

## Sistemas Adaptativos Complejos

*John Holland*

Universidad de Michigan, U.S.A.

*(Traducción y adaptación: Alejandro Pazos & Antonio Rivas)*

En primer lugar, se ofrece una introducción al área que se denomina “Sistemas Adaptativos Complejos”. Una gran parte de los estudios en este área se están realizando en la ciudad estadounidense de Santa Fe, donde se investiga en sistemas basados en agentes. Por agentes se quiere decir actores o dispositivos que pueden realizar tareas o ejecuciones. La característica principal de estos agentes es que pueden aprender y adaptarse y que, a medida que aprenden y se adaptan, interactúan entre sí.

Estos sistemas son realmente complejos y se darán unas nociones acerca de lo que esperamos entender de estos sistemas.

Se utiliza la palabra “agente” que ni siquiera es una palabra común en inglés, excepto en economía, y se verá que hay muchas cosas a las que se puede denominar como “AGENTE ADAPTATIVO”:

- En un ecosistema, los organismos serían los agentes adaptativos. La empresa sería el agente adaptativo de la economía.
- En un sistema político, el ser humano sería el agente.
- Y en el sistema inmunológico, el agente adaptativo sería el anticuerpo.

Después, se hablará en más detalle del sistema inmunológico porque es uno de los mejores ejemplos de un sistema adaptativo complejo.

Este sistema es tan bueno que puede distinguir entre miles de moléculas químicas distintas y, así, diferenciar a un organismo de otros.

Si se pudiera lograr un sistema informático que pueda funcionar tan bien como el inmunológico, los virus informáticos serían mucho menos preocupantes. Ahora mismo, hay algunos equipos de investigación en Santa Fe investigando el sistema inmunológico con ese objetivo, y con éxito en algunos de sus estudios.

Lo que es importante aquí es que, aunque todos estos sistemas son distintos, hay, al menos, una manera uniforme de tratarlos y una teoría matemática común que se puede aplicar a todos ellos.

Para analizar los agentes vamos a dividir el sistema (o los agentes) en tres partes.

1) EL SISTEMA DE EJECUCIÓN: Esta primera parte es como un sistema experto; o sea lo que puede hacer el sistema sin adaptarse ni aprender.

2) ASIGNACIÓN DE CRÉDITO: La segunda parte decide cuales de las partes (o reglas) del sistema funcionan y cuales no.

3) DESCUBRIMIENTO DE REGLAS: Es la parte que debe inventar o proponer al sistema nuevas reglas. Esta es la tarea más difícil de las tres.

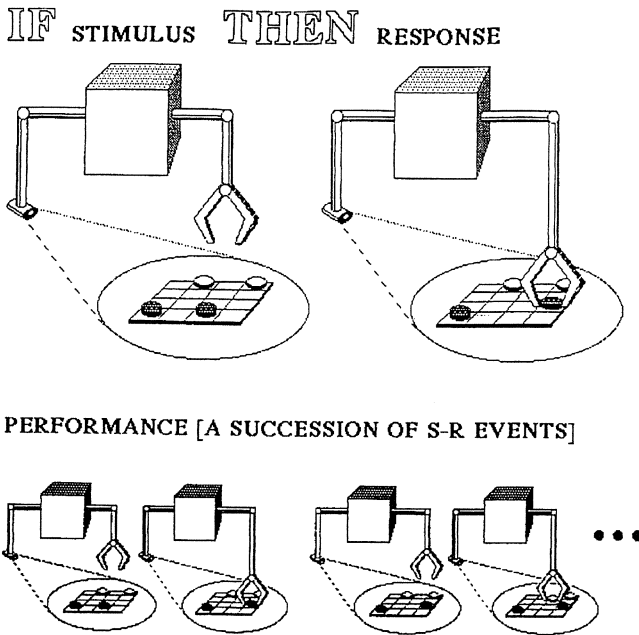


Figura 1.- Un agente basado en reglas.

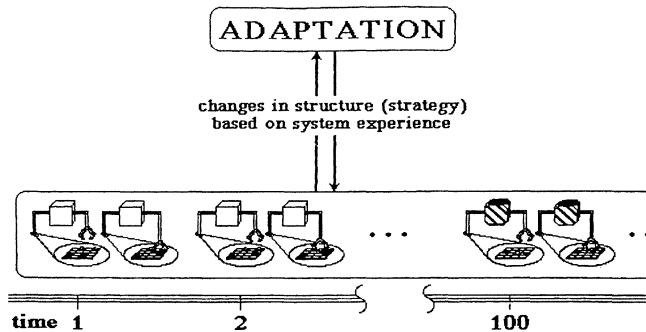
• Se va a utilizar la palabra “adaptación” de forma extensiva, incluyendo tanto los procesos de aprendizaje como los biológicos, los cuales tardan bastante tiempo en instaurarse.

• Se van a tratar estos sistemas en términos de reglas. Eso no quiere decir que se piense que estos sistemas tienen reglas realmente, simplemente es una manera cómoda para hablar del sistema.

• Se van a utilizar reglas que tengan la típica fórmula: SI... ENTONCES...

O sea, si está presente algún tipo de estímulo o antecedente, entonces se realiza alguna acción o respuesta como consecuente.

• Con el tiempo, el comportamiento del sistema será una secuencia de estos acontecimientos a los que llamaremos “acontecimientos E/R”.



SYSTEM	MODIFICATION TIME
central nervous system	seconds to hours
immune system	hours to days
business firm	months to years
species	days to centuries
ecosystem	years to millennia

Figura 2.- Adaptación y aprendizaje.

Se puede pensar en el sistema como si fuese cambiando las reglas poco a poco con el tiempo, a medida de que vaya adquiriendo más experiencia.

Si observamos a los distintos sistemas veremos que:

- Primero, para que el sistema nervioso central cambie la estructura necesita desde unas centésimas de segundo hasta unas horas.
- Para los cambios en el sistema inmunológico normalmente se precisan al menos unos días.
- Una empresa suele tardar meses o años para cambiar su organización.
- Las especies tardan hasta siglos en realizar cambios.
- Pues bien, cuando se trata de un ecosistema, los cambios pueden, incluso, tardar mucho más, incluso milenios.

Lo que es importante es que el mismo proceso es responsable de cada uno de estos cambios y que el aprendizaje y la evolución, en cada uno de estos sistemas, están detrás de todos los tipos de proceso con la misma descripción matemática.

En informática y en ingeniería, en general, la mayoría del trabajo que se realiza trata de optimizar o encontrar el equilibrio o el punto fijo, del proceso.

Pero este no es el caso de los sistemas adaptativos, en los cuales lo que se intenta es mejorar.

Y, en muchos casos, ni siquiera sabemos que es lo mejor; o sea, que no tenemos claro el objetivo deseado. No se sabe cual es el mejor ecosistema, ni hay ningún animal que sea el mejor de la selva. Todos los animales y plantas dependen uno del otro y, por tanto, no se puede decir que uno sea mejor que otro. Este análisis influye directamente en como se puede enfocar el sistema matemáticamente.

## STIMULUS - RESPONSE



**IF** SMALL, FLYING OBJECT TO LEFT

**THEN** TURN HEAD 15° LEFT

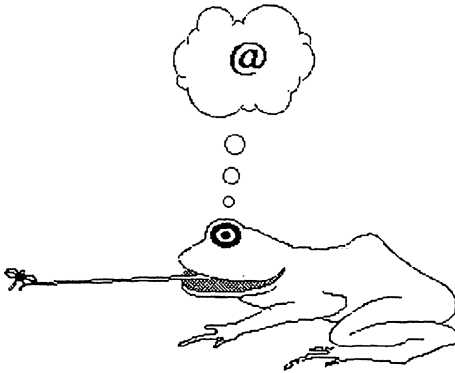
*Figura 3.- Regla Estímulo-Respuesta.*

En principio, se va a estudiar la primera de las tres partes antes mencionada.

Se considerará el sistema de ejecución, donde se estudia que es lo que puede hacer el sistema en un tiempo dado, en función de su experiencia. Sin considerar el aprendizaje ni la adaptación, esto es muy parecido al estudio que, en informática, se hace con los sistemas expertos.

Se tiene una regla sencilla que dice: Si hay un pequeño objeto volando a la izquierda, ENTONCES gira la cabeza 15° hacia la izquierda (Figura 3).

- Hay que destacar que, incluso, esta regla sencilla “a priori” no es tan sencilla, ya que si hay un objeto a la izquierda y la rana mueve su cabeza 15° hacia la izquierda y el objeto todavía le queda a la izquierda, la regla tiene que ser activada otra vez, y seguirá activándose hasta que quede centrado el objeto. Cuando quede centrado el objeto, la condición de la regla ya no quedará satisfecha, y la regla dejará de ser invocada.



```

IF SMALL, FLYING OBJECT CENTERED
THEN SEND @
IF @
THEN EXTEND TONGUE

```

A message, represented here by the uninterpreted symbol @, is typically represented by an uninterpreted bit string in implementations.

