Introducción a la Cibernética
- Primera Parte -
Memoria del Seminario de Robótica del INAOE

Enrique Alarcón Ávila
Carlos Rubén de la Mora Basáñez
Virginia Angélica García Vega
Raúl Gutiérrez Juárez
María Guadalupe Jiménez Velasco
Yazid León Fernández de Lara
Stivalis Anahi Martínez Cuevas
Angélica Muñoz Meléndez
Gesuri Ramírez García
Alejandro Rangel Huerta
Manuel Rubín Falfán
Héctor Simón Vargas Martínez

Reporte Técnico No. CCC-05-003
23 de Junio de 2005

Luis Enrique Erro 1
Sta. Ma. Tonantzintla,
72840, Puebla, México.

Introducción a la Cibernética
- Primera Parte -
Memoria del Seminario de Robótica del INAOE

Enrique Alarcón Ávila[1], Carlos Rubén de la Mora Basáñez[2], V. Angélica García Vega[2], Raúl Gutiérrez Juárez[3], Ma. Guadalupe Jiménez Velasco[4], Yazid León Fernández de Lara[4], Stivalis Anahi Martínez Cuevas[1], Angélica Muñoz Meléndez[4], Gesuri Ramírez García[3], Alejandro Rangel Huerta[1], Manuel Rubín Falfán[1], Héctor Simón Vargas Martínez[3]

[1] **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**
Facultad de Ciencias de la Computación
14 Sur y Av. Sn. Claudio. Ciudad Universitaria. 72570 Puebla, Pue. México
`{arangel,mrubin}@cs.buap.mx`

[2] **Universidad Veracruzana**
Facultad de Física e Inteligencia Artificial
Sebastian Camacho No. 5. 91000 Xalapa, Ver. México
`{cdelamora,angegarcia}@uv.mx`

[3] **Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla**
Escuela de Ingeniería en Computación
21 Sur No. 11003. 72160 Puebla, Pue. México
`{hsimon}@upaep.mx`

[4] **Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica**
Coordinación de Ciencias Computacionales
Luis Enrique Erro No. 1. 72840 Tonantzintla, Pue. México
`{marvel,yazid,munoz}@inaoep.mx`

Resumen Se hace una revisión de la primera parte del libro "Una introducción a la Cibernética" de W.R. Ashby. Conceptos importantes en el desarrollo de la cibernética y que más tarde tuvieron influencia en robótica e inteligencia artificial, como máquina homeóstática y caja negra, son analizados en este ensayo.

Introducción

En septiembre de 2004, estudiantes e investigadores de cuatro instituciones de educación superior en Mexico, iniciaron formalmente un seminario de robótica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. El propósito de este grupo interdisciplinario es reunirse con objeto de analizar, discutir y confrontar ideas relacionadas con el diseño de sistemas artificiales.

Este documento es un resultado de este seminario y sintetiza las reflexiones de sus miembros a propósito de la primera parte del libro *Introducción a la Cibernética* de W. Ross Ashby, editado por primera vez en 1957 [1].

La elección del libro de Ashby para iniciar las actividades del seminario no fue accidental. Los miembros del seminario quisieron con el estudio de este material, revisitar parte de sus orígenes y rendir homenaje a uno de los pioneros de la cibernética y del estudio de sistemas.

La importancia del trabajo de W. Ross Ashby consiste en que transmite los esfuerzos que en su época se realizaron para fundamentar el trabajo de los cibernetistas, su búsqueda de conceptos, de principios generales, y de herramientas metodológicas para fundar una ciencia de los sistemas. Ashby se aseguró de manera particular de exponer sus ideas de manera simple, aunque a veces no tan clara como él lo pretendió, acerca de fenómenos complejos.

Entre las contribuciones más importantes de este eminente médico y psiquiatra puede citarse la noción de máquina homeostática, basada en conceptos formulados por fisiólogos que fueron sus contemporáneos. Ashby definió la **máquina homeostática** como un sistema capaz de mantener sus variables esenciales dentro de límites aceptables a su propia estructura y a pesar de la influencia de perturbaciones externas. La máquina homeostática es el ancestro de los sistemas autónomos y adaptativos tan buscados hoy en día por los diseñadores de sistemas artificiales.

En este documento se sigue la ruta marcada por Ashby en su libro. La sección 1 aborda el prefacio y el primer capítulo del libro, en donde Ashby delínea el objeto de estudio de la entonces nueva disciplina, la cibernética. La sección 2 presenta y discute el segundo capítulo, referido a la noción de cambio. La sección 3 se ocupa del tercer capítulo y en ella se analiza el sistema más simple, llamado por su autor la máquina determinista. La sección 4 se encarga de analizar un sistema de mayor complejidad, la máquina con entradas. La relación de un sistema y de sus partes según la concepción de Ashby es abordada en esta sección. La sección 5 se refiere a la estabilidad, ahí se discuten las nociones de perturbación y de equilibrio, esenciales para comprender el discurso de Ashby. Las nociones que son presentadas gradualmente a lo largo de las secciones previas se integran en el concepto de caja negra, el cual es tratado en la sección 6. Finalmente, en la sección 7 se refieren las conclusiones de esta revisión.

1. Cibernética

El autor comienza recordando la definición de cibernética de Norbert Wiener como "la ciencia del control y de la comunicación en el animal y en la máquina" [3]. Ashby se declara convencido de que las ideas básicas de esta ciencia pueden ser tratadas por todo aquel que tenga conocimientos básicos en matemáticas, sin referencia obliglatoria a otras ciencias. Más aún, para el autor los fundamentos de la cibernética no están condicionados a los de alguna otra rama de la ciencia.

Para Ashby, la cibernética representa un ciencia novedosa que estudia los sistemas desde una perspectiva inusual para esa época. Esta ciencia puede también definirse como la ciencia del comportamiento de las máquinas. La cibernética, afirma Ashby, es esencialmente funcional y conductual, se interesa por toda forma de comportamiento a partir de que éste es regular, determinista o reproducible.

El estudio de los sistemas individuales queda incluido en el estudio de todas las máquinas posibles, ya sea que estén construidas por el hombre o por la naturaleza. Para Ashby, la existencia o materialidad de una máquina son irrelevantes, una postura de gran modernidad que puede reconocerse en un debate de los años ochenta a propósito de la vida artificial, una disciplina interesada en el fenómeno de la vida, independientemente del sustrato en el que ocurre [2].

Ashby encuentra que la cibernética puede jugar un papel relevante en la historia de la ciencia debido a dos razones (1) la posibilidad de establecer un vocabulario común, susceptible de representar los más diversos tipos de sistemas y (2) el desarrollo de métodos apropiados para el estudio de la complejidad.

La construcción de un vocabulario común es importante por un lado, para encontrar similitudes entre diversas disciplinas relacionadas con el estudio de sistemas, y por otro, para retroalimentar dichas disciplinas. Los métodos propuestos por los cibernetistas entre los que se cuenta Ashby, se orientaban a desarrollar y probar estrategias generales para aplicarse de manera uniforme en familias de sistemas, basados en lo que podría calificarse como una epistemología conductista o etológica. Más allá de los calificativos que hoy en día puedan darse a estos métodos, el ideal de los cibernetistas de categorizar y organizar los conocimientos generados en su disciplina -con objeto de abstraer principios sintéticos generales- actualmente sigue siendo una guía metodológica vigente y legítima en la investigación.

2. Cambio

En cibernética el concepto de cambio es fundamental, es la diferencia de un objeto con respecto al tiempo. El hecho de que un cambio ocurra contínuamente plantea un gran número de dificultades, por lo que en adelante se asumirá que todos los cambios ocurren en pasos y en un intervalo de tiempo finito.

