

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y SISTEMAS EXPERTOS

LUIS EDUARDO MUNERA

Matemático de la Universidad del Valle, máster y doctor en Informática de la Universidad Politécnica de Madrid, Ex-profesor de la Facultad de Informática de la U.P.M. Profesor del ICESI.

1

ANTECEDENTES

La historia de la Inteligencia Artificial es tan antigua como la historia de la humanidad. Desde que apareció sobre la faz de la Tierra esa criatura egoísta, soberbia, pero absolutamente fascinante que se autodenomina el *Homo Sapiens*, desde ese momento arranca también la historia de la Inteligencia Artificial, desde los pueblos primitivos, desde sus relaciones mágicas con los objetos, con los poderes, desde el intento de extender las facultades físicas, pero especialmente las facultades intelectuales.

La historia de la I.A. tiene en Grecia uno de sus momentos interesantes, con la aparición de algunos geniales matemáticos. El caso de Arquimedes, con sus inventos que mantuvieron en jaque a la flota romana, son muy conocidos por todos nosotros. También podemos recordar a Herón de Alejandría. Es decir,

es en Grecia con la aparición de los primeros automatismos y de los primeros inventos, cuando surgen los elementos ya concretos de lo que podríamos llamar hoy en día la Inteligencia Artificial (I.A.). También es en Grecia donde aparece la primera referencia en la literatura de la Inteligencia Artificial, en un libro maravilloso que es *La Ilíada*. En una de sus rapsodias se narra la escena de la madre de Aquiles en el taller o fragua de Efestos, que es en sí mismo un laboratorio de aquella época, lleno de automatismos y se cuenta que el Dios que tenía los pies deformes, para poder caminar era ayudado por dos robots femeninos de oro macizo y que tenían inteligencia. Es realmente entonces, en ese libro, donde se hace la primera referencia por escrito en la literatura de lo que es la I.A.

La I.A. estuvo presente en esas épocas en la literatura más que en la ciencia.

Este artículo corresponde a la transcripción de la conferencia que sobre Inteligencia Artificial dictó el autor, el 11 de octubre de 1990, en el ICESI.

En la Edad Media aparecen los primeros autómatas, muñecos que jugaban ajedrez, muñecos o autómatas que ejecutaban una serie de funciones. También en esa época aparece el famoso mito del Golem de Praga, la historia de un rabino judío que para proteger a su comunidad hace una especie de exorcismo y con arena del río Moldava construye un ser que sería el que protegería posteriormente a la comunidad judía.

Posteriormente es famosa la historia de Frankenstein realizada por Mary Shelley, la esposa del gran poeta inglés Percy Shelley, compañero de Lord Byron. Sobre este tema de Frankenstein se han hecho varias películas muy famosas, pero también se han realizado películas acerca de cómo fue que se originó, de cómo fue que Mary Shelley pudo concebir esta criatura fantástica. Entre las últimas que recuerdo estarían, por ejemplo, *Gotic* de Ken Russell y posteriormente una más reciente que se llama *Remando al Viento*, de un realizador español, donde trata de recrear esas relaciones entre Lord Byron, Percy Shelley y Mary Shelley, de su reunión en Suiza y alrededor de estas reuniones cómo nace la idea, el mito de Frankenstein.

En el cine tenemos presentes muchas referencias de lo que sería la I.A. Hay una película muy famosa, *Metrópolis*, de Fritz Lang. En fin, hay una serie de referencias históricas que podríamos mencionar en la literatura y en general en el arte sobre esta ciencia.

Pero realmente como ciencia, la Inteligencia Artificial podríamos decir que tiene como precursor, por allá en los años 40, a un grupo muy importante que se formó en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) alrededor de Norbert Wiener. Se congregaron una serie de científicos de diferentes disciplinas, fisiólogos, médicos, físicos, matemáticos, ingenieros; entonces se conformó un grupo que daría origen a la ciencia conocida con el nombre de CIBERNÉTICA.

La cibernetica es, en cierta forma, la precursora de lo que es la I.A. En esa época (1942-1943) aparecen los tra-

jos de McCulloch y Pitts. Uno era médico de la Universidad de Illinois y el otro un matemático. Se unieron para hacer un modelo del cerebro. Hicieron un estudio desde el punto de vista booleano de las neuronas y construyeron un primer modelo formal del procesamiento de información a nivel del cerebro. El cerebro, que sigue siendo el gran desconocido para todos nosotros.

