos claramente definidos y en los cuáles no existe ningún conflicto de intereses entre quienes están relacionados con la situación problemática

⁹⁶ Cfr. M. C. Jackson and P. Keys: *Toward a System of Systems Methodologies*. p. 473.

a analizar, hasta aquellos en los cuales los conflictos y luchas de poder son dominantes. El eje vertical está relacionado con la complejidad de los sistemas. El rango va desde los sistemas más sencillos (pequeño número de elementos, interacciones claramente identificables, decisiones cuyos efectos son predecibles, es decir, sistemas duros), hasta los más complejos. La figura 4.2 nos da una idea de este *sistema de sistemas*.

Con este esquema, la Investigación de Operaciones (I. de O.) –aquellas técnicas matemáticas utilizadas para la optimización de procesos en la Industria– tiene su origen y ha sido exitosa en los sistemas “duros”, en los cuales el acuerdo y definición de los objetivos no tienen dudas. Más aún, estas metodologías presumen, en la mayoría de los casos, un objetivo único. Esto lo veremos cuando estudiemos la metodología de Jenkins (Cap. 5, numeral 5.2). Sin embargo, a medida que los sistemas estudiados fueron más complejos, se necesitaron nuevas herramientas. La dinámica de sistemas, (de la cual hablaremos en el capítulo 5, numeral 5.3), la cibernética organizacional y la teoría de los sistemas vivos son ejemplos de tendencias hacia estos nuevos campos, los cuales han pasado de una propuesta que puede enmarcarse como positivista (es decir, reduccionista y mecanicista) a una propuesta enmarcada en los movimientos estructuralistas de enfoque más holístico. Un paso más allá es el de la teoría de la complejidad que busca una explicación general de los sistemas adaptativos.

En lo que respecta al eje horizontal, ya indicamos que la I. de O. parte de la base de la no existencia de conflictos desde el punto de vista de valores e intereses (o, por lo menos, se aceptan acuerdos sobre estos temas que son debidamente respetados). A medida que el grado de acuerdo empieza a desaparecer se hace necesario modificar las metodologías. Surge entonces la I. de O. “blanda” que tiene en consideración los conflictos. Una primera aproximación a ellos es la programación de metas, que logra la consideración simultánea de objetivos en conflicto. Aquí se propone una *única* función objetivo que incluye las discrepancias entre las metas; la idea es minimizar tales discrepancias. También se incluye en esta parte las denominadas metodologías de sistemas blandos (administración interactiva (Warfield), planeación interactiva (Ackoff), diseño de sistemas sociales y la

Metodología de Sistemas Blandos (Checkland)). De todas maneras, ellas también buscan ese único objetivo que resuma a los demás. Checkland trata de evitar esto proponiendo *diversos puntos de vista* del sistema (lo que quedará más claro en el capítulo 5, numeral 5.4). Estas nuevas tendencias buscan un enfoque *interpretativo*. Ya no se trata de buscar un modelo que pueda repetidamente ser utilizado. Para el caso de sistemas en los cuales los conflictos de intereses son realmente determinantes, la tendencia deriva hacia un *enfoque emancipatorio* de los sistemas. El campo está aún en proceso de desarrollo y es poco lo que podemos decir al respecto.

CAPÍTULO 5

ALGUNAS METODOLOGÍAS

5.0 Introducción. En lo que hemos hablado con respecto a los fundamentos teóricos –marco conceptual– de los sistemas, es claro que la ciencia que puede aportar las mejores bases es la sociología. Burrell y Morgan⁹⁷ dicen que existen cuatro tipos de teorías sociológicas útiles para enmarcar los diferentes movimientos sistémicos:

1. Lo enfoques *funcionalistas*.
2. Los enfoques *interpretativos*.
3. Los enfoques *emancipatorios*.
4. Los enfoques *postmodernos*.

Dentro del tratamiento funcionalista de los sistemas, es decir, aquellos que directa o indirectamente tratan de seguir la senda de la ciencia tradicional, se pueden citar:

- Las teorías basadas en el *movimiento organicista* (la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy, el pensamiento de sistemas de Barnard, la teoría de la contingencia, la teoría de los sistemas socio-técnicos).
- Las teorías basadas en los *sistemas duros* (Investigación de Operaciones, Análisis de Sistemas, Ingeniería de Sistemas).
- La *dinámica de sistemas*. (La teoría y metodología de J.W. Forrester, *La quinta disciplina* de P. Senge).
- La *cibernética organizacional*. (El sistema viable de S. Beer).
- La *teoría de los sistemas vivos*.
- La teoría de la *autopoiesis*.
- La *teoría de la complejidad*.

El *enfoque interpretativo* –o enfoque de los sistemas suaves– privilegia la percepción, los valores, las creencias y los intereses por encima de los aspectos tecnológicos; acepta la multiplicidad de puntos

⁹⁷ Cfr. M. C. Jackson: *Systems Approaches to Management*. Pg. 41.

de vista; busca *acomodaciones* entre ellos con el fin de favorecer el sistema. El subjetivismo es aceptado como parte del proceso, y esto constituye otra diferencia fundamental con el funcionalismo, que exige la objetividad como base del conocimiento científico. El enfoque interpretativo no busca hallar la “verdad” sobre los sistemas, sino más bien una “explicación” de las diferentes cosmovisiones. Los sistemas de su interés tienen propósitos en lugar de metas regidas por leyes externas, fuera del control del sistema.

Aquí podemos incluir:

- La administración interactiva de Warfield.
- El diseño de sistemas sociales, de Churchman.
- La teoría de Mason y Mitroff (Metodología SAST)⁹⁸.
- Las ciencias sociales de Ackoff (S³). La planificación interactiva.
- La metodología de sistemas blandos de Checkland. (SSM)⁹⁹.
- La teoría de sistemas blandos de Senge (La quinta disciplina).
- La Investigación de Operaciones, la dinámica de sistemas y la cibernética de sistemas blandos.

El *enfoque emancipatorio de los sistemas* puede considerarse como un movimiento de cambio social. Busca emancipar a las clases sociales oprimidas –dominadas, discriminadas– creando un nuevo orden social en el cual los opresores también pueden tener algunos beneficios. El proceso es de “desenmascaramiento” de los principios y valores que hacen que el oprimido acepte en cierta forma su situación. La posibilidad del cambio se basa en las contradicciones ideológicas y de poder que se hacen presentes para mantener el status del sistema.

Este movimiento social tiene visiones de un mundo mejor basado en las sociedades sin clases, en el cual exista una armonía entre los seres humanos y la naturaleza, y en donde las personas sean libres de determinar su futuro sin que sea influido o forzado por el poder de turno. Podríamos estar pensando en un movimiento tipo marxista. En este sentido, Jackson hace notar que existen en efecto, dos corrientes. La línea Kant, Hegel, Marx, Habermas; la emancipación vendría de un

⁹⁸ “Strategic Assumption Surfacing and Testing”.

⁹⁹ “Soft Systems Methodology”.

movimiento colectivo, social. La otra: Kant, Nietzsche, Heidegger, Foucault, busca la auto-emancipación, es decir, la emancipación del individuo. De estas líneas podemos citar:

- *Las teorías emancipatorias como liberación.* (Las vertientes críticas de la I. de O. y la ciencia de la administración, la propuesta de Habermas, la sistemología interpretativa¹⁰⁰, la pedagogía crítica de Freire, MacIntyre y la comunidad moral, la sostenibilidad ecológica de Capra).
- *Las teorías emancipatorias a través del uso de la racionalidad discursiva.* (El grupo de *sintegridad* de Beer, la crítica de la heurística de los sistemas de Ulrich, la teoría y la práctica de la crítica de frontera¹⁰¹).
- *Las teorías emancipatorias a través del uso indirecto de métodos sistémicos.*

El cuarto tipo de movimiento sociológico es el denominado *postmoderno*. Aquí también se busca que las voces marginales sean escuchadas. El mundo es un complejo de patrones que cambian continuamente debido a la vida misma... Cambio y novedad, orden y desorden... En lugar de buscar un sistema ideal como el movimiento emancipatorio, aquí se busca promover la novedad y el desorden. Podríamos decir que es una visión afín con la teoría del caos, vista anteriormente. Pero para algunos autores, no es la búsqueda de un patrón que rija el aparente desorden el que interesa. Es el desorden mismo. Para ser auténticos debemos enfrentarnos al hecho de nuestra propia existencia y hacer de ella lo que queramos. La existencia precede a la esencia.

Con esta perspectiva no es posible generar teorías sistémicas que puedan aplicarse a situaciones reales con un enfoque postmoderno. Recordemos que la sociología es más afecta al desarrollo teórico que a la práctica. Podríamos sin embargo, hacer un intento de conciliar algunos puntos de vista de ambas tendencias. Una idea es utilizar

¹⁰⁰ R. Fuenmayor, H. López-Garay *et. al.*

¹⁰¹ Se refiere al estudio y discusión de los sistemas sin considerar el sistema a fondo, lo cual impide a muchas personas no expertas expresar sus puntos de vista. Se considera entonces la frontera, en la cual todos somos, de alguna manera, ignorantes.

diferentes modelos, métodos y técnicas pero con un espíritu postmoderno. La otra es utilizar algunos métodos y herramientas que este último puede facilitar al practicante de los sistemas.

En este capítulo presentaremos ciertas metodologías únicamente con el ánimo de ilustrar el tema. Nuestra elección busca sólo mostrar algunas de las diferentes tendencias indicadas. No se trata, claro está, de “las 10 mejores”. Simplemente el autor las conoce más que otras y han demostrado ser muy útiles en diversas aplicaciones.

La primera es una técnica enmarcada en los procesos metodológicos de la Investigación de Operaciones. La segunda es la de G.M. Jenkins, muy enraizada con la I. de O. pero en la cual el factor humano empieza a ser tenido en cuenta. Se presenta luego la metodología de J.W. Forrester, nacida del enfoque cibernético y que, durante varias décadas, ha sido ampliamente utilizada en la descripción y estudio de diversos campos. Finalmente cerramos con la metodología de P.B. Checkland, un paso más en la búsqueda de modelos que permiten comprender y administrar sistemas complejos de la actividad humana.

Sobra advertir que si el lector desea utilizar alguna de estas metodologías, es imprescindible la consulta y estudio de las obras originales. Aquí sólo queremos llamar la atención sobre su existencia e importancia, resaltando sus características principales e indicando las consideraciones que sobre las metodologías hicimos en el capítulo anterior.

5.1 La programación lineal. La Investigación de Operaciones es el nombre genérico con el cual se conocen diferentes técnicas cuya finalidad es obtener el valor (o valores) que hacen óptimo (máximo o mínimo) un proceso generalmente sometido a restricciones. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la programación lineal, la programación no lineal, la teoría de inventarios, la programación dinámica, la teoría de colas y la teoría de juegos. Se acostumbra incluir también, la simulación de sistemas. Para mostrar la forma en la que se acostumbra analizar los problemas bajo esta perspectiva, tomaremos la herramienta correspondiente a la programación lineal¹⁰².

¹⁰² Existen muchos y muy buenos libros sobre este asunto. Autores como Dantzig, Hadley deben ser consultados.

La característica básica de esta herramienta es el hecho de que existe una función representada matemáticamente mediante una ecuación lineal. Entendemos por función lineal aquella en la cual las variables sólo están elevadas a la potencia uno, y no existen productos o divisiones de las mismas. Geométricamente, estamos hablando de ecuaciones que se representan en forma de rectas, planos e hiperplanos (planos más allá de la tercera dimensión). A esta función, que se le conoce con el nombre de *función objetivo*, se le desea hallar un valor máximo o mínimo según sea el caso.

Los valores que adquiera la función objetivo están sometidos a restricciones. No pueden moverse libremente. Estas restricciones se representan por ecuaciones lineales. Veamos un ejemplo elemental¹⁰³.

Sea una empresa muy sencilla en la cual existen dos departamentos que llamaremos A y B. Cada uno de ellos produce un artículo diferente y ambos utilizan el mismo taller para procesarlo.



fig. 5.1

El beneficio por la venta de cada bien producido por A es de \$190, mientras que el beneficio producido por B genera \$150. Se desea conocer la producción que maximice el beneficio total. El lector podría tratar, antes de continuar con la lectura, proponer una solución.

En el taller, el departamento A tarda 5 horas en el procesamiento de un artículo, consumiendo 4 metros cuadrados de materia prima; por su parte, el departamento B tarda 2 horas y utiliza 5 metros cuadrados. El total de horas de trabajo por semana es de 40 y se dispone de 40 m² de materia prima por semana.

El jefe del departamento A hace el siguiente análisis: el máximo número de productos que se puede producir es 8, ya que con ellos se consume el total de las horas disponibles (8 unidades \times 5 hs/unidad = 40 horas) y quedan sin utilizar $40 - 8 \times 4 = 8$ m² de materia prima. No hay

¹⁰³ Tomado de C.A. Ossa: *Álgebra lineal. Programación lineal*. Pg. 2.

restricción en cuanto a las horas-hombre ya que se utilizan sólo 16 de las 40 disponibles cuando se producen las 8 unidades. El beneficio total de la producción es de \$1520. B puede producir también como máximo 8 artículos consumiendo el total de m^2 de materia prima disponibles ($8 \text{ unidades} \times 5 \text{ m}^2/\text{unidad}$) y quedan sin utilizar 24 horas-hombre ($40 - 8 \times 2$); el beneficio será por lo tanto de \$1200. En vista de que B genera menos ganancias, lo lógico sería que se eliminara el departamento B quedando sólo A, con una producción de 8 unidades/semana.

Con base en lo anterior, el jefe del departamento A decide llevar esta propuesta a la gerencia. ¿Será correcto su análisis? ¿Qué ocurriría si, por ejemplo, A produjera cinco artículos (tres menos del máximo que puede producir), y B produjera cuatro artículos (también por debajo de los ocho que como máximo puede fabricar)? En este caso el total de horas de taller utilizadas sería de 33 horas y los m^2 consumidos serían 40, lo cual está dentro de las condiciones del problema. El beneficio total, sin embargo, sería de $\$950 + \$600 = \$1550$, superior al hallado anteriormente. ¿Habría, acaso, otra mejor solución? En otros términos, ¿cuál será la producción óptima bajo las condiciones descritas?

Únicamente como ilustración indicaremos el modelo matemático que resuelve este problema.

$$\max. z = 190x_A + 150x_B$$

Sujeta a:

$$5 x_A + 2 x_B \leq 40 \text{ (total horas-hombre)}$$

$$4 x_A + 5 x_B \leq 40 \text{ (total metros cuadrados)}$$

$$x_A \geq 0$$

$$x_B \geq 0$$

en donde x_A y x_B son las cantidades a producir en cada departamento y cuyo valor que maximice a z desea encontrarse. Las últimas dos restricciones, $x_A \geq 0$, $x_B \geq 0$, indican que no se pueden producir cantidades negativas.

La solución que se obtiene utilizando la técnicas de la programación lineal es $x_A = 7.059$, $x_B = 2.353$ con una ganancia de 1694.16. Como vemos, el óptimo global no se obtiene a partir de los óptimos locales. De hecho este problema cae dentro de una de las definiciones que dimos

de sistemas complejos. No es posible predecir a corto o mediano plazo sólo con cálculo mental, el comportamiento real del sistema.

Los modelos que se resuelven con la programación lineal son de muchas variables y muchas restricciones. Nótese que no hay dudas en que existe un solo objetivo: maximizar los beneficios. Aún si existieran dificultades entre los jefes de cada departamento, la autoridad superior del sistema administrativo hará que los programas de producción óptimos sean cumplidos. A este tipo de situaciones es a la que nos referíamos cuando se explicó el marco de referencia del *sistema de metodologías de sistemas*.

5.2 La metodología de Jenkins. En 1969 G.M. Jenkins publicó un artículo¹⁰⁴ en el cual desarrolló una metodología que permitió el uso del enfoque de sistemas en las empresas de tipo hombre-máquina. Estas organizaciones son complejos en los cuales los hombres y las máquinas interactúan mediante un plan¹⁰⁵. Un enfoque fragmentado como ha sido el tradicional, no es conveniente debido a la creciente complejidad de las firmas y de los gobiernos locales y nacionales.

La entidad fundamental es el *sistema*. El aspecto a destacar, según Jenkins, es la *existencia de un plan mediante el cual los elementos se conectan formando un todo*.

Las plantas o empresas en general son un complejo formado por seres humanos y máquinas que forman un todo o sistema. Este complejo puede romperse en subsistemas. La forma en que esto se realice depende de la naturaleza del sistema a ser estudiado y del detalle que quiera lograrse. Los subsistemas pueden apreciarse gracias a los diagramas de flujo entre bloques, como el indicado en la figura 5.3. Los subsistemas se representan por bloques y los flujos por flechas. El flujo en este ejemplo es de materia y energía. En forma más general los flujos son de dinero, materiales, energía, información y decisiones.

Los subsistemas se pueden definir como el proceso que transforma ciertos flujos de entrada (dinero, materiales, energía, información o

¹⁰⁴ Cfr. G.M. Jenkins: *The Systems Approach*. Pg. 1.

¹⁰⁵ Se le conoce como la metodología de las 4 M: Men, Money, Machine, Materials.

decisiones) en salidas correspondientes. Son sistemas abiertos que pueden representarse como se indica en la figura 5.2.

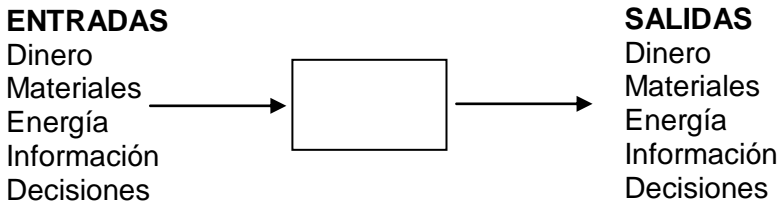


fig. 5.2

Estos subsistemas interactúan entre sí buscando que el sistema total cumpla su función de la mejor manera posible. Las salidas de un sistema son las entradas de otro y otros subsistemas, de la misma manera en que Lange define el acople de los elementos activos. La comprensión de tales relaciones es fundamental para entender bien el sistema. La figura 5.3 es una ilustración propuesta por Jenkins de un diagrama simplificado de una planta de acroleína que muestra al sistema definido por la interacción de varios subsistemas.

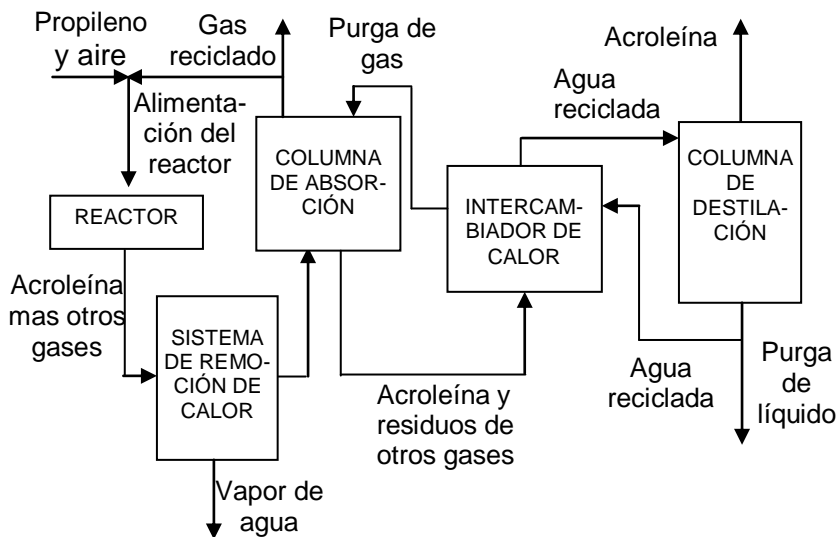


fig. 5.3

Los sistemas son *jerárquicos*. Hemos insistido en que todo sistema está compuesto de subsistemas, y que además él forma parte de otros mayores de los cuales hace parte como subsistema. El conocimiento de cómo un sistema está relacionado con el sistema (o sistemas) mayor que lo incluye, es también de fundamental importancia para analizar correctamente el sistema en estudio.

Los sistemas tienen *objetivos en conflicto*. Definir los objetivos correctos no es una tarea sencilla; sin embargo, es la clave para diseñar sistemas acertados. Que los diferentes objetivos a menudo están en contraposición, es un hecho diario que se presenta en las empresas. Por lo tanto, es necesario llegar a compromisos que permitan definir un objetivo como el distintivo del sistema. Esto se aclarará más adelante.

Por otra parte los sistemas deben ser *diseñados* de tal forma que alcancen el objetivo global que se ha trazado. Lograr que esto se cumpla es una labor compleja que incluye análisis, planeación y diseño con respecto a períodos largos de tiempo. El sistema debe ser pues, eficiente.

5.2.1 Fases de la metodología. El enfoque de sistemas en la solución de los problemas referentes a las empresas hombre-máquina, se puede resumir en las siguientes fases:

Análisis del sistema. El proceso se inicia, utilizando el sentido común, con un estudio de lo que está ocurriendo, por qué está ocurriendo y cómo podría hacerse mejor. Deberá entonces definirse el sistema y sus objetivos y recolectarse los datos referentes a las situaciones más probables.

Diseño del sistema (o síntesis). En primer lugar, el comportamiento futuro del ambiente (sistema mayor) deberá predecirse. Luego se elaborará un modelo, el cual debe simular o explicar, de acuerdo con las maneras diferentes en que pueda operarse el sistema, el “mejor” diseño, es decir, optimizar el sistema.

Realización. Los resultados del estudio del sistema deben ser presentados para su sanción e implementación. El sistema optimizado debe ser construido. El proyecto requerirá una planeación cuidadosa para garantizar que todos los beneficios del enfoque de sistemas sean logrados. Una vez construido el sistema, deberá revisarse su comportamiento, confiabilidad, etc.

Operación. El sistema debe ser operado por personas diferentes a quienes lo diseñaron originalmente. Por esta razón, se debe ser muy cuidadoso en evitar malas interpretaciones e ineficiencias en la operación del sistema. Según Jenkins, ésta es el área en la cual probablemente se hace menos énfasis en los proyectos. Posiblemente se deba “afinar” o reoptimizar el sistema para que opere en un ambiente que puede cambiar con respecto a aquel para el cual fue diseñado.

Esta metodología tiene algunas características importantes. En primer lugar está diseñada para grupos asesores, quienes deben resolver un problema específico que se les ha encomendado. También está referida a sistemas hombre-máquina; su utilidad es manifiesta cuando se aplica a problemas de carácter industrial y, a veces, organizacional. Finalmente, resume de una manera excelente el pensamiento de diversos autores en el área de la Investigación de Operaciones.

Vamos a describir en detalle las diferentes fases a las que hemos hecho referencia. Es necesario anotar que no se trata de una sucesión que tenga que seguirse ciegamente. Sólo son guías para el pensamiento que deben ser revisadas continuamente, volviendo atrás cada vez que se crea necesario.

5.2.2 Análisis del sistema. Esta fase incluye los pasos siguientes.

1. *Reconocimiento y formulación del problema.* Un hecho que siempre debe mantener presente quien se enfrenta a un problema es el relacionado con la definición del mismo. Casi como un postulado, se debe partir de la creencia en que el problema inicialmente propuesto no es en general, el verdadero problema. Y esto es cierto aún en el caso de situaciones que parecen ser de origen marcadamente técnico. Jenkins propone aquí las siguientes preguntas claves:

- a) ¿Cómo surgió el problema?
- b) ¿Quiénes son los que creen que la situación es un problema?
- c) Si es necesaria una decisión superior con respecto a un plan ¿cuál es la cadena de razonamiento que nos lleva a tomar la decisión?
- d) ¿Es realmente el verdadero problema? ¿No podría ser la manifestación de otro problema más profundo? ¿No se conseguirían mejores beneficios si se resuelve este problema en lugar del propuesto originalmente?

- e) Inevitablemente, los recursos a disposición de la empresa son limitados. Con la evidencia disponible hasta este momento ¿se cree que pueda haber una tasa de retorno favorable si se dedican los esfuerzos para resolver el problema, o sería mejor usarlos en otra situación?

Como resultado de este diálogo emergerá un cuadro más claro acerca de la amplitud del problema y de los beneficios probables que podrían resultar de su solución.