Figura 4.- Un pequeño sistema de paso de mensajes basado en reglas.

Se va a añadir una cosa más a las posibilidades de la acción de la regla.

A veces, en vez de dejar a la regla cumplir alguna acción fuera del sistema, se va a dejar que, simplemente, mande algún mensaje a otras reglas.

Así, se tiene un mensaje intermediario; por ejemplo: Si hay un objeto volador pequeño centrado ENTONCES emite un mensaje abstracto (el mensaje no tiene un significado directo, solo es una señal).

- Además, hay otra regla que dice:

Si está presente ese mensaje abstracto ENTONCES cumple esta acción. En el caso de la rana, extender la lengua.

Así, se ha modificado el sistema para que las reglas puedan enviar los mensajes que concluyen.

Cuando se añade esta posibilidad al sistema, ello hace que el sistema sea completo con respecto al cálculo.

Quiere decir que, si puedes escribir un programa en tu lenguaje preferido, sea FORTRAN ó C++, entonces, también se puede encontrar un conjunto de estas reglas que incluyan mensajes que ejecuten lo que ese programa puede hacer.



IF OBJECT TO LEFT THEN TURN HEAD 15° *LEFT* 33  
 IF OBJECT TO LEFT THEN TURN HEAD 15° *RIGHT* 12

**Rules act as competing hypothesis; the stronger the rule the more likely it is to win the competition.**

**Only winning rules post their messages.**

*Figura 5.- Competición de reglas en un sistema paralelo basado en reglas.*

Aquí, se va a hacer algo distinto a lo que hacen los sistemas expertos (Figura 5).

En este sistema, se permite que varias reglas puedan estar activas al mismo tiempo.

De modo que se describe una situación con un conjunto de reglas activas en vez de una única regla.

Además, en vez de elegir las reglas, se permite que las reglas compitan entre sí para determinar que reglas van a estar activas. Así, se tratan las reglas como si fuesen hipótesis, o sea, se tratan no como hechos sino como cosas a probar.

Se asigna un valor a cada regla, el cual representa la utilidad de esa regla en el sistema en tiempo pasado. En las redes de neuronas esto sería la fuerza de cada conexión entre los elementos de la red. En este sistema de reglas sería la fuerza de las reglas.

• Cuando se habla de la siguiente parte del sistema experto que vamos a tratar “Asignación de Crédito en Inteligencia Artificial”, se refiere a cómo cambiar estas fuerzas en función de la experiencia del sistema.

• Lo que hay que recordar es que se tienen varias reglas, las reglas tienen distintas fuerzas basadas en experiencia, y las reglas compiten entre sí en función de sus fuerzas. Las reglas más fuertes normalmente ganan, pero no siempre. La razón es que estas reglas son hipótesis y no son hechos, se probarán algunas de estas reglas más débiles ya que existe la posibilidad que éstas sean mejores que las que ya se han probado.

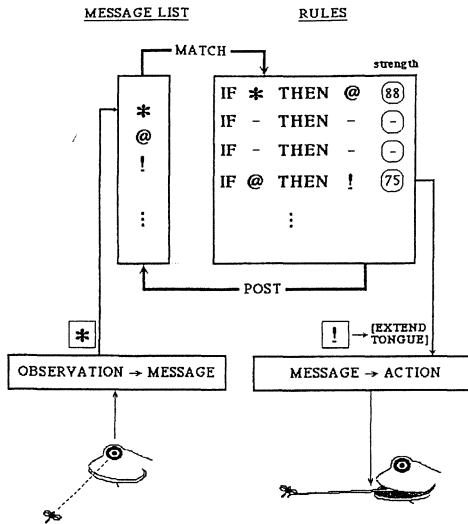


Figura 6.- Sistema de mejora de pase de mensajes.

- Esto es como es el sistema de ejecución.
- Hay algunos mensajes que vienen de fuera del sistema.
- Se colocan en una lista porque puede haber muchos mensajes al mismo tiempo.
- Todas las reglas del sistema miran en esta lista, intentando averiguar si alguno de esos mensajes satisface su condición. Si es así, esta regla entra en la competición.



- Cuando una regla gana en la competición, generalmente, lo único que hace es añadir un nuevo mensaje a la lista.

- Por último, puede ser que algunas reglas o mensajes causen acciones, pero la mayoría de las veces los mensajes permanecerán circulando por el sistema sin causar acciones directas, simplemente activando otras reglas.

El sistema nunca se para, del mismo modo que el cerebro, sigue procesando información permanentemente a medida que recibe nuevos mensajes. No tiene ningún objetivo, o sea, no es como un programa que intenta calcular un número.

El ciclo es, básicamente, que las reglas comprueban todos los mensajes y, a medida de que esos mensajes van desapareciendo, nuevos mensajes los reemplazan en la lista, simulando lo que podría conocerse como “olvido fisiológico”, por ir perdiendo fuerza los mensajes antiguos hasta desaparecer de la lista, dejando un sitio para los nuevos mensajes.

IF	THEN
flat tire while driving red Saab on expressway	slow, pull to trouble lane, get spare

— contrasted with rules as building blocks

IF tag	properties	THEN action
⋮		
	make condition motion	
car	# # skid #	turn toward skid
car	# flat tire moving #	slow down
car	# oil low stopped	turn off ignition
⋮		
	road type car cond road sign	
road	# good none	continue at speed limit
road	# stop sign # #	prepare to stop
road	xway flat # #	pull to trouble lane
⋮		
	size inflation	
tire	# flat # #	get spare
tire	small low # #	use tire pump
⋮		
⋮		

Figura 7.- Ejemplo de paralelismo de reglas.

En Estados Unidos, actualmente, se habla mucho del paralelismo y de los sistemas paralelos, para que valen y para que son útiles.

Ahora, se van a ofrecer algunos ejemplos que explican porque es mejor tener muchas reglas en vez de sólo una.

En un sistema experto sería típico decir (Figura 7):

SI: se pincha una rueda mientras conduzco un Saab rojo en la autopista (se tiene una regla que explica que hacer en esa situación)

ENTONCES: reducir, dirigir el coche al arcén y se busca una rueda de repuesto. Tendríamos que tener otra regla igual para un Saab azul, otra para un Saab verde, etc. Precisaríamos de un gran número de reglas para tener conocimientos expertos sobre este tema, cuando sóloamente va a ser necesario disparar una regla cada vez.

Por el otro lado, lo que se hace en sistema paralelo es utilizar varias reglas al mismo tiempo. Así se tiene un conjunto de reglas que tratan el problema de tener una rueda pinchada y otro conjunto de reglas que expresan que hacer en la autopista cuando se tiene un problema conduciendo, etc.

Lo que es importante, aquí, es que si tuviéramos bien definidas las partes de la situación que sabemos manejar, y si pudiéramos combinar esas partes, entonces podríamos manejar situaciones que nunca hubiésemos visto antes.

En cuanto al aprendizaje o la adaptación del sistema, en particular, se verá que este puede aprender estas reglas, que frecuentemente se prueban, y se les asigna una fuerza (un peso específico) en función de su experiencia. Y, cuando surge una nueva situación, en vez de utilizar solamente una regla, el sistema utilizará este conjunto de reglas como una variante más de esa situación.

Se van a hacer, a continuación, mas consideraciones para comparar los "sistemas paralelos basados en reglas" con las Redes de Neuronas Artificiales. Para empezar, se considerará algo que todos los seres humanos hacen muy bien. Si entras en una escena que sea desconocida en el exterior o bien en una habitación, se puede automáticamente dividirla en partes. Se observa que hay butacas, hay una tarima, etc. Se divide en partes que son familiares (conocidas), y lo que es más importante, se pueden utilizar estas mismas partes para describir otras situaciones. Eso

es una habilidad extraordinaria y singular que tienen los humanos y que los ordenadores no pueden hacer, al menos por ahora.

Las Redes de Neuronas Artificiales son también paralelas, y son hábiles en agrupar cosas y reconocer pautas. Además, pueden dividir y clasificar bastante bien. Pero lo que no pueden hacer bien es reciclar información y, por lo tanto, no pueden anticipar o prever también como lo hacen los humanos. La razón de estas características de los humanos tiene que ver con el famoso científico y premio Nobel español Santiago Ramón y Cajal. Hace más de un siglo, cuando el investigaba el sistema nervioso central, descubrió que hay muchos bucles en el sistema; o sea, que las neuronas están conectadas con otras neuronas que envían la información que generan a las neuronas previas que se las enviaban a ella. En otras palabras hay bastante retroalimentación en el sistema nervioso central.

Las Redes de Neuronas Artificiales no tienen bucles internos, en algunos de sus modelos más utilizados y probados útiles. Esto les impide hacer dos cosas:

- primero, no pueden hacer cálculos generales.
- y segundo, no pueden prever, debido a la falta de retroalimentación.

Se va a destacar una cosa que ocurre automáticamente en los sistemas paralelos basados en reglas, considerando lo que se ha dicho hasta ahora (Figura 8).