2.1. Transformaciones

En esta sección, Ashby define algunos conceptos fundamentales para entender el cambio como una transformación:

operando: estado inicial sobre el cual se realiza una operación.
operador: factor que actúa sobre los operandos.
transición: el cambio que ocurre.
transformación: conjunto de transiciones en un sistema de operandos al aplicar un operador.

Una transformación puede ser representada por un sistema de operandos dispuestos en dos filas, la primera contiene estados iniciales y la segunda estados a los que se llega aplicando un operador. Por ejemplo, sea A el estado inicial y la transición el cambio a la letra siguiente del alfabeto, su transformación puede ser representada como se muestra en la figura 1(a).

Una característica importante de una transformación es la cerradura. Cuando una transformación no introduce ningún elemento nuevo, se dice que el sistema de operandos es **cerrado**, como en el caso de la transformación de la figura 1(a).

Muchas transformaciones llegan a ser muy largas y en tales casos interesa encontrar una notación simple, e.g. si los operandos son *1 2 3 ...* y la transición es *sumar 10*, entonces la transformación reducida de la transformación expresada en la figura 1(b) es $n' \to n + 10$.

$$\Big\downarrow \begin{array}{l} A\ B\ C\ D \ldots Y\ Z \\ B\ C\ D\ E \ldots Z\ A \end{array} \qquad\qquad \Big\downarrow \begin{array}{l} \ \ 1\ \ \ 2\ \ \ 3 \ldots \\ 11\ 12\ 13 \ldots \end{array}$$

(a) (b)

Figura1. Transformaciones. (a) Representación de una transformación. (b) Transformación no reducida

Las transformaciones pueden ser:

transformación uni-valuada: ocurre en un operando y se refleja en un solo operando, e.g. la transformación de la figura 2(a) y no la de la figura 2(b).
transformación uno a uno: transformación uni-valuada en la cual las transiciones son diferentes unas de otras, e.g. la transformación de la figura 2(c).
transformación muchos a uno: transformación uni-valuada, diferente a la del tipo uno a uno, y en la cual los operandos pueden no ser únicos, e.g. la transformación de la figura 2(d).
identidad: la transformación que no produce ningún cambio. La identidad es una transformación de tipo uno a uno que transforma un operando al mismo operando, e.g. la transformación de la figura 2(e).

Representación Matricial de una Transformación. Una transformación puede ser representada por una matriz, cuyas columnas representan los operandos y cuyas las filas representan las posibles transformaciones. Las intersecciones entre filas y columnas están marcadas con + en donde ocurre transición y con 0 en donde no ocurre, como se ilustra en la figura 3.

2.2. Repetición del Cambio

Una transformación cerrada uni-valuada se puede aplicar más de una vez generando una serie de cambios análogos a las series de cambios de un sistema dinámico.

$$\downarrow\begin{array}{l} A \\ B \end{array} \qquad \downarrow\begin{array}{l} A \\ A \; o \; B \end{array} \qquad \downarrow\begin{array}{llllllll} A & B & C & D & E & F & G & H \\ F & H & K & L & G & J & E & M \end{array} \qquad \downarrow\begin{array}{lll} A & B & C \\ A & A & A \end{array} \qquad \downarrow\begin{array}{lll} A & B & C \\ A & B & C \end{array}$$

(a) (b) (c) (d) (e)

Figura2. Transformaciones de un solo valor o uni-valuada (a), de dos valores (b), uno a uno no cerrada (c), muchos a uno (d) e identidad (e)

$$\downarrow\begin{array}{lll} A & B & C \\ A & C & C \end{array}$$

(a)

↓	A	B	C
A	+	0	0
B	0	0	0
C	0	+	+

(b)

Figura3. Representación matricial (b) de la transformación representada en (a)

Para cada transformación cerrada, se puede obtener otra transformación cerrada cuyo efecto, si se aplica una vez, es idéntico al efecto de aplicar dos veces la primera transformación. La segunda transformación puede simbolizarse como el cuadrado de la primera y es una de las potencias de esta, como se ilustra en la figura 4.

$$T : \downarrow\begin{array}{l} A \; B \; C \ldots Y \; Z \\ B \; C \; D \ldots Z \; A \end{array} \qquad T^2 : \downarrow\begin{array}{l} A \; B \ldots Y \; Z \\ C \; D \ldots A \; B \end{array}$$

(a) (b)

Figura4. Transformación T (a) y su segunda transformación, T^2 (b)

La importancia de la cerradura sobre la no cerradura es que se puede aplicar repetidamente. Una transformación no cerrada, dice Ashby, es similar a una máquina que después de un paso se atasca.

La eliminación y la sustitución se utilizan para abreviar una transformación, e.g. si tenemos $n“ = (n + 1) + 1$ y $n‘ = n + 1$ entonces $n“ = n‘ + 1$. Ashby conviene en utilizar la notación $n‘$ para representar transformaciones simples, mientras que para las transformaciones repetidas prefiere $T(n)$, la cual denota la transformación T aplicada al operando n, así como $T^2(n)$ para representar $T(T(n))$.

La transformación que se repite, sin embargo, no tiene por qué ser obligatoriamente la misma. Dos transformaciones distintas, T y U, pueden también aplicarse repetidamente. Si el resultado de la transformación T se aplica al operando n y la transformación U se aplica a la transformación $T(n)$, el resultado es conocido como **producto** o **composición** y se denota $U(T(n))$, como se ilustra en la figura 5.

(a)	(b)	(c)	(d)
$T: \downarrow \begin{smallmatrix} a & b & c & d \\ b & d & a & b \end{smallmatrix}$	$U: \downarrow \begin{smallmatrix} a & b & c & d \\ d & c & d & b \end{smallmatrix}$	$V: \downarrow \begin{smallmatrix} a & b & c & d \\ c & b & d & c \end{smallmatrix}$	$W: \downarrow \begin{smallmatrix} a & b & c & d \\ b & a & b & d \end{smallmatrix}$

Figura5. T y U aplicadas en ese orden definen la transformación V, lo cual se confirma si se ve que $T(b)$ es d y que $U(T(b))$ es b, al igual que $V(b)$. La transformación V es el producto de T y U, mientras que la transformación W lo es de U y T

Las transformaciones cerradas pueden ser representadas mediante **grafos cinemáticos**, donde una flecha entre dos operandos representa una transición de un paso entre ellos. Comenzando en cualquier estado y siguiendo una cadena de flechas, se puede verificar que mediante una transformación repetida, se llega a un estado de paro o a un ciclo. La figura 6 ilustra esta forma de representación.

3. Máquina Determinista

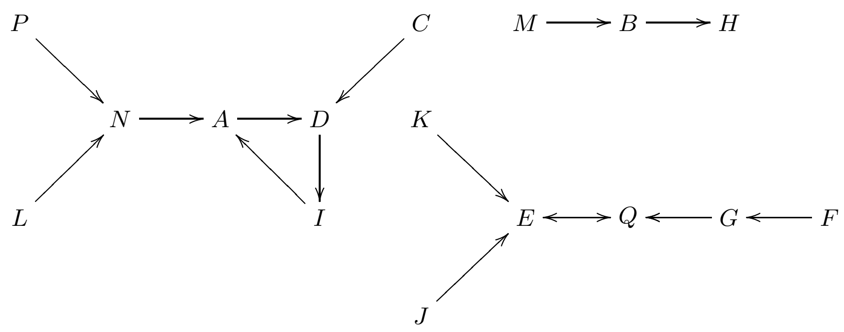
Ashby establece un paralelismo entre las propiedades de las transformaciones previamente expuestas y las propiedades de los sistemas dinámicos del mundo real. Cabe recordar, sin embargo, que para facilitar su comprensión y análisis, Ashby simplificó la noción de sistema a una máquina cerrada y aislada, no muy parecida aparentemente a los sistemas del mundo real.