2. *Organización del proyecto del sistema.* Definida la amplitud del problema, es necesario programar la forma en la que debe ser enfrentado. Se deben especificar las técnicas que van a usarse, lo cual permitirá definir qué personas deberán formar parte del *grupo asesor*. Se deben aprovechar los mejores recursos de que disponga la empresa y si no están preparados para trabajar como grupo de sistema, será necesario llevar a cabo un programa de entrenamiento al respecto. Un grupo típico está compuesto por todas o algunas de las siguientes personas:

- a) Líder del grupo: idealmente un experto en enfoque de sistemas o, en su defecto, alguien brillante y con gran conocimiento del problema que va a ser estudiado.
- b) Usuarios: en el grupo es necesario que haya algún representante de la empresa que luego operará el sistema que va a diseñarse.
- c) Constructores de modelos: se encargarán de la elaboración del modelo y también ayudarán a estimular a aquellos departamentos especializados (investigación, desarrollo de procesos, ventas) que puedan proveer información para los modelos de los subsistemas.
- d) Diseñadores: si el sistema requiere la construcción de elementos (“hardware”) es necesario que el grupo tenga representantes en el grupo de ingeniería responsable de su diseño para que se ajusten a las especificaciones del sistema. Igual para los elementos de soporte (“software”) tales como programas, procesamiento de datos, etc.
- e) Programadores de computación y matemáticos: programarán los modelos del sistema y ayudarán con la optimización del diseño.
- f) Un economista o contabilista: suministrará información sobre el ambiente económico general del problema, con lo cual se podrá

definir el criterio económico global así como información de costos, la cual será útil para el modelo.

- g) Ingenieros de sistemas¹⁰⁶: contribuirán en mayor o menor grado en la construcción del modelo, en la programación, optimización, evaluación económica y demás actividades que se presentan durante la solución del mismo. En muchas situaciones ellos deberán hacer la mayor parte del trabajo. Pero fundamentalmente, su función es mantener una visión global del desarrollo del proyecto.

También es indispensable en esta fase indicar los *términos de referencia* bajo los cuales se va a llevar a cabo el proyecto. Será necesario asegurarse de tener las mayores garantías en cuanto al acceso a la información que sea requerida.

Finalmente se indicará un *programa (horario) del proyecto*. Aquí son de gran utilidad técnicas como la del PERT-CPM. Esto permitirá concentrar los esfuerzos en las áreas que realmente sean importantes.

3. *Definición del sistema*. Aquí se trata de un proceso de análisis en el cual el sistema debe romperse en los subsistemas más importantes, así como en las interrelaciones entre ellos, lo cual debe quedar indicado en un diagrama de flujo (esquema de bloques en donde cada uno es un subsistema y en donde las relaciones se indican por líneas que van de un bloque a otro).

Para evitar que la descripción del sistema sea muy compleja, es mejor empezar con una representación sencilla y luego, si fuera necesario, completarla con detalles. Esta descripción debe ser suficientemente flexible de tal manera que pueda cambiarse fácilmente a medida que nuevos conocimientos vayan apareciendo durante el desarrollo del proyecto.

4. *Definición del sistema ampliado*. Para definir los objetivos del sistema, es necesario indicar claramente el papel que juega el sistema en el sistema ampliado del cual forma parte. Es preciso elaborar un diagrama de flujo con el fin de indicar estos elementos. Invariablemente ocurre que las relaciones entre el sistema y el sistema ampliado no sean

¹⁰⁶ Jenkins se refiere aquí al tipo de Ingeniero de Sistemas de Lancaster, cuya formación es la de un Ingeniero con formación en teoría de sistemas.

claras para la mayoría al comienzo del proyecto. El diagrama de flujo del sistema ampliado nos permite aclarar estos aspectos.

5. *Definición de los objetivos del sistema ampliado.* Debido a que los sistemas son jerarquizados, los objetivos del sistema ampliado son cruciales pues ellos determinan las condiciones en las cuales el sistema debe funcionar. Si el ambiente cambia, también cambiarán los objetivos del sistema.

Es esencial definir los objetivos del sistema ampliado ya que los objetivos de los sistemas competitivos podrán ser formulados de tal manera que contribuyan efectivamente a los objetivos del sistema ampliado en lugar de estar apuntando en direcciones diferentes. De esta manera se puede garantizar la flexibilidad necesaria para que el sistema se adapte a los cambios del ambiente.

6. *Definición de los objetivos del sistema.* La parte culminante de cualquier definición de objetivos es la formulación del criterio, generalmente económico, que permita medir la eficiencia con la cual el sistema logrará su objetivo. Esto puede requerir un estudio cuidadoso. Sin embargo, en los comienzos es mejor definir los objetivos en términos amplios.

Aquí es importante hacer una lista de todos los objetivos posibles tratando de darles un orden de importancia. Como por razones de manipulación del modelo será necesario decidirse por un solo objetivo, habrá necesidad de hacer concesiones y compromisos.

7. *Definición del criterio económico general.* Una vez que los objetivos se han coordinado, el paso siguiente consiste en definir en los términos más precisos posibles un criterio que permita medir la eficiencia con la cual el sistema puede lograr su objetivo. Generalmente se trata de un criterio económico, como ya se indicó.

Los criterios generales deben estar relacionados con los objetivos; ser simples y directos, aceptados aún en el caso de que sean cualitativos.

Respecto a cómo manipular objetivos que estén en conflicto, existen técnicas tales como la programación de metas. Aquí se dan pesos a los diferentes objetivos y con ellos se plantea una sola función objetivo que busca minimizar sus discrepancias. Otra forma es la de decidirse por un objetivo que sea representativo de los criterios del sistema e incluir los objetivos restantes en forma de restricciones en el modelo.

8. *Recolección de información y datos.* La fase final y probablemente la más extensa en el análisis del sistema es la recolección de los datos y de la información que formarán las bases de cualquier modelado futuro del sistema. Si el sistema va a ser creado, entonces los datos se obtendrán de la investigación y desarrollo de sistemas similares en caso de que éstos existan. Los datos y la información son necesarios no sólo para dar indicaciones de cómo opera el sistema, sino para predecir el ambiente en el cual el sistema operará en el futuro.

5.2.3 Diseño del sistema (síntesis). Esta fase incluye los pasos siguientes.

1. *Predicción.* La predicción es el primer paso importante en el diseño de cualquier sistema. Predicciones exactas son esenciales para el diseño eficiente de un sistema. Si éstas son inexactas, no podrán ser compensadas por la sofisticación y la optimización del modelo que puedan hacerse posteriormente.

Las predicciones por sí solas no son de valor si no se tiene una idea de la exactitud; se debe asociar una función de riesgo en el diseño del sistema.

2. *Construcción del modelo y simulación.* Para computar los costos asociados con las diferentes formas en que puede funcionar el sistema, es necesario predecir su comportamiento con respecto a un amplio rango de condiciones de operación, lo cual puede lograrse a través de la construcción de un modelo. Éste debe ser elaborado teniendo en mente su posterior optimización. La Investigación de Operaciones (I. de O.) presta aquí un invaluable apoyo.

3. *Optimización.* Este paso está ligado al anterior. Los criterios ofrecidos por la I. de O. tienen cabida aquí. Es interesante ver que a menudo la optimización puede resultar en un proceso de suboptimización por lo que se debe estar atento a este hecho. De aquí la importancia de definir claramente los objetivos del sistema ampliado porque, de otra manera, el "óptimo" del sistema podrá estar en conflicto con el ambiente en el cual operará el sistema. No debemos confundir aquí otro concepto de suboptimización según el cual siempre se suboptimiza ya que "lo mejor" será una meta inalcanzable; el hecho de aceptar compromisos entre los diferentes objetivos nos impide lograr "lo mejor".

4. *Control*. El control es necesario debido a que las perturbaciones impredecibles que afectan a un sistema desvían el comportamiento actual de su comportamiento predicho.

El control debe ser considerado como parte integral del sistema y no como una idea tardía; debe ser general y no orientado hacia aspectos a menudo irrelevantes.

5. *Confiabilidad*. Un buen sistema de control debe fundamentarse para asegurar una buena confiabilidad. Sin embargo, la confiabilidad de los sistemas incluye otros aspectos diferentes al control ya que debe tener en cuenta los efectos globales de la incertidumbre en el diseño del sistema. La teoría estadística brinda una valiosa herramienta al respecto. Por otra parte, la experiencia con equipos y sistemas semejantes es a veces imprescindible.

5.2.4 Realización. Ningún estudio de sistemas, no importa qué tan bien llevado a cabo haya sido, puede considerarse útil si no es ejecutado. Indicaremos los pasos más importantes.

1. *Aprobación de documentos y sanción*. Los informes finales del proyecto deben ser redactados para llevar a cabo acciones concretas. Las fallas en la comunicación en esta importante fase pueden arruinar lo que de otra manera hubiera sido un buen estudio de sistemas. Para ello es recomendable discutir el contenido y la forma con los administradores y supervisores quienes serán responsables de llevar a cabo el proyecto. Los manuales de presentación de informes son obras de consulta obligada si se quiere tener éxito, y éxito significa aquí que el trabajo se lleve a cabo.

Esta es la fase más crítica para cualquier estudio de sistemas puesto que en este momento se debe tomar la decisión de continuar y construir el sistema. Obviamente, la decisión será favorable si la propuesta es clara y objetiva; exagerarla o, por el contrario, resaltar más los perjuicios que los beneficios son dos procedimientos seguros para que jamás la propuesta sea escuchada. La honestidad debe primar por encima de todo.

2. *Construcción*. A veces es necesario construir equipos y diseñar soporte (“hardware” y “software” del sistema). Debido a que en esta fase la mayor parte del equipo de trabajo ya se ha disuelto, es fundamental considerar la construcción como parte integrante del diseño del sistema.

Cada etapa del diseño, construcción e instalación de los equipos debe ser vigilada para evitar demoras que afecten los costos y la eficiencia del sistema diseñado.

5.2.5 Operación. Una vez que el sistema ha sido diseñado, construido e instalado en el ambiente de trabajo, será necesario tener en cuenta los siguientes pasos.

1. *Operación inicial del sistema.* Un lazo efectivo entre el equipo de sistemas y los usuarios es esencial para obtener los beneficios plenos del estudio realizado. En general, esta parte es mal ejecutada en la práctica. Para evitarlo es conveniente que de antemano se posea documentación y entrenamiento adecuado. También es importante incluir, en un grupo de sistemas, uno de los miembros encargados de la operación.

2. *Evaluación retrospectiva del proyecto.* Cuando el sistema ha sido operado por un tiempo suficientemente largo, el grupo de sistemas debe colaborar con los usuarios a fin de hacer una evaluación retrospectiva del funcionamiento del mismo. Si todo marcha bien, nada habrá que objetar. De lo contrario, será necesario tomar medidas que corrijan la situación anómala. Nada puede ser más dañino para el enfoque de sistemas que considerar terminado un trabajo cuando el sistema original ha sido completado.

Esta fase brinda una oportunidad magnífica para comprobar si las suposiciones económicas fueron acertadas, con lo que se puede mejorar el pensamiento de sistemas para futuros desarrollos.

5.3 La dinámica de sistemas de J.W. Forrester¹⁰⁷. Esta metodología representa una corriente sistémica que se sitúa entre las más “duras”, como la de Jenkins, y las más blandas, como la de Checkland.

El año 1946 se puede considerar como el inicio formal de la cibernética. Aunque de corte reduccionista, esta rama del conocimiento ha ampliado su enfoque mecanicista teniendo en cuenta algunos de los planteamientos elaborados por la teoría de sistemas.

El concepto básico de la cibernética es “el lazo de retroalimentación”: éste representa la influencia que puede ejercer un elemento de un

¹⁰⁷ Resumen extractado de C.A. Ossa O.: *Simulación básica*. Cap. 1.

sistema sobre sí mismo pero a través de su influencia en otros elementos. Esta teoría postula que los sistemas pueden describirse en términos de elementos que interactúan mediante acoples de partes en los que se hacen presentes los lazos de retroalimentación. La interacción se ilustra en un lenguaje pictórico conocido como *diagramas causales*. En ellos se establecen relaciones de tipo causal entre los diferentes elementos del sistema.

5.3.1 Causalidad. De una manera intuitiva, podemos comprender la causalidad como el origen o explicación de un hecho. Es el caso común en la física clásica.

Supongamos que un gas está confinado en un recipiente rígido. Debido a su confinamiento, el gas ejerce una presión P sobre las paredes del recipiente. Si lo calentamos *sin permitir que aumente su volumen* la presión sobre las paredes del recipiente aumentará debido a que la energía de las moléculas del gas aumenta. Por lo tanto, a mayor temperatura T , mayor presión (permaneciendo el volumen constante). Podríamos indicar gráficamente lo anterior mediante el diagrama causal ilustrado en la figura 5.4.



fig. 5.4

El arco dirigido muestra el sentido de la causalidad. Esta observación se escribe matemáticamente:

$$P \propto T \quad (V-1)$$

en donde P es la presión del gas que se encuentra a una temperatura T . El símbolo “ \propto ” significa: “directamente proporcional a”.

Consideremos otro caso. Comer en exceso causa aumento de peso. En este caso podría pensarse que alguna ley biológica pudiera explicar esta relación. Sin embargo, ella es más bien fruto de la experiencia, puesto que hay personas que aparentemente comen mucho y sin embargo parecen no engordar. De todas formas, también utilizaremos una flecha que una a ambas situaciones:

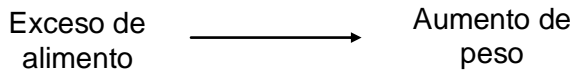


fig. 5.5

Pero ¿el aumento de peso implica un aumento en el consumo de alimentos? La afirmación o negación de esta proposición requiere un análisis más cuidadoso. Con el fin de facilitar el análisis de los diagramas causales, la flecha puede indicar:

- Una causalidad directa, como en el caso de la presión y la temperatura en un gas.
- Una influencia o perturbación, como en el caso de los alimentos.

La “causalidad” en nuestro caso se basa en leyes naturales, en experiencia empírica o en datos estadísticos. Es necesario tener en cuenta estos factores cuando se realizan modelos causales.

Es muy útil, cuando se analiza la influencia de una situación sobre otra, efectuar un experimento mental (o real si es posible e indispensable) en el cual nos preguntamos lo que ocurriría si esta influencia fuera la única que actuara sobre el elemento afectado. Así, en el ejemplo de la figura 5.5 no incluimos en la relación causal consideraciones como las de alimentos dietéticos o de personas hiperactivas que consumen más energía que el promedio si el análisis se está haciendo bajo condiciones normales.

Cuando se establecen diagramas causales es fundamental preguntarse:

- ¿Qué tipo de causalidad está implicada?
- ¿Las hipótesis son plausibles?
- ¿Qué evidencia puede presentarse para aceptar o refutar la relación?
- ¿Qué hipótesis alternativa es posible?

5.3.2 Lazo de retroalimentación. Como se indicó anteriormente, un elemento puede afectarse a sí mismo a través de una serie de relaciones causales. La figura 5.6 muestra cómo la población de ballenas se afecta a sí misma mediante la migración.

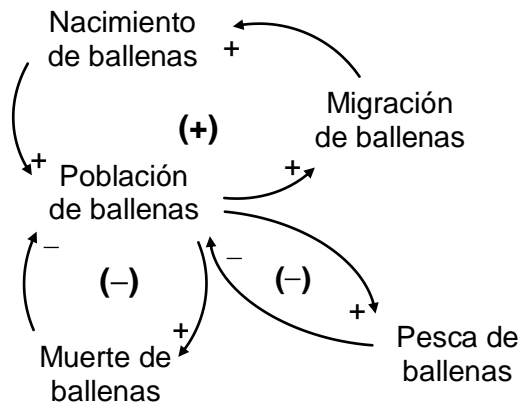


Fig. 5.6

Los signos que aparecen en el diagrama tienen el siguiente significado. Si el nacimiento de ballenas crece, la población de ballenas aumentará (si decrece, disminuirá); en este caso decimos que la causalidad es *positiva*, de allí el signo “+”. Igual ocurre con la relación “población de ballenas” y “migración de ballenas” y con “migración de ballenas”, y “nacimiento de ballenas” (a más migración, más nacimientos). El lazo de retroalimentación formado por este ciclo es positivo, ya que los signos son todos positivos. También se dice que un lazo es positivo si el número de causalidades negativas es par (como nemotecnia recordemos que “menos por menos, da mas”).

Por otra parte, si la “población de ballenas” aumenta, aumentará la “muerte de ballenas” (signo positivo); si se aumenta la “muerte de ballenas” la “población de ballenas” disminuirá. El lazo es, pues negativo. El lector podrá deducir fácilmente el caso de “población de ballenas” y “pesca de ballenas”.

La importancia de los lazos de retroalimentación estriba en el hecho de que ellos dominan la dinámica del sistema. Así como los lazos de retroalimentación positiva incrementan el comportamiento de la parte que afectan, los de retroalimentación negativa los controlan. En esencia, el control de un sistema es efectuado por los lazos de retroalimentación negativa. Y la estabilidad del mismo es la combinación de los lazos positivos y negativos.

Al identificar estos lazos, los elementos externos al sistema de base (el ambiente) quedan claramente determinados y son incluidos en el mismo. Ésta es una característica muy importante de los sistemas dinámicos que vamos a analizar: el ambiente hace parte del sistema. El sistema, originalmente abierto, es convertido ahora en un sistema cerrado gracias a la cuasi-descomposición.

Los sistemas complejos se caracterizan por tener varios lazos de retroalimentación. En estos sistemas hay dificultad en predecir mentalmente, aunque sea de forma aproximada, el comportamiento del sistema.

Los diagramas causales son el nuevo lenguaje de los sistemas. Los sistemas retroalimentados, son la forma de expresar la complejidad, y son no lineales.

Con base en estos principios es posible desarrollar modelos de muy diversa índole. Desde modelos de fenómenos duros, como los utilizados en ingeniería hasta modelos más “blandos” como los del área ambiental, la economía y aún la psicología y la sociología.

La metodología de Forrester permite expresar cualquier sistema susceptible de ser cuantificado, mediante la combinación de *niveles* y *flujos*. Veamos esto con cierto detalle.

5.3.3 Niveles. Un nivel es la representación de una condición o estado de un elemento de un sistema. Su diagrama es un rectángulo. Los niveles representan “acumulaciones” de los atributos (propiedades) mediante las cuales los elementos son descritos.

El mejor símil para comprender este concepto y el de flujo, es considerar un tanque que se está llenando con agua mediante una o varias entradas, y se vacía mediante una o varias salidas. La figura 5.7 es un ejemplo al respecto.

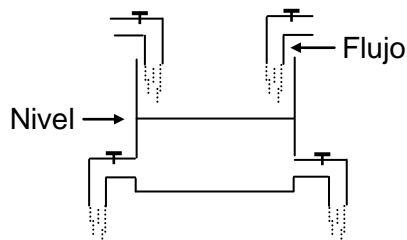


fig. 5.7

La cantidad de agua acumulada es el nivel. Su representación gráfica en los *cursogramas* o *diagramas de Forrester* es un rectángulo, como el indicado en la figura 5.8.



fig. 5.8

5.3.4 Flujos¹⁰⁸. Son la parte del proceso que modifican un nivel; generalmente representan una decisión o una acción que afecta su valor. Los flujos (acciones) causan cambios en el nivel que afectan. El símbolo tradicional es una válvula electrónica ligeramente modificada para poder incluir en ella información nemotécnica¹⁰⁹. En la figura 5.7, los flujos son la cantidad de agua que entra y sale del tanque. El agua fluye, no se acumula. Su representación gráfica es la de la figura 5.9.

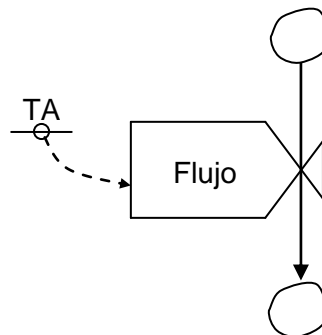


fig. 5.9

Lo que fluye es agua, representada por la línea continua que indica la dirección del flujo. Generalmente los flujos están asociados a dos tipos de elementos: los parámetros y las variables auxiliares. El flujo, junto con las variables que lo afectan, lo denominamos una "tasa": ella mide la

¹⁰⁸ En la nomenclatura original de Forrester se habla de "tasas" (*rates*). Esto induce a menudo a confusiones entre el concepto de lo que fluye y la medida de la cantidad que fluye por unidad de tiempo. Por esta razón introducimos más bien el término flujo.

¹⁰⁹ El símbolo de una válvula electrónica es: |

cantidad de flujo por unidad de tiempo. Cuando se combinan flujos y niveles, debe existir un canal de información entre el nivel y el flujo (cosa que indicaremos más adelante).

5.3.4.1 Variables auxiliares. Parámetros. Frecuentemente, para aclarar el significado de una ecuación de flujo es necesario dividirla. Estas ecuaciones reciben el nombre de “ecuaciones auxiliares”. Lo anterior no contradice la afirmación de que la estructura de un sistema está compuesta sólo de niveles y flujos. Las ecuaciones auxiliares son subdivisiones algebraicas de las ecuaciones de flujo. Cada ecuación parcial tiene significado en sí misma. Se encuentran entre el canal de información del nivel y los flujos que son afectados por él.

El símbolo para representarlas es un círculo con el nombre de la variable, y tiene entradas y salidas que conectan con otras variables auxiliares o con un nivel. Ver figura 5.10.

Se pueden utilizar como variables ecuaciones matemáticas (función exponencial, logarítmica, sinusoidal etc.), funciones especiales (salto, impulso), tablas o cualquier otro tipo de cálculo que sea necesario para describir un flujo en particular.

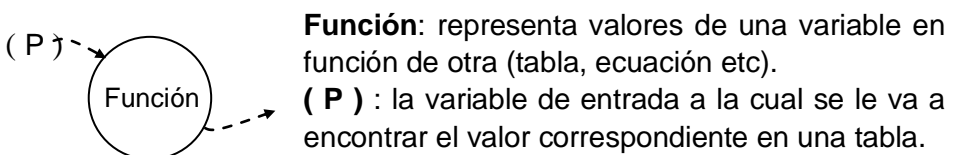


fig. 5.10

También es necesario, para el cálculo de los flujos, utilizar constantes. En los diagramas de Forrester el símbolo para las constantes es el que aparece en la figura adjunta.

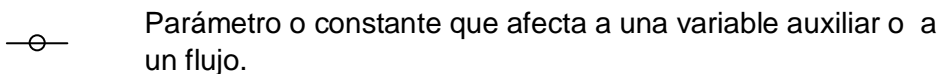


fig. 5.11

En la figura 5.9 aparece un parámetro que corresponde a lo que se conoce como *tiempo de ajuste* (TA), un tema que se explicará más

adelante. Las “nubes” son fuentes y destinos de los flujos cuando éstos no vienen de, o no van a, otros niveles.

5.3.5 Lazo de retroalimentación: niveles y flujos. Los lazos de retroalimentación descritos anteriormente se pueden representar convenientemente mediante la interrelación de niveles y flujos. El principio básico es que un nivel sólo puede ser afectado por uno o varios flujos. *No es posible que dos niveles se afecten (o interactúen) entre sí en forma directa.* En otras palabras, únicamente los flujos afectan los niveles; jamás dos niveles pueden hacerlo en forma directa. Por otra parte, los flujos no pueden afectarse entre sí; solamente son afectados por el nivel (o niveles) con el que ellos conectan directa o indirectamente (a través de otros niveles), y exclusivamente a través de canales de información. Estas condiciones garantizan la independencia de las políticas (representadas por flujos) y de sus efectos (representados por niveles) en un intervalo de tiempo relativamente pequeño. Desde un punto de vista matemático, lo anterior permite establecer un sistema de ecuaciones simultáneas que facilita enormemente los cálculos de la simulación. Es posible permitir cierta licencia en la interacción directa entre flujos cuando existe certeza de una información instantánea entre uno y otro, pero esto debe, en principio, evitarse.

Entre flujos y niveles puede circular materia, dinero, personas, energía. Entre niveles y flujos, sólo información.

Aunque en principio estos planteamientos son de una sencillez extrema, no siempre es fácil distinguir en la descripción de un sistema qué parte es un nivel y cuál un flujo, y la forma como interactúan. Una manera práctica de lograr esta diferenciación es “congelar” la dinámica del sistema durante un intervalo de tiempo. Lo que permanece al detener el tiempo, será un nivel, pues éste representa acumulaciones; lo que se desvanece será un flujo, ya que ellos no pueden medirse instantáneamente. Así, en el ejemplo de los tanques, si detenemos el tiempo, el agua deja de fluir, por lo que los grifos son flujos; en cambio, el nivel del agua queda en su estado actual, por lo que se representa como un nivel.

Como lo indicamos anteriormente, en la dinámica de sistemas la estructura de un lazo de retroalimentación se representa con base en las interrelaciones de los niveles y los flujos. Se trata de una decisión (flujo)

que controla una acción (nivel), el cual a su vez influye en la decisión. La comunicación entre el flujo y el nivel se efectúa mediante la transferencia de recursos que se representan por una línea de trazo continuo.

Por su parte, el nivel afecta la decisión a través de canales de información, representados por líneas de trazo punteado. La figura 5.12 muestra la estructura básica de un lazo de retroalimentación. La fuente indica aquellos aspectos externos al sistema que son necesarios para su comprensión (tal es el origen del agua, en el símil que venimos utilizando).