Por ejemplo, se puede tener una regla que dice: SI hay un objeto que se mueve, ENTONCES huir, o sea, cuando una rana vea cualquier objeto que se mueve, tendría que huir. En el mundo de las ranas esta regla no es muy mala, porque la mayoría de las veces los objetos que se mueven le indican algún peligro. Pero, el problema que la rana tendría es que nunca comería, ya que las moscas también se mueven y forman una parte importante de la dieta de la rana.

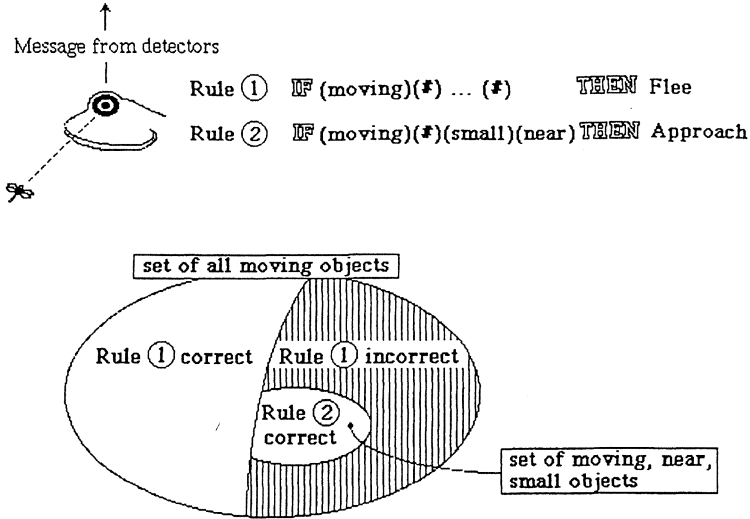


Figura 8.- Jerarquías por defecto, basadas en reglas.

Se puede pensar en una segunda regla que utiliza mucha más información. Así, la regla número dos dice que: SI hay un objeto, pequeño y cercano que se mueve ENTONCES acercarse.

Se destaca que estas dos reglas son contradictorias.

Si hay un objeto pequeño y cercano que se mueve no solamente satisface la segunda regla, sino que también satisface a la primera. (que solamente indica que el objeto se mueve). Pero las consecuencias de las dos no coinciden. Una dice huir y la otra acercarse. Aquí, es donde entra el factor de la competición. Y la competición está establecida para que se favorezca la regla que utilice más información.

Entonces, en una situación como esta, donde las dos reglas tienen la misma fuerza, se favorecerá la segunda regla, porque contiene más información acerca de la situación. De esta forma, en un sistema como el visto, en general, lo que hace primero es aprender las reglas más generales, ya que son estadísticamente mejores que las elegidas aleatoriamente.

Es mejor utilizar esto que hacer las cosas al azar ya que, la mayoría de las veces, da al sistema las instrucciones correctas. El término común para esto es “default”. Es lo que se hace cuando el sistema necesita mas información.

Primero, el sistema aprende las reglas de “default”; o sea, las reglas más generales, y después, aprende las excepciones al “default”. Esto es algo que en la Informática se domina “Jerarquía de Default” (Figura 8).

Después, se aprenden las excepciones a las excepciones, construyendo capas de “defaults” y excepciones.

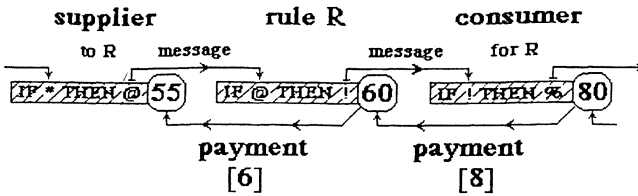
El punto clave es que esto es una manera muy natural de aprender para un sistema, dado que primero aprende las cosas que son útiles estadísticamente (pero que son incorrectas algunas veces), y después aprende como corregirse, y puede ocurrir que tenga que corregir sus correcciones.

Si se observa un sistema como este cuando aprende, se podría decir que aprende elegantemente. No tiene que deshacerse de la información que ya había aprendido anteriormente. En efecto, lo que hace es modificar esta información, añadiendo nuevas reglas.

Lo más importante para recordar es lo siguiente: que el sistema utiliza varias reglas simultáneamente, ellas compiten en función de una fuerza basada en su experiencia anterior, y que el sistema aprende construyendo esta jerarquía de reglas. Esos son los puntos claves de estos sistemas. Además, el sistema aprende primero las reglas que sólo utilizan una o dos propiedades aunque esas sean equivocadas a veces, porque eso es mejor que aprender las reglas al azar. Entonces, a medida de que se adquiera más experiencia, se aprenden más combinaciones de propiedades y entonces combinan esas reglas. Aprendiendo las reglas que sólo atienden a propiedades sencillas se gana antes experiencia.

En el problema clásico de la inteligencia artificial “asignación de Crédito” puede ser relativamente fácil decidir cual es la mejor opción, lo que suele ser más complicado es saber lo que hizo posible que esa sea una buena opción; o sea, lo que creó el escenario oportuno. Esto lo podemos ver con un ejemplo de ajedrez: en una partida de ajedrez, es bastante fácil saber que si se hace una jugada que pone al rey en jaque, suele ser una buena jugada. Lo que no es fácil de saber es cuál era la jugada de cuatro movidas antes que hizo posible esa jugada; esto es lo

que llamamos “crear el escenario”. El problema es: que si tengo varias reglas actuando simultáneamente, intentando describir distintas partes de la situación; o sea, un conjunto de reglas estudia las posiciones de los peones, otras reglas controlan la situación del rey, otras siguen los alfiles, etc., y todas estas reglas actúan juntas, y compiten entre sí para determinar las próximas jugadas, y si al final se gana el juego: ¿cómo se sabe cuales de las reglas empleadas en el principio del juego ayudaron? (algunas de ellas pudieran haber estado ayudando y otras perjudicando). Así, el problema de la asignación de crédito es que se separan todas las reglas y se asignan pesos elevados a las reglas que ayudaron y fuerzas o pesos bajos a las que perjudicaron. Eso es lo que hay que averiguar.



**R after transaction:**  $\boxed{\text{IF @ THEN}} \text{ (62)} = 60 - 6 + 8$

**Stage-setting rules leading to reward become strong.**

Figura 9.- Asignación de créditos cambiando el peso de las reglas.

Para hacer eso, las reglas son tratadas como si fuesen “intermediarios”; o sea, como las personas que, en términos económicos, compran una cosa de alguien y después lo venden a otra persona. Lo que se compra y vende en este caso, son mensajes.

Si una regla envía un mensaje, a otra regla a la que satisface, la regla que manda el mensaje se llama la “proveedora”. La regla que recibe el mensaje envía a la vez el mismo mensaje a otra regla, de modo que se forma una cadena de intermediarios. Ahora, el truco, como en la economía, es intercambiar dinero por cada venta y compra. Entonces, la regla que recibe el mensaje tiene que pagar algo al proveedor; esto es, comprar el mensaje. Ahora, antes de realizar la compra, la regla primero tiene que hacer una oferta. Hay que pensar en la regla como si su fuerza fuese la cantidad de dinero que tuviera disponible, y que la regla con más fuerza es la que puede hacer la mejor postura. Hay que destacar que,

cuando esta regla gana en la competición y realiza la compra, en la misma manera que un comprador se queda con menos dinero, su fuerza sufre una bajada. Lo que ha comprado esa regla es el derecho de vender este mensaje a otra regla, por eso la regla espera que haya otra regla por allí que pueda comprarle el mensaje.

Cuando encuentra otra regla o consumidor que pueda comprar el mensaje, lo vende a un precio más alto del que había pagado, y sale de la transacción más fuerte que antes.

Así, pues, el objetivo, de las reglas será, como se dice en Estados Unidos, compra barato y vende caro. Conseguirá más fuerza solamente si gana beneficios.

Ahora, pensando otra vez en el juego, y en la regla responsable de la última jugada que ganó la partida, esa regla cobra lo que fuese el valor del juego.

Así, pues, las reglas que realizan los movimientos obvios son reforzadas directamente desde el mundo exterior (en psicología se llama reforzamiento). Esas reglas juegan el papel del consumidor final. Entonces, las reglas que toman la ruta adecuada consiguen más fuerza dado que cobran más fuerza de fuera.

Ahora, hay que considerar la regla que vino antes, el proveedor que creó el escenario para la última regla. La última regla es más fuerte, hace una oferta más alta, por eso la regla que la creó el escenario cobra más y, a la vez, también consigue más fuerza. Así que, como en una economía actual, si una persona produce automóviles, y hay otra persona que produce carburadores, y si los automóviles se están vendiendo bien, entonces se van a vender bien los carburadores, o sea el intermediario va a ir bien, y entonces la persona que produce las partes que componen los carburadores venderán mucho, etc. Así, se tiene una cadena que conduce desde la regla de la ruta adecuada, a través de este proceso, enriqueciendo cada regla, que crea el escenario de esa cadena.