Para Ashby, la **máquina determinista** o transformación uni-valuada cerrada, es suficiente para estudiar los sistemas dinámicos reales. A su favor hay que señalar que, dado que esta máquina refiere formas de comportamiento regulares y generales, es aplicable a la descripción de una variedad de sistemas reales, e.g. sistemas biológicos.

Una máquina determinista posee un conjunto de operandos o estados distintos entre ellos. A partir de un estado sólo se puede acceder a un único estado siguiente aplicando una transformación, lo cual permite definir una **trayectoria** de estados o **línea de comportamiento** del sistema. Los operadores son las reglas de transición. La transformación aplicada a los operandos produce las transiciones de una máquina determinista.

$$T: \downarrow \begin{array}{cccccccccccccccc} A & B & C & D & E & F & G & H & I & J & K & L & M & N & P & Q \\ D & H & D & I & Q & G & Q & H & A & E & E & N & B & A & N & E \end{array}$$

(a)



(b)

Figura6. Grafo cinemático (b) de la transformación T (a). El estado H puede opcionalmente tener una flecha apuntando a sí mismo

Ashby señala que una transformación no tiene porqué ser necesariamente numérica para estar bien definida, pues lo importante es que refleje cambios regulares del sistema, e.g. formas de comportamiento reflejo animal.

La relación entre máquina y transformación, sostiene Ashby, constituye la base de una disciplina que relaciona la conducta de los sistemas físicos reales a propiedades de expresiones simbólicas, y afirma además que todos los temas de la física-matemática son parte de esta disciplina en formación. Quizás Ashby sobredimensiona los alcances de esta disciplina al afirmar que sus métodos son más amplios que los usados por los físico-matemáticos. Los métodos propuestos por los cibernetistas contemporáneos de Ashby, se percibían en efecto más adaptados al estudio de sistemas reales, e.g. biológicos, generalmente no lineales, no continuos y no numéricos, que los métodos principalmente continuos y lineales, de la física-matemática de esa época.

El autor plantea así mismo, que las máquinas cerradas proporcionan lo que denomina “mayor poder de transformación” que las máquinas no cerradas, pues a las primeras puede aplicárseles una transformación a cualquier potencia (ver figura 7).

Las máquinas discretas son igualmente señaladas por Ashby como herramientas simples y no ambiguas, en donde las propiedades sólo pueden estar presentes o ausentes. Los cambios discretos siempre pueden aproximar el cambio continuo, pues aún el comportamiento de los sistemas reales se describe muchas veces como puntos discretos cuyos intervalos pueden modificarse de acuerdo al nivel de aproximación deseado.

Cuando una máquina y una transformación están relacionadas, la transformación es la **representación canónica** de la máquina.

$$T: \downarrow \begin{matrix} a & b & c & d & e & f & g \\ e & b & m & f & g & c & f \end{matrix}$$

Figura7. Transformación T no cerrada que ilustra el "menor poder de transformación" de las transformaciones cerradas. $T^4(a)$ es c y $T^5(a)$ es m, pero $T(m)$ es indenifida

3.1. Vectores

En esta parte, Ashby introduce una relación que será comentada constantemente a lo largo de su libro: la del todo y sus partes. Es necesario encontrar una forma de representación que permita distinguir el estado de un sistema, del estado de sus componentes. Ashby se vale para ello de lo que denomina estados compuestos, descripciones del estado de cada una de las partes de un sistema. Para representarlos el autor utiliza **vectores**, entidades compuestas de un número definido de **componentes** representados con la notación $(a_1, a_2, \ldots, a_n)$. Los vectores serán considerados en adelante como un tipo de variable.

Dos vectores son considerados iguales solamente si cada componente de uno es igual al componente correspondiente del otro. Por ejemplo, $(4,3,2,1)$ y $(4,3,2,1)$ son vectores iguales, mientras que los vectores $(4,3,8,1)$ y $(4,3,8,2)$ no son iguales. Si los vectores poseen diferentes elementos son considerados no comparables, por ejemplo $(4,2,3,5)$ y (H,T). La transformación se realiza sobre un vector, no sobre uno de sus componentes, ya que el vector entero es el operando.

Se presenta una nueva forma de notación de transformaciones sobre vectores. Por ejemplo, se tiene el vector $(0,1,1)$ de donde se deducirán los demás vectores aplicando la siguiente transformación, el primer y segundo elementos del operando transformado serán iguales, respectivamente, al segundo y tercer elemento del vector anterior, y el tercer elemento del vector transformado será igual a la suma del primer y segundo elementos del vector anterior (ver figura 8).

Las representaciones canónicas son importantes para Ashby pues para él, son una forma estándar de describir todo sistema dinámico determinista. Tanto las representaciones canónicas como las tabulares pueden, a juicio de Ashby, utilizarse para representar sistemas biológicos con rigor y generalidad.

Ashby aclara que de igual forma que existen problemas que no pueden resolverse empleando métodos y matemática convencionales, existen problemas **no resolubles** en los cuales no puede definirse una trayectoria . Hasta este punto, se

$$f = \begin{cases} a' = b \\ b' = c \\ c' = b + c \end{cases}$$

(a)

$$(0,1,1),(1,1,2),(1,2,3),(2,3,5),(3,5,8),\ldots$$

(b)

Figura8. Representación de una transformación (a) sobre los elementos de un vector (a, b, c) y la transformación obtenida (b)

han analizado problemas en donde dados una transformación y un estado inicial, es posible obtener una trayectoria "integrando" una transformación. Ashby cita las ecuaciones diferenciales no integrables o no resolubles en donde la trayectoria no puede ser obtenida a causa de restricciones matemáticas.

Ashby concluye esta sección enfatizando que todo sistema dinámico determinista corresponde a una transformación uni-valuada, aunque tiene el cuidado de no dogmatizar, como él mismo afirma, sobre los sistemas del mundo real.

4. Máquina con Entradas

La máquina como una unidad simple se ha definido por una o varias transformaciones, cada una de las cuales contiene una operación. Los componentes más importantes de estas máquinas son los operandos o elementos a ser manipulados, y el operador o la acción que lleva de un elemento a otro.

4.1. Parámetros

En esta sección, Ashby introduce una nueva familia de máquinas que pueden operar bajo distintas condiciones y modificar por ello su comportamiento. Esta nueva familia contiene más de una transformación, con operandos y operadores como los estudiados hasta este punto y un componente adicional para su manipulación.

Este componente es necesario para que la máquina pueda decidir cuál es la transformación a realizar y se conoce como parámetro. La figura 9 ilustra una máquina con parámetros.

Un **transductor** o máquina con entradas es un conjunto de transformaciones cerradas uni-valuadas cuyo comportamiento puede variar en función de un parámetro. Se puede también definir un transductor como una caja negra que transforma una señal de entrada en una señal de salida de diferente naturaleza.

Algebráicamente, un transductor es un sistema de ecuaciones con una o más variables dependientes. Por ejemplo $z' = z + w$ y $w' = w - z$, donde la nueva z, z', depende del valor anterior de w y viceversa. La figura 10 ilustra gráficamente un transductor.