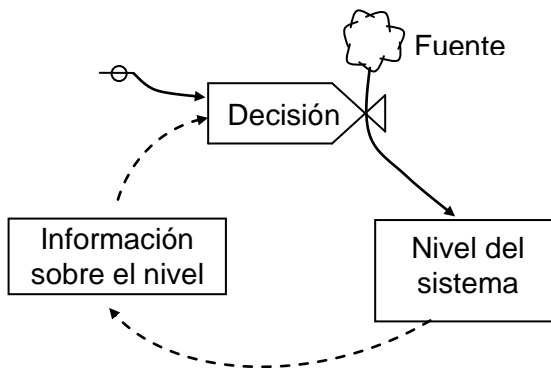


fig. 5.12

Consideremos el caso de la persona que se preocupa por el exceso de peso. Entre más ingiere alimentos más aumenta de peso y, a su vez, el aumento de peso hace que consuma más alimentos. El diagrama causal así como el diagrama en niveles y flujos se muestra en la figura 5.13.

Sabemos que el peso es un nivel debido a que se acumula. Por su parte, los alimentos “fluyen” debido al consumo de los mismos. En este ejemplo no se considera la digestión de alimentos (que consume calorías y por lo tanto disminuye la masa corporal). Un modelo más cercano a la realidad incluye este nuevo aspecto. El nuevo ejemplo propuesto nos lleva al siguiente análisis. El consumo de alimentos produce un aumento de peso. La digestión de los mismos reduce el peso corporal. Podemos observar dos lazos de retroalimentación: uno positivo y otro negativo. La figura 5.14 muestra este caso.

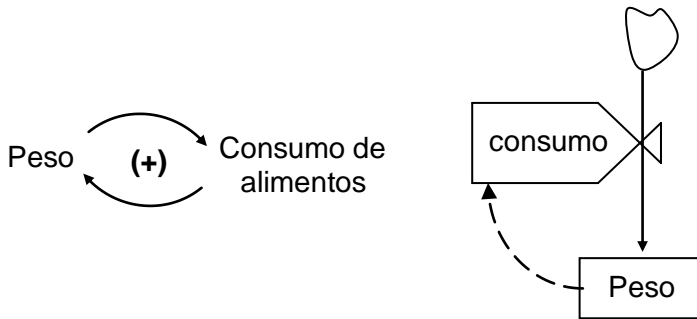


fig. 5.13

Volviendo a la analogía de los tanques, pensemos que las entradas y salidas son controladas por personas. Las llaves (flujos) se abren o se

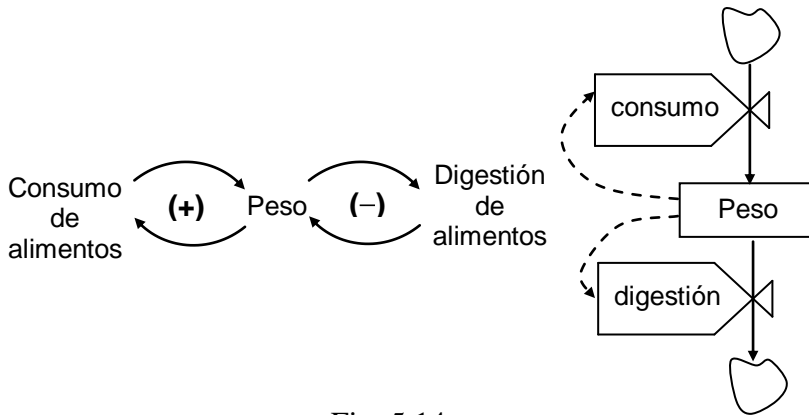


Fig. 5.14

cierran mientras se llenan o vacían los tanques, y pueden abrirse o cerrarse dependiendo del nivel de agua que estos tengan. Los tanques (niveles) se identificarán por la cantidad de agua que tengan en un momento dado. No hay comunicación entre las personas que controlan las llaves diferente a la información que dan los niveles. Digamos que se comunican a través de los efectos que sufre el nivel por las acciones combinadas sobre las llaves (flujos).

La figura 5.15 muestra un caso particular con un sólo nivel y dos flujos: uno de entrada, *A*, y otro de salida, *B*.

Si *A* y *B* desean mantener el nivel del tanque alrededor de ciertos límites, *A* abrirá la llave si observa que el tanque está por debajo de dicho nivel, mientras que posiblemente *B* cerrará la suya. Al aumentar el

nivel y sobrepasar el límite superior deseado, *A* cerrará la llave y *B* podrá abrirla.

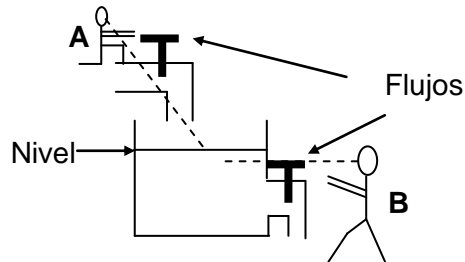


fig. 5.15

Tanto la actividad de *A* como la de *B* están reguladas únicamente por la *información* recibida sobre el nivel actual del tanque. La tasa a la cual fluye el agua que entra o sale es la medida de la cantidad de agua que entra o sale por unidad de tiempo.

5.3.6 Consideraciones adicionales respecto a flujos y niveles.

Hemos indicado que los niveles representan acumulaciones (positivas o negativas) de los flujos que entran o salen. En principio, su descripción es bastante sencilla.

Al contrario, los flujos, por ser las representaciones de políticas o decisiones, tienen una estructura más compleja.

Generalmente se dispone de una meta que se desea alcanzar. La condición actual del sistema se compara con la meta y dependiendo de la diferencia se toman las acciones pertinentes. La figura 5.16 es un esquema bastante general para describir los aspectos que debe contener un flujo.

La "condición observada" es la información proveniente del nivel que afecta a la tasa. La discrepancia es igual a la diferencia entre la meta y la condición observada.

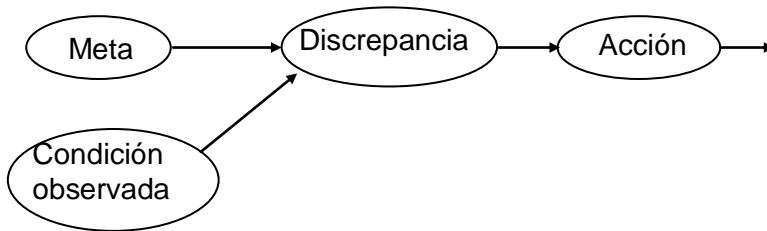


Fig. 5.16

5.3.7 Ecuaciones matemáticas. Escribir las ecuaciones matemáticas correspondientes a un cursograma no es, en general, una tarea difícil. Aunque no vamos a entrar en detalles, daremos una breve indicación de cómo son las ecuaciones típicas para el caso de niveles y flujos.

5.3.7.1 Ecuaciones de flujo. Las ecuaciones de flujo parten, en principio, del esquema de la figura 5.17. En general, F representa el flujo, M la meta que se quiere alcanzar, N el valor del nivel que influye en el flujo F , y TA el tiempo de ajuste que puede interpretarse como el tiempo en el cual la tasa satisfaría el objetivo si el flujo permaneciera constante. De todas formas, este tiempo es un factor de diseño que puede variarse a conveniencia. $1/TA$ puede interpretarse como un porcentaje que afecta al flujo.

El diagrama de Forrester para este caso se muestra en la figura 5.17.

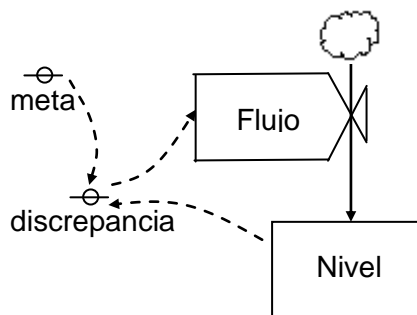


fig. 5.17

La discrepancia es: meta-nivel. Alcanzar la meta toma cierto tiempo que se conoce como tiempo de ajuste, TA . Es costumbre indicar el

diagrama de la figura 5.17 de forma equivalente, en la cual la discrepancia no se detalla sino que más bien se incluye en el cálculo de la ecuación de flujo; allí se hace explícito el tiempo de ajuste. La figura 5.18 describe la situación.

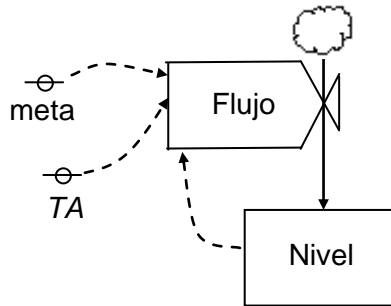


fig. 5.18

La ecuación de flujo correspondiente se escribe:

$$\text{Flujo} = \text{discrepancia}/\text{TA}$$

De acuerdo con lo anterior, podremos escribir en forma muy general:

$$F = 1/\text{TA} (M - N) \quad (\text{V-2})$$

En donde F representa el flujo, M la meta que se quiere alcanzar y N el valor del nivel que influye en el flujo.

Existe otra manera de calcular los flujos. Cuando no hay una meta específica que alcanzar, y el flujo es afectado por una o varias variables auxiliares, VA_1, VA_2, \dots, VA_n , la ecuación correspondiente es:

$$F = VA_1 \times VA_2 \times \dots \times VA_n \times N \quad (\text{V-3})$$

5.3.7.2 Ecuaciones de nivel. Supongamos que tenemos un tanque con 10 litros en el momento actual. El flujo de agua que le entra es de 4 litros/segundo (cada segundo entran 4 litros), y salen 2 litros/segundo (flujo de salida). Al cabo de 2 minutos el nuevo nivel del tanque será:

$$10 \text{ lt.} + 2 \text{ seg.} (4 - 2) \text{ lt/seg.} = 14 \text{ lt.}$$

Es fácil deducir que el nivel del tanque en un momento dado es el resultado de sumar al valor del nivel en un momento anterior el flujo que ingresa en un intervalo dado de tiempo y restarle el flujo que sale. Si consideramos intervalos de tiempo igualmente espaciados de un valor Dt , la ecuación del valor del nivel en el momento $t + Dt$ es:

$$\text{Nivel}_{t+Dt} = \text{Nivel}_t + Dt \times \text{Flujo} \quad (\text{V-4})$$

Prácticamente, éstos son los elementos necesarios para elaborar modelos de simulación de sistemas complejos. Para desarrollar los cálculos sólo es necesario conocer las condiciones iniciales, es decir, los valores de todos los niveles con que se inicia el proceso. Forrester y su grupo desarrollaron el lenguaje DYNAMO que permite obtener resultados numéricos y su graficación, mediante el uso del computador. Existen además versiones en lenguajes como BASIC. Stella y Vensim son dos programas comerciales de amplio uso que facilitan enormemente la aplicación de esta herramienta.

Como ejemplo final, mostraremos, sin analizar, un modelo de la forma como un grupo de conejos depende directamente del alimento disponible, y los resultados sorprendentes (y reales) que se dan en la naturaleza cuando este tipo de situaciones se presenta.

5.3.8 Un ejemplo. Una población de conejos tiene a su disposición un pastizal para su alimento. La región está en cierta forma aislada por lo que, tanto la población de conejos como la biomasa producida por el pastizal, dependen únicamente del clima y de las interrelaciones entre la cantidad de alimento y el número de animales presente en cada momento.

El diagrama causal de la figura 5.19 es una forma de representar este sistema.

El porcentaje de nacimiento de los conejos es del 1.5% mensual, y el de muerte del 0.5% mensual. El pasto es afectado por el clima, y esto se muestra mediante una tabla que mide la producción de biomasa según los meses del año. Cada conejo consume 1 kg. de biomasa por día (30

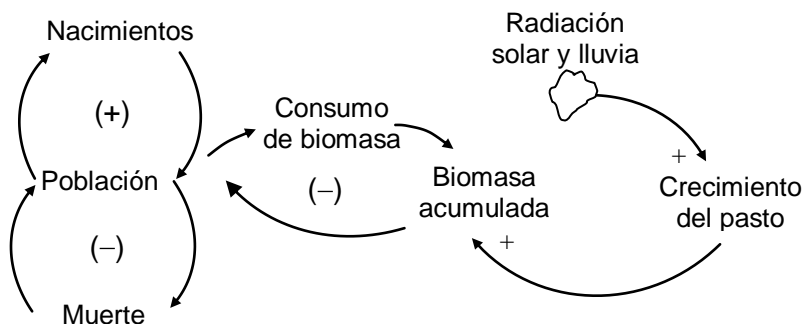


Fig. 5.19

kg./mes). Cuando no hay alimento suficiente los animales mueren a una tasa mayor que, hemos supuesto, es del 20%.

El diagrama de Forrester correspondiente al modelo de la figura 5.19 se muestra en la figura 5.20.

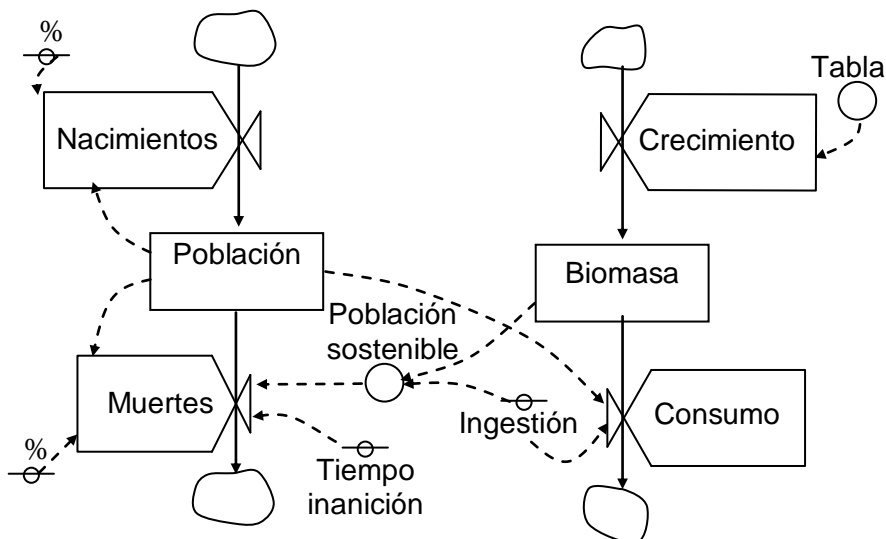


fig. 5.20

Las ecuaciones para desarrollar la simulación son las siguientes.

$$PC_{t+Dt} = PC_t + Dt (FN_{Dt} - FM_{Dt}) \quad [\text{conejos}]$$

PC: población de conejos.

$$BM_{t+Dt} = BM_t + Dt (FCP_{Dt} - FCC_{Dt}) \quad [\text{Kg.}]$$

BM: biomasa.

$$FN_{Dt} = 0.015 \times PC_t \quad [\%/mes][\text{conejos}] = [\text{conejos/mes}]$$

FN: flujo de nacimientos

$$I_{Dt} = 30 \times Dt \quad [\text{kg}]$$

Flujo de ingestión (tasa).

$$MI_{Dt} = 0.2 \quad [\text{mes}]$$

MI: % muerte por inanición.

$$PS_t = BM_t / I_{Dt} \quad [\text{conejos}]$$

PS: población sostenible.

$$FM_{Dt} = \begin{cases} \text{Si } (PS_t \geq PC_t) \text{ entonces } 0.01 \times P_t \\ \text{de lo contrario } (P_t - PS_t) \times MI_{Dt} \end{cases} \quad [\text{conejos/mes}]$$

FM: flujo de muerte.

FCP_{Dt} = Tabla (datos mes).

FCP: Flujo de crecimiento del pastizal.

$$FCC_{Dt} = PC_t \times I_{Dt} \quad [\text{conejos}] [\text{kg./[Dt]-conejos}]$$

FCC: flujo de consumo (conejos)

Supongamos que se desea soltar cien conejos en un habitat que tiene 10000 kilogramos de biomasa en las condiciones descritas y deseamos conocer el comportamiento del sistema en los próximos años. Las condiciones iniciales son:

$$PC_0 = 100.$$

$$BM_0 = 10000.$$

La figura 5.21 muestra la dinámica de la población y de la biomasa para las primeras 200 semanas.

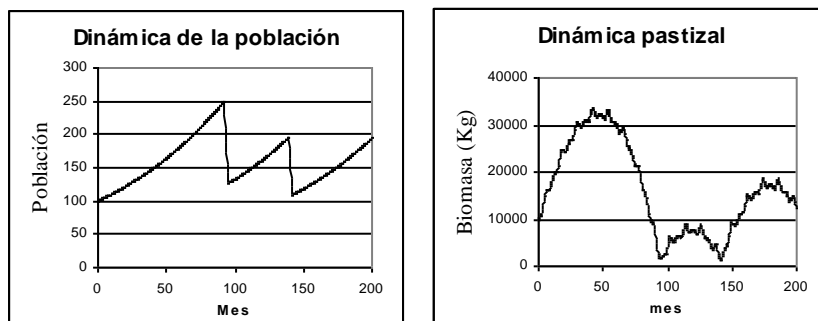


fig. 5.21

El modelo se calculó utilizando una hoja electrónica. El comportamiento que se observa en la figura 5.21 se da particularmente en las especies que son invasoras y sólo dependen del medio para subsistir. Se observa un marcado descenso debido al consumo casi total de la biomasa existente. Cuando la población de conejos está prácticamente extinguida, el consumo de biomasa es mínimo, por lo que ésta puede recuperarse gracias a su flujo de crecimiento normal. Un nuevo ciclo se hace presente, y la situación se repite en forma similar. La naturaleza regula este comportamiento facilitando que otras especies compartan el habitat del invasor. Surge la relación predador-presa en la cual el predador convierte en presa a la especie que es predadora de la parte vegetal (*Cfr.* Ecuación III-5). Al modelo anterior le podemos pues, agregar una población de zorros que se alimenta de conejos... y a los cazadores que desean cazar zorros. Como podemos ver, el modelo puede ampliarse a medida que sea necesario.

La gráfica de la figura 5.20 nos muestra cómo las poblaciones de conejos oscilan entre 100 y 200 conejos, mientras que la cantidad de biomasa lo hace entre 100 y 20000 kilogramos.

Una reflexión se hace necesaria. No por más complejo, un modelo es mejor. Ni tampoco es mejor aquel que considere a los subsistemas bajo estudio como compuestos de un gran número de partes. La sencillez es un distintivo de excelencia y elegancia. Esto lo podemos interpretar bajo la idea de lo que se conoce como la "navaja de Occam": un buen modelo debe tener el mínimo de elementos necesarios, pero no menos; tampoco, más.

Cada vez que se desee modelar un sistema, lo mejor es empezar por consideraciones sencillas de carácter global. Luego se debe observar el comportamiento de cada subsistema para determinar si concuerda con la realidad observada. Posteriormente, se analizan las interacciones con otros subsistemas y así sucesivamente hasta que el comportamiento del sistema satisfaga nuestras apreciaciones.

Pero, aparte de poder observar la dinámica del sistema ¿qué otros beneficios se pueden tener? Muchas preguntas se podrían resolver con este modelo sin necesidad de recurrir a experimentos directos sobre el ecosistema, experimentos que por lo demás podrían tener consecuencias desastrosas para el mismo sistema o ser muy costosas.

Por ejemplo ¿cuál sería el efecto de introducir una población adicional de 30 conejos? ¿Cuál sería el efecto de mejorar la producción del pastizal incrementando en un 20% su producción actual? ¿Qué ocurriría si se permitiera la caza una vez estabilizado el sistema después de mejorar la producción de pasto? ¿Cuál sería la tasa de caza más favorable para mantener un equilibrio en el ecosistema?

Pasemos ahora a la consideración de metodologías para estructurar sistemas blandos. En particular, consideraremos la metodología de P.B. Checkland.

5.4 La metodología de P.B. Checkland.

5.4.1 Generalidades. En sus inicios como “hombre de sistemas”, Checkland utilizó la metodología de Jenkins tratando de resolver problemas de corte social¹¹⁰. En un estudio exhaustivo de las técnicas que podrían definirse bajo el amplio nombre de *Análisis de Sistemas* quedó claro que, estando todas ellas permeadas por una visión desde la perspectiva de la ingeniería, debía existir alguna razón por la cual estas metodologías presentaban dificultades cuando se aplicaban a problemas relacionados con la actividad humana. Se observó que una característica de los problemas de la ingeniería era que el *qué hacer* estaba definido y, por lo tanto, lo que el ingeniero tenía que decidir era el *cómo hacerlo*. Esto quedaba muy claro en los modelos de optimización

¹¹⁰ Es interesante anotar que la formación profesional de Checkland es la de Ingeniero Químico.

cuando se planteaba una función objetivo (Cf. numeral 5.1) que representaba el *qué*; el modelo matemático conducía al *cómo* hacerlo mejor. Las metodologías de los sistemas duros buscan optimizar. Cuando hay acuerdo en un único objetivo sólo un sistema es relevante. Aquí funcionan las metodologías duras. Para el caso de los sistemas blandos es necesario definir primero el *qué* para luego estudiar el *cómo*.

Nació entonces la idea de generar una metodología que permitiera tener en consideración estos hechos, la cual se conoce con el nombre de *Metodología para sistemas blandos* (Soft Systems Methodology: SSM). En ella básicamente se intenta *aprender*. Durante el proceso de aprendizaje se busca cómo interrelacionar los diferentes puntos de vista para lograr mejoras. No es pues, una metodología de sistemas que busca metas (H. Simon) sino que “mantienen relaciones” (Vickers). Checkland cree que intentar definir un futuro ideal y conseguir consenso sobre él presenta muchas dificultades; esta visión está muy cerca de la sociología interpretativa de Weber (ni Ackoff, ni siquiera Churchman lo hacen; la noción de diseño, en estos autores, es predominante).

En los sistemas blandos se presenta la dificultad de escoger *el problema*. Para comprender bien esta dificultad hay que tener en cuenta que, desde el punto de vista de esta metodología¹¹¹, una organización surge del discurso entre dos o más individuos con visiones y puntos de vista diferentes respecto a la organización misma y a lo que se considera de trascendencia. De esto puede resultar un grado de acuerdo en los propósitos o un proceso social para buscar criterios que permitan evaluar los éxitos en relación con la búsqueda de esos propósitos, pero también tensiones y conflictos. Por lo tanto, un modelo de organización debe capturar la tensión entre la buena disposición de los individuos para organizar su búsqueda racional de metas, y la absoluta terquedad e irracionalidad que a veces se demuestra. Por esta razón, no es fácil encontrar ese objetivo único, ese problema fundamental que resume toda la situación a resolver en una organización. Por el contrario, habrá docenas de candidatos para ocupar tan importante sitio.

La visión anterior destaca la importancia de conocer la posición de los individuos dentro de la entidad (su rol o roles), así como los valores y las

¹¹¹ Cfr. P.B. Checkland and S. Holwell: *Information, Systems and Information Systems*.

normas que la rigen y rigen a sus miembros. Estos tres elementos están en *continuo cambio y negociación* debido a la dinámica que se genera a través de las conversaciones y discusiones. La organización debe aprender a *acomodarse* a estos cambios temporales entre los individuos y sub-grupos que puedan proporcionar bases para la acción, esta última entendida como un manejo del cambio y no como la toma de decisiones racionales para lograr objetivos. La metodología que vamos a describir ayuda a gestionar las relaciones orquestando un proceso a través del cual los actores organizacionales pueden hallar y aprender las “acomodaciones” (convenios) que sean factibles y deseables.

5.4.2 Fundamentos. Seguiremos muy de cerca el texto de Checkland y Scholes¹¹² en sus capítulos 1 y 2, pues presenta una excelente visión actualizada de la metodología.

La metodología de Sistemas blandos se fundamenta en un proceso cognoscitivo en donde la experiencia juega un papel fundamental. En general, el ser humano inicia su conocimiento a partir de la experiencia y de la manera como sus facultades estructuran estas vivencias dándoles un significado, generando así conocimiento ya sea inmediato o científico. Este conocimiento hace que el ser humano tenga intenciones, no simplemente respuestas genéticas ante lo percibido y conocido. No sólo experimentamos el mundo, lo interpretamos. Las intenciones generan a su vez acciones con propósito que realimentan la experiencia. Una “secuencia” de este proceso del conocimiento puede ser el de la figura 5.21.

El propósito es la característica que va a ser tenida en cuenta como soporte primordial en esta metodología. En las ciencias sociales aún no es posible basar el propósito de las acciones humanas en razones puramente científicas. Nuestras acciones con propósitos se basan en gran medida en la experiencia (conocimiento) inmediata.

¹¹² Cfr. P.B. Checkland and P. Scholes: *Soft Systems Methodology in Action*.