A la pregunta de: ¿cómo elige la regla sus proveedores y consumidores?, se responde que una vez que se implementan las reglas en el sistema es cuestión de si el mensaje mandado queda satisfecho por alguna regla en el sistema. Una regla puede tener tanto como 10 ó 20 reglas consumidores, y se destaca que la regla va a tener más éxito cuantos más consumidores tenga. Las reglas que están en el centro del

proceso tienden a tener éxito siempre que hayan beneficios al final de la cadena de reglas. Este sistema, en efecto, es un tipo de economía, se pueden utilizar teorías matemáticas de economía matemática para demostrar que, en una amplia variedad de sistemas, las reglas que deberían estar fuertes, en realidad consiguen bastante fuerza.

Cuando una regla no puede encontrar a ningún consumidor que quiere comprar su información, esto es, si la regla envía su mensaje y no encuentra ninguna regla que le satisface, no recibirá ningún pago, y su fuerza se irá decrementando. Con el tiempo su fuerza bajará tanto que ya no puede ganar en la competición y, con el tiempo, será eliminada del sistema.

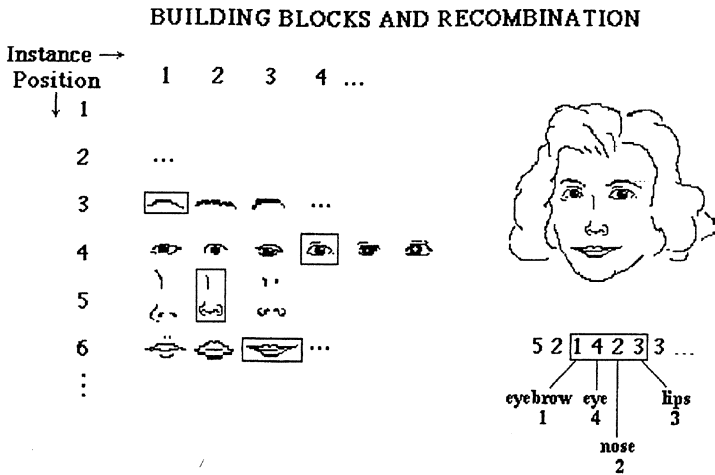
Ahora, vamos a considerar que es cierto que este sistema asigna los créditos adecuados para cada regla. Tenemos las matemáticas y hemos hecho experimentos, con sistemas con hasta 10.000 reglas, en los cuales se ha hecho la asignación de crédito apropiada.

Llegamos, así, a la última parte: ¿cómo se eligen las nuevas reglas?. No queremos inventar nuevas reglas que son obviamente equivocadas en función de la experiencia anterior, pero, de alguna manera, se quieren inventar reglas que sean razonables en función de la experiencia del sistema. Para conseguir esto, se hace algo muy parecido a lo que se hacía antes cuando se refería al paralelismo: en vez de tener una sola regla que corresponde a un Saab rojo con una rueda pinchada en la autopista teníamos varias reglas constituyendo los denominados “building blocks” o “bloques de construcción”.

Lo que se necesita son bloques de construcción para reglas, o sea, antes se tenían las reglas enteras como building blocks, pero ahora también se requieren piezas de reglas (Figura 10).

Ahora, hay que pensar en las reglas como cadenas; después de todo, eso es lo que son en el ordenador. Se puede pensar en esas cadenas como si fuesen cromosomas, como si fuesen las cadenas de los genes que componen el cromosoma de un organismo.





**A face can be described by stringing together the numbers that index its component parts.**

*Figura 10.- Bloques de construcción para caras.*

Si se piensa en una cara, y en los diferentes componentes que la integran: el estilo de pelo, el color del pelo, la forma de la frente, la forma de las cejas, etc., esos son los bloques de construcción para una cara.

Recientemente, en Estados Unidos, debido a la bomba que explotó en Oklahoma, se ha hecho un dibujo de la cara del sospechoso utilizando los bloques de construcción que fueron seleccionados por los testigos.

Aquí podemos hacer lo mismo. Se tienen varios tipos de cejas, varios tipos de ojos, de nariz, de boca, etc. Se describe esta cara en particular, utilizando la primera ceja del grupo de cejas, el cuarto ojo del grupo de ojos, la segunda nariz y la tercera boca, para sacar un número que puede describir esta cara.

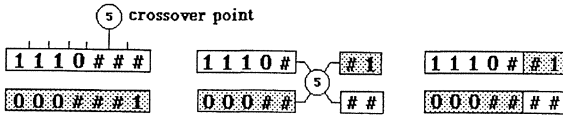
Entonces si, en este caso, se tienen diez bloques de construcción con diez posibilidades para cada uno, o sea, para cejas hay diez cejas posibles, diez alternativas para cada bloque tendremos, entonces, 100 bloques en total y con ellos se pueden hacer  $10^{10}$  caras distintas.

Este es el punto clave: si se escogen los bloques adecuados, se puede hacer una tremenda variedad de soluciones. Veremos ahora dos caras,

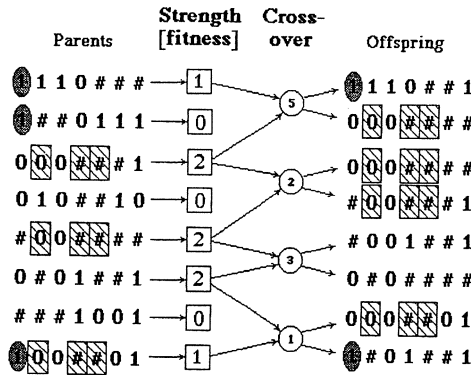
cada una construida por un grupo de bloques y representada por una cadena de números. Vamos a hacer con ellas algo muy biológico que se llama entrecruzamiento “crossing over” (Figura 11). Se tienen estas dos cadenas y se elige un punto aleatoriamente, y entonces se intercambian entre sí las partes de cada cadena utilizando partes de las dos caras. El resultado es que obtenemos dos caras nuevas, bastante diferentes de las anteriores.

Esta acción de entrecruzamiento es, exactamente, lo que hace un criador cuando quiere criar toros o caballos de calidad superior, seleccionando los mejores representantes y después cruzándolos. Al final, se espera que la cría tenga las mejores características de cada uno de los padres.

**Crossover Operator**



**Genetic Algorithm**



Ave. Strength of All Indivs. = 1

Ave. Strength of Instances of  \*\*\*\*\* = (1+0+1)/3 = 2/3

Ave. Strength of Instances of \*\*\*\*\* = (2+2+1)/3 = 5/3

Figura 11.- Cruces y algoritmos genéticos.

Este mismo proceso de crianza se puede utilizar en este sistema basado en reglas. Se escogen las reglas más fuertes y se utilizan como los padres. Entonces se cruzan estos padres para crear hijos (descendientes). Lo importante es que los hijos no reemplazan a los padres. Las reglas padres permanecen en el sistema, y los hijos sólo reemplazan a las reglas débiles. De nuevo se utilizarán las reglas fuertes para producir hijos y éstos hijos serán las nuevas hipótesis en el sistema.

Los estudios matemáticos de la genética pueden predecir lo que sucederá en un sistema como este, pero lo que hay que saber es que el cruzamiento es la razón principal por la que nosotros no somos idénticos a nuestros padres. Es el cruzamiento, no la mutación. La mayoría de gente que lee sobre biología cree que la mutación, cambios aleatorios, es lo que conduce la evolución. Y no lo es. La fuerza principal que empuja la evolución es el cruzamiento. Este tiene lugar en cada individuo y en cada generación. La mutación es un fenómeno muy raro que ocurre una vez por cada millón a cada 100 millones.

A continuación viene la parte más difícil. Se va a intentar demostrar porqué este proceso funciona, y porqué es mejor que los cambios aleatorios.

Ahora, se va a pensar en esta cadena de números de la figura 11 como si fuese una de las reglas del sistema. Es simplemente una cadena de dígitos, describiendo una de las reglas del sistema. Puede haber un cruzamiento con otra reglas, y el número 5 significa que el cruzamiento tiene lugar en el quinto punto de las cadenas de números. Al final se obtienen dos reglas nuevas (como en el proceso con las caras).

Hay que pensar en esto como nuestro sistema basado en reglas (Figura 11). Hay ocho reglas (a la izquierda) y las reglas más fuertes llegan a ser padres, y cuanto más fuertes sean los padres más hijos tendrán.

O sea, las reglas de fuerza 2 pueden tener dos hijos, las reglas de fuerza 1 pueden tener un hijo sólo y reglas de fuerza 0 no pueden tener hijos. El sistema planteado es muy sencillo. Tenemos un conjunto de reglas con fuerzas que se habían asignado por asignación de crédito. Las reglas con más fuerza producen más copias y, después, se cruzan esas copias; eso es el algoritmo de la nueva generación de reglas: las reglas fuertes se cruzan para generar nuevas reglas.

Lo que se quiere demostrar ahora, es que este algoritmo sencillo hace lo siguiente: los que han formado parte de reglas triunfantes en el pasado, se utilizan más frecuentemente para generar las nuevas hipótesis. Las partes que no han formado parte de las reglas con éxito tienden a ser utilizados en menor proporción.