↓	a	b	c	d
R_1	c	d	d	b
R_2	b	a	d	c
R_3	d	c	d	b

Figura9. Si se tiene un conjunto de transformaciones R_1, R_2 y R_3 que actúan sobre el mismo conjunto de operandos, a, b, c y d, el parámetro que indica qué transformación aplicar es el subíndice x de R_x

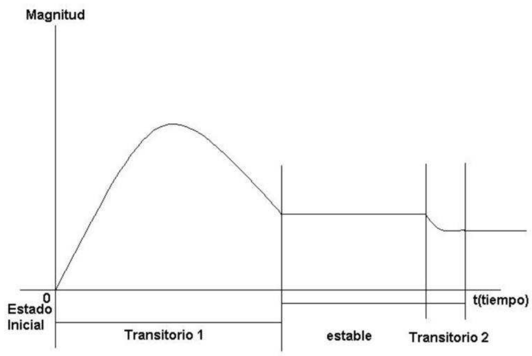
Figura10. Ejemplo de transductor

Ashby se interesa en el comportamiento uniforme de una máquina. La idea de transitorio se refiere a la respuesta de una máquina después de alguna perturbación en que las entradas han sido constantes. Un **transitorio** es una secuencia de estados estables o no repetitivos, como se ilustra en la figura 11.

| Z B Z C X Z | X X X X . . .

Transitorio 1 Ciclo estable

(a)



(b)

Figura11. Ejemplo de transitorios en una máquina de estados (a) y de una magnitud contra el tiempo (b)

4.2. Acoplamiento de Sistemas

Una de las propiedades fundamentales de las máquinas con entradas o transductores, es la de poder acoplarse de tal forma que dos o más máquinas formen una sola. Este acoplamiento puede hacerse con máquinas o transductores que contienen una sola transformación, la cual establece una relación uno a uno. En la figura 12 se muestra este acoplamiento con dos transductores, $T1$ y $T2$, con una sola transformación cada uno, $R1$ y $S1$, y un solo conjunto de operandos a_i. La entrada de estas máquinas va hacia $T1$ y el resultado entregado por la transformación $R1$ entra directamente hacia $T2$, produciendo una salida por la transformación $S1$.

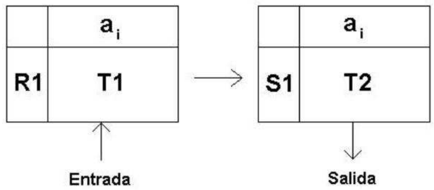


Figura12. Ejemplo de acoplamiento uno a uno

Existen igualmente acoplamientos en donde intervienen dos máquinas, una con varias transformaciones y otra con una sola transformación. En la figura 13 puede observarse este tipo de acoplamiento entre las máquinas $T1$ o máquina 1 y T_j o máquina 2, cuya entrada es un vector (a, b) de dos dimensiones. La máquina 1 cuenta con una única transformación $R1$ y un conjunto de operandos a_i; mientras que la máquina 2 cuenta con j-transformaciones y un conjunto de operandos b_i. Para relacionar ambas máquinas, se creó una máquina que no posee la propiedad de cerradura donde el resultado de la transformación de la máquina 1 determina cual será la j-transformación de la máquina 2. Las entradas de ambas máquinas son obtenidas del vector (a, b), la transformación $Z1$ sólo se necesita para la obtención de la j-ésima evaluación de la máquina 2; la alimentación de la transformación $Z1$ es la salida de la máquina 1. La máquina 2 depende de la máquina 1, lo que puede llamarse relación de dominación de una máquina sobre otra.

Cuando es necesario acoplar dos máquinas o transductores, cada una con más de una transformación, se necesita crear una máquina por cada transductor. Es importante recordar que un transductor es una máquina que posee la propiedad de cerradura y una máquina puede o no contener esa propiedad. En la figura 14 puede observarse gráficamente el acoplamiento entre dos transductores, T_k y T_j, el primero con k-transformaciones y el segundo con j-transformaciones. La entrada es un vector bidimensional (a, b), cada transductor posee sus propios conjuntos de operandos, a_i para el primero y b_i para el segundo. Se creó la máquina j para determinar el valor de la j-transformación a utilizar en el transductor 2 y también se creó la máquina k para determinar el valor de la k-transformación a utilizar en el transductor 1. La salida será un vector formado por el resultado que arrojen T_k y T_j en sus respectivos k y j. En este tipo

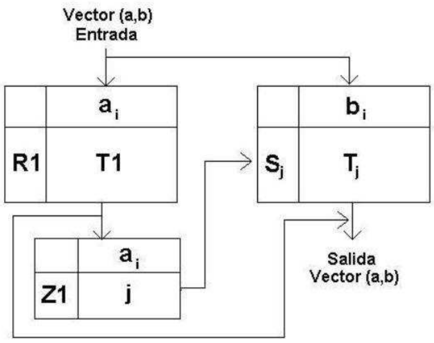


Figura13. Ejemplo de acoplamiento 1-n

de acoplamiento, el vector de salida depende de ambas máquinas, por lo que la relación de dominación es de una máquina sobre otra y viceversa.

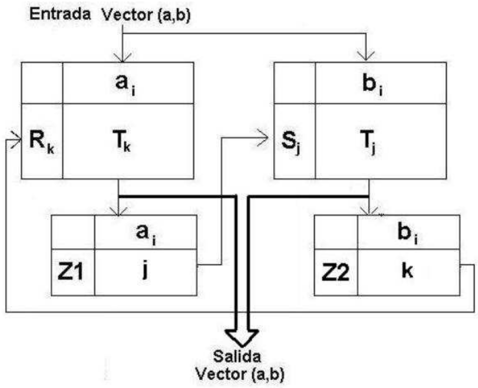
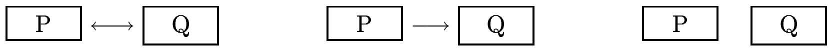


Figura14. Ejemplo de acoplamiento n-n

4.3. Retroalimentación e Independencia

Ashby se interesa en este punto en la noción de efectos inmediatos. Para estudiar o controlar un sistema, lo mejor es dividirlo en varias partes, al dividirlo siempre existe la posibilidad de que algunas partes del sistema queden o no interconectadas entre sí, lo cual depende de la afectación inmediata que una parte ejerza sobre otra. Esto en general puede representarse de diferentes maneras, como se muestra en la figura 15.



(a) (b) (c)

Figura15. Efectos inmediatos: P tiene el significado básico de estado de equilibrio, P tiene una afectación inmediata sobre Q y viceversa (a); sólo P tiene un efecto inmediato sobre Q (b) y P no afecta Q y Q tampoco afecta P

En la figura 15(c) se muestra un sistema sin conexiones, donde ninguna de las partes del sistema tiene afectación inmediata sobre la otra. Esto hace posible que los sistemas puedan estudiarse por separado, en cuyo caso se dice que el sistema es **reductible**.

4.4. Sistemas muy Grandes

La cibernética se interesa en sistemas de gran complejidad, e.g. máquinas de cómputo, sistemas nerviosos, sociedades. Al referirse Ashby a los sistemas muy grandes no sólo menciona cuáles son, sino que menciona también cómo es posible especificarlos para estudiarlos, y menciona tres propiedades que pueden presentar este tipo de sistemas.

De acuerdo a la cibernética, los sistemas muy grandes deben ser caraterizados por el número de partes distintas que lo componen, esto es, el número de estados definidos en el sistema, o si los estados están definidos por un vector, el número de componentes en el vector. Es importante mencionar que el autor hace particular énfasis al referirse al tamaño de los sistemas, pues al hablar de sistemas grandes se refiere a lo que denomina su complejidad y no al número de elementos que tiene el sistema, i.e. si el sistema es muy complejo, entonces se dice que es muy grande. Lo complicado de los sistemas es relativo pues depende directamente del punto de vista funcional de lo que se quiera estudiar, definido por el observador, e.g. si tenemos un sistema dinámico de cinco personas de una familia, puede decirse que el sistema se compone de cinco partes, pero este número de partes puede cambiar si se desea observar el sistema como un conjunto de átomos.