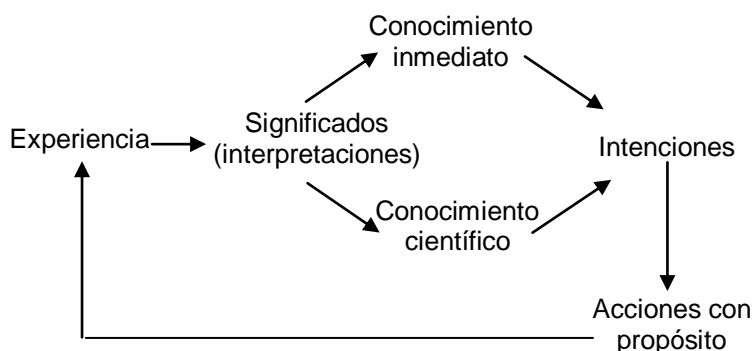


fig. 5.22

La metodología de los Sistemas Blandos se fundamenta en el ciclo mostrado en la figura 5.23.

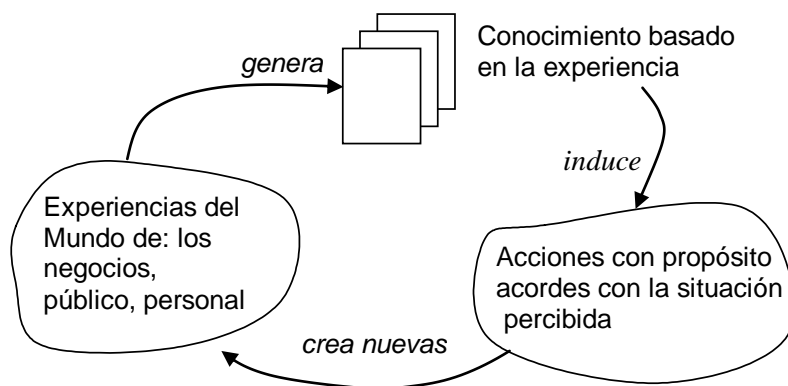


fig. 5.23

Es importante insistir en que las preguntas *cuál es el sistema, cuáles son sus objetivos*, no tienen respuesta cuando se trata de los sistemas de la actividad humana. Lo que hace que este tipo de sistemas sea difícil de comprender es precisamente la dificultad de identificar una estructura y unos objetivos. Por estas razones, las acciones con propósitos son tan importantes. Así como en las ciencias duras se busca un conjunto de todos naturales como es el caso en la ecología, o todos diseñados como en la ingeniería, en los sistemas blandos se propone un conjunto de

actividades conectadas entre sí de tal forma que integren un todo con propósito.

El propósito se hace presente en los llamados *sistemas de la actividad humana*, es decir, sistemas integrados por personas que pueden desplegar un propósito, que tienen voluntad. En la metodología se distingue entre *acción*, que está referida al mundo real, y *actividad*, que es aquello que se ejecuta en el sistema como ente abstracto.

Por su parte, la palabra *sistema* se refiere exclusivamente al constructo mental, a la concepción que se tiene de una situación. Se ha propuesto la palabra *holón* para evitar la confusión que la palabra “sistema” tiene en el lenguaje común. La propuesta es concebir e interpretar el mundo como compuesto por holones (sistemas). Aunque la palabra no ha sido acogida para el uso corriente en el mundo sistémico, la acotación hecha debe ser suficiente para distinguir entre el uso cotidiano de la palabra y lo que significa *sistema* tanto en la metodología como en el pensamiento sistémico en general.

Para poder identificar un sistema con propósito es necesario que exista un punto de vista, una cosmovisión que lo soporte, lo que en principio permite asegurar que es único para cada observador particular. Sin embargo, las perspectivas que genera son múltiples. Por esta razón, es necesario que cuando se planteen sistemas de la actividad humana relacionados con acciones reales con propósito, se tengan en cuenta diferentes visiones de mundo y se proponga para cada una el holón respectivo. Checkland y Scholes ejemplifican cómo es posible pensar en diferentes sistemas relacionados con un mismo hecho: un grupo guerrillero, un periódico, una liga de fútbol profesional. La figura 5.24 es un buen ejemplo.

En cuanto a una actividad con propósito, ésta puede concebirse a la manera de una flecha, como se indica en la figura 5.25. (La nomenclatura ha sido modificada con respecto a la primera presentada por Checkland). Esta acción es una expresión de la intención de alguna(s) persona (s) **B**. Como **T** es una acción humana, alguien debe ejecutarla. Este ejecutor o ejecutores serán **A** en la figura. La acción ejercerá un impacto en alguien o algún grupo, que llamaremos **C**. Ella se desarrolla en un ambiente **E**. Por otro lado, puede existir una persona o un grupo que pueda detener la acción que se está llevando a cabo. Los hemos representado por **O**.

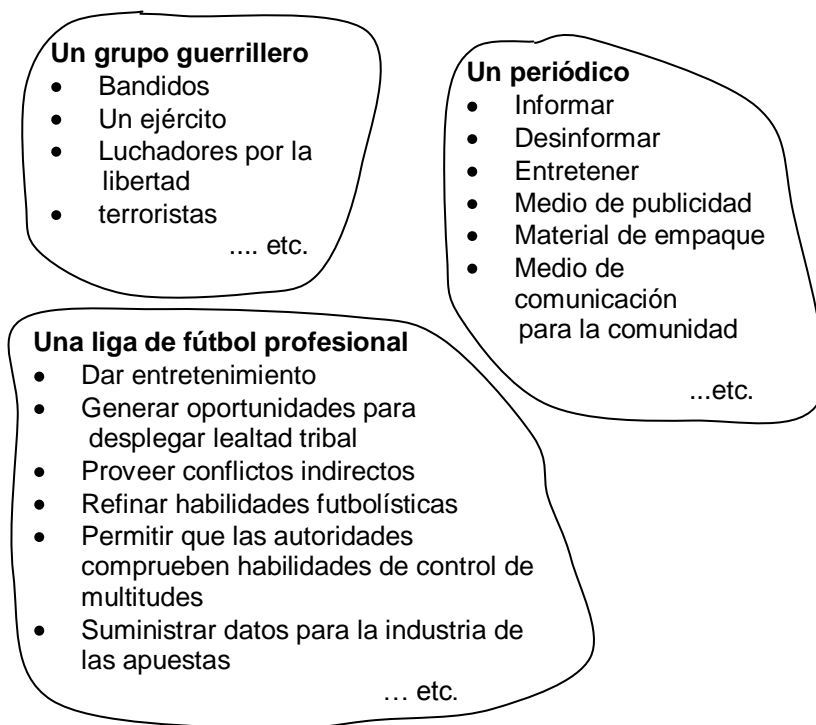


fig. 5.24

Supongamos que el acto con propósito, **T**, es asistir a una fiesta con su pareja. **B** es tanto usted como su pareja y pueden identificar el resto de elementos. En principio ambos son **C**, pues son los beneficiados (suponiendo que asistan porque lo desean y no por compromiso; en caso contrario serían los “perjudicados”; de todas maneras, seguirían siendo **C**). Si son independientes, **O** puede ser cualquiera de los dos, o ambos, pues cualquiera puede impedir que el otro vaya o decidir de común acuerdo no ir. Si dependen de otra persona (por ejemplo sus padres) seguramente ellos representarán el elemento **O** de esta acción con propósito. **E** representa, por ejemplo, la escasez de dinero, o la dificultad de hallar transporte o el deseo de asistir o no, es decir, las restricciones.

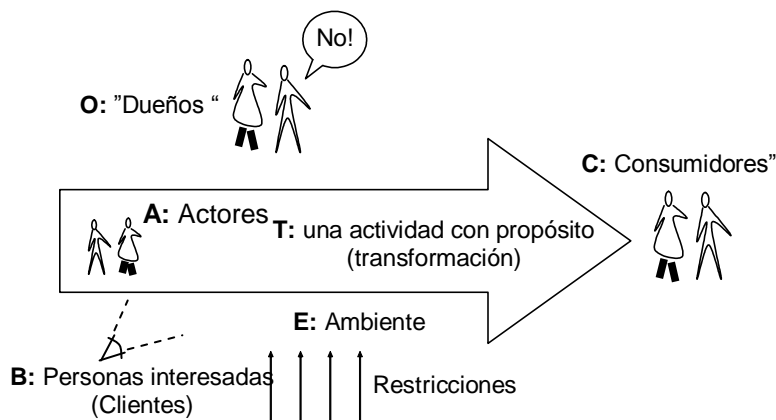


fig. 5.25

5.4.3 El proceso metodológico. La primera versión de la metodología fue presentada en 1975, y aunque fue revaluada posteriormente por una versión *más sistémica*, no deja de ser interesante analizar primero esta propuesta, ya que da ideas importantes para ser tenidas en cuenta en la versión de 1988¹¹³.

La primera versión se conoce como *el proceso de siete fases*, el cual describe la forma como una situación de la vida real puede enfrentarse mediante una teoría de sistemas. La figura 5.26 es el diagrama correspondiente.

Aunque se haga referencia a fases o pasos, la metodología no es una secuencia a seguir. Obviamente, cuando se conoce poco de la situación problemática, el paso 1 es necesario y luego el 2. Pero no siempre es así. Consideremos cada fase con un poco de detalle.

La *fase 1* consiste en formarse *una imagen* de una *situación problemática* que afecta a alguien. No debemos referirnos a esta situación como "el problema", ya que no conocemos prácticamente nada al respecto, y cuando hablamos de *problema* es por que se tiene claramente especificada una transformación entre lo que existe (como problema) y lo que queremos obtener (como solución). Lo corriente es

¹¹³ Cfr. P.B. Checkland: *Soft systems methodology. An overview.*

que exista una *sensación de inconformidad* (que hemos denominado situación problemática) y que es considerada en esta fase; en otros términos, es la búsqueda de una idea general, vaga, que permita una comprensión inicial de la situación y se logra a partir de uno o varios síntomas que puedan ser observados y considerados como importantes.

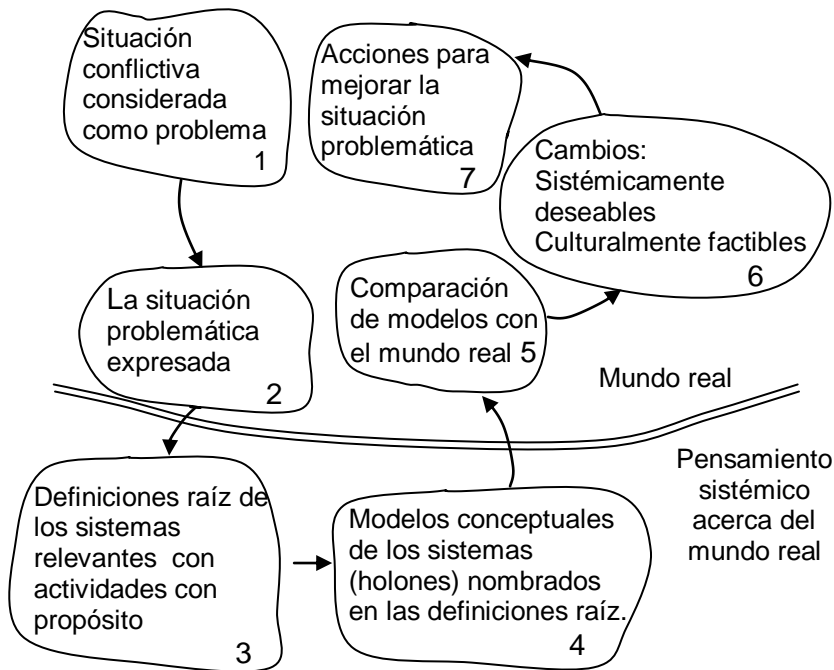


fig. 5.26

La *fase 2* busca aclarar más la situación. Tanto en esta fase como en la anterior *debe evitarse el uso de conceptos de sistemas*, puesto que al no tener una situación definida –“un problema”– no hay traducción o interpretación posible en términos de sistemas. Es importante no sesgar la situación, por ello debemos *minimizar nuestro Weltanschauung (W)* (cosmovisión), es decir, romper prevenciones, prejuicios y estereotipos. Algunas personas creen que esto no es posible debido a que siempre estudiamos y resolvemos las situaciones mediante un “W” particular. Tal vez se hace necesaria una diferenciación. Podemos decir que poseemos dos tipos de *Weltanschauung*: uno personal (digamos W_1) debido a nuestra educación y formación primera, y otro, W_2 debido a nuestra

formación profesional. Es este segundo W el que es necesario minimizar. Queremos, pues, evitar los prejuicios profesionales que puedan deformar la situación que está siendo estudiada. Insistimos: la fase de análisis no debe realizarse en términos de sistemas. En ausencia de acuerdos entre metas y objetivos, es necesario definir una jerarquía de sistemas. Se debe generar un “cuadro rico” sin tratar de representarlo en términos sistémicos.

En esta fase, el estudio se hace mediante la observación de las características o conceptos que existan en la situación particular, de los procesos y las estructuras, del *clima* en el cual se desenvuelve el sistema y del conocimiento de los roles, normas y valores que predominan en la situación estudiada. Puede decirse que esta fase, junto con la anterior, termina con la identificación del problema.

En la *fase 3* caemos en el mundo de los sistemas. En la figura 5.25 se observa una frontera imaginaria que separa el mundo real del enfoque de sistemas. Interpretamos lo aprendido en las dos fases anteriores en términos de sistemas. El concepto clave es la llamada *definición raíz*, una identificación verbal, cuidadosa, de lo que *el problema* es. La definición raíz expresa una transformación que representa lo que actualmente existe y lo que deseamos cambiar de dicha situación. Evidentemente, para un problema dado existen múltiples definiciones raíz.

La *fase 4* es una fase de conceptualización. Es el *cómo* enfrentar el problema. Esto se logra mediante un modelo conceptual: un cuadro, tan objetivo como sea posible, de lo que está implicado en la definición raíz, y un modelo por cada definición raíz escogida. No se trata de analizar una situación idealizada ni tampoco la situación actual. Nos dice lo que se debe hacer desde el punto de vista del sistema y no desde uno personal. Ésta es la parte de la metodología en la cual el enfoque de sistemas debe usarse de la manera más formal.

A partir del modelo conceptual se podrán identificar las actividades mínimas que el sistema debe poseer para resolver la situación problemática.

En la *fase 5* volvemos al mundo real. Es la de la comparación. Aquí confrontamos el modelo conceptual y la situación que se está resolviendo. Tal comparación puede hacerse en términos generales (por ejemplo de los modos de operación y de la estructura del sistema) o en

términos muy específicos. En general se observa qué actividades, decisiones o información, que el modelo conceptual propone, no se cumplen o no existen en la realidad.

En la *fase 6* surgen los posibles cambios que puedan mejorar la situación problemática. En esta parte se hace sensible hasta dónde la metodología permitió que los realmente interesados jugaran un papel de importancia durante todo el proceso. El hombre de sistemas puede indicar y defender una sugerencia particular, pero la decisión para la acción sólo puede ser llevada a cabo por los actores, no por él. Si en los sistemas duros el “diseño” es el “diseño del sistema a ser manipulado” permitiendo el uso de técnicas de optimización, simulación etc. (recordemos a Jenkins), en los blandos esto no es posible. El diseño lo entendemos como el diseño para un cambio obtenido a partir de la definición raíz, la conceptualización y el proceso de comparación. Diseñar no es aquí la creación de algo que funcionará de una manera específica, a “prueba de gente”, y que logrará un objetivo definido; al contrario, es la creación de alguna(s) modificación(es) para que la gente con propósitos pueda llevarlos a cabo.

Como puede inferirse, el diseño es una actividad más bien específica para una situación particular, en un tiempo particular, que considera gente particular y una historia particular. Se sugiere que la *fase 7* (fase de realización) sea tratada como si fuera una “situación problemática” y se le aplique a este nuevo problema la metodología discutida.

Finalmente, debe indicarse que es necesario hacer un estudio retrospectivo: empezar de nuevo. Esto no debe hacerse sólo en cada una de las fases sino al final del proyecto. Pueden ocurrir cambios en las actividades y pueden surgir nuevas experiencias que obliguen a reconsiderar las definiciones raíz.

En la propuesta de 1988, Checkland propone dos tipos de corrientes de investigación: una basada en la lógica y otra en la cultura. La figura 5.27 resume la nueva propuesta.

Tomemos una situación real que es considerada como problemática por alguien. Existe la sensación de que puede ser manejada con el fin de mejorarla. Ella se encuentra dentro de cierto contexto e historia que es necesario considerar. Esta parte no puede subestimarse.

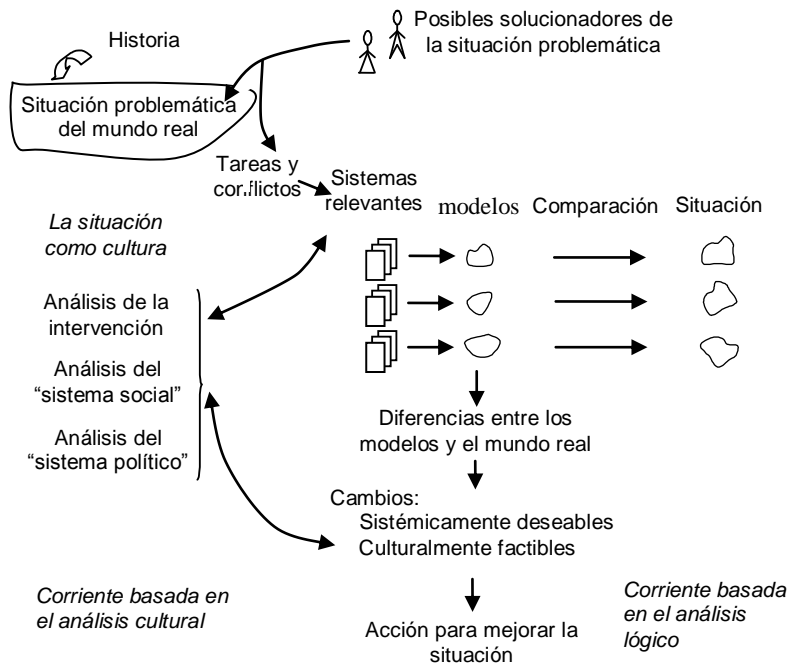


fig. 5.27

Frente a esta situación existen unos *posibles solucionadores* que van a utilizar la metodología. Son colaboradores, pero no los únicos que pueden enfrentar la situación. A partir de su interacción con la situación problemática se abren dos corrientes que se relacionan continuamente. Aquí las representamos por separado para facilitar la explicación, pero operan simultáneamente; ambas deben conducir a acciones que produzcan los cambios necesarios para mejorar la situación, y deben tener su origen en las percepciones de las diferentes acciones con propósito en la situación (las tareas) y los asuntos en los cuales hay desacuerdos (conflictos).

En la parte derecha de la figura 5.27 se describe la corriente regida por la lógica. Allí se presentan holones con propósito en forma de modelos de la actividad humana, que se van a comparar con la situación real. Esta comparación da origen a un debate para proponer cambios.

En el debate, los cambios propuestos deben buscar cierta *acomodación* entre los diferentes intereses. El concepto de “consenso” no es aquí una buena opción. Los intereses y conflictos humanos difícilmente se deponen para lograr un acuerdo común. Lo que realmente ocurre es una especie de negociación en la que estos conflictos se “acomodan”.

La corriente lógica conduce a un cuestionamiento del mundo real. Sin embargo, ella sola no es suficiente para que los cambios sean los más adecuados a la situación. Los aspectos culturales juegan un papel de igual importancia; corresponde a la parte derecha de la figura 5.27.

En la corriente cultural, se tienen en cuenta tres aspectos para estudiar la situación problemática. El primero es la *intervención* misma, que no es otra cosa que la alteración que sufre la situación cuando agentes extraños intervienen en ella. El segundo aspecto es considerar la situación como un *sistema social*, no sólo como un generador de tareas o conflictos. El tercero es el examen del *sistema político* (o los aspectos de poder) que está contenido en la situación problemática.

Estas dos corrientes deben conducirnos a proponer cambios que sean acogidos por los afectados para que sean llevados a cabo, lo cual generará nuevas situaciones. El proceso no tiene fin, y la decisión de terminar en alguna parte es en cierta medida, arbitraria.

Lo anterior deja claro que los aspectos subjetivos son seriamente tenidos en cuenta. Si es científico o no este procedimiento, queda abierto el debate. Lo que sí se puede asegurar es su rigurosidad intelectual.

5.4.4 La corriente de la investigación basada en la lógica (estudio lógico). Hemos dicho que en esta metodología se deben buscar los sistemas relevantes. Sin embargo, en principio, ningún sistema es intrínsecamente importante en los sistemas de la actividad humana. Debemos hacer ciertas escogencias, subjetivas sin duda, con la esperanza que nos ayuden a descubrir sistemas realmente representativos. Esta parte es muy difícil de aceptar para las personas entrenadas en las ciencias duras debido al subjetivismo que la caracteriza.

Una ayuda para lograr esta elección es analizar las *tareas primarias del sistema*, proceso generalmente sencillo, pues se trata de identificar

las acciones con propósito (sus tareas) que la entidad (o el sistema que contiene el problema) lleva a cabo para cumplir sus objetivos.

Por ejemplo, si consideramos la universidad como organización, puede suponerse que sus tareas principales son impartir docencia, apoyar y desarrollar la investigación, prestar ayuda a la comunidad, mantener un presupuesto equilibrado, etc. A partir de allí es posible nombrar algunos sistemas representativos basados en estas acciones: un sistema que gradúa profesionales, un sistema que produce descubrimientos, etc. Estos subsistemas podrían integrar un todo que de alguna manera reflejarán la universidad actual. Pero debido a que las tareas son diferentes y en cierta forma compiten generando conflictos, es posible proponer una segunda elección de sistemas representativos. Si el problema obedece a la asignación del presupuesto, podríamos pensar como sistema relevante *el que resuelve las dificultades en la repartición del presupuesto*. Aquí no es de esperar versiones institucionalizadas de tales sistemas en el mundo real. Éstos son los *sistemas relevantes basados en los conflictos* y no están reflejados explícitamente en la universidad actual.

Podemos pensar en un espectro que va desde los sistemas basados en tareas primarias en un extremo hasta los sistemas basados en conflictos, en el otro. La diferenciación entre ambos tipos de sistemas no es tajante; se trata más bien de manifestaciones diversas de aspectos institucionalizados (las tareas) y de aquellos que no lo son (los conflictos).

Como no es fácil identificar estos sistemas, en particular los que surgen de los conflictos, el uso de metáforas es de gran ayuda. Así, es posible pensar en relaciones entre *A* y un opuesto *B*: por ejemplo, las relaciones entre policía/ladrón, parásito/huésped, esposo/esposa, amantes, amo/esclavo, amigos etc. ayudan a mover el pensamiento.

Nombrar los sistemas relevantes. Es necesario nombrar –identificar– los sistemas relevantes que van a ser considerados como parte del sistema a definir. Los nombres deben expresar, tal como lo dice Checkland, la *esencia de la percepción* que va a ser modelada: a ellos se les denomina *definiciones raíz*. En otras palabras, la definición raíz expresa el propósito esencial de un sistema *propositivo*, que se manifiesta como una transformación (**T**) entre una situación actual y la situación modificada. Como existen diferentes percepciones, entonces

existirán diferentes transformaciones, cada una de las cuales estará relacionada con una cosmovisión particular. La figura 5.28 muestra cómo una universidad puede ser conceptualada de diferentes maneras, de acuerdo con diferentes puntos de vista (W).

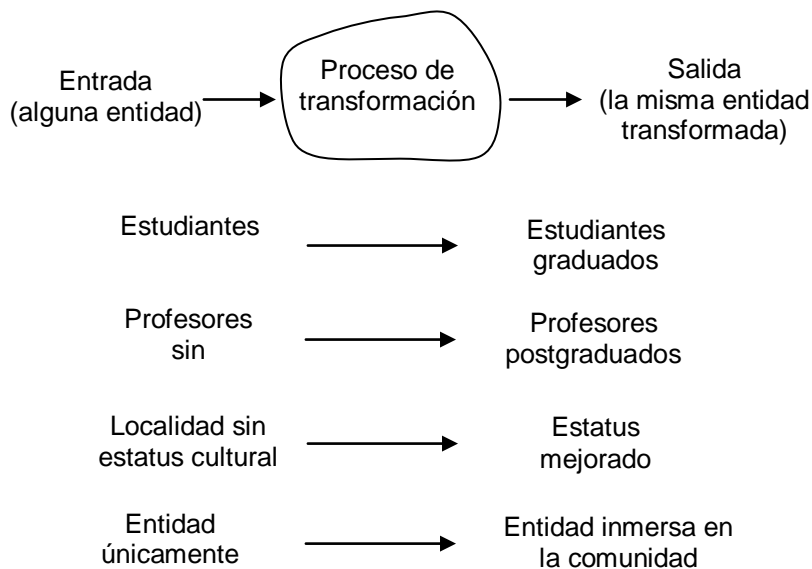


fig. 5.28

Sin estas diferentes cosmovisiones, cualquier estudio de la universidad de nuestro ejemplo no puede ser sino parcial. Esta es una excelente manera de destacar las diferentes percepciones. Es importante hacer notar que tanto en la entrada como en la salida debemos referirnos a *la misma entidad*. No sirve, para el desarrollo del modelo mediante el cual vamos a concebir nuestro “sistema problemático”, una transformación del tipo: profesores sin postgrado → nivel educativo mejorado, o algo por el estilo. La entidad *profesor* debe estar en ambos lados de la transformación. Por otro parte, la transformación no puede incluir acciones; no se deben incluir verbos sino entidades (sustantivos).