Ante la pregunta ¿es buena una regla que empiece con el número dos? (tenemos tres reglas que empiezan con el número dos y la única información que se tiene sobre estas tres reglas es sobre sus fuerzas, una tiene fuerza 1, otra 0 y la otra 1). Como estadístico, si se estuviera intentando calcular el valor de ese bloque de construcción usaría el promedio de la fuerza de esas dos reglas que empiezan por dos ( $1+1=2$ , como hay tres reglas que empiezan por dos el promedio es  $2/3$ ).

Fijarse que todas estas reglas fueron seleccionadas para que la fuerza promedio de las ocho reglas fuera 1. O sea, después de añadir todas y dividir la suma por 8, el resultado fuese 1. Por eso, las reglas que empiezan con 2 y tienen un valor de  $2/3$  están debajo del promedio. Eso quiere decir que esas reglas no son buenos bloques de construcción.

Aquí se ve lo que ha ocurrido. Aunque el sistema no hiciese este cálculo efectivamente se usa ese bloque que empieza con 2 con menos frecuencia en la siguiente generación.

Ahora, se consideran las reglas con otros bloques, se miran las reglas que tengan el número 1 en la segunda posición, un 3 en la cuarta y un 3 en la quinta.

Se hace lo mismo que antes. Sumando las reglas  $2+2+1=5$  y se divide por 3. La fuerza media es  $5/3$ , lo cual está bastante por encima del promedio. Fijarse que se está utilizando el mismo sistema, por eso el bloque utilizado será más frecuentemente en la segunda generación.

Lo que es importante es que, aunque se están asignando distintas fuerzas a las reglas y después cruzándolas, el sistema actúa como si estuviese calculando este promedio para cada bloque posible y, además, hay una extensa variedad de bloques. Entonces, la siguiente generación utilizará más a menudo los bloques que superan el promedio y menos los bloques con menor valor que el promedio. Así, el sistema actúa como si estuviese haciendo una serie de cálculos muy complicados y extensivos para cada bloque posible, pero solamente se está haciendo reproducción y

cruzamiento. Por lo tanto, esto es el asunto de verosimilitud del que se hablaba antes.

Los bloques que aparecen en las reglas superiores al promedio son utilizados más y los que aparecen en las reglas con menor valor que el promedio son utilizados menos. Si uno quisiera hacer una prueba matemática se podría preguntar ¿Cuántos bloques posibles existen en una sola regla? Este es un número enorme.

Si hay una regla de longitud “n” hay  $2^n$  bloques en una sola regla. Todas se comportan según esta tasa (estimación). Pero hay que recordar que esta es, solamente, una tasa, puesto que se está probando con unas pocas reglas y sólo se puede estimar si un bloque es bueno o malo. Por eso el sistema no se limita a usar sólo los bloques mejores y no se deshace de los bloques que sean inferiores al promedio, dado que la tasa puede estar equivocada. No obstante, con cada generación el sistema refina esta tasa.

Esto no es, sólo, ciencia matemática o informática. Si se tienen conocimientos de la genética o bioquímica se sabe, en efecto, que el proceso principal de la evolución es encontrar bloques de ese tipo. Algunos de esos bloques han existido durante muchísimo tiempo. Un conjunto de bloques que consta de ocho proteínas se llama “ciclo de Krebs” y está presente en casi todos los organismos aeróbicos. Ese bloque se encontró hace muchísimo tiempo y, de hecho, todavía se encuentra en los organismos que respiran el aire, utilizándose para generar depósitos de energía en forma de Adenosín Trifosfato (ATP).

Otro ejemplo de ese tipo de bloques es el siguiente: en los reptiles, hay un conjunto de tres huesos en la mandíbula que permiten a los reptiles abrir la boca extensamente, (son muy flexibles) para que puedan tragar a sus presas. Anteriormente, estos tres huesos se encontraban en el arco de las branquias de los peces y permitían a estas abrirse y cerrarse. Los humanos también tienen estos huesos permitiendo, a los tímpanos, responder a los sonidos, denominándose: el martillo, el yunque y el estribo.

Lo destacable de esto es que, una vez que la evolución encuentre un bloque tiende a utilizarlo repetidamente en nuevas situaciones. En este caso, encontró un conjunto de huesos extremadamente flexibles y los utilizó en varias situaciones diferentes.

Es lo mismo con las reglas. Los bloques particulares para reglas son utilizados en nuevos contextos, pueden permitir a las reglas hacer lo inesperado, y son muy adecuados para hacer pruebas.

Hasta ahora, se ha visto el sistema de ejecución, también se ha visto como se asigna crédito y se ha estudiado como se utiliza ese crédito para decidir qué son los bloques de construcción y cómo generar nuevas reglas. La cuestión final es que, como se ha dicho antes, los sistemas adaptativos complejos no intentan optimizar sino que intentan mejorar. Si se piensa en una generación entera de seres humanos, la de Einstein, por ejemplo. Esa generación constó de un individuo, entre muchos otros, que era extremadamente inteligente. Pero cuando se murió Einstein ya no quedaban más. Aunque se pudiera haber dicho que él era el óptimo (o bastante cerca del óptimo) por su trabajo en la física matemática, lo perdimos, y jamás habrá otro Einstein. De hecho, de una generación a otra no se preserva a ningún individuo. Jamás se volverá a ver el mismo individuo en la siguiente generación. Si es así ¿qué se está preservando de una generación a otra?. Desde luego no es el mejor individuo.

La cuestión clave será: ¿qué es lo que permanece en la evolución o en el sistema de reglas si no se está preservando al mejor individuo de una generación a otra?

La única respuesta que realmente encaja son los bloques de construcción.

Lo que se guarda son esas cosas que valen para hacer o construir mejores seres humanos. Por ejemplo, el ciclo de Krebs, los ojos, etc. Se guardan esos bloques de construcción pero se montan de diferente forma en cada generación, lo que equivale a hacer pruebas y nuevos intentos para conseguir unos individuos mejores.

Por desgracia el esquema de todo esto es limitado. Se podría elaborar con mucha base matemática pero no es lo que se intenta hacer ahora. Lo que se persigue es dar una sensación de lo que se quiere hacer. Entonces lo que se ha visto es una idea general de cómo es un agente adaptativo: un sistema basado en reglas, asignación de crédito, descubrimiento de reglas, etc. Esto es lo que compone un agente adaptativo. Así, se describe un sistema adaptativo y las matemáticas acompañarán esa descripción.

Eso es la mitad de la historia. La otra mitad es: ¿qué ocurre cuando hay un grupo de agentes adaptativos interactuando con otro, como ocurre en un ecosistema, o en la bolsa o en otros entornos?.

Esto es, como se estudian estos agentes adaptativos cuando interactúan entre sí. Se van a señalar, a continuación, algunas de las propiedades más sencillas y comunes que se pueden aplicar a cualquier tipo de sistema complejo adaptativo.

Para empezar, se considera un ejemplo en una ciudad como La Coruña. Hay un almacén que contiene comida suficiente para dos semanas. O sea, que si toda la comida de la ciudad se pudiera almacenar junta esta cantidad sería suficiente para alimentar a toda la ciudad durante dos semanas. ¿Cómo es que, día tras día, año tras año, década tras década, siempre está allí esa comida? cuando no hay ninguna planificación central o no hay ningún tipo de organización que diga “hoy se va a entregar este tipo de comida a estas filas en estas cantidades”.

Esto es un ejemplo de un sistema que no tiene ningún control central, pero que las cosas consiguen llevarse bien. Los niveles de abastecimientos de comidas no suben ni bajan drásticamente. Se mantienen bastante estables. Se puede bajar a la tienda para comprar lo que se quiera todos los días.

La pregunta es: ¿cómo ocurre eso sin ningún control central?. Ese tipo de acción o propiedad es muy típico de los sistemas complejos adaptativos donde la distribución es equilibrada.

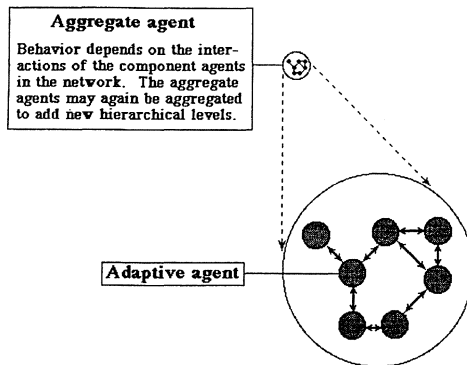


Figura 12.- Un sistema adaptativo complejo.

Por otra parte, en casi todos los sistemas complejos adaptativos de que se tiene conocimiento (se está hablando del sistema nervioso central, ecosistema, sistema inmunológico, ciudades, etc.) hay otra propiedad que se llama “lever point”. El mejor ejemplo que hay de un “lever point” es la vacuna. El sistema inmunológico es tremendamente complicado, pero se puede hacer ese sistema inmune a un gran número de enfermedades con una operación sencilla que utiliza solamente una pequeña cantidad de materia. O sea, con un esfuerzo mínimo se puede crear un efecto considerable y controlado.