Acoplamiento Aleatorio. En cibernética, cuando se habla de sistemas grandes se hace referencia a sistemas muy complicados, ante esto es posible preguntarse ¿cómo se debe proceder? y ¿cómo debe ser especificado el sistema?. En su libro, Ashby muestra que las respuestas a estas preguntas pueden ser más sencillas de lo que parece y sugiere especificar el sistema de forma estadística, ya que de esta manera, si existen demasiadas partes para la especificación individual, entonces se debe especificar por un método manejable de reglas, donde cada una de las reglas pueda ser aplicada a muchas de las partes. Esto significa que una regla especificará una distribución de partes, donde lo que se observa es lo que caracteriza al sistema. Para hacer el acoplamiento del sistema, es necesario utilizar el mismo método estadístico que se utilizó para estudiarlo. Es posible que la especificación para el acoplamiento no sea completa, en cuyo caso será necesario encontrar algún criterio para completarla, y saber que cuando se utiliza este tipo de acoplamientos, se tiene siempre un componente de aleatoriedad.

En los sistemas grandes se observan las siguientes características: muchas repeticiones en sus partes, pocos efectos inmediatos y ligero acoplamiento. Ashby llama **propiedades locales** al proceso de unión o afectación que tienen los subsistemas con algunas de las partes del sistema pero no con todas. Un ejemplo muy claro que se menciona de esta propiedad es la reacción química del nitrato de plata en solución con el cloruro de sodio, este es un sistema grande, sus partes (átomos, iones, etc.) son principalmente repetitivas, ya que sólo existe una docena de tipos, además de que cada parte tiene un efecto inmediato en sólo una pequeña parte de la totalidad de ellas, así que el acoplamiento de un ion de plata con un ion de cloruro no tiene efecto sobre la gran mayoría de los otros pares de iones. El resultado propiamente acoplado de las dos soluciones es cloruro de plata y los iones pueden reconocerse y acoplarse repetidas veces en el recipiente.

Las **propiedades de auto-bloqueo** permiten el "aislamiento" de algunos subsistemas que forman parte del sistema completo, lo cual puede ser útil para fines de preservación, de protección o de estabilización del mismo sistema. Cabe mencionar que existen muchos sistemas en la naturaleza que presentan esta propiedad de auto-bloqueo, y sólo en algunos de ellos es posible explicar con precisión cómo es que se desarrolla esta propiedad. ¿Cuáles son los mecanismos que activan el auto-bloqueo?, ¿quién o qué indica que el sistema se ha completado y debe estabilizarse?. Estas son preguntas que Ashby no menciona pero en cuya respuesta bien valdría la pena adentrarse.

Cuando en una parte del sistema surge una transformación y el valor resultante de la primera depende de la segunda parte del sistema, el resultado de la transformación afecta la probabilidad de que exista posteriormente la segunda parte del sistema en otro intervalo de tiempo y en otro lugar. Esto es, cuando el sistema crece por autoproducción de sus subsistemas bajo entradas, el crecimiento y decrecimiento del sistema se caracteriza por un parámetro K del sistema como se muestra en la siguiente fórmula: $n = n_0 e^{(k-1)t}$. En tales casos, se habla de **propiedades que procrean**.

5. Estabilidad

Los sistemas naturales tienen comportamientos regulares, cuya actividad resulta invariable a cambios en su ambiente. Los sistemas naturales se pueden entender como la integración de varios subsistemas que comparten un objetivo común, y los cuales deben conservar también, comportamientos regulares. Los conceptos de estabilidad, estado de equilibrio, ciclo, regiones estables y perturbaciones, ayudan a entender los comportamientos regulares de los sistemas, por lo que Ashby se detiene a analizarlos en este capítulo.

La palabra estabilidad carece de una definición bien establecida. Sin embargo, en su documento Ashby no pretende establecer una terminología mejor a la ya existente concerniente a estabilidad.

El término más simple del cual partir para tratar de definir estabilidad es el de invariabilidad. El que un sistema sea invariante implica que aún cuando sea susceptible a una serie de cambios, existe algún aspecto del sistema que permanece sin cambios. La invariabilidad es la idea básica de la estabilidad.

Ashby establece que un **estado de equilibrio** ocurre cuando un estado y su transformación son iguales, es decir, la transformación de un estado devuelve el mismo estado. Algebráicamente, esto se denota $T(x) = x$, por lo que, todo estado que cumpla con la igualdad dada es considerado un estado de equilibrio.

Un **ciclo** es una secuencia de estados generados por la repetitiva aplicación de la transformación sobre algún estado en algún punto de la secuencia repetida en forma periódica. Sea T la transformación ilustrada en la figura 16(a), se verifica que se genera la trayectoria $a\ c\ b\ h\ g\ c\ b\ h\ g\ c\ b\ \ldots$, es decir, se tiene un ciclo en $c\ b\ h\ g$, como se ilustra en la figura 16(b).

La noción de ciclo está relacionada con la de estado de equilibrio. De la figura 16(b) es posible referirse al ciclo como un conjunto de estados en equilibrio. Dada la definición de estado de equilibrio, se observa que este no genera un nuevo estado, i.e. el estado generado después de aplicar una transformación no cambia. Algo similar puede suceder con un conjunto de estados que se repiten, lo cual se conoce como **región estable**.

$$T : \downarrow \begin{array}{cccccccc} a & b & c & d & e & f & g & h \\ c & h & b & h & a & c & c & g \end{array}$$

(a)

$$\begin{tikzcd} c \arrow[r] & b \arrow[d] \\ g \arrow[u] & h \arrow[l] \end{tikzcd}$$

(b)

Figura16. Transformación (a) incluyendo un ciclo (b)

Considérese la transformación T de la figura 17, la cual no tiene estados de equilibrio, pero sí un ciclo comenzando en el estado b: $b\ g\ b\ g\ \ldots$ Aquí es de notarse que la iteración sucesiva sobre estos dos estados no genera estado nuevo alguno. Los estados b y g forman una región estable, i.e. el conjunto de estados b y g es estable con respecto a T.

$$T: \downarrow \begin{matrix} a & b & c & d & e & f & g & h \\ p & g & b & f & a & a & b & m \end{matrix}$$

(a)

$$T: \downarrow \begin{matrix} a & \mathbf{b} & c & d & e & f & \mathbf{g} & h \\ p & \mathbf{g} & b & f & a & a & \mathbf{b} & m \end{matrix}$$

(b)

Figura17. Transformación no cerrada (a) con una región estable formada por los estados b y g (b)

5.1. Perturbaciones

Hasta aquí, los conceptos tratados involucran sólo un estado de equilibrio o un conjunto de estados estables. Sin embargo, no se han considerado los estados en las proximidades de un estado de equilibrio.

Una **perturbación** es cualquier desplazamiento del estado de equilibrio a cualquier otro estado vecino. Bajo esta definición, sea un sistema con transformación T, a un estado de equilibrio bajo T y sea D una transformación denominada operador de desplazamiento, la cual desplaza un estado inicial a otro estado. En este contexto, D es una perturbación del sistema. Dado un estado de equilibrio a y considerando su perturbación $D(a)$, se define al estado a como estable bajo el desplazamiento D si y sólo si, la transformación sucesiva de $D(a)$ conduce nuevamente al estado de equilibrio a. En otras palabras, se debe cumplir

$$\lim_{n \to \infty} T^n D(a) = a$$

La presencia de perturbaciones en un sistema siempre es posible, por ello, en la práctica, los únicos estados de equilibrio que pueden persistir son aquellos que son estables bajo las perturbaciones del sistema.

Se considera que un sistema está en equilibrio sólo si un conjunto bien definido de desplazamientos D es especificado. Ashby sostiene que si la especificación es explícita, D está completamente definido. D puede no estar definido explícitamente pero ser entendido y catalogado de estable, e.g. los desplazamientos del tipo de fluctuaciones de voltaje.