El proceso de elaborar una definición raíz debe ampliarse mediante una frase que elabore el corazón de la transformación. Para ello se ha

desarrollado la fórmula CATWOE. La figura 5.29 explica en qué consiste.

C: Consumidores.	Las víctimas o beneficiarios de T .
A: Actores	Aquellos quienes ejecutarán T .
T: Proceso de transformación.	Conversión de la entrada en salida.
W: Weltanschauung.	La cosmovisión que le da contexto a T .
O: Dueño (owner).	Quien(es) puede(n) detener T .
E: Restricciones ambientales. (environment)	Elementos externos al sistema que se aceptan como dados.

fig. 5.29

Los elementos centrales son **T** y **W**. Cualquier actividad con propósito siempre tendrá diferentes transformaciones que la pueden expresar, derivadas de diferentes **W** (fig. 5.27).

Estos mismos elementos los encontramos en la figura 5.24. Si una definición raíz los posee debe ser, preferiblemente, en forma explícita; de otra manera su exclusión debe darse de manera conciente. Bajo estas condiciones, podemos pensar que “técnicamente” está bien elaborada y es una opción aceptable para definir el todo con propósito que vamos a modelar. Sin embargo esto no garantiza que sea una definición raíz “buena” o “correcta”. El veredicto final lo darán los resultados favorables o no que de ella se obtengan.

Un patrón sencillo para una definición raíz es: *un sistema que hace X*, siendo *X* un *proceso de transformación* particular. Es decir, *X* es **T** desarrollada. Hasta aquí tenemos el *QUÉ*. La forma de llevar a cabo el proceso queda a libre decisión. Pero es conveniente limitar desde el principio el sistema a un *CÓMO* particular. Aquí la definición raíz toma la forma: *un sistema que hace X mediante Y*. Como es necesario identificar **O**, la definición raíz puede tomar la forma completa: *un sistema que hace X mediante Y para lograr Z*. Entonces **T** son los medios *Y*; *Z* tendrá que ver con las intenciones a largo plazo de **O**, debiendo existir una relación lógica que haga que *Y* sea el medio apropiado para lograr *X*.

La elaboración del *modelo* se deriva de la definición raíz. Ella es la fuente de los holones con propósito (de los sistemas de la actividad humana). El asunto ahora es proponer el mínimo de actividades (verbos) que son necesarias para lograr el proceso de transformación a la luz de los elementos del CATWOE. Estas actividades (que son subsistemas con propósito) deben interrelacionarse lógicamente, de tal manera que destaquen la necesidad que una tiene con respecto a otra u otras.

Tomemos como definición raíz la siguiente:

Se busca desarrollar un procedimiento que permita a los profesores de planta de la Universidad, que no tengan estudios de postgrado, adquirirlos en universidades del país o del exterior. Los estudios deberán tener relación directa con el área de desempeño del docente y se regirán por los reglamentos existentes en la Institución.

Desde un punto de vista técnico tenemos el siguiente análisis:

- C:** El profesor seleccionado, estudiantes.
- A:** El mismo profesor. La universidad escogida.
- T:** Profesor con postgrado.
- W:** Mejorar el nivel académico de la institución (es lo que se espera).
- O:** El profesor, la universidad.
- E:** La situación financiera de la universidad. Los reglamentos.
La aceptación de la otra universidad.

Para elaborar el modelo se ha encontrado que es muy útil describir pictóricamente la definición raíz. Esta fase es altamente creativa y permite expresar muchas situaciones que de otra forma serían difíciles de exteriorizar. Como un ejemplo muy simple, la representación de la figura 5.30 podría reflejar la transformación. La universidad ha escogido la perspectiva del profesor para diseñar un procedimiento que tenga en cuenta su situación. Pudo, perfectamente haber escogido un aspecto eminentemente técnico o financiero y en cada caso, la transformación sería dibujada de manera completamente distinta.

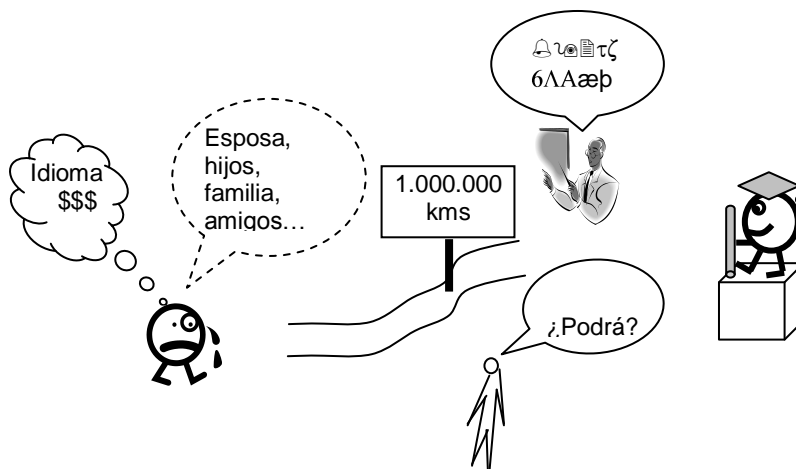


fig. 5.30

Las siguientes son algunas actividades que surgen como relevantes para lograr esta transformación: escoger la universidad y el programa, dejar su situación familiar y económica resuelta, estudiar previamente el idioma si no lo conoce, estar seguro de no tener impedimentos con la universidad (cumplir con el reglamento respectivo), asegurarse de que no existe sobreoferta en el área escogida. Esto puede generar un modelo que resuma las actividades que deben cumplirse para lograr la transformación deseada, como el de la figura 5.31.

Este modelo indica que la primera actividad importante es la de comprobar si realmente el programa de estudio propuesto por el docente debe llevarse a cabo o no, para evitar la duplicación de esfuerzos, o lo innecesario del estudio. Cumplido el requisito, se solicita al respectivo consejo la aprobación. Una vez que el consejo dé el visto bueno, se inicia una fase de ayuda para resolverle al docente los problemas administrativos que tenga pendiente. A su vez, se le facilita una dirección y un acceso de correo electrónico y se lo capacita en caso de que sea necesario. Simultáneamente se lleva la propuesta a los estamentos de orden superior. El profesor podrá iniciar sus estudios cuando se hayan cumplido las actividades anteriores.

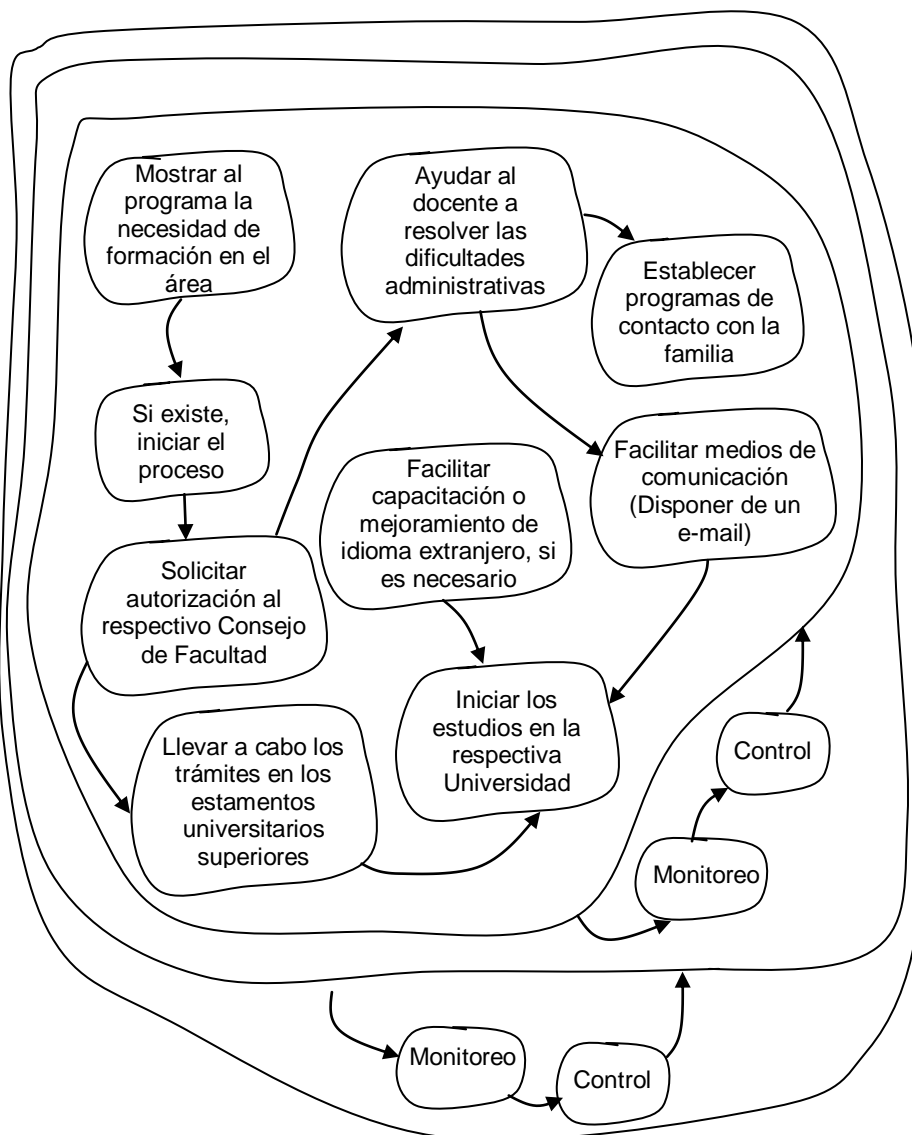


fig. 5.31

El anterior modelo puede perfeccionarse, pues se necesita mucha discusión y revisión de la situación para proponer algo realmente

efectivo. Sin embargo, él destaca, de un lado, la importancia de establecer secuencias lógicas entre las actividades, lo que no siempre es fácil de establecer. Por otro lado, da una visión global de la situación a tratar. Las partes han sido definidas a partir del todo.

Se deben incluir aspectos de monitoreo y control. Se trata de mantener una información y un control continuos del proceso descrito por el modelo.

Se habla de las tres “E” necesarias para tal fin: Eficiencia, Eficacia y Efectividad. La *eficacia* mide si los subsistemas están haciendo lo que se espera que hagan. La *eficiencia* es una medida de cómo los recursos escasos están siendo bien administrados. En términos técnicos, es la proporción entre la cantidad de salida dividida por la cantidad de recursos utilizados. Estas dos medidas se utilizan para fines a corto y mediano plazo. Para medir el sistema como un todo se usa la *efectividad*: nos indica si el sistema está cumpliendo la transformación (T) a largo plazo.

En nuestro ejemplo, el proceso administrativo debe llevar un control al respecto. Así, la eficiencia puede medirse en términos del tiempo que se espera para obtener el grado; la eficacia, observando si los estudios que se están realizando concuerdan con las necesidades planteadas. La efectividad se podrá valorar, si después de varias aplicaciones del procedimiento, los resultados son los esperados, cumpliendo con los indicadores de eficiencia y eficacia.

El modelo debe ahora confrontarse cuidadosamente con la definición raíz y, particularmente, con el CATWOE. Este procedimiento es necesario para que el siguiente paso pueda llevarse a cabo con seguridad y confianza.

Comparación del modelo con la realidad percibida. El modelo sirve de base para establecer una comparación entre él y el mundo real. De esta confrontación surgirán los cambios que deben realizarse para mejorar la situación problemática. Una buena idea es definir una matriz que permita realizar tal comparación. La figura 5.32 es una forma de hacerla.

De un posible debate surgirán asuntos como: entre los procedimientos de la universidad ¿se solicita actualmente un estudio serio sobre la necesidad del programa de postgrado propuesto? Si no es así ¿por qué? ¿Debe hacerse? ¿Cómo? ¿Se tiene en cuenta a la familia? Si no ¿por qué? ¿Sería conveniente?

Actividad	¿Existe o no en la realidad?	¿Cómo se hace?	¿Cómo se juzga?	Comentarios
1. ----- 2. ----- 3. ----- 			Criterios y juicios actuales	Nuevos "Qué". "Cómo" alternativos etc. (Ideas para el cambio)
Conexiones 1 → 2 2,3 → 4 ..				

fig. 5.32

De todo lo anterior surge un cuadro para proponer acciones concretas: los cambios que deben mejorar la situación problemática actual. Pero lo dicho hasta ahora no es suficiente para que ellos sean realmente cambios fundamentales. Esta parte nos asegura, hasta cierto punto, que los cambios son *sistémicamente deseables*. Pero ¿serán aceptados sin dificultad? El estudio de la otra corriente nos dará la respuesta.

5.4.5 La corriente de investigación basada en la cultura. Checkland destaca que así como los hechos y la lógica juegan un papel importante en los asuntos humanos, el sentido que tengamos de ellos

tiene igual trascendencia. Este aspecto surge de los *mitos y significados* que las personas atribuyen a sus prejuicios y dificultades tanto profesionales como personales con sus semejantes. En nuestro ejemplo no se incluyó la importancia que puede tener un posible fracaso en el futuro, aunque en el dibujo de la transformación sí fue tenido en cuenta. ¿Acaso cuenta la aceptación que tenga la comunidad académica de cierto tipo de universidades?

Visión enriquecida. Se trata ahora de ilustrar gráficamente toda la situación problemática incluyendo las relaciones entre los diferentes componentes del sistema tratando de descubrir los mitos, creencias y significados explícitos e implícitos que surgen de tales relaciones. En cierta forma, la figura 5.30 es un inicio de una visión enriquecida. Podemos ampliarla ilustrando las tensiones entre los diferentes elementos del proceso, así como añadiendo nuevos elementos que permitan formarnos una idea, ya no sólo de la transformación, sino de la definición raíz como tal.

Análisis de la intervención (o análisis de los roles). La intervención misma es una situación problemática. Para analizarla se ha encontrado que debe mirarse desde tres roles distintos: *cliente, solucionador*¹¹⁴ y *dueño*.

El papel “cliente” es el de la persona o personas que fueron la causa de que el estudio se llevara a cabo. La pregunta de base es ¿quién(es) tiene(n) el papel del cliente? Es necesario tener en cuenta *las razones* que originaron la iniciación de la intervención (el estudio) aunque no de manera dominante.

El papel “posible(s) solucionador(es)” es el de quien o quienes tienen a su cargo el control del proceso (la aplicación de la metodología) y la ejecución del mismo. Aquí interesa tener presente *las percepciones, el conocimiento y la capacidad de conseguir recursos*.

El papel “dueño” es *decidido* por el “solucionador”. No hay nadie que sea intrínsecamente el dueño. Puede estar en la lista de los clientes o de los solucionadores. A este respecto puede ser de mucha utilidad el siguiente análisis.

Debemos identificar el *área* –el sistema– que contiene al problema (Problem Content Systems o PCS) y el “sistema que resuelve el

¹¹⁴ Es un neologismo.

problema” (Problem Solving System o PSS). El PSS es un equipo. Para delimitar el PCS se ha propuesto la fórmula SOCCER, cuyo significado es el siguiente:

- S: solucionadores. Quienes pueden resolver el problema.
- O: (Owner) el dueño. La persona o entidad que se considera responsable de la situación.
- CC: cultura y costumbres inmersas en la situación problemática.
- E: (Environment) el ambiente en el cual se desarrolla el sistema.
- R: recursos. Los que dispone el sistema.

Cada uno de estos factores debe ser considerado y manejado por el PSS. Los que no puedan serlo, no podrán formar parte del PCS.

Si hacemos del “solucionador” un posible “dueño”, el primer sistema relevante que aparece es “el sistema para hacer el estudio”. El PSS se vuelve una parte del PCS. Esto explica la fórmula del SOCCER. Pero, obviamente, hay otras posibilidades de encontrar “dueños”. Por eso este aspecto es tan trascendental, y se conoce como *Análisis uno*.

La escogencia de posibles dueños es un trabajo de imaginación, obviamente soportado por un buen conocimiento de la situación a estudiar. En el caso de la universidad y en la parte específica del envío de profesores a estudios de postgrado, podemos proponer como dueños: el profesor mismo (si el cliente es el mismo profesor), el programa al que pertenece (si quien propuso el estudio es una facultad o departamento al cual pertenece el programa), la universidad (si el cliente es la universidad que está interesada directamente en la escogencia de los candidatos), el rector (si el estudio fue originado por algún interés del representante legal de la Institución), el Ministerio de Educación (si es una orden del alto gobierno para que las universidades lleven a cabo programas agresivos al respecto, y la autonomía no sea tenida en cuenta), etc.

La dificultad real se encuentra en el uso del lenguaje. Recordando el capítulo 1, la depuración del lenguaje de las ciencias sociales está por realizarse.

Debido a que los términos técnicos de cualquier enfoque específico utilizan palabras que tienen sentido en el uso cotidiano (en la SSM los términos

técnicos incluyen “cliente”, “solucionador de problemas”, “dueño del problema”, “sistema relevante”, “comparación”, etc.), es importante, al utilizar el enfoque, manejar su lenguaje con un especial y cuidadoso rigor. La vida es más fácil para los científicos de la naturaleza. Pueden hablar del “spin Hamiltoniano” y de “coeficientes de difusión” y saber que no son mal interpretados¹¹⁵.

Análisis del “Sistema Social”. Nuevas concepciones irán enriqueciendo el dibujo de la definición raíz y nuevos “solucionadores” y “dueños” harán su aparición a medida que el Análisis Uno se vaya utilizado. Igual situación se presenta en el análisis del sistema desde una perspectiva social. Para esta fase, se ha encontrado que es muy útil considerar a un “sistema social” como un continuo cambio entre las relaciones de tres elementos: roles, normas y valores. Cada una de ellas redefine y es redefinida por las otras dos. La figura 5.33 da una idea de este modelo.

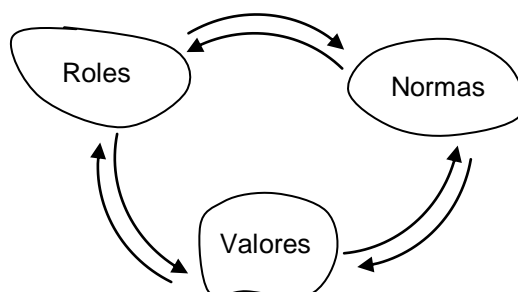


fig. 5.33

Un *rol* es una posición social reconocida como de importancia por la gente en la situación problemática. La posición puede ser institucional (“investigador”, “jefe de almacén”, “estudiante”) o de comportamiento (“tramitador” (gestor), “agente de bolsa”, “político”). Las *normas* son los comportamientos esperados cuando se está en un papel determinado. Hay normas que debe seguir un profesor, y otras que debe seguir un estudiante. Las actitudes que tengamos cuando efectuamos un rol son juzgadas de acuerdo con ciertos estándares llamados *valores*. Se juzga

¹¹⁵ Checkland and Scholes, *Op. cit.* Pg. 48.

de manera diferente al profesor y al estudiante; los valores asociados son distintos, aunque existen valores generales que rigen por igual cualquier desempeño.

Así, en algunas universidades los roles más reconocidos son de tipo profesional, como por ejemplo la suficiencia investigativa; en otras, lo que prevalece son los roles relacionados con la conducta como ciudadano o la capacidad de transmitir el conocimiento vigente. Este tipo de consideraciones permite enmarcar la situación problemática (al sistema que la define) dentro de ciertos contextos lo cual facilita enormemente su estudio. Lo anterior se conoce con el nombre de *Análisis dos*. Se diferencia del Análisis uno en que el conocimiento adquirido no se logra a través de preguntas directas. Durante este análisis debemos conocer continuamente (ya sea en cada conversación, reunión, lectura de documentos etc.) los roles, normas y valores que nos permitan extractar un conocimiento mejor de la situación problemática.

Análisis del "sistema político". Se conoce como el *Análisis Tres*. Se parte de la base de que cualquier situación humana tiene una dimensión política que debe ser tomada en cuenta durante el estudio de la situación problemática. También se utiliza un modelo como en el Análisis Uno y Dos. El término *política* se toma aquí como "el arte de lograr acuerdos entre desacuerdos". Es la manera como se puedan lograr "acomodaciones" de diversos intereses. Estas acomodaciones descansan en la distribución del poder. Podríamos redefinir la política como la *actividad relacionada con el poder cuyo interés es manejar las relaciones entre intereses diferentes*.

No existe actividad humana que esté exenta del aspecto político. Aún los estudios académicos más científicos no escapan a este hecho. Son bien conocidas las implicaciones políticas de las investigaciones que se realizan aún dentro de la ciencia pura. De hecho, si se consideran sólo los aspectos económicos, la mera distribución de un presupuesto ya es un asunto político.

El modelo que nos puede ayudar aquí es el de preguntarnos *cómo el poder se manifiesta* en la situación estudiada.

¿Cuáles son las encarnaciones del poder? ¿Cómo se expresa el poder cuando se llegan a cierto tipo de acuerdos (acomodaciones)? ¿Cómo se

logran estos acuerdos, cómo se usan, se protegen, se preservan, se transmiten, se abandonan? ¿Cuáles son los mecanismos? ¹¹⁶

Algunas de las encarnaciones de poder que han sido descubiertas a través del uso de la metodología son: autoridad oficial (basada en los roles), autoridad intelectual, pertenencia o no a ciertos grupos, autoridad profesional, acceso a cierto tipo de información, carisma personal, etc.

El Análisis Tres es especialmente delicado debido a que pueden ponerse en evidencia debilidades que de ser conocidas, afectarían seriamente al sistema en lugar de mejorar la situación actual y, a su vez, podrían convertirse en nuevas manifestaciones de poder. Como afirman los autores, no se trata de una metodología maquiavélica para darle concejo al “príncipe” de cómo dividir y reinar.

Los tres Análisis permiten enriquecer la visión de la situación problemática; permiten también identificar sistemas relevantes, nombrarlos, así como reconocer las interrelaciones existentes entre ellos lo cual facilita el proceso de modelado. Siempre debemos tener en cuenta que esta corriente debe interactuar continuamente con la corriente lógica. De alguna manera esto se hizo evidente cuando se trató de dibujar la transformación (figura 5.29). Pero el proceso debe llevarse mucho más allá de los simples hechos de evidencia inmediata.

Cambios factibles y deseables. Hemos resaltado continuamente que la idea final es lograr modificaciones que mejoren la situación problemática en estudio. Las dos corrientes convergen en un debate, del cual se esperan acuerdos sobre este punto.

A menudo es necesario utilizar la metodología para desarrollar los procedimientos de cambio.

La implantación es, naturalmente, una “situación problemática” en sí, y es común utilizar la SSM para enfrentarla. Podemos conceptualizar y modelar sistemas para implantar los cambios y hacerlo teniendo en cuenta diferentes *Weltanschauungen* relevantes. Finalmente podemos precisar “un sistema para realizar cambios” cuyas actividades se conviertan en

¹¹⁶ Checkland and Scholes, *Op. cit.*, pg. 51.

acciones del mundo real. Podemos empezar a realizar las actividades de este modelo final, en la situación del mundo real.¹¹⁷

Los cambios deben ser sistémicamente deseables y culturalmente factibles. Recordando la presentación de la metodología de las siete fases, en la fase 4 se indicaba que un modelo (originado en la definición raíz) no puede ser ni la copia al carbón de la situación actual, ni tampoco un ideal, el fruto de un vuelo libre de la imaginación. El modelo debe destacar diferencias entre lo propuesto y la realidad. Si el modelo describe la situación actual, no habrá diferencias que resaltar. Si por el contrario, propone ideas irrealizables, no tendrá ninguna utilidad práctica. La corriente lógica garantiza que los cambios a proponer sean sistémicamente deseables, es decir, que desde el punto de vista lógico, el modelo responda a una secuencia razonable de acciones que deben conducir, necesariamente, a mejorar la situación problemática. Por otro lado, si se han tenido en cuenta los mitos, creencias y significados que tienen las personas relacionadas con el sistema, los cambios propuestos no deberán reñir con la cultura imperante; serán culturalmente factibles.