Los trabajos de McCulloch y Pitts, los de Norbert Wiener y otros conforman el origen de esa ciencia que es la cibernetica. En el Dartmouth College, en el verano de 1956, se reúne un grupo de investigadores, aproximadamente diez, y dan origen a lo que oficialmente ya se conoce con el nombre de Inteligencia Artificial (I.A.). Muchos de ellos venían del grupo del MIT, el grupo de Norbert Wiener.

Entre los más destacados elementos de la reunión del Dartmouth College estaba John McCarthy, matemático, padre del famoso lenguaje LISP, el más utilizado en I.A. y quien dio el nombre de I.A. a esta ciencia. Nombre que para muchos es considerado desafortunado porque puede inducir a muchos errores. A la reunión también asistieron dos investigadores muy famosos, actualmente en Carnegie Mellon University; son Allen Newell y el profesor Herbert Simon que es premio Nobel de Economía. En esa reunión de 1956, Allen Newell y Herbert Simon presentaron un programa capaz de demostrar teoremas de cálculo de proposiciones. A esa misma reunión asistió el profesor Samuels, quien presentó un juego capaz de aprender; era un juego de damas bastante inteligente, lo que pasa es que indujo a error en ese entonces porque se le atribuía al juego esa habilidad de aprender cuando en realidad se estaba descubriendo los elementos que el profesor Samuels le había dado. En esa reunión estuvo presente Marvin Minsky, quien posteriormente sería uno de los que daría origen a una técnica de representación del conocimiento muy importante que es la de los frames (marcos), y actualmente es el director del laboratorio



de I.A. del MIT junto con Winston. A esa reunión asistió el profesor Shaw, del MIT, un colaborador de Wiener que estuvo trabajando en la teoría de la información.

Estas personas conformarían después grupos; por ejemplo, Shaw y Minsky se irían para el MIT y Allen Newell y Simon se irían para Carnegie Mellon. También se conformaron dos grupos en cuanto a la forma de enfocar esta nueva ciencia que ellos llamaron I.A.

En el primer grupo, sus representantes pretenden emular con el cerebro, incluida, si ello fuera posible, su estructura. En el segundo, sus integrantes buscan crear sistemas cuyo comportamiento sea tal que si lo llevase a cabo una persona sería considerada como inteligente.

Se conformaron así dos tendencias, dos líneas de investigación, que posteriormente se conocerían con los nombres de conexiónismo e ingeniería del conocimiento, respectivamente.

2. ETAPAS DE LA EVOLUCION DE LA I.A.

A partir de esa época se establecen lo que podríamos llamar las tres etapas que ha sufrido esta ciencia.

En la primera etapa, la etapa primaria, que va de 1956 a 1970, se desarrollan las técnicas fundamentales, las técnicas básicas de la I.A.; por ejemplo, los de la línea cognitiva estuvieron trabajando en algoritmos y en estrategias de búsqueda en solución de problemas. Allí los aportes fundamentales vinieron precisamente de Allen Newell y de Herbert Simon. Ellos lo que hicieron fue tomar los trabajos de 1943 de un lógico muy importante, Emil Post, quien había creado un sistema que se conoce con el nombre de Sistemas de Post o Sistemas de Producción, basados en reglas de reescritura que eran equivalentes a una máquina de Turing. Es decir, eran sistemas tipo reglas de gramática que los profesores Newell y Simon adaptaron

para que no se hiciera un manejo, digamos, tan estricto, tan simbólico y que aquello pudiera ser utilizado como un modelo de representación del conocimiento humano. Y es allí donde surge la técnica más importante de representación que se denomina reglas de producción y que vamos a ver más adelante.

Al mismo tiempo que Newell y Simon estaban preocupados por la parte cognitiva, también crearon un modelo semejante al cerebro desde el punto de vista general, un modelo de memoria y de procesamiento de información. Crearon lo que se denominó los sistemas de producción, tomando como base las reglas que les acabo de mencionar.

En esa etapa primaria se desarrollan las estrategias de búsqueda, las estrategias de solución de problemas.

Esos sistemas de producción los utilizan Newell y Simon para resolver problemas. Pero en esa época eran demasiado ambiciosos, creían que el problema era muy sencillo y que se podría construir un solucionador general de problemas. La idea que tenían era que se podía construir un sistema capaz de resolver cualquier problema, que se conoce con el nombre de General Problem Solver, Solucionador General de Problemas. Pero precisamente a raíz de este tipo de enfoques que le dieron a las cosas fueron demasiado optimistas. Por ejemplo, Simon llegó a decir viendo el programa de juego de damas de Samuels, que en menos de diez años la I.A. podría crear un programa para jugar al ajedrez que le ganaría al campeón mundial. Todavía no se ha conseguido, aunque se ha mejorado mucho en ese aspecto.