La razón de querer tener una teoría para los sistemas complejos adaptativos es que sería muy útil para poder saber cómo buscar las drogas que pudieran proporcionar los antídotos contra las enfermedades, esos son los puntos críticos. Por ejemplo, algo como que una pequeña cantidad de penicilina puede parar un amplia y difícil infección.

Por tanto, si se pudieran conocer más a fondo estos sistemas complejos adaptativos se podrían obtener unas líneas de guía teóricas para encontrar estos puntos críticos, y muchos de los problemas más graves que hay en el mundo, hoy en día, dependen de los sistemas complejos adaptativos.

Otro ejemplo sería el tema de que todos los días se oyen cosas sobre la conservación de las selvas tropicales. La cuestión es ¿cómo se puede salvar esta parte importante del ecosistema y, al mismo tiempo, seguir aprovechándose de él?. En Estados Unidos existe un problema que se llama “descomposición energética” donde, de alguna manera, las ciudades grandes están experimentando una descomposición por dentro dado que la gente ya no desea vivir en el centro y, por tanto, el comercio empieza a desaparecer del centro.

Todos estos ejemplos son problemas es sistemas complejos adaptativos.

El equilibrio comercial es un tema bastante relacionado con esta zona (Galicia) donde se plantea la cuestión ¿cómo se gestiona la pesca en un océano donde el número de peces está bajando rápidamente?. Todo esto tiene que ver con los sistemas complejos adaptativos.



Aquí tenemos un grupo de agentes adaptativos que están interactuando entre sí, y lo que es de interés es el comportamiento de la red entera de agentes en vez de lo que pasa con el individuo. Así que, por ejemplo, interesa más como el país funciona económicamente es su totalidad (en conjunto) que como lo hace el individuo económicamente.

Ahora, se mostrarán algunas de las características de los sistemas adaptativos complejos (otras ya se han citado).

Por ejemplo, en la selva tropical, hay muchos tipos distintos de individuos que hacen cosas distintas (un sólo árbol en la selva tropical puede albergar hasta 10.000 especies de insectos). Por otra parte, hay tantas especies de árboles en la selva tropical que se puede andar durante más de un kilómetro antes de encontrarse con un árbol de la misma especie.

Una característica básica de los sistemas complejos adaptativos es, como ya se ha citado, que no hay ningún individuo que sea el mejor, lo que hay son muchos individuos que se ocupan de distintas tareas. Otra cosa que es muy típica de este tipo de sistemas es que nunca se estabilizan; nunca llegan al equilibrio, están continuamente produciendo nuevos elementos, nuevas especies, nuevos mecanismos de comercio, están siempre en movimiento. De hecho, normalmente, cuando un sistema complejo adaptativo se estabiliza y llega al equilibrio, se muere.

Finalmente, los sistemas complejos adaptativos anticipan o pronostican, y esto no se limita a los que son como los humanos (se volverá a esto después) y puede cambiar su actividad del futuro, aunque ese pronóstico sea erróneo. Por ejemplo, si hay un pronóstico que dice que habrá una merma de petróleo en Estados Unidos el efecto de un pronóstico como ese fue el de un límite de velocidad que continúa estando en vigor después de veinte años. Ahora, se muestran las siete propiedades en que vamos a concentrarnos:

Una propiedad importante es la agregación (Figura 13), la actividad en grupo (cooperativo), que se mencionó antes, juega un papel clave en cómo se comporta el sistema.

Otra cosa es la no linealidad. La no linealidad es un tema extraño. Casi todas las matemáticas tratan con sistemas lineales (el cálculo diferencial, matrices, etc.); todas esas herramientas matemáticas están basadas en sistemas lineales. Menos del 5% de las matemáticas tratan de sistemas no

lineales, por lo que hay un problema bastante importante para nuestros fines.

Otra propiedad de estos sistemas es que actúan cambiando cosas de su sitio. Esto se llama flujos. Si se pudiera ver el sistema se parecería a uno de tubería con varios productos o recursos fluyendo de un sitio a otro.

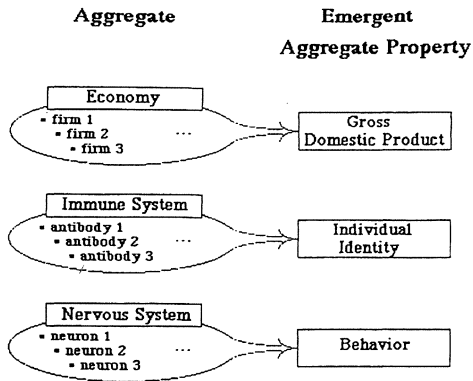


Figura 13.- Propiedades de la agregación y del agregado.

Cuando se ve un río con cauce rápido y hay una piedra en el medio del cauce se forma una ola delante de la piedra. Esto se llama una ola "estacionaria" ya que mientras corre el agua la ola se queda delante de la piedra. Esta es una propiedad típica de flujos. Esa ola es sencillamente un "patrón". Si se le toca con un palo, la ola perderá momentáneamente parte de su forma pero, rápidamente, la recuperará. Lo que no es tan obvio es que en un individuo, como esa ola del río, cada átomo en su cuerpo cambie más o menos cada dos años, de modo que la parte material de una persona se está cambiando continuamente, la única cosa que permanece es la personalidad, o lo que es lo mismo, el patrón. Los sistemas complejos adaptativos tienen esa propiedad.

Dentro de los mecanismos que se pueden encontrar en los sistemas adaptativos complejos están las etiquetas, que son como las banderas de los partidos políticos o de una base militar (Figura 14). Estas ayudan a identificarse. O son como por ejemplo, en el sistema inmunológico, los anticuerpos, moléculas especializadas que el cuerpo utiliza para identificar a los invasores. Por otra parte, están los bloques de

construcción y, se volverá, después, a hablar de ellos. Finalmente, un punto clave en el sistema es la idea de los modelos internos: ¿cómo puede el sistema pronosticar? y ¿cómo puede hacer cosas virtualmente internas?.

Hay un científico famoso de la Inteligencia Artificial aplicada al juego del ajedrez que se llama Hans Berliner, que dice lo más importante al jugar una partida es no cometer errores graves. Si se pueden evitar los errores graves, habrá una gran posibilidad de ganar. Por tanto anticiparse, pronosticando, es lo que puede salvar a uno de caerse al acantilado.

Volviendo a la primera propiedad, la de agregación, donde muchos individuos trabajan juntos para producir un efecto global único. Si se considera un ejemplo de economía, hay un grupo de empresas pero el resultado final es la salud económica del país, lo que se mide, a veces, por el PIB. Como un ejemplo de biología se puede considerar el sistema inmunológico donde hay mucho anticuerpos individuales. Estos trabajan juntos para crear la identidad global del individuo, y que pueda distinguirse de los otros individuos, incluso de sus hermanos, por lo cual, normalmente, no son aceptados los injertos de piel.

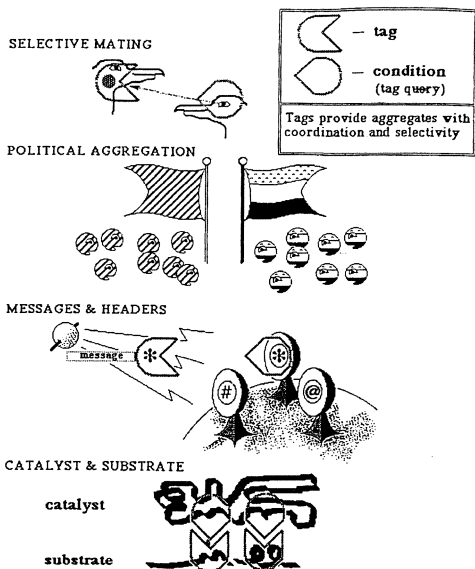


Figura 14.- Etiquetas y agregados.

En el sistema nervioso se pueden considerar las propiedades importantes como la consciencia, etc., pero, efectivamente, su comportamiento es el resultado del efecto agregado de la interacción de muchísimas neuronas individuales, ninguna de las cuales es muy inteligente por sí misma.

Volviendo al tema de las etiquetas, si se consideran algunos tipos de animales, estos dependen de ciertas marcas para elegir una pareja. En el caso de las gaviotas esta marca puede ser una mancha en la cara cuyas características dependen de la especie particular de la gaviota. Esa etiqueta representa y sustituye a todo el organismo para determinar el apareamiento.

Si se consideran las banderas de los partidos políticos, o el logotipo de una empresa industrial, todas esas cosas son etiquetas que ayudan a identificar lo que ese partido o empresa esta representando.

Si se considera a la red global, estos son los encabezamientos (headers) de los mensajes para determinar quién va a ser el receptor del mensaje.

Las etiquetas son mensajes cortos, en términos de lo que se hablaba antes, que ayudan a hacer una inferencia sobre la identidad de la totalidad del sistema u organismo.