Sistemas Continuos. Se han considerado hasta ahora sistemas discretos, pero no hay que olvidar que los sistemas reales suelen ser continuos.

En un sistema continuo, considerando un estado de equilibrio a, una perturbación D se suele definir como un desplazamiento de a hacia alguno de sus estados cercanos. Si los estados se definen como vectores de valores numéricos, D puede definirse como la adición (o sustracción) de una pequeña cantidad numérica al estado de equilibrio.

La representación con valores numéricos asegura, según Ashby, el tratamiento de formas más especializadas de estabilidad, por su facilidad para trazar los cambios a través de estados $D(a), TD(a), T^2(a), \ldots$.

Ashby afirma igualmente que la noción de estabilidad no tiene porqué asociarse a calificativos positivos. Un estado estable puede significar comodidad deseable, o bien dolor indeseable para algún paciente, por ejemplo.

5.2. Equilibrio en el Todo y en las Partes

Un sistema puede estar compuesto de varias partes. En estos casos se debe analizar la relación existente entre equilibrio y acoplamiento de las partes.

Considérese un sistema formado de dos partes, A y B, como se ilustra en la figura 18. Supóngase también que el sistema completo está en equilibrio, es decir, el estado del todo permanece sin cambios en el tiempo. Se debe notar también, que un estado de todo el sistema es un vector cuyos componentes son el estado de A y el estado de B, por lo que, dado que A y B son subsistemas, estos deben estar en equilibrio también.

$$\boxed{\mathrm{A}} \longleftrightarrow \boxed{\mathrm{B}}$$

Figura18. Sistema formado de dos partes

En este ejemplo, el estado de A no sólo no cambia, sino que su valor de entrada está determinado por el estado de B, el cual a su vez no cambia. De manera que A está en equilibrio en las condiciones provistas por B, y lo mismo puede afirmarse para B. De ahí que si el todo está en equilibrio, cada una de sus partes debe estar en equilibrio en las condiciones provistas por las demás partes. El argumento puede ser invertido, de modo que la implicación "el sistema completo está en un estado de equilibrio si y solo si cada una de sus partes está en un estado de equilibrio en las condiciones dadas por la otra parte" es también cierta.

Ashby se refiere informalmente a la **máquina homeostática** como una máquina que se dirige y mantiene en estado de equilibrio.

6. Caja Negra

En este capítulo, se plantea una metodología para el análisis del comportamiento de sistemas físicos y biológicos cuando estos se consideran como cajas con entradas que el investigador puede manipular y salidas que puede observar, pero desconociendo el contenido de la caja. Se pretende plantear un método a tráves del cual se adquiere el conocimiento científico, lo cual Ashby denomina el desarrollo de una epistemología científica. Se discute en este capítulo qué tipo de deducciones puede hacer un investigador de la cibernética y cómo puede asegurar que sus deducciones son válidas.

La caja negra es un recurso inventado por los ingenieros para el estudio de dispositivos mecánicos cuya estructura interna es desconocida y de los cuales se conocen sólo sus entradas y salidas. Este método es factible de usar en diversas disciplinas, en particular en las biológicas y psicológicas en las que el desconocimiento de los objetos de estudio es amplio.

Cualquier fenómeno que se desee investigar, se puede ver, desde el punto de vista dinámico, como una caja negra con la condición de contar con la posibilidad de interactuar con ella aplicándole perturbaciones y de observar su respuesta a través de instrumentos. Con esto se establece una categoría que incluye tanto sistemas físicos como biológicos. Uno de los principales aspectos del trabajo de Ashby es que resalta cómo la cibernética, a diferencia de la física clásica, considera el papel del observador y plantea cómo es posible considerar al observador dentro de una metodología de investigación científica.

Ashby asume que todo investigador tiene un conjunto de creencias y una de sus primeras recomendaciones es evitar asumir suposiciones ante el fenómeno bajo observación, es decir, evitar hipotetizar sobre la naturaleza de la caja negra y su contenido. La segunda recomendación de Ashby es considerar que el experimentador y la caja negra forman un **sistema acoplado**, y que el experimentador dispone de ciertos recursos para perturbar y observar la caja. En un intento por formalizar matemáticamente, Ashby considera que los datos primarios de la investigación quedarán modelados como vectores de dos componentes *(estado de entrada, estado de salida)*.

El que la caja negra y el observador formen un solo sistema se suma a otras teorías, como la segunda ley de la termodinámica o el principio de incertidumbre, en el que no existe separación entre el medio y el propio sistema. Esto es una propuesta holística, característica de los posteriormente llamados sistemas complejos.

La definición de cuáles son las catacterísticas observables a considerar abre una discusión sobre el diseño mismo de los posibles experimentos, restringidos tanto por las posibilidades como por los intereses del investigador y por su habilidad para establecer una elección adecuada basada definitivamente en su experiencia. Esta consideración será importante cuando se trate la especificación del tipo de cajas negras que podrán utilizarse para comprensión de otras, y el tipo de simplificación que podría ser válido en un entendimiento que pudiese denotarse científico, mediante un homomorfismo adecuado.

Investigación. Ante las diferentes perspectivas para proceder con la investigación sobre la caja negra, Ashby concluye que se requiere de un protocolo de investigación en el que se registre la secuencia de los datos recolectados. Esta secuencialidad auxiliará en la identificación de patrones de comportamiento en el tiempo.

Aunque Ashby habla de secuencias de parejas *(estado de entrada, estado de salida)* como el único conocimiento con el que cuenta el investigador para analizar el comportamiento de las cajas negras, parece que hay más interpretación que esta sola observación.

Si bien es cierto que las observaciones son secuencias de dupletes, la interpretación se hace en términos de tripletes. En efecto, en el ejemplo ilustrado en la figura 19, se están considerando implícitamente tripletes de la forma *(entrada, estado de salida al momento de introducir la entrada, estado de salida después de introducida la entrada)*. La interpretación de la secuencia de datos se hace en dos tiempos consecutivos, en donde en un tiempo t se consideran tanto el estado actual del sistema como la perturbación inducida, y en el tiempo $t+1$ sólo se considera el efecto de la perturbación dado el estado del sistema en el tiempo anterior.

El tiempo es una dimensión más a considerar por parte del observador. Sin embargo, esta posibilidad queda aparentemente coartada al considerar sólo eventos con distancia en el tiempo igual a uno. Así, en el ejemplo de la figura 19 no hay más relación con eventos más allá que al previo anterior. Pareciera que esta limitación está impuesta a las cajas negras en sí, al considerarlas (implícitamente) markovianas, y no considerar las capacidades del observador, que estaría en posibilidad de extender en el tiempo su análisis, aunque en los capítulos previos pareciera que las causalidades son directas. Ashby termina con una deducción fundamental: *todo conocimiento que se obtenga de una caja negra (dadas las entradas y salidas) es tal que puede obtenerse por la re-codificación del protocolo; todo eso y nada más.* [capítulo 6, p. 89].