A partir de los juegos se desarrollaron las técnicas básicas. Técnicas que en realidad son útiles en algunos casos en problemas reales, pero que muchas veces no sirven para atacar problemas más complejos como los que ellos pretendían resolver. Los juegos y problemas combinatorios proporcionan unas reglas muy definidas, con lo que la so-

lución automática de estos problemas es más fácil de realizar.

Una de las cosas que se trabajó en esta etapa fue el lenguaje natural y se sigue trabajando, pero entonces lo veían como un problema muy simple. Creían que podíamos lograr una gran base de datos donde tendríamos almacenada la información de los idiomas, una especie de diccionario enorme, y que con algunas reglas gramaticales se podría hacer una traducción automática de manera muy simple. Sin embargo ese proyecto, que no tuvo en cuenta para nada muchos de los aspectos complicados del lenguaje, el aspecto cultural, el aspecto biológico y en fin todo el mundo complejo que tiene que ver con el lenguaje, fue el fracaso más estremecedor que tuvo la I.A. en esa época de los 60; tanto que se cuenta un chiste sobre una traducción que hicieron del inglés al ruso. Había que traducir una sentencia de la Biblia, algo así como: "El espíritu es fuerte y la carne es débil". El sistema la había traducido al ruso así: "El vodka está muy bueno, pero la carne está podrida".

Esto por el lado de la parte cognitiva, ¿qué pasó con la gente de la parte neuronal? Esta gente llegó a plantear una máquina que se conoce con el nombre de Perceptrón, un ingenio capaz de aprender. La máquina funcionó muy bien hasta cierto momento. Aprendió ciertas cosas, pero cuando tuvo que manejar algunas situaciones de lógica compleja, también se le encontraron limitaciones. Entonces se escribió un libro donde prácticamente se ponía fin a esa línea de la investigación.

En esa época los que trabajaban en I.A. eran muy pocos, unos cuantos investigadores, y la I.A. no estaba reconocida internacionalmente. Es más, los artículos que se sacaron no están publicados en ninguna de las prestigiosas revistas del mundo sino en revistas secundarias.

Sin embargo en esa etapa, la etapa primaria (todavía estamos del 56 al 70) aparte de las técnicas básicas, de las estrategias de solución de problemas,

estrategias de búsqueda y aparte de los intentos con el lenguaje natural, hubo un trabajo muy importante que quiero resaltar: el del profesor Robinson. Atacó el problema de la demostración automática de teoremas, basado en lo que denominamos el razonamiento por contradicción, negando lo que queremos demostrar hasta obtener una contradicción, un absurdo. Lo que hizo el profesor Robinson fue encontrar un método, una técnica de automatizar ese proceso de razonamiento que se denomina el proceso de resolución.

Este es el mérito fundamental de Robinson y es quizás para mí uno de los aportes más importantes que se ha hecho en la historia de la I.A. El poder conseguir que un computador mediante un procedimiento automático pueda efectuar un razonamiento por contradicción. En resumen, en esa etapa primaria se desarrollaron las técnicas básicas, que se quedaron un poco en el olvido, conocidas sólo por unos pocos investigadores que no tenían status de ninguna clase dentro de la comunidad científica.

Pero la segunda etapa, de prototipos, inicia a partir de los trabajos de los finales de los 60 de Newell y Simon, los sistemas de producción, algunos sistemas de planificación automática y además los trabajos de Robinson. En la etapa de prototipos se comienza ya a recoger un poco la experiencia de los años 60 y se encuentra una cosa muy importante; se analiza por qué habían fracasado esas técnicas frente a ciertos problemas. Y es que les faltaba un ingrediente fundamental que no estaban teniendo en cuenta: cuando los seres humanos resolvemos un problema, allí estamos involucrando la experiencia, estamos involucrando el conocimiento, lo que se denomina el conocimiento heurístico. Entonces retoman estos trabajos de los 60 y los analizan desde esta óptica, y en las universidades se empiezan a desarrollar los primeros prototipos de sistemas que ya comienzan a dar resultados. Es en 1974 cuando aparece el primer sistema experto, Mycin, desarrollado en la Universidad de California,

un sistema para diagnóstico de enfermedades infecciosas.