Nada peor que proponer cambios que sean sistémicamente *factibles* y culturalmente *deseables*. Esta inversión, más común de lo que podamos creer, es la causa del fracaso de muchos proyectos. No es el hombre de sistemas, ni quienes administran el sistema, los llamados a decidir qué es lo mejor para una comunidad. Tal vez nos parezcan extraños ciertos tipos de comportamientos y ciertos gustos. Pero si estos forman parte de la cultura, *si tienen sentido* (significado), debemos respetarlos y aceptarlos.

Muchas personas usan la metodología libremente perdiendo de vista su verdadero sentido; la vuelven “dura” al no respetar con fidelidad las ideas y observaciones expresadas anteriormente.

La metodología debe utilizar un proceso cíclico de aprendizaje con el uso de modelos de sistemas dentro de ese proceso; es adaptativo. Aunque en las organizaciones hay diferentes evaluaciones de las situaciones que se presentan, dichas evaluaciones deben coincidir en algunos puntos pues, de lo contrario, la organización no podría existir. Y

¹¹⁷ Checkland and Scholes, *Op. cit.*, Pg. 52.

es a partir de aquí en donde deben iniciarse los acuerdos (“las acomodaciones”).

Corriendo el riesgo de simplificar diremos, en una apretada enumeración, que la metodología desarrolla las siguientes actividades (no necesariamente en un orden preestablecido):

- Hallar una situación de “inconformidad”.
- Seleccionar algunos sistemas de actividad humana relacionados con la situación.
- Elaborar modelos de estos sistemas.
- Usar los modelos para contrastar la situación real.
- Usar el debate iniciado en la comparación para definir acciones con propósito que alivien la inconformidad.
- Tomar las acciones que modifiquen la situación... Y el ciclo comenzará de nuevo.

CAPÍTULO 6

CRÍTICAS A LA TEORÍA DE SISTEMAS LA DINÁMICA DE SISTEMAS EN LOS SISTEMAS BLANDOS: UNA RESPUESTA

6.0 Introducción. En el esquema que hemos trazado y que va desde los conceptos básicos de la ciencia hasta la aplicación práctica del enfoque de sistemas, nos hemos encontrado continuamente con dificultades que de una u otra forma hemos tratado de explicar someramente o, por qué no decirlo, ignorar. Este trabajo quedaría incompleto si no incluyera de alguna manera un resumen de las principales críticas hechas al movimiento sistémico. Hemos adicionado, por razones que el lector comprenderá más tarde, el enfoque metodológico de Peter Senge, que hemos denominado *dinámica de sistemas, en los sistemas blandos*.

Hay que admitir que no es fácil, para alguien que cree en esta manera de ver el mundo, hacer de abogado del diablo, sobre todo cuando existe la posibilidad de que el resultado final no sea precisamente una canonización. Pero tratar de lograr un cierto grado de honestidad intelectual es una tarea que debe estar por encima de tales sentimientos y temores.

6.1 Las críticas de D.C. Phillips. D.C. Phillips¹¹⁸ hace una serie de reparos muy interesantes a la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy y que son válidas para la teoría en general. Este autor centra sus juicios en cuatro aspectos primordiales:

- Crítica a la filosofía de sistemas.
- Crítica a la imprecisión del concepto de “sistema”.
- Crítica a la debilidad de los ataques al reduccionismo y al mecanicismo.
- Crítica al carácter dudosamente científico de la teoría.

¹¹⁸ Cfr. D.C. Phillips: *Systems theory. A discredited Philosophy*. En Schoderbek (recopilador).

Veamos de qué trata cada una de ellas.

6.1.1 Crítica a la filosofía de sistemas. Estas críticas incluyen aspectos relacionados con la identificación de los elementos o partes de los sistemas, la jerarquización de los mismos, la propiedad emergente y las relaciones entre el todo y las partes.

Cuando los teóricos de los sistemas aseguran que *el todo determina la naturaleza de las partes*, se presenta la siguiente contradicción. Si la realidad se considera como un sistema cuyas partes están interrelacionadas orgánica o internamente, ésta no podrá ser subdividida en partes. En términos de la teoría de las relaciones de Hegel, podríamos decir que cuando *A* entra en relación con *B* y *C*, gana cierta propiedad *P* como resultado de las interrelaciones. Sin las interrelaciones, sin *P*, *A* no es *A* y podría incluso ser *no-A*. Un elemento podría ser pues, a su vez, su contrario.

Usando el concepto de "naturaleza" de una entidad, este argumento tiene aparentemente fuerza. Pero a la luz de la terminología de mediados del presente siglo, Phillips advierte que perdió poder. Aquí el énfasis en la naturaleza de las entidades es reemplazado por el énfasis en las *características definidoras y acompañantes*. Toda entidad tiene un enorme número de características; aquellas sin las cuales la entidad no pudiera designarse como tal, son las definidoras; las otras son las acompañantes: su presencia o ausencia no establece diferencia para el uso del término. Entonces, al relacionarse *A* con *B* o *C* puede adquirir características, no necesariamente definidoras, y por lo tanto seguir siendo *A*.

Respecto a la jerarquización de los sistemas, y como lo indicamos en su momento, ella presenta serias dificultades para explicar la forma como podemos adquirir cierto conocimiento de las cosas. Si se sigue este principio, nos vemos abocados a la paradoja de no poder conocer ninguna entidad. Así, para conocer *A* es necesario conocer todas las relaciones de *A*: conocer el todo antes que *A*. Parfraseando a B. Russell: *si todo el conocimiento consistiera en el conocimiento del universo entero, no habría conocimiento*.

En la teoría de sistemas el aforismo *el todo es mayor que la suma de sus partes*, resume lo que la teoría sostiene. En esencia estamos hablando de la propiedad de la emergencia de los sistemas. Cuando

discutimos el tema, observábamos cómo los sistemas presentan la interesante característica de tener comportamientos que ninguna de sus partes posee. Phillips anota que en esta afirmación, el concepto de *suma* debe aclararse; es necesario especificar en el aforismo, el tipo de operación a la que nos estamos refiriendo. En la matemática existe la suma aritmética, algebraica, matricial. Sería posible entonces, al menos en teoría, definir “sumas” que reflejen la característica de la emergencia. Pero esta opción no resolvería el problema ya que las dificultades que se presentan son de tipo lógico: al insistir que debemos definir primero el todo para luego definir sus partes, forzosamente debemos aceptar que el *todo* se autodetermina o autodefine. Como las partes son partes del todo, el todo se determina a sí mismo y ellas no intervienen en la explicación.

La crítica en este aspecto sostiene que la emergencia viola un principio lógico en el cual descansa gran parte del desarrollo del conocimiento científico: el silogismo; recordemos que éste nos dice que una conclusión no puede tener elementos que no estén contenidos en sus premisas. Así, en el caso de la formación del agua, compuesta por hidrógeno y oxígeno, sus propiedades –líquido inodoro, incoloro, insípido– no pueden ser deducidas de las que tienen, de manera aislada, los dos gases que la componen y que son muy diferentes a las del agua. Conclusión: el agua tiene propiedades que sus componentes no poseen. Si la ciencia tradicional no puede dar una explicación, tampoco la está ofreciendo la teoría de sistemas. Y es muy probable que en un futuro se puedan encontrar propiedades aún desconocidas de la materia, que permitan deducir cómo un líquido se puede formar a partir de dos gases.

Con respecto a estos argumentos, podemos decir lo siguiente. Que el todo defina las partes (y no al contrario) no podría explicarse mediante un procedimiento deductivo, por la misma naturaleza de la afirmación. Si bien el silogismo es la forma correcta de pensar “mecanicistamente” no es posible aplicar la misma fórmula a los sistemas. En la aplicación del enfoque de sistemas a problemas reales, es muy claro que la representación como sistema de una situación compleja es un proceso de “estructuración mental”; nos imaginamos la situación como un sistema, como un todo, y a partir de allí, iniciamos un proceso de reconocimiento de una estructura (un modelo) que pueda permitirnos

comprender el todo. Esto es necesario por razones ya explicadas: no podemos manejar la globalidad y necesitamos subdividirla en partes. El asunto es cómo hacerlo sin producir un daño mayor a la comprensión del todo. No es la explicación del sistema la que inicialmente interesa. Es su estructuración. Posteriormente estas partes, por fuerza, “explicarán” el todo.

Respecto a la jerarquización ya se hizo cierta aclaración ayudándonos del concepto de “cuasi-descomponibilidad sistémica”, pero queda pendiente el asunto relacionado con los sistemas extremos: el gran sistema que los contiene a todos, y el subsistema último, que no contiene ninguno; así, ellos no podrían ser sistemas por no ser jerárquicos. La cita completa de la página 85, dice al respecto:

Si el comportamiento de un sistema debe explicarse con referencia al sistema que lo contiene (suprasistema) ¿cómo debe explicarse el comportamiento del suprasistema? La respuesta es obvia: con referencia a un sistema más inclusivo, uno que contenga al suprasistema. Surge entonces la pregunta fundamental: ¿tiene fin este proceso de expansión? Recuérdese que cuando se planteó la pregunta correspondiente a la Era de la máquina –¿tiene fin el proceso de reducción?–, la respuesta estuvo dictada por la creencia de que, al menos en principio, era posible la comprensión completa de universo. En la primera parte del siglo XX, sin embargo, esta creencia fue destrozada por dilemas como el que formuló Heisemberg. Como resultado, hemos llegado a creer que la comprensión completa de cualquier objeto, dejando de lado la de todos los objetos, es un *ideal* al que uno puede aproximarse continuamente pero que *nunca puede ser alcanzado*. Por lo tanto, no hay ninguna necesidad de suponer la existencia de un todo último que si es entendido produciría la respuesta última.¹¹⁹

Por su parte, sobre la propiedad emergente de los sistemas, la visión moderna nos muestra cómo, cuando los elementos de un sistema interactúan en forma no lineal, aparecen patrones de conducta sorprendentes. Así, a partir del caos, podemos obtener sistemas altamente organizados. La teoría de la complejidad ha arrojado mucha luz al respecto. Recordemos lo que dijimos al respecto en el capítulo 3.

¹¹⁹ R.L Ackoff: *El paradigma de Ackoff...* Op. cit. Pg. 20.

6.1.2 crítica a la imprecisión del concepto de “sistema”. Phillips destaca cómo la definición de lo que debe entenderse por "sistema", aunque es planteada sistemáticamente por los tratadistas del tema, no ha sufrido ningún avance notable y sigue sufriendo de los mismos defectos. Cita entonces a Haldane, quien en 1884 sostenía:

Estas partes (del organismo) permanecen una con otra y con el ambiente, no en una relación de causa y efecto, sino en una de reciprocidad. Las partes de un organismo y su ambiente forman pues, un sistema, y cualquiera de sus partes constantemente actúa sobre el resto, pero sólo lo hace "qua" parte del sistema, en la medida en que él, al mismo tiempo, actúa sobre ella.¹²⁰

La lectura de cualquier autor moderno sobre Sistemas, nos mostrará que no ha habido un cambio sustancial en la concepción de Haldane.

Uno de los defectos de que adolece la definición de "sistema" (conjunto de partes interrelacionadas) es la de no aclarar cómo se puede delimitar el sistema que se desea estudiar. En efecto, tal delimitación es fundamental, pues de otra manera tendríamos que estudiar el universo entero cada vez que quisiéramos estudiar un sistema en particular, ya que, de alguna manera, todo esta relacionado con todo.

Algunos autores (Hall y Fagen; Beishon etc) proponen que quien estudie un problema, seleccione aquellas entidades que son relevantes al mismo y llamen a tales entidades "el sistema". Esto parece ser una situación desesperada y ampliamente violatoria de los principios de los sistemas. Para empezar, el teórico únicamente podrá considerar entidades relevantes si tiene algunos principios de selección o criterios específicos y esto sólo es posible si ya se ha hecho considerable investigación para el problema particular que él estudia: "la investigación deberá encontrarse en niveles tan adelantados que ya sea posible decir que las entidades *a*, *b* y *c* son importantes, pero que *d*, *e* y *f* no lo son", afirma Phillips. Además, este conocimiento debe haber sido alcanzado sin el uso de métodos de sistemas, ya que lo que se busca es definir el sistema al cual se le va a aplicar la teoría de sistemas. Parece ser que el

¹²⁰ Particularmente en Schoderbek, *Op. cit.* Pg. 59.

criticado reduccionismo es el método a usar para poder llegar a un nivel de investigación suficiente que permita definir el sistema.

Ahora bien, con seleccionar (definir) el sistema, no terminan sus problemas. Debe ahora demostrar que al aislar este sistema de las otras partes con las cuales está normalmente interrelacionado, no ha introducido cambios en él. Y caemos de nuevo en el asunto de *A* y *no-A* discutido anteriormente.

La crítica a la definición del concepto de "sistema", tal y como se indicó anteriormente, es una espada de Democles que pende continuamente sobre los especialistas del tema. Y si bien en la práctica ha sido posible evitar las dificultades que el término encierra, especialmente mediante la idea de cuasi-descomponibilidad de los sistemas en los aspectos filosóficos y teóricos, tal dificultad está siempre latente. Queda, sin embargo la posibilidad, presentada en este texto, de considerar el *sistema* como un concepto no definido, a la manera como se hace en el campo de la matemática (recordemos el concepto de punto, línea, conjunto y, en física, de tiempo y espacio).

6.1.3 Crítica a la debilidad de los ataques al reduccionismo.

Puede decirse sin temor a estar equivocados, que la piedra angular de la discusión entre los enfoques sistémicos y analistas (mecanicistas) es la propiedad de la emergencia. Ya hemos hecho referencia a ella cuando hablamos de la formación del agua.

Hasta este punto, gran parte de los razonamientos expuestos por la crítica se basan en el uso de una lógica bivalente y del principio de causalidad. Un buen contra-ejemplo sería criticar una teoría en la cual un elemento pudiera pertenecer a un conjunto y a su "contrario", simultáneamente. Aunque no podríamos aceptar esta situación desde el punto de vista de la lógica clásica, es perfectamente posible a la luz de los conjuntos difusos, tal como lo vimos en el capítulo 3.

6.1.4 Crítica al Carácter científico de la Teoría de Sistemas. Nos referimos aquí, como teoría de sistemas, a todas aquellas teorías que se basan en un enfoque globalista (sistémico) para desarrollar sus metodologías y técnicas. Un caso particular es la teoría general de sistemas de Bertalanffy.

Hemos dicho que la capacidad de predicción es una característica fundamental de cualquier teoría científica. Toda teoría que se precie de científica debe, pues, predecir eventos que sean observables posteriormente. A este respecto, Popper hace la siguiente anotación al referirse a las doctrinas de Marx, Freud y Adler:

Encuentro que aquellos de mis amigos que eran admiradores de Marx, Freud y Adler, fueron impresionados por un número de puntos comunes a estas teorías, y especialmente por su aparente *poder explicatorio*. Estas teorías aparentaban ser capaces de explicar prácticamente cualquier cosa que ocurriera dentro de los campos a los cuales ellas se referían... Una vez que sus ojos eran abiertos se veían confirmaciones en todas partes: el mundo estaba lleno de verificaciones de la teoría. Todo lo que ocurría la confirmaba... Fue precisamente este hecho –el que siempre encajaban, el que siempre eran confirmadas– lo que a los ojos de sus admiradores constituía el argumento más fuerte en favor de estas teorías. Y empezó a manifestármeme que esta aparente fuerza era de hecho su debilidad.¹²¹

De la misma manera que Popper, Phillips concluye que se puede asegurar que la teoría de sistemas no ha hecho ninguna predicción notable respecto a los sistemas complejos que ella explica o maneja. De hecho, es una teoría que no se compromete.

Debemos reconocer que en la fecha en la cual este autor escribió sus críticas, el pensamiento sistémico estaba atravesando una gran crisis. Los modelos formales eran eminentemente teóricos y las tendencias se centraban en las metodologías. Pero los desarrollos a partir de 1980, tanto teóricos como prácticos, han desestimado esta posición.

6.2 Las críticas de Gall.¹²² En 1975 John Gall publicó un libro que llamó: "Systemantics" (de Systems: sistema y Antics: travesuras). Aunque el libro fue escrito en un tono ampliamente humorístico, no por ello deja de tener un profundo contenido en sus críticas.

El presente trabajo ha sido desarrollado en un tono eminentemente académico. Por esto, parecería poco pertinente referenciar algunos de los conceptos que Gall presenta en su interesante obra, a la manera

¹²¹ K. Popper: *Conjectures and Refutations*, en Schoderbek, *Op. cit.* Pg. 63.

¹²² Cfr. J. Gall: *Systemantics*. Ver bibliografía.

como él lo hace. Espero que el lector sepa aquilatar el verdadero contexto que se esconde detrás de sus finas y mordaces críticas. La inclusión, muy resumida, de algunas partes de su libro, obedece a dos razones: primero, nos muestra cómo en temas de mucha dificultad, abandonar el estilo académico permite tocar puntos que de otra manera sería difícil considerar. Un excelente ejemplo, aparte del libro de Gall, es el *Principio de Peter*¹²³. En segundo lugar, a través de las críticas del profesor Gal1 es posible adquirir un conocimiento de los sistemas desde una perspectiva práctica.

"Alea Jacta est".

6.2.1 La sistemática y sus teoremas sistémicos.

Escenario básico de la teoría:

Los sistemas en general trabajan poco o no trabajan.

Una forma alternativa:

Nada complicado funciona.

Dado que ésta es la base de la teoría, aquí no daremos ejemplos concretos: todos los ejemplos que siguen serán confirmaciones de la anterior premisa.

El teorema fundamental: *Nuevos sistemas generan nuevos problemas,*

Corolario (la navaja de Occam): *Los sistemas no deben ser multiplicados innecesariamente.*

Cuando un sistema es elaborado para cumplir alguna meta, una nueva entidad entra en acción: el sistema mismo. No importa cuál sea la "meta" del sistema; éste empieza inmediatamente a manifestar un

¹²³ Cfr. L. Peter, R. Hull : *The Peter Principle*.

comportamiento sistémico regido por leyes que gobiernan la operación de todo el sistema. Donde antes había un problema, ahora habrá infinidad de problemas asociados con la sola presencia del nuevo sistema.

Ejemplos: El bienestar de las naciones; la recolección de basuras.

Ley del crecimiento: Los sistemas tienden a crecer, y a medida que crecen, se inmiscuyen.

Forma alternativa (teorema de la explosión de la cosmología sistémica):

Los sistemas tienden a expandirse y llenar el universo conocido.

Ejemplo: Los administradores de los mayores y más sofisticados sistemas de producción en masa han iniciado el movimiento "hágalo usted mismo" con el fin de que el consumidor participe del trabajo que el sistema se supone debe hacer. El consumidor es animado a llevar a cabo su tarea porque "ahorra trabajo y gastos". Después de muchas horas y desesperación, el frustrado comprador se da cuenta de que los medios de producción en masa fueron creados con el fin primordial de hacer las cosas mejores, más rápidamente y mas económicamente.

Ejemplo: El sistema de gobierno, principalmente concebido para proteger a la gente, llega a ser, no obstante, su peor opresor.

Principio de incertidumbre generalizado: *Los sistemas complicados producen resultados inesperados.*

Formulación alternativa: *El comportamiento total de los sistemas grandes no puede ser predicho.*

Corolario: *Un sistema de gran escala, obtenido de la expansión de las dimensiones de uno pequeño, no se comporta como el sistema pequeño.*

Ejemplo: La represa de Asuán, construida con enormes gastos con el fin de mejorar las parcelas de los campesinos Egipcios, ha causado

que los sedimentos fertilizantes del Nilo se depositen en el lago Nasser de donde es irrecuperable. Los campos Egipcios deben ahora ser fertilizados artificialmente. Se han construido gigantescas plantas de fertilizantes, para llenar las nuevas necesidades. Las plantas requieren enormes cantidades de electricidad. La represa debe operar a plena capacidad para satisfacer las demandas cada vez mayores de electricidad, creadas por la construcción de la represa.

Ejemplo: (Diseño máximo: "Climax Design"): El edificio más grande del mundo, el hangar para la preparación de vehículos espaciales en cabo Kennedy genera su propio clima incluyendo nubes y lluvias. Diseñado para proteger los cohetes espaciales de los elementos, los inunda con tormentas propias.

Principio de Le Chatelier: *Los sistemas complejos tienden a oponerse a su propia función.(Retroceden).*

Ejemplo: usted realiza una investigación por su cuenta y propio interés (que puede ser oculto y no manifestable). El sistema administrativo decide que la investigación debe administrarse y crea un departamento para tal fin. Usted recibe un oficio en el cual le solicitan sus "objetivos" y "metas" respecto a la investigación con lo cual se ve forzado a inventarlos ya que un simple interés no es suficiente y es necesario reforzar sus argumentos "científicamente". El paso siguiente es claro: ahora el sistema le exigirá que cumpla con los objetivos descritos, lo cual no podrá evitar ya que fue usted mismo quién los propuso. Su investigación original se ha perdido y difícilmente podrá realizar entonces una verdadera investigación. El sistema, diseñado para aumentar la eficiencia en la investigación, retrocedió dando como resultado ineficiencia en lugar de eficiencia.

Falsedad del funcionario: *La gente en los sistemas no hace lo que el sistema dice que está haciendo.*

Ejemplos: Un rey se supone que gobierna su país. De hecho gasta mucho de su tiempo y energía (y del tesoro de su reino) luchando contra los invasores.

En los países democráticos, un presidente recién elegido puede encontrar oportuno empezar a planear su reelección inmediatamente.

La falacia operacional: *El sistema mismo no hace lo que dice que está haciendo.*

Ejemplo: La industria automovilística ¿acaso no produce carros hechos a la medida y a nuestro gusto demostrando que este axioma es falso? Realmente no. Lo que ocurre es que somos inducidos a comprar lo que ellos hacen y creemos que esos son nuestros deseos. Lo que nosotros realmente deseamos es un vehículo económico, sencillo, conveniente, seguro y rápido. Y esto no es precisamente lo que obtenemos al comprar un carro.

Ley Fundamental del trabajo administrativo: *Las cosas son aquellas que son reportadas como tales. El mundo real es lo que reporta el sistema.*

Corolario: *Para aquellos que están dentro del sistema, la realidad externa tiende a palidecer y desaparecer.*

Una forma alternativa de decir lo anterior es: *si no es oficial, no ha ocurrido.*

Ejemplo: La frase del derecho penal que reza: "el delito no existe, es creado por la ley". En otras palabras, sólo es delito aquello que como tal es contemplado en los códigos legales.

Teorema (¿Ley gravitacional de los sistemas?): *Los sistemas atraen gente de sistemas.*

Corolario: para cada sistema humano, hay un tipo de persona adaptada para desarrollarlo a expensas de él o dentro de él.

Nota: es inútil cualquier esfuerzo por eliminar a las personas parásitas del sistema. Esto llevaría a formar comités de evaluación, comités de protección etc., lo que generaría nuevos empleos en qué ocupar estas personas.

Teorema: *Entre más grande es el sistema, más estrecha y especializada es la interfase con los individuos.*

Ejemplo: En los grandes sistemas, las relaciones no son con los individuos sino con su número de cédula, su tarjeta de crédito ó algún otro fantasma de papel.

Ejemplo: En los sistemas medianos quedan algunos residuos de humanidad. En algunos hospitales se recuerda: "la tarjeta no es el paciente", lo cual es una clara demostración de lo que está realmente ocurriendo.

Teorema: *Un sistema complejo no puede ser "hecho" para trabajar. Él simplemente trabaja o no.*

Corolario (Ansiedad del administrador): *Presionar al sistema no sirve. Esto empeora las cosas.*

Ejemplos: Casi todos los anteriores.

Teorema: *Algunos sistemas actualmente trabajan.*

Corolario: *Si un sistema funciona, déjelo tranquilo.*

Teorema: *Un sistema complejo que funciona, invariablemente se encuentra que ha evolucionado de un sistema simple que funcionaba.*

Esto nos lleva a la siguiente **proposición:**

Un sistema complejo hecho desde el principio, nunca trabaja y no puede ser arreglado para que trabaje. Es necesario empezar de nuevo con un sistema sencillo que funcione.

Teorema de la indeterminancia funcional: *En un sistema complejo, el mal funcionamiento e incluso el no funcionamiento total, puede no ser detectable por largos períodos de tiempo.*

Ejemplo: Es razonable suponer que las monarquías absolutas, los déspotas orientales, y cualquier otro tipo de gobierno en el cual todo el poder esta concentrado en el deseo de un hombre, requiera un mínimo de voluntad y equilibrio mental de parte de quien gobierna. La historia nos ofrece muchos ejemplos contrarios a esta suposición; se gobernó con capricho por décadas y sin embargo, los resultados netos sobre el pueblo fueron sensiblemente iguales a los resultados obtenidos cuando fueron gobernados por reyes sabios.