No se pide destreza alguna al experimentador para manipular las entradas. Ashby pretende introducir al lector en la consideración de cierta "semejanza" entre cajas negras. Sin embrago, al sugerir que mayor experiencia puede implicar mejor manipulación de la caja desconocida, anticipa la idea de que estudiar cierto tipo de cajas, podría ser -en cierto sentido- equivalente a estudiar otras que se le parecieran.

tiempo:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
estado:	αg	αj	αf	αf	αf	βf	βh	βh	αh	αj	βf	αh	βj	βf	αh	βj	αf

Figura19. Protocolo describiendo el comportamiento de un sistema con entradas α y β, y salidas f, g, h y j. En el tiempo 1, el sistema producía la salida g y a la entrada α dada por el experimentador, produjo la salida j en el tiempo 2, y así sucesivamente

Determinismo. En una investigación, se debe tener una cantidad generosa de registros con la finalidad de detectar repetición de la conducta. Esta repetitividad se debe dar en términos de lo que puede llamarse un conjunto de condiciones iniciales bajo un experimento debidamente controlado. Las regularidades que se pueden encontrar pertenecen a la dimensión temporal o espacial, en las entradas, en las salidas, en la secuencia de estados ante la presencia de ciertos estímulos y producción de ciertas salidas. Con ello se identifican **estados absolutos** en los que se observen las mismas respuestas ante las mismas perturbaciones. Detrás de esta búsqueda se encuentra la idea de obtener una representación canónica. Es importante señalar que la representación obtenida podría no tener estados absolutos, lo que da lugar a dos considerandos:

- reformular el experimento para establecer mayor diferenciabilidad entre entradas y salidas, de tal suerte que se logre que bajo condiciones y estímulos iguales se tuviese el mismo efecto, o bien,
- buscar estimadores estadísticos cuando se estudien sistemas conteniendo estados que por naturaleza no son absolutos.

Con esto, el autor, introduce la idea de cajas negras deterministas y no deterministas. Aunque se inclina por las cajas deterministas, deja abierta la posibilidad de cajas negras con comportamiento estocástico, proporcionando una manera de evaluar este comportamiento, por ejemplo, mediante una distribución de probabilidades para diferentes estados finales dadas las mismas condiciones y las mismas perturbaciones. Una vez que se obtiene el protocolo, se puede inferir el determinismo del sistema y deducir su representación canónica.

La pregunta que queda en el aire es ¿sólo hay una representación canónica?.

Estados Inaccesibles. Para distinguir una especie de cerradura de las observaciones a las que se les aplican perturbaciones, se definen los estados inaccesibles, sobre los cuales el experimentador no tiene ningún control y más bien le marcan los límites de su observación. Hay estados a los cuales no se puede llegar por diferentes transformaciones y transiciones que se pueden dar en el sistema, e.g. g en la figura 19. De alguna manera se observaron pero no ha sido factible encontrar transiciones que lleven a ellos.

Si el sistema fuese cerrado en el sentido de que todo estado pudiese ser producido por cierta perturbación, el experimentador tendría control total sobre el sistema. No sólo se ganaría en conocimiento del sistema, sino en el control del mismo. Sin embargo, como actualmente se reconoce, hay muchos factores que conducen a tener una gran incertidumbre sobre las mediciones en particular, porque las herramientas de medición son falibles. Pero más importante es la imposibilidad real del investigador de establecer las entradas adecuadas, ya sea por carencia de alguna variable de control o por imposibilidad de establecer alguna configuración específica.

Deducciones sobre las Conexiones. A pesar de tener un control sobre las perturbaciones y las salidas observadas, la dedución del diagrama de las conexiones internas no es único. Esto conduce a Ashby a la conclusión de que la conducta del sistema no especifica las conexiones de manera unívoca. El problema principal de las cajas negras que tienen comportamientos similares es que pueden contener esquemas de conexiones internas totalmente diferentes.

Resulta interesante que esto sea un impedimento importante para justificar una epistemología basada únicamente en un punto de vista etológico o conductista. Si consideramos que el comportamiento corresponde a la dinámica de la caja negra, lo que se está perdiendo es justamente su particularidad. Lo significativo es que diferentes sistemas pueden dar lugar a dinámicas similares.

6.1. Máquinas Isomorfas

El discurso anterior sirve de preámbulo para las máquinas isomorfas, considerando isomorfo con el significado de "similar en el patrón". ¿En qué patrón?. Pueden considerarse las relaciones que conducen el patrón de comportamiento, sin considerar el aspecto visual de la observación se pueden encontrar diversos patrones. Dado que las cajas negras no pueden ser conocidas en su interior, establecer similitudes de comportamientos con otras cajas será el límite de equivalencia entre ellas. Así, un isomorfismo es el límite máximo de equivalencia para aquellas cajas negras con patrones de comportamiento "idénticos". Sin embargo, las cajas pueden ser de naturaleza muy disímbola. Por ello, será importante establecer relaciones de isomorfismo entre diversas cajas.

Lo que resulta útil al establecer isomorfismos, es la posibilidad de utilizar representaciones isomorfas entre diferentes tipos de cajas, en las que una de ellas sea manipulable más fácilmente para el objeto de estudio. Hay que notar, que esto incluye isomorfismos entre representaciones matemáticas y cajas "reales", por lo que la ecuación diferencial de un sistema guarda un isomorfismo con él. Su resolución es más económica que la implementación del sistema real y que el estudio de las respuestas que genera.

Un isomorfismo entre dos máquinas puede establecerse encontrando equivalencias entre ellas a partir del mapeo de sus transformaciones en grafos cinemáticos. Si es posible establecer correspondencias en las transformaciones una a una entre los estados de entrada y de salida de ambas máquinas, las máquinas son isomorfas.

La definición formal de isomorfismo entre dos máquinas se establece *si en la representación canónica de cada una de ellas se pueden establecer transformaciones unívocas en los estados de entrada y de salida de ambas máquinas.* Una estrategia para establecer un isomorfismo entre máquinas es reetiquetando estados o variables. La reetiquetación de estados es más general que reetiquetar variables, ya que ésto último corresponde a una reetiquetación de estados de manera genérica. Sin embargo, el reetiquetado de estados -aunque más laborioso-permite realizar más detalladamente las reasignaciones.

Se puede usar el método de coordenadas normales, usado en la física matemática, para obtener sistemas de referencia de manera tal que los problemas obtengan una solución directa de manera que el isomorfismo mantenga independientes las variables independientes

6.2. Máquinas Homomorfas

El uso del isomorfismo presenta una limitación en el análisis de las máquinas o de los sistemas y es que implica "igualdad" ya sea esta funcional o conductual, lo cual resulta difícil de asegurar en cualquier tipo de máquina. Por ello, para hablar de algún grado de semejanza entre máquinas se puede relajar la definición y hablar de *homomorfismo.* Dos máquinas son homorfas cuando se pueden aplicar transformaciones muchos-a-uno, en las que varios estados de la más compleja son mapeados a un solo estado de la más simple. Es así que dos máquinas son homomorfas cuando se vuelven semejantes y una de ella es simplificada, es decir, es representada con menos detalle que la original. De igual manera, un observador sin el poder de resolución para distinguir todos los estados de la máquina más compleja podría reportarlas como isomorfas.

La introducción de homomorfismo no es tan sólo una disminución de granularidad y por tanto de información en el conocimiento de los sistemas. Es de hecho también una necesidad para la comprensión de sistemas muy complejos, como son los sistemas biológicos. Lo complicado de la metodología e incluso de lo que se pudiese asimilar conlleva a la necesidad de una simplificación, para que se pueda llevar a cabo un estudio.

Surge entonces el cuestionamiento acerca de si puede conocerse el funcionamiento de una caja o sistema, sabiendo que siempre se trabaja con ”medias verdades”. El autor responde introduciendo dos tipos de conocimiento: el parcial y el completo. El conocimiento parcial corresponde a segmentos o casos de conocimiento que son verdaderos pero que no son completos más que para los segmentos que se consideran. El conocimiento completo considera categorías de los posibles casos y propiedades entre categorías. Ashby ofrece como ejemplo el primer homomorfismo considerado en matemáticas, acerca de la paridad del resultado de multiplicar dos enteros, categorizándolos por su paridad. El homomorfismo también puede existir dentro de la misma máquina, cuando sus posibles simplificaciones mantengan sus características propias. Es decir tengan una descripción completa.