El término Sistema Experto se debe a Feingenbaum, en 1977, aunque el primer sistema experto reconocido es el Mycin del año 1974. Otros investigadores recogen los trabajos de Robinson y con base en ellos crean un lenguaje de programación lógica; así nace en 1975 la primera versión de PROLOG. Como ven, la etapa de prototipos es la más fructífera y va desde 1971 al 81, porque ya es donde se construyen los primeros sistemas que funcionan o resuelven problemas, sistemas expertos para diagnóstico, como el caso de Puff que es un sistema para enfermedades pulmonares, el sistema Prospector para la prospección geológica, un sistema para la detección de yacimientos y el sistema Dendral que fue desarrollado por Feingenbaum precisamente para el análisis de química orgánica.

A raíz de los éxitos de esa época del 70 al 81, comienza lo que se denomina la etapa de difusión industrial, es decir, ya esos prototipos que funcionaron en las universidades, en los laboratorios, salen del mundo de la investigación y entran en el mundo de la industria. Las empresas comienzan a interesarse en el desarrollo comercial de estos sistemas y en la aplicación a diferentes áreas de las actividades humanas. Esta etapa de difusión industrial comienza en 1981 y estamos en plena expansión de ella. De las dos áreas, la que se viene a desarrollar más en los 70 es el área de la parte cognitiva y toma un nombre: se llama Ingeniería del Conocimiento.

Sin embargo, en la etapa de difusión industrial se descuida la investigación básica y todo el mundo ya quiere meterse en el negocio.

En este momento estamos asistiendo a una especie de crisis de esa rama. Por el contrario la otra rama, la de redes neuronales, pasó sin pena ni gloria por esa década y sin embargo en este momento es en la que más se está trabajando.

Entre los dominios de aplicación de la I.A. tenemos los sistemas expertos, la demostración automática, juegos y teoría combinatoria, aprendizaje automático, robótica, procesamiento del lenguaje natural, redes neurales, base de datos inteligentes, reconocimiento de patrones. Como ven, los dominios de aplicación de la I.A. son muy amplios, cubren muchos aspectos.

Esos dominios están muy relacionados; por ejemplo, los trabajos en demostración automática como el caso de PROLOG y todos los trabajos en lógica se pueden usar para sistemas expertos y a su vez, por ejemplo, todos los trabajos en juegos son las estrategias básicas que usan los sistemas expertos. La parte de robótica se nutre mucho de la parte de reconocimiento de patrones, o sea el reconocimiento de imágenes o sonidos, es decir de todo lo que son estímulos sensoriales, el manejo de la parte auditiva o de la parte luminosa. Para los robots esto es fundamental y para ellos también se pueden utilizar los sistemas expertos, sistemas de aprendizaje automático, etc.

La parte de lenguaje natural se ha venido trabajando bastante y es muy complicada. Realmente no se ha obtenido un éxito bastante rotundo en este aspecto, es decir ha funcionado bien en algunos casos. Las redes neurales son las que en este momento han tomado mayor auge y con ellas se están realizando una serie de aplicaciones, sobre todo hacia reconocimiento de patrones, como por ejemplo cuando se necesita el manejo de imágenes o de sonidos. También se está usando como una técnica fundamental para los problemas de lenguaje natural.

Fundamentalmente todas las técnicas que se desarrollaron en esa etapa primaria que les mencioné son técnicas basadas en juegos y en la actualidad esta área sigue siendo vigente. Hay problemas de carácter combinatorio que siguen tratándose mediante técnicas similares a éstas.