Parece que el problema es evaluar el "éxito" o "fracaso" de los sistemas grandes ya que no se dispone de criterios apropiados. ¿Acaso el sistema feudal fue un éxito o un fracaso? (Por un lado, salvó la civilización Occidental. Por otro lado, creó los nacionalismos que tanto daño hacen a la humanidad).

La hipótesis Kantiana: *Los sistemas grandes, complejos, están por encima de la capacidad humana para evaluarlos.*

Ley de Newton de la inercia sistémica: *Un sistema que tiene un cierto interés, continuará operando de la misma manera, independientemente de las condiciones cambiantes o de las necesidades cambiantes.*

Ejemplo: El servicio de reclutamiento sigue registrando personas mucho tiempo después que éste ha concluido.

Se siguen construyendo casas de interés social, aunque las necesidades puntuales hayan sido satisfechas.

Teorema: *Los sistemas desarrollan metas propias tan pronto como son formados. Las metas intrasistémicas son prioritarias.*

Ejemplo: Las Naciones Unidas suspendieron recientemente, durante todo un día, sus esfuerzos para analizar las drogas, la tensión mundial, el petróleo, para debatir cuándo un empleado de la ONU podía viajar en primera clase en los aviones.

6.3 La dinámica de sistemas, en los sistemas blandos. En 1990, Peter Senge publicó un libro que abrió nuevos horizontes para el uso de herramientas provenientes de la cibernética en los campos de la administración y de los sistemas de la actividad humana¹²⁴. La obra está dirigida fundamentalmente a las empresas, pero no es difícil comprender que sus posibilidades van mucho más allá.

Senge propone que las empresas modernas deben ser inteligentes, y con capacidad de aprendizaje. En sus palabras:

Al crecer la interconexión en el mundo y la complejidad y el dinamismo en los negocios, el trabajo se vincula cada vez más con el aprendizaje. Ya no basta con tener una persona que aprenda para la organización, llámese Ford, Sloan o Watson. Ya no es posible “otear el panorama” y ordenar a los demás que sigan las órdenes del “gran estratega”. Las organizaciones que cobrarán relevancia en el futuro serán las que descubran cómo aprovechar el entusiasmo y la capacidad de aprendizaje de la gente en todos los niveles de la organización.¹²⁵

El autor propone cinco disciplinas (cinco nuevas tecnologías) para innovar las organizaciones inteligentes: el dominio personal, los modelos mentales, la visión compartida, el aprendizaje en equipo y el pensamiento sistémico (la quinta disciplina). Aunque nuestro interés se centrará en el pensamiento sistémico, haremos un recuento rápido de cada una de ellas.

El *dominio personal* se refiere al desarrollo de la capacidad de mejorar continuamente nuestra visión personal. Es el dominio de nosotros mismos sobre nuestras debilidades y prejuicios que nos dan visiones de mundo equivocadas y nos impiden escuchar y comprender a los demás. Es aprender a esperar, a tener paciencia. Gira en torno a la claridad que debemos lograr respecto a aquello que nos interesa verdaderamente. Desde el punto de vista sistémico, se trata de descubrir nuestros verdaderos objetivos, no los objetivos declarados.

Los *modelos mentales* se refieren a aquellos supuestos que tenemos profundamente arraigados, a los prejuicios que nos impiden ver el

¹²⁴ Cfr. P. Senge: *The Fifth Discipline: the Art and Practice of the Learning Organization*.

¹²⁵ P. Senge, *La Quinta disciplina*. pgs. 11-12.

mundo de una manera diferente a como siempre lo hemos concebido y evaluado. Debemos aprender a revisar nuestras aprehensiones, a no juzgar de primera instancia, a someter todas nuestras imágenes a un cuidadoso análisis, trayéndolas al exterior y confrontándolas con la realidad.

Construir una *visión compartida* es la base del verdadero liderazgo. Los valores, metas y misiones, si no son compartidas, jamás podrán respetarse ni lograrse. No debe ser una orden la que mueva la acción sino el deseo y la voluntad. Una visión compartida no puede ser la del dirigente o líder de turno o aquella que surge en un momento de crisis. “Es contraproducente tratar de imponer una visión, por sincera que sea”¹²⁶

El *aprendizaje en equipo* es un proceso que debe “aprenderse”. A menudo preferimos trabajar solos, aislados. Esto fue posible en épocas anteriores, pero actualmente se hace más evidente que un buen grupo produce mucho más desde el punto de vista de la creatividad y el talento, que las producciones individuales de sus integrantes, cuando saben cómo trabajar en equipo. Hay pues, emergencia sistémica. El gran secreto aquí es el *diálogo* como precursor a la *discusión*. En el diálogo se “suspenden los supuestos”, escuchamos a los demás sin aprehensiones, aprendemos de los otros en forma abierta y sincera. Esto evita tomar posiciones extremas, a veces imposibles de defender. El diálogo nos hace ver en dónde podemos estar equivocados, en qué parte puede fallar nuestra argumentación. Nos da las herramientas con las cuales, posteriormente, podemos entrar en el terreno de la discusión, con un conocimiento más profundo de nuestro pensamiento, y sin una carga emocional alta.

La *quinta disciplina* –el pensamiento sistémico– es la que permite que las cuatro anteriores se integren y formen un todo, pues han existido desde hace mucho tiempo pero en forma independiente. Integrarlas es lo que permite dar fuerza a una organización para salir adelante en un mundo tan competido como el actual. Este pensamiento nos posibilita un dominio personal, modificando nuestros modelos mentales y mediante un aprendizaje en equipo para construir visiones compartidas. No creo que sea muy difícil trasladar estas ideas al mundo personal y social. Por

¹²⁶ P. Senge. *La quinta disciplina*. Pg. 19.

otra parte, un pensamiento sistémico sin el apoyo de estas disciplinas no pasa de ser una propuesta teórica, de difícil aplicación. De hecho, una de las dificultades más grandes con que se encuentra el mundo de los sistemas es que una gran mayoría acepta las ideas sistémicas, le parecen absolutamente naturales y lógicas, pero en la práctica retorna a sus procedimientos tradicionales que le impiden aprender y entender el mundo.

La *quinta disciplina* tiene una herramienta muy poderosa para comprender el comportamiento de los sistemas complejos: la extensión de los diagramas causales vistos en la metodología de Forrester a problemas de la organización. Se ha encontrado que muchas situaciones complejas aparentemente diferentes comparten, sin embargo, patrones de comportamiento similares. Existe en la actualidad más de una docena de estos patrones que han permitido allanar el campo de estudio de estos sistemas. Se les conoce con el nombre de *arquetipos sistémicos*. En lo que sigue trataremos de analizar algunos de ellos. De nuevo, nada iguala la enseñanza de los maestros. Es imprescindible la consulta del texto de Senge y de las nuevas publicaciones en este campo.¹²⁷

6.3.1 Lazos de retroalimentación. Demoras. Arquetipos sistémicos. Dijimos anteriormente que los diagramas causales son el lenguaje para describir los sistemas complejos. Ellos captan muy bien la no linealidad de los sistemas a través del concepto de lazo de retroalimentación.

Existen dos tipos de retroalimentación que son la piedra angular de este lenguaje sistémico: los lazos de *retroalimentación positiva* y los de *retroalimentación negativa*.

Un *lazo de retroalimentación positiva* –Senge los llama *lazos reforzadores*– es aquel cuyo comportamiento se ve siempre reforzado.

Es el conocido “círculo vicioso”: más leo, más aprendo; más aprendo, más leo. El diagrama correspondiente se indica en la figura 6.1.

El lazo también puede leerse: menos leo, menos aprendo; menos aprendo, menos leo. De todas formas, la dirección del cambio es la misma en ambos casos: a más, más, o a menos, menos. Por eso es

¹²⁷ Por ejemplo, P. Senge et al.: *La quinta disciplina en la práctica*.

positivo, es decir, reforzador. En estos procesos, un cambio pequeño se alimenta a sí mismo. Es el efecto “bola de nieve”. Hace algunos años se corrió en la ciudad el rumor de que la gasolina iba a escasear. Por la mañana algunos vehículos se dirigieron hacia las estaciones de gasolina, lo cual generó una pequeña cola en la mayoría de ellas. Rápidamente el rumor se fue extendiendo y hacia la media mañana las colas eran enormes. Nunca hubo escasez. Se generó un lazo de retroalimentación reforzadora.

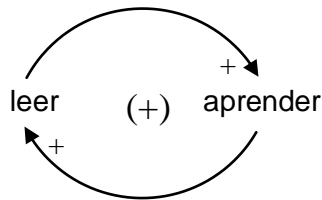


fig. 6.1

Un ejemplo impactante de lazo de retroalimentación positiva lo trae Senge¹²⁸ con respecto a la carrera armamentista entre la Unión Soviética y los Estados Unidos de Norteamérica. El diagrama se indica en la figura 6.2.

La lectura del diagrama es la siguiente. La Unión Soviética construye armas nucleares, lo que Estados Unidos considera una amenaza (más armas, más amenaza). Esta amenaza crea la necesidad de construir armas por parte de USA (más amenaza, más necesidad de armas), lo que a su vez produce la decisión de construirlas (más necesidad, más construcción). Las armas construidas amenazan la integridad de la URSS (más armas USA, mas amenaza URSS). Dicha amenaza obliga a planes de construcción de armas en la URSS (más amenaza, más necesidad de construir armas Rusas), lo cual da como resultado más construcción de armas soviéticas, cerrando el círculo, produciendo un efecto reforzador. Lo más interesante de esta historia es que la solución está, en principio, implícita en el mismo lazo. Si en lugar de aumentar la construcción se disminuye, esto fuerza al sistema a crear un lazo reforzador en sentido negativo, eliminando, a la larga, la construcción de

¹²⁸ Cfr. P. Senge: *La quinta disciplina*. Pgs 93-94.

estas armas (claro está, si esta fuera la única razón. Sabemos que también hay intereses económicos y políticos que juegan un papel muy importante en la carrera armamentista).

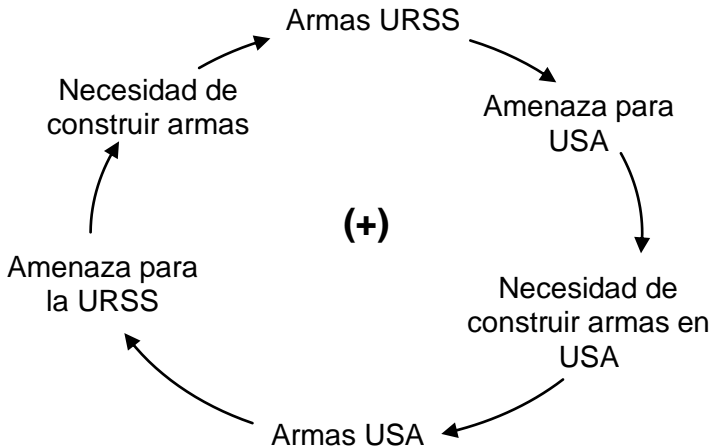


Fig. 6.2

Por su parte, el *lazo de retroalimentación negativa* crea un sistema compensador, una búsqueda de estabilidad. Ello implica la existencia de una meta implícita o explícita. En este caso el sistema se auto-corrige. La teoría del control automático de sistemas se rige por este principio. El ejemplo del termostato es clásico. Se trata de mantener un cuarto a una temperatura ambiente. Para facilitar el ejemplo, supondremos que el cuarto se encuentra por debajo de la temperatura deseada; el termostato permitirá la entrada de calor hasta que alcance la temperatura deseada. El diagrama de la figura 6.3 explica el funcionamiento de este sistema.

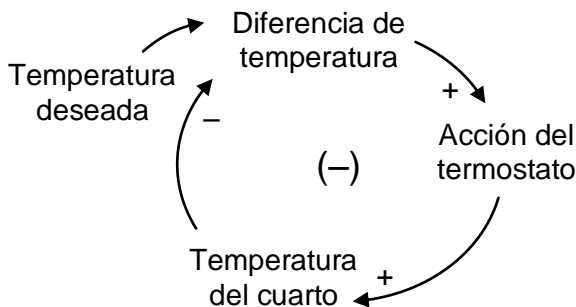


fig. 6.3

El funcionamiento es el siguiente. Supongamos que la temperatura deseada es de 20°C y el cuarto se encuentra actualmente a 10°C . La diferencia de temperatura (o “brecha”) es la diferencia entre la temperatura deseada y la del cuarto; para este caso 10°C . El termostato deja entrar calor de tal manera que la temperatura del cuarto se eleve, lo cual a su vez disminuye la diferencia. Si la diferencia es menor, el termostato deja fluir menos calor, que a su vez eleva la temperatura del cuarto, disminuyendo aún más la diferencia de temperatura. Cuando esta diferencia sea muy pequeña, el termostato detendrá su funcionamiento.

Las gráficas que ilustran el comportamiento general de ambos tipos de lazos se indican en la figura 6.4.

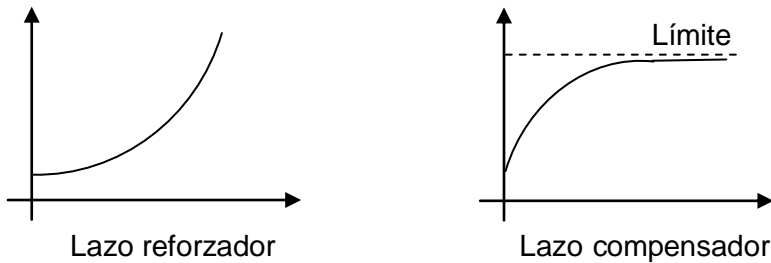


fig. 6.4

Consideremos ahora la acción de llenar un vaso con agua. La figura 6.5 muestra el proceso.

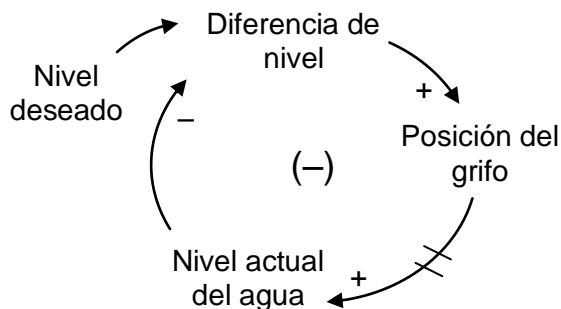


fig. 6.5

Obsérvese que, con respecto al ejemplo anterior, sólo se diferencia en el cambio de la variable “temperatura” “por nivel”. La posición del grifo es equivalente a la acción del termostato. Los dos sistemas son isomorfos. Se ha adicionado una demora, indicada por las dos líneas paralelas entre la posición del grifo y el nivel del agua. En la mayoría de los casos, si no fuera por las demoras, los comportamientos serían fácilmente controlables. Este es el tercer elemento fundamental para el estudio de los diagramas causales.

La gráfica de su comportamiento se muestra en la figura 6.6.

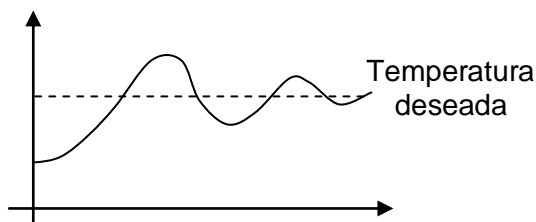


fig. 6.6

Utilizando una metáfora de Senge, si los lazos reforzadores, compensadores y las demoras son los sustantivos y verbos del lenguaje sistémico, los arquetipos sistémicos son las oraciones simples o narraciones sencillas que se cuentan una y otra vez.

Estos arquetipos son una excelente ayuda para desenmarañar la complejidad de muchos de los comportamientos de los sistemas. Nos permite distinguir el *síntoma* de la *enfermedad*.

Dice Senge:

La familiarización con los arquetipos sistémicos sin duda contribuirá a solucionar un problema apremiante contra el cual los directivos luchan sin cesar: la especialización y fraccionamiento del conocimiento. En muchos sentidos, la mayor promesa de la perspectiva sistémica es la unificación del conocimiento a través de todas las especialidades, pues los mismos arquetipos se repiten en biología, sicología, terapia familiar, economía, ciencias sociales y ecología y administración de empresas.¹²⁹

¹²⁹ P. Senge: *Op. cit.* Pg. 123.

Los arquetipos sistémicos permiten dar un paso firme desde la sola idea o deseo de pensar sistémicamente, a su aplicación. Ellos nos enseñan a reconocer circunstancias similares (isomorfismos) donde aparentemente no existen. Además indican en donde hacer énfasis con el fin de tomar las decisiones correctas en el lugar correcto. El término utilizado aquí es *apalancamiento*; es la metáfora de la palanca la cual permite mover grandes pesos, con fuerzas pequeñas, simplemente si sabemos el mejor sitio dónde apoyarla, dónde apalancar. Veamos algunos de ellos.

6.3.2 Límites del crecimiento. El síntoma de los procesos en donde puede encontrarse este arquetipo sistémico es muy característico. Un comportamiento específico del sistema empieza a aumentar cada vez más; de pronto, y sin razones evidentes, empieza a retardar su crecimiento y, en ocasiones, a decrecer.

Por ejemplo: iniciamos con mucho entusiasmo nuestro entrenamiento físico. A medida que progresamos, dedicamos más tiempo al ejercicio. Con el paso de los días empezamos a perder interés a pesar de nuestros esfuerzos por continuar.

Un líder empresarial, apoyado por técnicas de motivación, logra que su personal adquiera un gran compromiso de trabajo. Cada día que pasa se ve el crecimiento del espíritu de grupo, el compromiso por la empresa, el deseo de trabajo. Poco a poco se observa un decaimiento, a pesar de los esfuerzos por intentar retomar el impulso inicial; la organización ha vuelto a la situación inicial que había llevado a la administración a realizar los talleres de crecimiento y motivación.

En muchas empresas se observa inicialmente un aumento en las ventas. Éstas continúan su carrera ascendente hasta que, a partir de cierto momento, empiezan a disminuir su ritmo. La administración toma las medidas del caso y las ventas reinician su ritmo de crecimiento para luego empezar a decaer y no responder a los nuevos intentos de recuperación.

El diagrama causal que explica este comportamiento está compuesto por dos lazos de retroalimentación que interactúan: uno de crecimiento (reforzador) y uno de control (compensador). El diagrama general es el de la figura 6.7.

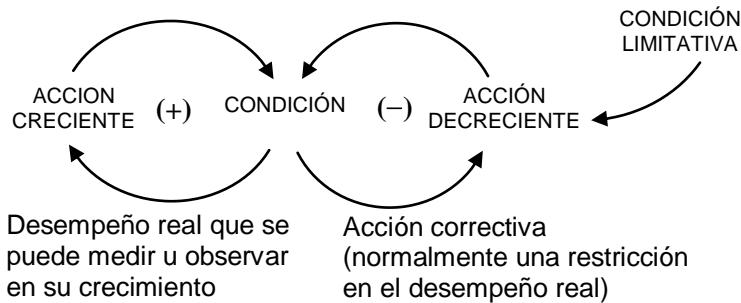


fig. 6.7

Para leer estos diagramas es conveniente iniciar con el lazo reforzador. Consideremos el ejemplo del ejercicio físico (figura 6.8).

Al comienzo, mientras más tiempo pasamos en el gimnasio, obtenemos más desarrollo físico, lo cual nos motiva a pasar más tiempo en el gimnasio (por ejemplo, dedicamos más días a la semana o incrementamos en media hora cada sesión). Sin embargo, debido a nuestra capacidad de dedicación, que puede estar afectada por otras circunstancias (pereza, motivación por otros asuntos) el interés por el ejercicio puede verse afectado. Al destinar más tiempo al gimnasio, debido a la capacidad de dedicación, nuestro interés por el ejercicio disminuye. Si este interés disminuye, disminuirá el tiempo que dedicamos al gimnasio (o, visto de otra manera, a más interés, más tiempo en el gimnasio). La razón por la cual el lazo compensador no entra a actuar inmediatamente, permitiendo que el reforzador ejerza su influencia inicial, es debido a la demora que se presenta entre el tiempo consagrado al gimnasio y el interés por el ejercicio.

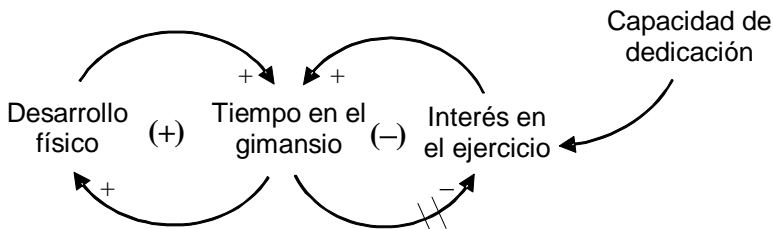


fig. 6.8

El siguiente ejemplo es de Senge¹³⁰. Una empresa dedica una buena parte de su presupuesto a investigación y desarrollo (I. y D.). Esto hace que surjan nuevos productos, lo cual genera ingresos, que permiten aumentar el presupuesto de I. y D. El aumento en I. y D. hace necesaria la contratación de nuevos ingenieros, lo cual requiere una administración especial; se hace necesario que algunos de los ingenieros (generalmente los mejores) ocupen cargos administrativos. Estos ingenieros, no entrenados para la administración (o tal vez porque su vocación es la investigación) tienen un tope en cuanto a su aptitud para administrar. La combinación de estos factores produce como resultado que el tiempo de desarrollo de los nuevos productos aumente, lo que ejerce un efecto negativo en la producción de los mismos. Ahora el resultado es una disminución en los nuevos productos, una disminución en el presupuesto de I. y D. El diagrama propuesto por Senge es el de la figura 6.9. Observe el lector cómo el lazo compensador también se cierra a través del lazo reforzador. La demora se explica por el tiempo que tarda el personal administrativo en adquirir los conocimientos y la pericia necesaria para ejercer las funciones administrativas.

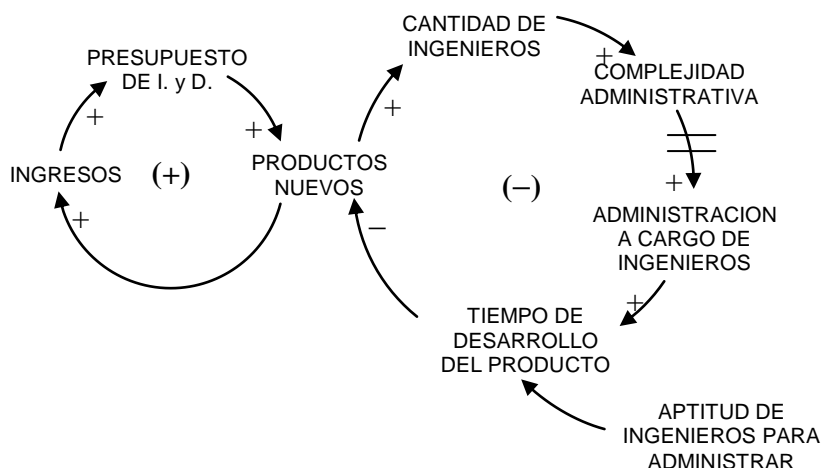


fig. 6.9

¹³⁰ Cfr. P. Senge. *Op. cit.* Pg.128.

Cualquier intento que centre su interés en el lazo reforzador con el fin de mejorar la situación, no sólo es inútil sino contraproducente. En efecto, al ejercer presión en este lazo con el fin de reactivar el crecimiento se logra que el lazo compensador, una vez vencida la inercia de la demora, tome el control del sistema. Por esta razón, el apalancamiento debe hacerse en el lazo compensador, bien sea logrando un cambio en la meta, –que puede ser explícita o en casos más complejos implícita– (y es aquí donde las otras disciplinas juegan un papel fundamental), o mediante cambios de estrategias o acciones que modifiquen la situación actual. Esto requiere mucha voluntad y convicción, pues es muy difícil vencer la resistencia al cambio. ¿Qué pasaría, por ejemplo, si se contrataran administradores profesionales y se regresara a los ingenieros a su lugar de diseño? ¿Cuál sería la reacción del grupo? ¿Y de los ingenieros mismos?

La gráfica del comportamiento de este patrón se asemeja a una de las siguientes.

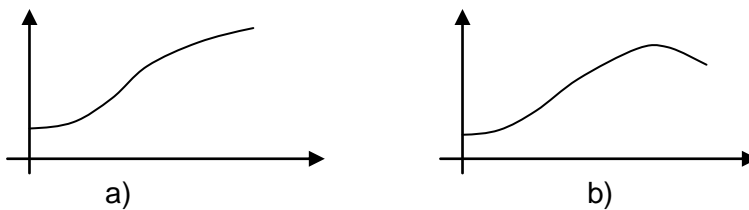


fig. 6.10

Al comienzo, el sistema empieza a crecer con fuerza, pero poco a poco el lazo compensador frena el crecimiento y puede incluso ocasionar un decrecimiento en su desempeño.