Hablando de la no linealidad existe un dibujo o historieta que dice "early bird gets the worm" ("pájaro madrugador consigue el gusano" o "al que madruga Dios le ayuda") como buen ejemplo de como funciona la linealidad. El pájaro ve que, cuanto más tarde se levante por la mañana, menos lombrices se puede encontrar para comer, lo que es una proyección lineal.

Lo que se intenta hacer es evitar este proceso puesto que las proyecciones lineales no funcionan en los sistemas complejos adaptativos.

Siempre que haya algo como un catalizador surge una interacción no lineal dado que se tiene un proceso de realimentación, o sea, el poder de utilizar la misma química una y otra vez, y esto es un ejemplo razonable de los puntos críticos. Estos permiten hacer mucho con poca cantidad. Un catalizador, dado que se utiliza una y otra vez, permite hacer grandes

cambios en una reacción química con poca cantidad de catalizador, en un efecto lineal.

Otro efecto lineal que se vio en la primera parte es: cuando se vea una regla de la forma “SI... ENTONCES...”, es no lineal. El punto clave de la no linealidad que hay que tener en cuenta, sea en el uso de catalizador o de reglas, es que en estos sistemas no se puede determinar lo que va a pasar analizando las partes individuales y entendiéndolo cómo actúa cada parte. También hay que saber cómo interactúan entre sí las partes. Por eso, en estos sistemas, la totalidad del sistema realmente es más que la suma de las partes.

Típicamente, en la Ciencia y desde hace mucho tiempo, se podían analizar los sistemas por partes, los átomos por ejemplo. Una vez que se supiera cómo se comportan los átomos, se asume saber cómo se comporta un grupo de átomos. En seguida se aprendió que esto era erróneo en cuanto se empezaron a estudiar moléculas bioquímicas complejas como las proteínas, dado que sólo sabiendo como se comportan los átomos de una proteína no tenemos idea de como se comportaría la proteína en su totalidad.

La primera propiedad de que se hablaba antes fue la idea de “flujos”, de cosas moviéndose por el sistema. Se va a dar un ejemplo que demuestra otra vez cómo la interacción juega un papel importante. En la economía eso se llama “multiplicador” (Figura 15).

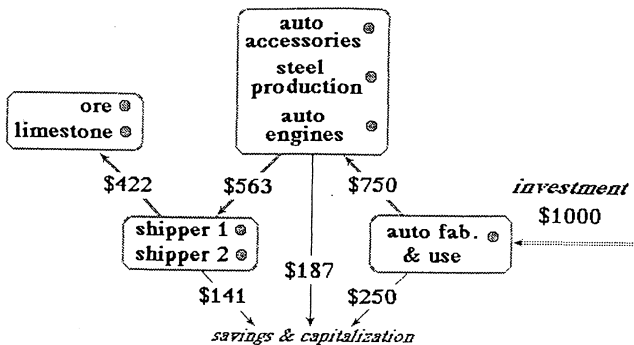


Figura 15.- Efecto multiplicador.

Si unos obreros reciben una paga por realizar obras en una casa, el dinero no se para en ellos. A la vez, ellos utilizan ese dinero para pagar la comida. Por eso, no sólo se mejoran los ingresos del obrero sino también se mejoran los del frutero. Y, a la vez, el frutero compra productos del campesino, de modo que se mejoran sus ingresos también. Así, se ve que existe un flujo moviéndose a través del sistema. Una manera de percibir todo esto es: si se asume que un ingreso nuevo, una inversión de \$1000, por ejemplo, se introduce al sistema, y si se asume que cada persona ahorra una cierta parte de ese dinero y paga el resto a una persona del sistema, el resultado es una serie infinita que se puede sumar. Esto se conoce como el efecto del multiplicador.

En este caso, en particular, cada persona ahorra el 25% de sus ingresos y gasta el resto para comprar cosas. Si se examina esa serie se ve un efecto multiplicador de esta inversión inicial de \$1000, como si cada uno de estos individuos tuviese una cierta cantidad de dinero nuevo. En este caso, cuando se suma la serie, se descubre que hay un efecto multiplicador de valor 4. De forma que es como si se introdujera cuatro veces más dinero en el sistema debido a la interacción.

Otra idea que coincide con los flujos es la de “realimentación”, que la producción pueda realizarse de forma circular. Últimamente, en Estados Unidos, se oye hablar mucho sobre el reciclado de las materias. Hay muchos efectos de este tipo en los flujos que tienen una fuerte inflexión sobre el resultado de los sistemas complejos adaptativos.

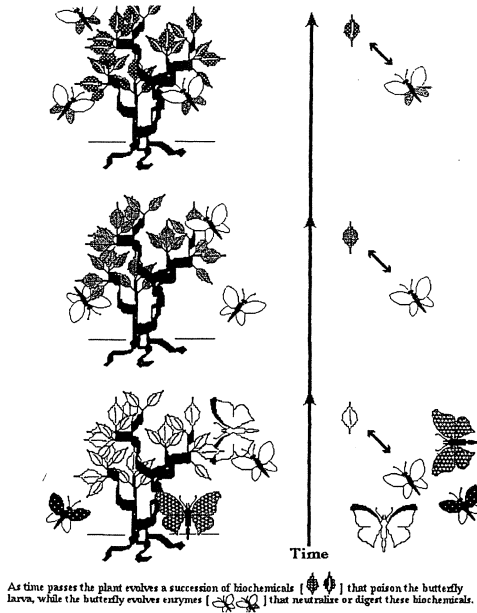


Figura 16.- Una secuencia de armas biológicas.

Cuando se habla de la “diversidad”, la pregunta es que cuando se considera algo como la selva tropical: ¿de dónde viene toda la diversidad?, ¿porqué no hay un animal que sea el mejor de la selva? y ¿porqué no surge un individuo que domine toda la selva?.

Par dar un ejemplo sencillo de porqué hay diversidad, hay que pensar primero en lo que se decía antes sobre la generación de nuevas reglas. Esto se llama una carrera de armas biológica (Figura 16). En la selva tropical, se encuentra un arbusto que alberga muchas larvas distintas que se alimentan de sus hojas. Así pues, muchas especies distintas de mariposas ponen sus huevos en este arbusto y las larvas comen las hojas. Lo que sucede es que, a través del proceso genético, este arbusto llega a tener una nueva sustancia química en sus hojas (en este caso la guanina) que es venenosa para las larvas. Pero la historia no acaba aquí. Llegará un día en que la larva llegue a producir un enzima o catalizador que le permita digerir el veneno. Entonces, esta especie de larva en particular podrá quedarse en el arbusto para comer y podrá sobrevivir.

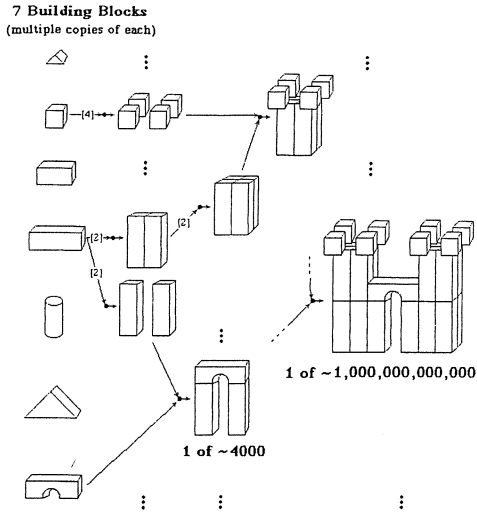


Figura 17.- Construyendo bloques (Generadores).

La batalla continúa puesto que el arbusto llega a producir un nuevo veneno que es todavía más letal (que podríamos llamar veneno B) y, a la vez, la larva gradualmente llega a producir una nueva enzima que pueda digerir el veneno B. Así pues, resulta una carrera donde los dos organismos intentan evolucionar lo más rápido posible para mantenerse al mismo nivel uno con el otro. Hasta muy recientemente esto fue el principal problema en la carrera armamentística entre Estados Unidos y la URSS.

Al principio parece que, así, los dos organismos no están llegando a ninguna parte, y eso es cierto si se considera cada uno como un individuo. Lo que hay que hacer es considerar los dos juntos. Los dos estarían mejor juntos si no tuvieran la carrera de armas, puesto que el arbusto sólo tiene que preocuparse de una especie, y la mariposa tiene una amplia cantidad de comida por la ausencia de otras especies viviendo en la planta. En efecto, esas carreras de armas no son nada raras en los ecosistemas, por lo cual muchas veces se estudian las selvas tropicales para hacer nuevos diseños de drogas y, normalmente, las cosas que se



consideran como las mejores drogas es lo que se han inventado estas plantas y animales debido a estas “carreras de armas”.

Esto no se limita a los ecosistemas. Se encuentra también en el comercio, el sistema inmunológico, etc. Se inventan sustancias como la penicilina y después se utiliza tanto en los hospitales que se desarrollan los gérmenes más fuertes que han existido nunca debido a la “carrera de armas” de estos contra los nuevos antibióticos.