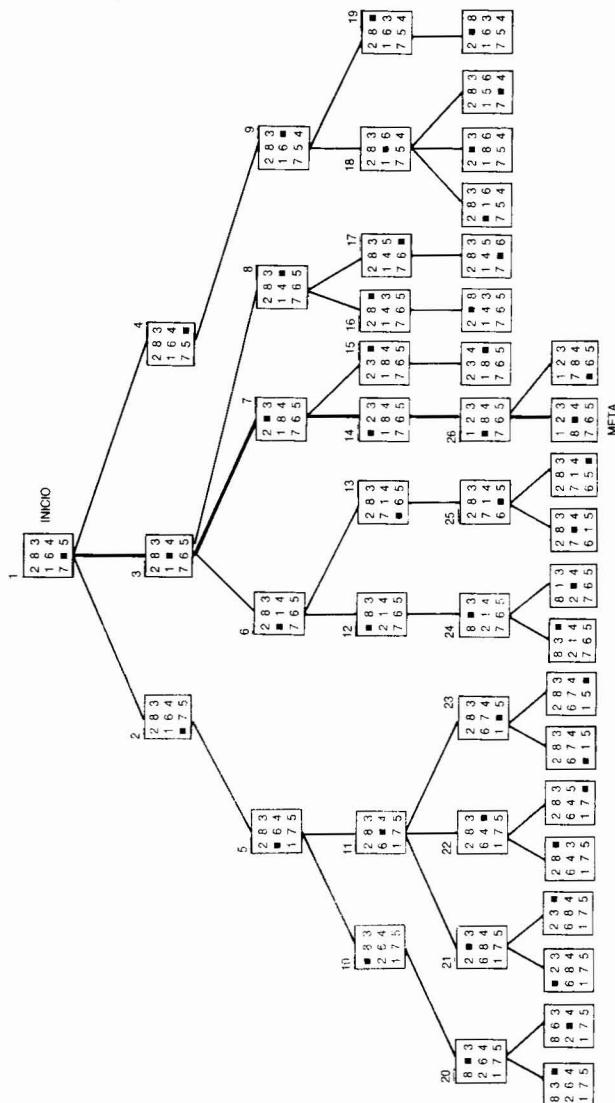
El objetivo fundamental en I.A. es resolver un problema. El problema lo podemos mirar como constando de un estado inicial y queremos llegar a un estado objetivo o estado de meta, y para ello vamos a generar un espacio de estados, es decir partimos de un estado inicial y aplicando unos operadores vamos a ir generando nuevos estados hasta alcanzar un estado objetivo o estado meta.

En la figura 1 tenemos un árbol de búsqueda para el juego del 8-puzzle. Tanto

el estado inicial como el estado objetivo están señalados y con el trazo grueso se indica un camino que va desde el estado inicial a la meta, es decir, una solución al problema.

En este caso los operadores que podemos utilizar serían básicamente cuatro: podemos mover el espacio en negro hacia la izquierda, hacia la derecha, hacia arriba o hacia abajo.

Figura 1
Un árbol de búsqueda para el 8-puzzle



Existen varias estrategias de búsqueda que es lo que suele enseñarseles a los estudiantes en un primer curso de I.A. Es decir, cómo encontrar esa meta y para eso se desarrollan árboles de búsqueda. Existen diferentes estrategias. Una es, por ejemplo, desarrollar el árbol en profundidad o irse por una rama hasta un determinado nivel; otra es ir desarrollando nivel por nivel, que se denominaría una búsqueda en amplitud. Estos dos casos se denominan búsquedas ciegas, búsquedas sin información; lo único que se hace es una búsqueda exhaustiva hasta encontrar la meta.

Sin embargo existen técnicas más evolucionadas para tratar el tema y es asignándole a cada estado un peso, haciendo una evaluación de cada estado, mediante una función heurística o función de evaluación. Entonces, dependiendo de esa función de evaluación, nosotros haríamos el recorrido para encontrar la meta.

Existen diferentes técnicas que son las que trata la Inteligencia Artificial para efectuar ese proceso de búsqueda.

Bien. Vamos a mirar ahora un poco los sistemas expertos que es la rama más interesante, o que es para nosotros la que podemos desarrollar mejor.

3. SISTEMAS EXPERTOS

Un sistema experto es un sistema informático que incorpora en forma operativa el conocimiento de una persona experimentada de tal manera que es capaz tanto de responder como de explicar y justificar sus respuestas. Esta, como todas las definiciones, es incompleta; sin embargo, nos da una idea. Fundamentalmente con los sistemas expertos lo que se ha ganado es la incorporación del conocimiento del ser humano. La idea es que precisamente, para resolver un problema inteligentemente lo que vamos a hacer es imitar cómo un ser humano resuelve ese problema.

Esa experiencia del ser humano para resolver un problema la incorporamos

nosotros al sistema, y ese conocimiento se denomina conocimiento heurístico.

Así que un sistema experto puede resolver un problema en un determinado dominio del conocimiento como lo resolvería un experto en ese campo.

Los primeros sistemas que se hicieron eran fundamentalmente sistemas de diagnóstico en medicina, capaces de efectuar un diagnóstico como lo haría un médico experto en esa rama de la medicina. Fundamentalmente en eso consisten los sistemas expertos, pero además tienen una cualidad importante; el sistema es capaz de explicar los razonamientos. Si el usuario le requiere por qué llegó a determinada conclusión, el sistema debe justificar y explicar su respuesta.

Las áreas de aplicación de los sistemas expertos están agrupadas por tipos de problemas que serían básicamente: interpretación, predicción, diagnosis, planificación y control.