Lo interesante de este análisis es el hecho de que, sin ninguna fuerza extraña o ajena al sistema, el lazo compensador aparece. No se trata de buscar “chivos expiatorios”; de culpar a la “alta gerencia”. Su aparición es inevitable y, en muchos casos, necesaria. El crecimiento tiene un límite. Tal vez el ejemplo más dramático lo estamos viviendo al tratar de forzar nuestro planeta “más allá del límite”¹³¹.

¹³¹ Ver a D. H. Meadows *et al.*: *Beyond the limits*.

6.3.3 Desplazamiento de la carga. El comportamiento típico es el siguiente. Una situación que crea conflicto es solucionada rápidamente mediante ciertas acciones. Al presentarse la situación de nuevo, la solución anterior es aplicada, tal vez con más intensidad, lográndose una mejora. A la larga, ya no es posible seguir recurriendo a este tipo de solución y la situación es definitivamente mala. Sin embargo, se sospecha que puede existir una solución más radical, pero no se recurre a ella. Es el típico acto de tratar el síntoma sin curar la enfermedad.

Un buen ejemplo es la migraña. El dolor de cabeza intenso se cura mediante un analgésico común. El dolor desaparece, pero reaparece más adelante, con más frecuencia y mayor malestar. Dosis cada vez mayores del analgésico mitigan el sufrimiento. Finalmente la migraña se vuelve insoportable. Por otro lado, se sospecha que un tratamiento largo, seguramente costoso, y exigente en cuanto a dieta, pueda ser la solución. Pero posponemos estas acciones hasta que ya no podamos más debido a que las soluciones sintomáticas nos “convencen” que no es necesario recurrir a soluciones radicales.

El diagrama causal de este arquetipo consta de dos lazos compensadores que actúan simultáneamente. Uno de ellos, el síntoma, responde inmediatamente a las acciones tomadas; el otro tiene demoras que hacen que la sensibilidad a la solución permanezca “dormida”. Aún más, el lazo reforzador sintomático afecta la capacidad de ser sensibles a la solución radical que trae el lazo correspondiente. “Desplazamos la carga” hacia la solución fácil. La figura 6.11 ilustra este arquetipo.

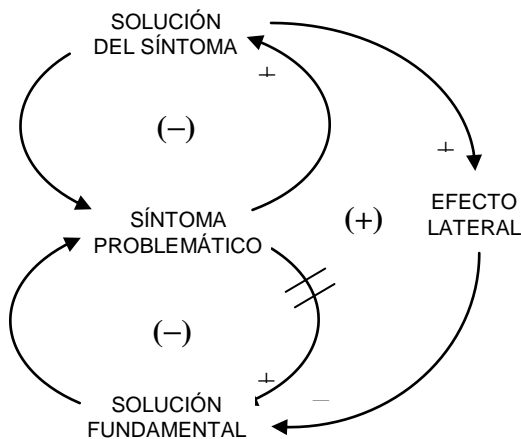


fig. 6.11

Senge comenta cómo los jefes de personal, ante un problema con sus subordinados, recurren a la ayuda de expertos en solución de conflictos, quienes, efectivamente, solucionan el problema. Pero la dificultad del jefe al enfrentar nuevas situaciones (ya que descarga su responsabilidad en los expertos), lo obliga a requerir nuevamente de sus servicios. Cada vez está en menos capacidad de resolver situaciones conflictivas, por no desarrollar sus aptitudes gerenciales. Como los expertos “solucionan” el problema vigente, esto ejerce una influencia en el no desarrollo de sus capacidades administrativas; observe bien el lazo externo; cruza por los dos lazos compensadores, tal como se muestra en la figura 6.12.

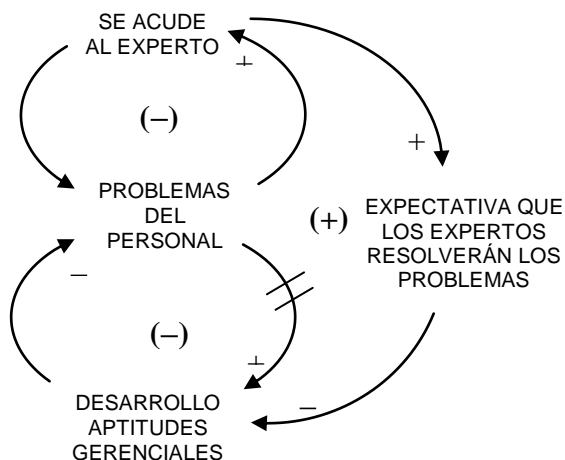


fig. 6.12

Una gráfica que describe el comportamiento de este sistema puede ser la indicada en la figura 6.13.

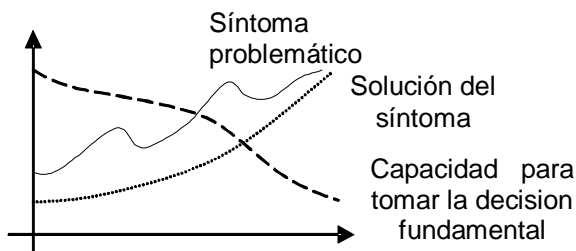


fig. 6.13

El síntoma oscila entre un aumento y una aparente solución, pero siempre con tendencia a aumentar (empeorar) su situación. Por su parte, la solución de este síntoma exige cada vez más intervención. La capacidad para tomar la decisión fundamental cada vez es menor.

6.3.4 Erosión de metas. La erosión de metas es un patrón similar al anterior. Sin embargo, aquí no hay una influencia directa entre la solución del síntoma y la acción radical (el lazo reforzador externo). En esta situación se fija una meta. Debido a las dificultades que se van presentando, en lugar de tomar las medidas para lograrla, se modifica la meta haciéndola más fácil. El diagrama correspondiente es el de la figura 6.14.

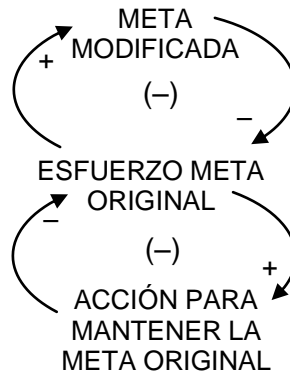


fig. 6.14

Consideremos el siguiente ejemplo. Me propongo dedicar cinco horas semanales a lecturas ajenas a las relacionadas con mi trabajo. Al cabo de algún tiempo observo que esto no es tan sencillo, debido a presiones de diverso tipo: cansancio, falta de interés, otras actividades... En lugar de hacer un esfuerzo para vencerlas, considero que cuatro horas son suficientes para colmar mis aspiraciones. Y el proceso puede continuar, erosionado la meta inicial. Senge comenta:

Las sociedades sufren el acoso permanente de la erosión de las metas: veamos cómo se ha reducido el estándar de "empleo pleno" en los Estados Unidos. El objetivo federal de empleo pleno se deslizó de 4 por ciento en los años 60 a 6 y 7 por ciento a principios de los 80. (En otras

palabras, el país estaba dispuesto a tolerar 50 o 75 por ciento más de desempleo como “natural”). Así mismo, 3 o 4 por ciento de inflación se consideraba grave a principios de los 60, pero una victoria de la política antiinflacionaria a principios de los 80.¹³²

Un diagrama de la reducción del déficit puede ser el que muestra la figura 6.15.

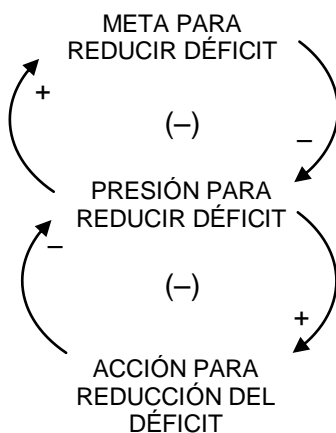


fig. 6.15

6.3.5 Soluciones contraproducentes¹³³. Este arquetipo describe el caso en el cual se toma una acción para resolver una situación, acción que al principio produce el resultado deseado, pero más adelante, ella misma empeora la situación. El ejemplo de los autores es claro. A una rueda que chirría le echamos agua, lo cual quita el molesto sonido. Pero con el tiempo, el agua y el oxígeno producen herrumbre, lo cual acentúa más el chirrido. El diagrama de este arquetipo se muestra en la figura 6.16.

Senge (*et al.*) trae el siguiente ejemplo. Una compañía reduce el personal (solución rápida) para bajar los costes y elevar la rentabilidad (síntoma del problema). Lo más aconsejable parece ser alentar a los

¹³² P. Senge: *Op. cit.* pg. 141.

¹³³ Cfr. P. Senge *et al.*: *La quinta disciplina en la práctica*. Pg. 131 sgts.

trabajadores de más edad, que en general tienen sueldos más altos, a aceptar una jubilación anticipada. Para deleite de todos, la rentabilidad

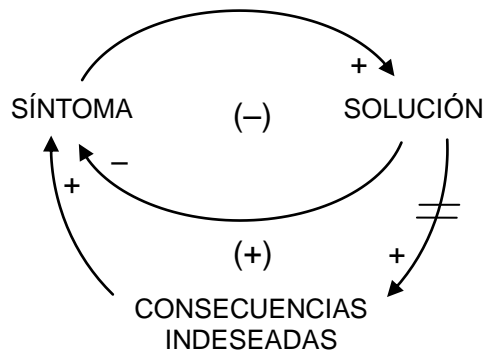


fig 6.16

mejora de inmediato. Sin embargo, los recortes de personal eliminan además a gente con experiencia. Los despidos atentan contra el entusiasmo. Los costes de producción aumentan por culpa de los errores y el exceso de trabajo. Estos factores reducen la productividad (consecuencia involuntaria) y eliminan la rentabilidad adicional que se obtuvo mediante la “solución” del despido. Los directivos deciden muy a su pesar que no queda otro remedio que hacer más recortes de personal.

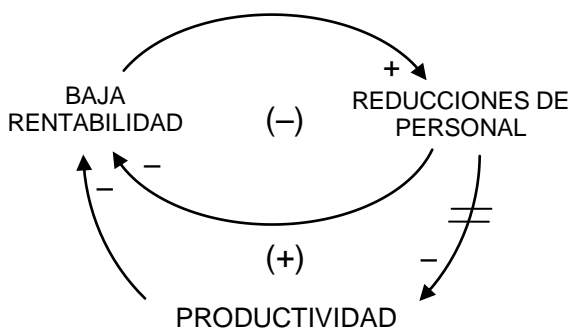


fig 6.17

6.3.6 Escalada. La figura 6.18 es un diagrama de este arquetipo. Su dinámica se hace presente cuando dos “sistemas” compiten el uno contra el otro suponiendo que el desarrollo de uno depende de la ventaja relativa que pueda tener sobre el otro. La “guerra de las tapas” puede ser un buen ejemplo. Una empresa importante de bebida gaseosa inicia una campaña para mejorar sus ventas premiando a sus consumidores por medio de tapas contramarcadas.

La competencia hace algo parecido (bien con sus propias tapas o bien con otro tipo de promoción); al aumentar sus ventas, la compañía competidora redobra sus esfuerzos en una guerra sin fin, o una con resultados poco deseados para cada una de ellas (salvo que una de las partes sea sensiblemente más fuerte que la otra, como ocurre con los monopolios. Este arquetipo lo estudiaremos bajo el nombre: éxito para quien tiene éxito).

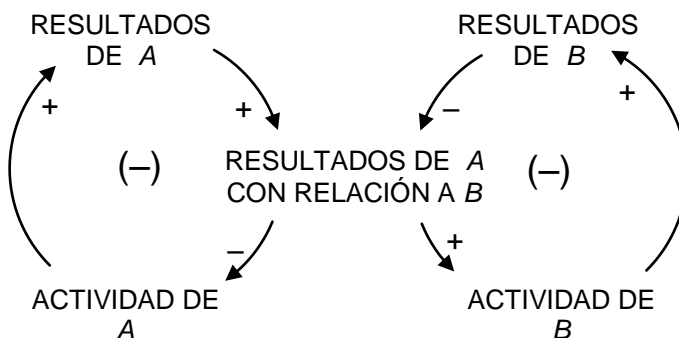


fig. 6.18

6.3.7 Tragedia del terreno común. Es la competencia de dos sistemas por un recurso común.

Cada uno de los sistemas trata de utilizar el recurso común para lograr su propio desarrollo. Al final, el recurso ha desaparecido prácticamente con resultados negativos para ambas entidades (fig. 6.19).

En este arquetipo existen dos lazos de retroalimentación reforzadora: el de cada entidad. La actividad total (actividad conjunta) sobre el recurso hace que éste, al ser limitado, afecte los beneficios que puedan obtenerse. Al disminuir los beneficios de cada organización, éstas

refuerzan su actividad “predadora” afectando sobretodo el escaso recurso disponible.

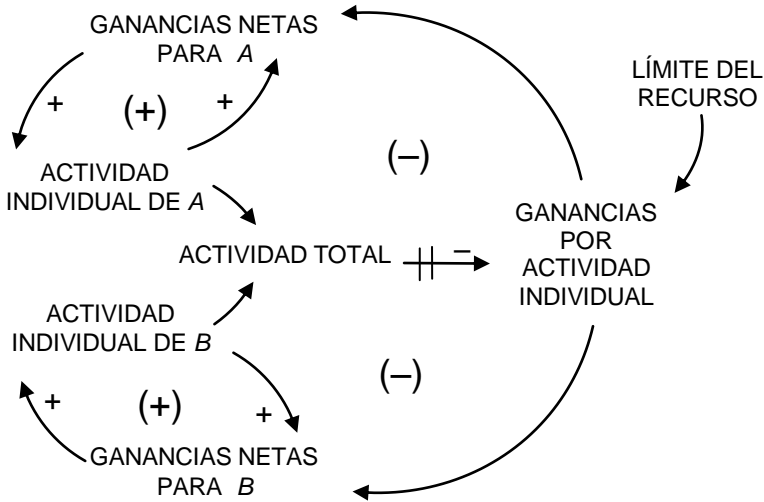


fig. 6.19

6.3.8 Éxito para quien tiene éxito. Como indicamos anterior-mente, aquí una entidad compite con otra por el mismo recurso hasta que logra dominarla. Si en la escalada los lazos son negativos, aquí son positivos.

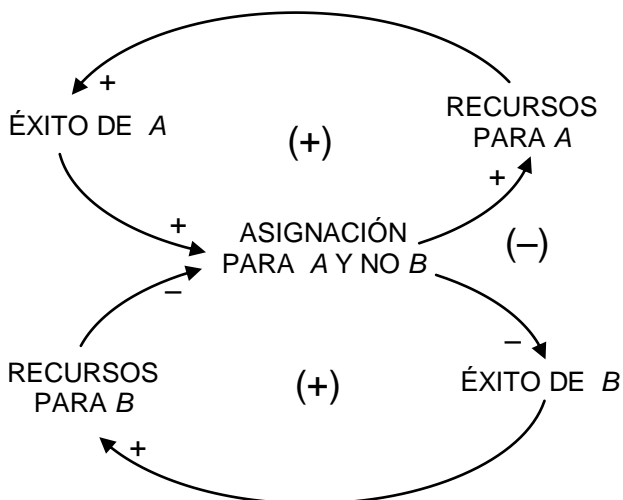


fig. 6.20

6.3.9 Crecimiento y subinversión. Se trata de una estructura que parte del arquetipo del límite del crecimiento. El lazo compensador es afectado por otro lazo de control que hace las veces de un objetivo o meta. A medida que pasa el tiempo, el crecimiento inicial se ve desacelerado debido a la acción del lazo compensador. Como los esfuerzos por recuperar el ritmo no dan resultado, se decide esperar “tiempos mejores”. Sin embargo, el punto de apalancamiento está más allá. Existe otro lazo de control afectado por una meta que restringe la capacidad de expansión del sistema, es decir, limita los recursos. Lo correcto es modificar esta meta mediante políticas de aumento de capacidad física, mejora en equipos, preparación del personal etc., es decir, haciendo una inversión, evidentemente costosa, en lugar de escoger como política el ahorro esperando “tiempos mejores”.

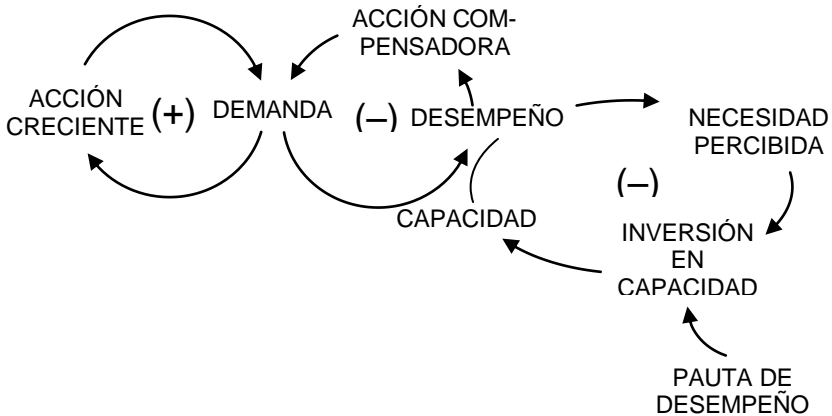


fig. 6.21

Esto no agota los arquetipos sistémicos. Existen más, y todos igualmente interesantes. Queríamos, con los aquí expuestos, simplemente ilustrar esta nueva manera de ver las empresas, y por qué no decirlo, de ver el mundo.

Invitamos al lector a que, retomando los análisis de Gall y con los conocimientos adquiridos, trate de analizar, refutar o interpretar de una manera diferente las críticas hechas a los sistemas por la *sistemántica*.

Finalmente, no debemos olvidar que los arquetipos sistémicos son sólo un parte de todo un conjunto de disciplinas que deben trabajar mancomunadamente. Estos patrones nos permiten el diagnóstico y las acciones de curación. El resto del proceso es del dominio de las otras disciplinas.

6.4 “Coda”. Hemos terminado el objetivo de este trabajo. Es evidente que han quedado una gran cantidad de conceptos sistémicos por fuera de nuestras indicaciones. Pero la intención no era, tal y como se indicó en la introducción, hacer una presentación exhaustiva de esta teoría, sino, más bien, tratar de resumir sus fundamentos y su aplicación en el campo práctico, como una nueva alternativa complementaria del conocimiento científico tradicional. Como bien dice Churchman, *e/ enfoque de sistemas no es una mala idea.*

BIBLIOGRAFÍA

- Ackoff, R.L.: *El paradigma de Ackoff*. Limusa Wiley, México, 2002.
- : *Toward a System of Systems concepts*. Management Science, 17, No. 1.
- Angyal, A.: *A Logic of Systems* (En Emery). Penguin Modern Management Readings, 1977.
- Aristóteles: *Metafísica*. Espasa-Calpe, Madrid, 1975.
- Bacon, F.C.: *Novum Organum*. Folio, Barcelona, 2000.
- Beishon, J. (ed.): *Systems*. The Open University press. 2nd printing, 1976.
- Bertalanffy, L. Von.: *General Systems Theory*. Penguin Books, England, 1968.
- Boulding, K.: *General Systems Theory. The skeleton of Science*. Management Science, 2 (3), 1956.
- Braithwaite, R.B.: *La explicación científica*. Tecnos, Madrid, 1965.
- Brigman, P.W.: *Reflections of a Physicist*. Philosophical Library, N.Y. 1950.
- Campbell, N.R.: *Las leyes numéricas y el uso de las matemáticas en la ciencia* (En Newman) Grijalbo, S.A. 1967.
- : *Medición* (En Newman). Grijalbo, 1967.
- Capra, F.: *La trama de la vida*. Anagrama, Barcelona, 1998.
- Checkland, P.B.: *A systems map of the Universe*. Journal of Systems Engineering, 2,2.
- : *Soft systems methodology. An overview*. Journal of Applied Systems Analysis, 15, 27-30, 1988.
- Checkland, P.B. and Holwell, S.: *Information, Systems and Information Systems*. Wiley, Chitester, 1998.
- Checkland, P.B. and Scholes, P.: *Soft Systems Methodology in Action*. Wiley, Chichester, 1990

- Churchman, C.W.: *El enfoque de sistemas para la toma de decisiones*. Diana, México, 1992.
- Descartes, R.: *El discurso del método*. Folio, Barcelona, 1999.
- Donella, H.M. et al.: *Beyond the limits*. Chelsea Green Publ. Comp., Vermont, 1992.
- Dubois & Prade: *Fuzzy sets and Systems: theory and applications*. Academic Press, 1980.
- Emery, F.E.: *Systems Thinking*. Penguin Modern Management Readings, 1976.
- Ferrater Mora, J.: *Diccionario de Filosofía*. Ariel, Barcelona, 1994.
- Feyerabend, P.K.: *Contra el método*. Ariel, 1975.
- Forrester, J.W.: *Dinámica Industrial*. Ateneo, 1972.
- , J.W.: *Principles of Systems*. Second preliminary edition, Wright-Allen Press, Inc., Cambridge, Mass., 1976.
- Frankfort, H. y H.A., Wilson J.A., Jacobsen T.: *El pensamiento filosófico*. F.C.E, México, 1974.
- Fuenmayor R. et al.: *Special issue*. Systems Practice, 4(5), 1991.
- Gall, J.: *Systemantics*. Pocketbooks, 1978.
- Guzmán, M. de et al.: *Estructuras fractales y sus aplicaciones*. Labor, Barcelona, 1993.
- Halliday, D.-Resnick R.: *Physics. For students of Science and Engineering*. Wiley, 1963.
- Holton, G.: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Reverté, Barcelona, 1975.
- Jackson, M.C.: *Systems Approaches to Management*. Kluwer Academic, Plenum Publisher, 2000.
- Jackson, M.C. and Keys P.: *Toward a System of Systems Methodologies*. J. Opl. Res. Soc., 5, 1984.
- Jager, R.: *Fuzzy logic and control*. Tesis doctoral, univ. De Delft, Holanda, 1995.

- Jenkins, G.M.: *The Systems Approach*. Journal of Systems Eng., Univ. Of Lancaster, Vol. 1, No.1, 1969.
- Kuhn, T.: *La estructura de las revoluciones científicas*. F.C.E., México, 1975.
- Lakatos, I. y Musgrave A.: *La crítica y el desarrollo del conocimiento*. Grijalbo, Barcelona, 1975.
- Lea, S.M. y Burke, J.R.: *Física: La naturaleza de las cosas*. International Thomson Editores, 1999.
- Mandelbrot, B.B.: *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Tusquets, Barcelona, 1987.
- Miller, G.A.: *The Psychology of Communication*. Allen Lane, the Penguin Press, London, 1968.
- Nagel, E. y Newman, J.: *La demostración del teorema de Gödel*. Tecnos, Madrid, 1970.
- Newman, J.R.: *Sigma: el mundo de las matemáticas*. Grijalbo, 1967.
- Olivares, C.M.: *Teoría del Caos*. Alfaomega, Bogotá, 1998.
- Ossa, C.A.: *Álgebra lineal. Programación lineal*. Univ. Tecnológica de Pereira, 2002.
- : *Simulación básica*. Univ. Tecnológica de Pereira, 2002.
- : *Some considerations about Hard and Soft Methodologies*. SGSR Proc. International Conference, Washington, 1982.
- Peter, L and Hull R.: *The Peter Principle*. Bentam Books, 1970.
- Philips, D.C.: *Systems Theory. A discredited Philosophy*. (En Schoderbeck P.P).
- Popper, K.: *The Logic of Scientific Discovery*. Harper Torchbooks, 1968.
- Reale, G. y Antiseri, D.: *Historia del pensamiento filosófico y científico*. Herder, Barcelona, 1999.
- Richmond, B. and Peterson S.: *An introduction to Systems Thinking*. High Performance Systems Inc., 2000.
- Saunders, P.T.: *Una introducción a la teoría de catástrofes*. Siglo Veintiuno, 1983.

- Senge, P.: *La Quinta Disciplina: El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Granica, Barcelona, 1992.
- : *The Fifth Discipline: the Art and Practice of the Learning Organization*. Random House, London, 1990.
- Senge, P. et al.: *La Quinta Disciplina en la práctica*. Granica, Barcelona, 1995.
- Schoderbeck, P.P. (recopilador): *Management Systems*. John Wiley and Sons, Inc. 1971.
- Simon H.A.: *La Arquitectura de la complejidad*.(En Simon “Las ciencias...”). ATE, 1979.
- : *Las ciencias de lo artificial*. ATE, 1979.
- Swinborne, R.: *La justificación del razonamiento inductivo*. Alianza, Madrid, 1976.
- Woodcock, A., Davis M.: *Catastrophe Theory*. Avon Books, 1980.
- Zadeh, L.A.: *Fuzzy sets and systems*. Proc. Simps. Systems Theory Politech Inst. Brooklyn, 1965.
- : *Fuzzy Sets*. Information and Control, vol. 8, No. 3, June 1965.