Volviendo sobre los bloques de construcción, si estamos en la situación de que se tienen muy pocos bloques pero del tipo adecuado, se puede hacer una amplia gama de estructuras razonables o útiles. En este caso, se está tomando la idea de bloque literalmente y se ha elegido un conjunto pequeño de los bloques de los juegos de construcción de los niños para demostrar la tremenda cantidad de posibilidades que hay. Aún teniendo sólo siete bloques el número de estructuras posibles es tremendamente grande (Figura 17).

Para dar un ejemplo de esto se considera el motor de combustión interna que se utiliza en los automóviles, aviones, etc. Este motor, que es una pequeña fuente de energía (fuerza) relativamente compacta cambió totalmente la sociedad en la primera mitad del siglo XX. Cuando se consideran los bloques del motor de combustión interna, en principio tenemos el carburador. El bloque del carburador es muy antiguo, antes, en el siglo IX formaba el atomizador. Las bujías también han existido durante más de un siglo teniendo otros usos antes. Asimismo, los pistones se han utilizado en las bombas de las minas desde hace muchos años. Así, se conoce cada bloque principal del motor de combustión interna desde hace mucho tiempo. ¿Por qué entonces se tardó tanto en inventar el motor de combustión interna?.

Es interesante que se puede hacer el mismo ejercicio de razonamiento con un computador corriente y descubrir que sus bloques de construcción han existido desde hace muchísimo tiempo, mientras que todas las invenciones importantes han tenido lugar en el siglo XX.

La cuestión depende, en gran medida, de que hay muchas formas de montar los bloques pero el truco es encontrar la manera apropiada, la que funciona adecuadamente. Eso es lo que se intentaba hacer con los algoritmos genéticos: encontrar la manera correcta de recombinarlos (lo

que se hizo con el cruzamiento), o sea, cruzar los bloques de construcción (en adelante bc) para encontrar los algoritmos útiles.

Aquí hay dos cuestiones a tener en cuenta:

- Cada vez que se encuentra un bc nuevo, normalmente, se abre una gama muy extensa de nuevas posibilidades.
- Una vez se encuentre el bc queda el problema de explorar las distintas maneras de montarlos.

El descubrimiento de nuevos bc es un acontecimiento poco común y buscar nuevas maneras adecuadas de combinarlos es todavía más complicado.

Si se considera la biología y la genética seguramente se encuentre la explicación de porqué esta operación, que se llama cruzamiento es mucho más frecuente que la de mutación.

Por último se trata la idea de un modelo interno, algo que permite que el sistema pronostique o anticipe su futuro.

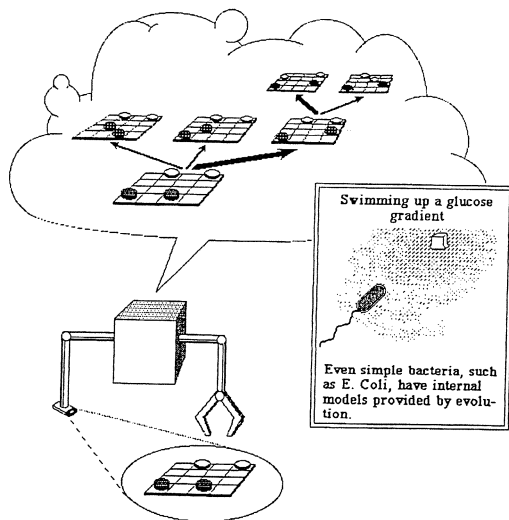


Figura 18.- Modelos internos.

Lo importante es que esto no se limita a organismos conscientes, como los humanos. Incluso algo tan sencillo como una bacteria posee un modelo interno. Las bacterias, por ejemplo la E. Coli, tiene un circuito

interno que le impulsa a nadar hacia donde hay más concentración de glucosa (Figura 18). Esto ocurre gracias a una adaptación no adquirida por aprendizaje, sino por la genética, por la propia evolución de la bacteria. Dicha adaptación consiste en la elaboración de un modelo interno que es capaz de anticipar que, nadando, a lo largo de la pendiente de glucosa, llegará a una fuente de energía. Este indicador es instalado en el individuo por la evolución pero, en efecto, el proceso es generado en un modelo interno.

Si se considera lo que se cita en la primera parte de este capítulo, se tiene la noción de una jerarquía por defecto, donde se construyeron las reglas, las cuales, se iban estrechando en su ámbito de actuación con excepciones, excepciones a las excepciones, etc. Esta era la manera de construir un modelo interno donde lo que intenta el individuo es encontrar maneras de anticipar lo que va a ocurrir en el ambiente.

Las propiedades de anticipación del sistema adaptativo complejo se entiende que son propiedades comunes para todo tipo de sistema complejo adaptativo, lo cual explica porqué la anticipación desempeña un papel tan importante en el comportamiento de los sistemas.

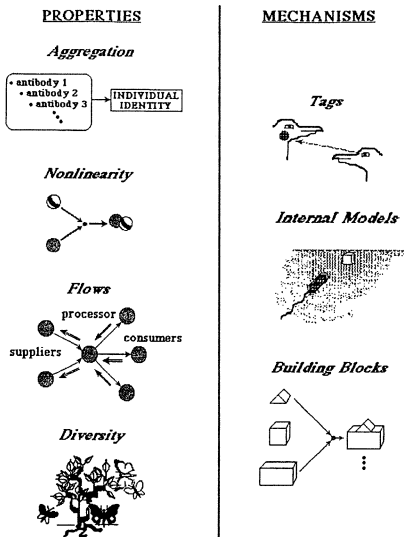


Figura 19.- Siete bases para los sistemas complejos adaptativos

•En la figura 19, se pueden observar las propiedades básicas y los mecanismos comunes de los sistemas complejos adaptativos, los cuales vamos a citar a continuación. Tenemos cuatro propiedades básicas: Agregación, No linealidad, Flujos y Diversidad. Y tres mecanismos comunes: Etiquetas, Modelos internos y bc.

En el Instituto de Santa Fe, centro donde desarrollo mi labor investigadora, una de las características comunes entre sus miembros es la habilidad para hablar sobre los modelos informáticos; ya que, al ser sus miembros procedentes de diversas disciplinas (dos premios Nobel en Física, uno en Bioquímica, otro en Economía, etc.), la informática se convierte en una especie de punto intermedio común entre los experimentos de cada uno por un lado, y las teorías por el otro. El modelo Informático es completamente riguroso, por lo cual no es como una prueba experimental, en el sentido de que tiene una definición simbólica rigurosa. En cambio, no ofrece la generalidad de una definición simbólica matemática. Se puede decir que está, por tanto, entre ambos conceptos.

Lo que debería hacer el modelo informático es ayudar a examinar los datos para encontrar regularidades o mecanismos o maneras de organizar esos datos. Esta es su tarea por el lado experimental. Por el otro lado, un modelo bien formalizado debería sugerir que tipo de operadores se deberían utilizar para su fundamentación y desarrollo matemático.

Para ver un ejemplo de cómo se puede comprobar un modelo informático como el citado, se puede tomar un simulador de vuelo. Cuando un piloto experto intenta controlar la simulación de la misma manera que haría en un vuelo real y, en circunstancias normales, el simulador se comporta correctamente (de la manera esperada por el piloto en función de su experiencia), entonces eso sería una comprobación de la realidad para ese modelo, dado que no hay ninguna manera de que el piloto pueda conocer todas las situaciones para esa programación y, en efecto, la programación tampoco lo sabe. Así que, la mejor manera de comprobar estos modelos complejos es que alguien con experiencia utilice el modelo en la manera en que lo usaría en condiciones reales; o sea, que tiene que haber un interfaz que parezca natural para esa persona.

Cuando, en situaciones normales, ese simulador se comporta en la forma que el piloto espera, entonces el piloto o experto intentará utilizarlo en situaciones no usuales, en situaciones que serían imposibles con el

sistema verdadero. Por ejemplo, intentará volcar el avión con uno de los motores averiado, o intentará poner el avión recto desde una posición inversa. Ninguna de estas posiciones serían posibles con un avión comercial verdadero. Esas experiencias (saber lo que ocurre cuando el sistema adaptativo complejo está al borde del desastre) es lo que empieza a ayudar al experto a saber donde están los puntos críticos, donde están los puntos en donde él puede hacer pequeñas correcciones que tendrían un efecto significativo sobre el avión.

Si el piloto tiene éxito, esos puntos críticos que se han descubierto sugerirán cómo formular una teoría matemática que valga para todo tipo de sistema complejo adaptativo. Así que se pueden buscar puntos críticos de una forma organizada en lugar de descubrirlos aleatoriamente.

La verdadera esperanza del trabajo del Instituto de Santa Fe es la creencia de que muchos problemas del mundo real (la continuación de la pesca, el deterioro de ciudades, los balances comerciales,...) son susceptibles de la búsqueda de este tipo de puntos críticos. Además, también se cree que los modelos informáticos, con la integración de técnicas y métodos de Inteligencia Artificial, son los más adecuados para intentar encontrar estos puntos críticos tan importantes, que ayudarán a prever y tomar las medidas correctoras oportunas, en caso de ser preciso, para solucionar los ya citados problemas del mundo real.