En el estudio de los sistemas biológicos, debe hacerse una restricción deliberada a algún homomorfismo. Esto es una condición tanto justificada como inevitable ya que la recepción de toda la información involucrada en el estudio de dichos sistemas es imposible de considerar, ya sea por limitaciones de los canales de información o por el volumen mismo de la información recibida. Un homomorfismo logra un conocimiento parcial que aun siendo parcial, no es el menos completo dentro del sistema y al mismo tiempo puede ser suficiente para los propósitos prácticos que se requieran.

Un sistema significa un conjunto de variables para los observadores, cada subconjunto implica un comportamiento diferente a ser explicado. En el caso de máquinas muy complicadas, podría haber tantas sub-máquinas -y por ende comportamientos- como número de observadores.

La ciencia -representada por los descubrimientos de los observadores- no está directamente relacionada con lo que el sistema es ”realmente”, sino coordinando los diferentes descubrimientos de los observadores, siendo cada uno de esos descubrimientos una porción de la verdad completa.

Si bien Ashby menciona que la ciencia no está relacionada con lo que el sistema es ”realmente”, pareciera que de todos modos propusiera una epistemología en donde existiera de cualquier manera la ”verdad” acerca del sistema, aunque ésta probablemente fuese muy difícil de capturar, dificultad derivada de nuestra imposibilidad de manipular la información mediante el seguimiento de todas las variables y su dinámica y la manipulación que se requeriría. El autor hace una separación entre lo observado por un científico y lo observado por un ingeniero, ya que este último tiene una visión más simplificada de los objetos que utiliza para la construcción y no le interesan los detalles atómicos del material con el que están hechos los objetos.

Rejilla. Cuando se llevan a cabo simplificaciones de un sistema dinámico, existen relaciones entre ellas de manera que de puede establecerse cierta jerarquía u ordenamiento entre las posibles simplificaciones. Estas simplificaciones pueden relacionarse mediante una rejilla, o estructura que refleje el ordenamiento de las ideas sobre el sistema. Lo interesante es que cuando la rejilla representa una simplificación posible de una máquina, en un extremo se encuentra a la máquina con cada estado distinguido; es el conocimiento del experimentador que toma nota de cada distinción disponible en cada uno de sus estados. En el otro extremo se encuentra el elemento que corresponde a una máquina en la que se han mezclado todos sus estados. Este estado representa una transformación Z que es cerrada y en la que persiste algo, la propiedad más rudimentaria de una máquina que la distingue del resto. Entre los extremos se encuentran diferentes simplificaciones, de manera que *las diversas simplificaciones de un sistema dinámico pueden ordenarse y relacionarse.*

Modelos. El autor deja entrever la importancia que tiene la idea de comparar sistemas homomorfos en el estudio de sistemas vivos. Deja sin embargo esta discusión para su posterior consideración. La idea es que el sistema real y el modelo están relacionados por un homomorfismo, mientras mayor sea el homomorfismo de sus rejillas mejor o más realista es el modelo.

6.3. Cajas muy Grandes

Ashby argumenta que los objetos reales son de hecho cajas negras. Para él, la teoría de la caja negra es la teoría de los objetos o sistemas reales, cuando relacionando objeto y observador se da atención a la pregunta de qué información viene del objeto y de cómo es obtenida. Esta teoría es simplemente el estudio de las relaciones entre el experimentador y su medio ambiente, cuando se le da especial atención al flujo de información. De manera que Ashby concuerda con Goldman en que *un estudio del mundo real se convierte en un estudio de transductores.*

El autor requiere una discusión sobre el concepto de emergencia. Aunque se refiere a la idea de alguna propiedad que no podría haber sido predicha a partir del conocimiento de las partes y de sus relaciones, menciona que no ha habido una definición precisa del término y discute sobre la complejidad y los grados de conocimiento para determinar si existe emergencia por limitaciones de método y conocimiento. De hecho, menciona que si el conocimiento es completo y se tuviera una representación canónica de forma tal que todas las entradas y circunstancias se conocieran para todas las cajas con las que está acoplada la caja negra, entonces se tendría un conocimiento tan completo que toda predicción sería completa y por tanto no habría propiedades emergentes. En este caso, se puede interpretar que la emergencia es resultado o quizás la medida de nuestra ignorancia.

¿Cómo debe un investigador actuar cuando se tienen sistemas tan complejos como el cerebro o una infinidad de cuerpos celestes?. Ashby propone una cuidadosa selección de lo que se desea conocer y propone métodos que en su época se aplicaron a problemas planteados en términos de ecuaciones diferenciales complicadas. La búsqueda de enfoques topológicos permitiría el enfocar los aspectos que realmente interesarían a un investigador sin abrumarse por la inmensa cantidad de datos que el problema completo implicaría.

6.4. Cajas Incompletamente Observables

En esta sección el autor reflexiona sobre los supuestos del observador, en el sentido que cuenta con los medios para observar todo lo que pertenece a los estados de la caja negra. Sin embargo, menciona que una parte importante de la teoría de la caja negra es la concerniente a clarificar las peculiaridades que aparecen cuando el observador sólo puede observar ciertos componentes de todo el estado. Si esto ocurre, habrá variables no observables ya que no es posible observar eventos en los que todas las variables sean significativas. Para ello, Ashby recurre a la necesidad de contar con una memoria. Concluyendo en una regla general *si un sistema determinista es observable parcialmente, y por tanto se convierte (para el observador) en no predecible, el observador puede ser capaz de restaurar la predictibilidad tomando en consideración la historia pasada, i.e. asumiendo la existencia de alguna forma de "memoria".*

Una memoria no es una explicación del comportamiento del sistema, sino que es una declaración de que el observador no puede observar el sistema completamente. La memoria es parcialmente objetiva en la medida que la ignorancia del observador lo oblige a revisar eventos pasados como parte de la conducta del sistema. Esto último refleja que se requiere de un reexamen de primeros principios en el funcionamiento del sistema.

7. Conclusiones

Los cibernetistas como Rosenblueth, Wiener, y más tarde Ashby, sentaron los principios de un programa de investigación muy amplio a ser abordado desde un punto de vista multi-disciplinario, que incluía, entre otras, la psicología, las matemáticas y la teoría de control.

Fundar una ciencia de los sistemas figuraba entre los objetivos de este programa, una ciencia suficientemente general para aplicarse en el estudio de fenómenos tan diversos como los de la medicina, la economía y la biología. Ashby insistió en que el estudio de estos fenómenos, en particular el estudio de sistemas biológicos, debía ser riguroso. De ahí que insista a lo largo de su discurso en lo inadecuado de los métodos de la física matemática conocidos en su época para estudiar este tipo de fenómenos, y de ahí también la justificación para proponer nuevos métodos.

La caja negra es una metáfora de los cibernetistas para estudiar sistemas. En la primera parte del libro de Ashby analizada en este ensayo, el autor introduce conceptos y prepara el terreno para concluir con la noción de caja negra. Para él, estudiar el comportamiento de un sistema haciendo variaciones aleatorias en sus entradas y observando sus salidas, es un método tan defendible como cualquier otro método para aproximarse y comprender un sistema.

Adradecimientos

Enrique Alarcón Ávila, Ma. Guadalupe Jiménez Velasco, Yazid León Fernández de Lara y Stivalis Anahi Martínez Cuevas son becarios del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con los números de expediente 182106, 181509, 182899 y 182108, respectivamente.

Referencias

1. W.R. Ashby (1957) An Introduction to Cybernetics. Chapman & Hall, Londres. *http://pcp.vub.ac.be/ASHBBOOK.html*
2. C. Langton (1984) Artificial Life. Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, SFI/Addison-Wesley.
3. N. Wiener (1948) Cybernetics. John Wiley & Sons, Nueva York.