Los primeros sistemas, como les he contado, son los sistemas de diagnóstico médico, pero aquí sistemas expertos de diagnóstico en un sentido amplio, no necesariamente diagnóstico médico. Pueden ser sistemas de diagnóstico de fallas mecánicas o de parte eléctrica. Se utilizan mucho, por ejemplo, en centrales nucleares para el diagnóstico de fallas en la central, o en locomotoras, etc. Aplicaciones de éstas hay muchísimas desarrolladas en el mundo entero. También están los sistemas de interpretación, más que todo para la parte de interpretación de imágenes, por ejemplo una imagen en el radar. El sistema es capaz de interpretar si la imagen corresponde a un avión de combate enemigo y qué tipo de avión es. Se han desarrollado muchas aplicaciones militares en la parte de interpretación.

Hay sistemas de predicción que son capaces de prever el futuro estado de un sistema partiendo de unas condiciones dadas. Se están usando, por ejemplo, en la parte de predicción en meteorología que es tan compleja. También tene-

mos sistemas expertos en la aplicación en problemas de diseño, en problemas de planificación y de control, también en la parte de administración en el mundo de los negocios y para sistemas que ayudan a la toma de decisiones.

4. ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS EXPERTOS

Vamos a mirar un poco la arquitectura de un sistema experto, al menos de una forma global.

La figura 2 nos muestra la arquitectura de un sistema experto. Básicamente tiene tres módulos: de una parte la base de conocimientos, de otra parte el motor de inferencias y de otra parte el subsistema de adquisición del conocimiento.

El problema fundamental en este campo de los sistemas expertos es la adquisición del conocimiento. El ingeniero del conocimiento es la persona encargada de la construcción del sistema, o sea hay una nueva profesión que es la de ingenieros del conocimiento; esta profesión surge a raíz de esta ciencia. El ingeniero del conocimiento interactúa con un experto humano y trata de adquirir, de sacarle de alguna manera (una espe-

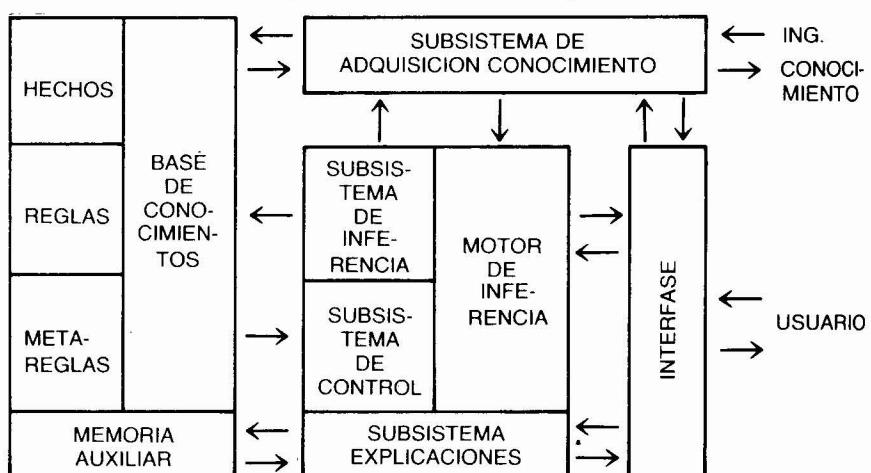
cie de sicoanálisis) el conocimiento de ese experto sobre el tema, porque muchas veces el experto razona frente a determinadas situaciones, emite unos juicios pero muchas veces ni él mismo sabe por qué ha llegado a determinadas conclusiones.

Es decir, el ingeniero del conocimiento intenta hacer explícitos esos mecanismos de razonamiento que efectúa el experto humano mediante técnicas que no están muy desarrolladas. Desafortunadamente esa es la parte más crítica que tienen los sistemas expertos.

Pero, muy bien; supongamos que un ingeniero del conocimiento ha adquirido los conocimientos de un experto en algún campo, luego la labor del ingeniero del conocimiento es formalizar ese conocimiento, es decir, llevarlo a una representación que sea reconocida por los seres humanos. Y esa representación también debe ser tomada por el sistema. Ahí tenemos al subsistema de adquisición del conocimiento. Ese subsistema consta de un conjunto de herramientas que ayudan a representar el conocimiento en el sistema experto, es decir, nos debe proporcionar unas herramientas de ayuda y un lenguaje de representación del conocimiento.

Figura 2

Arquitectura de un sistema experto



Aquí viene una parte importante que son las diferentes técnicas que hay de representar el conocimiento.

Dependiendo del sistema, se podrán incorporar una o varias técnicas de representación. Entre más técnicas tenga, más flexible y más útil es el sistema. El ingeniero del conocimiento, con la ayuda del subsistema de adquisición de conocimiento, hará una representación y esa representación irá a la base del conocimiento. En la base del conocimiento podemos distinguir dos niveles que serían: primero, el nivel de hechos o aserciones; y segundo, el nivel procedimental que consta de reglas y meta-reglas.

El conocimiento asencial que es la base de hechos, es decir, una base de datos, son conocimientos acerca del dominio del que estamos hablando. Las reglas representan el conocimiento heurístico o conocimiento procedimental. Estas reglas son los elementos fundamentales pues allí es donde está presente la experiencia, el conocimiento de ese experto humano. El subsistema que se llama motor de inferencia, que viene siendo como el cerebro del sistema experto, es el que ejecuta los procesos del razonamiento. Ese subsistema es el que tiene que interactuar con la base del conocimiento para que, partiendo de unos hechos, de unos datos y teniendo en cuenta esa base de reglas, ese conocimiento heurístico sea capaz de generar nuevos hechos, de generar nuevo conocimiento.

El motor de inferencias o máquina deductiva es la parte clave del sistema. Ese motor de inferencias consta de dos módulos, digámoslo así, de dos subsistemas, uno de inferencia y otro de control.

El subsistema de inferencia hace alusión al mecanismo de inferencia que el motor va a aplicar en las técnicas de inferencia, a la forma como va a efectuar el razonamiento.

La parte de control es la que tiene que ver ya un poco con la estrategia de búsqueda, como la que mencionaba ahora

en los juegos; es la parte que indica la estrategia que se va a usar para obtener la respuesta.

El usuario final interactúa con el sistema a través de una interfase, y por ejemplo, si él hace una consulta, esa interfase se comunica con el motor de inferencia y el motor de inferencia va a la base de conocimiento y ejecuta lo que se denomina un ciclo de trabajo. Los motores de inferencia tienen un ciclo de trabajo mediante el cual ellos efectúan el razonamiento.

Una cosa importante es el subsistema de explicaciones. El usuario le puede preguntar al sistema experto por qué ha llegado a una determinada conclusión o cómo ha llegado a una determinada conclusión. En la memoria auxiliar que tiene, se guarda una traza o rastro de todo el proceso deductivo que ha efectuado el sistema. Con base en esa traza es que el sistema le explica al usuario cómo fue que llegó a unas determinadas conclusiones.

Las meta-reglas son útiles para el motor de inferencia a la hora de efectuar los ciclos. Eso lo voy a explicar más adelante cuando veamos las diferentes etapas y fases que tiene un motor de inferencia en un ciclo de trabajo. Las meta-reglas ayudan a la parte de resolución de conflictos. Ahora lo veremos.

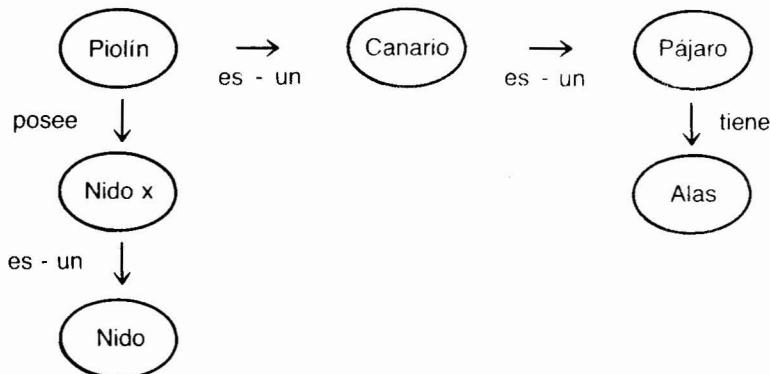
Esta sería, *grosso modo*, la arquitectura de un sistema experto, pero una cosa fundamental es el conocimiento, es decir cómo representamos el conocimiento.

5. TECNICAS DE REPRESENTACION DEL CONOCIMIENTO

Existen diferentes técnicas de representación. Solamente voy a mencionar dos.

Por una parte tenemos aquí, por ejemplo, en la figura 3, las **redes semánticas**. Esta es una técnica de representación del conocimiento. Una red semántica es simplemente un grafo en cuyos nodos ponemos unos objetos, o nombres de objetos, o clases de objetos, y las rela-

Figura 3
Redes Semánticas



ciones que existen entre ellos las situaciones en los arcos. Digo, por ejemplo, que Piolín es un canario. Estoy dando a entender que Piolín es un objeto, un elemento de un conjunto que es el de los canarios. Así pues, yo digo que canario es un pájaro, estoy diciendo entonces que el conjunto de los canarios es un subconjunto de los pájaros.

Si digo que los pájaros tienen alas, estoy dando una propiedad de los pájaros. Si digo que Piolín posee un nido, ese nido es un elemento cualquiera que pertenece a la clase de los nidos. La importancia de esto, de esta técnica de representación del conocimiento, es por una parte la sencillez y por otra que permite efectuar razonamientos basados en la noción de herencia, es decir, puedo a partir de esta red inferir varias cosas, sin necesidad de hacer explícitas esas propiedades. Por ejemplo puedo deducir que Piolín es un pájaro, a pesar de que no lo he dado explícitamente, porque se hereda esa propiedad, y también puedo decir que Piolín tiene alas: como los pájaros tienen alas y los canarios son un subconjunto de los pájaros, entonces se puede deducir que los canarios tienen alas, y como Piolín es un canario entonces Piolín tiene alas.

Esa es, digamos, un poco la intención del manejo de esas redes semánticas. Las redes semánticas tienen su importancia y fueron de las técnicas más an-

tiguas de representación del trabajo de Quillian de los años 60.

Existen redes más evolucionadas. Las redes particionadas de Hendrix permiten hacer el manejo de cuantificadores, los cuantificadores de la lógica.

Bien. Ahora entramos a mirar un poco la representación más importante que hay en sistemas expertos. Es la representación basada en reglas.

Como observan en la figura 4, fundamentalmente una regla la pueden ver ustedes como una sentencia *if... then... else...*

La regla tiene un lado izquierdo o premisa y un lado derecho que sería la conclusión o la acción. Es decir, la idea es que si se cumple la premisa en una conjunción de condiciones, si se cumplen determinadas condiciones, entonces podemos concluir determinada cosa o podemos ejecutar determinada acción.

Una forma de representar las condiciones son las ternas: atributo, objeto, valor. Sin embargo la representación de reglas es mucho más general. En este caso, es una representación típica sobre todo en los sistemas expertos de primera generación usando ternas objeto-atributo- valor. Empero, ahí podríamos utilizar la lógica del cálculo de predicados, por ejemplo.

Tenemos un ejemplo de Mycin, el sistema experto más antiguo que hay, siste-

Figura 4
Representación basada en reglas

```
<REGLA> :: = IF <PREMISA> THEN <ACCION>
<PREMISA> :: = (AND {<CONDICION>})
```

Ejemplo de Mycin

SI:

- La infección del paciente es bacteriemia primaria, y
- La toma del material cultivado es una toma estéril, y
- Se cree que la puerta de entrada del organismo al paciente es el tracto gastrointestinal,

ENTONCES:

- Hay bastante evidencia (0.7) de que la identidad del organismo sea bacteroides.

ma de primera generación. Una regla diría algo así como: si la infección del paciente es bacteriana primaria, y la toma del material cultivado es una toma estéril, y se cree que la puerta de entrada al organismo del paciente es el tracto gastrointestinal, es decir, si se cumplen esas condiciones (observen por ejemplo la condición uno: el atributo o la propiedad de la que estamos hablando es la infección, el objeto es el paciente), entonces el valor del atributo o sea el valor de la infección es bacteriemia primaria. Así es que se efectúan las representaciones: se hace una conjunción de condiciones, cada condición es entonces de la forma objeto-atributo-valor. Luego si se cumplen esas tres condiciones se puede concluir, hay bastante evidencia de que la identidad del organismo sea bacteroides.

Lo importante de señalar ahí es que las reglas no necesariamente son implicaciones en el sentido de la lógica, sino más bien apreciaciones del experto.

Una de las cosas fundamentales es el manejo del razonamiento aproximado. Como verán aquí, a partir de esas condiciones el experto dice: yo no estoy completamente seguro de esto. En una

escala de 0 a 1 él le da un valor de 0,7 a la posibilidad de esa conclusión. Esto es importante. Las reglas no son necesariamente implicaciones lógicas. Si se cumplen determinadas condiciones entonces él establece un factor de certeza de que se dé determinada conclusión.

Esta es la técnica de representación más importante que hay. Vamos a mirar cómo funcionaría un motor de inferencias trabajando con reglas.

En la figura 5 tenemos lo siguiente: el ciclo de funcionamiento de un motor de inferencia. El motor de inferencia tiene dos fases claramente diferenciadas. Una fase de decisión y una fase de ejecución.

La fase de decisión consta de una etapa de restricción, una etapa de equiparación y también de una etapa de resolución de conflictos.

Vamos a ver en qué consiste esto.

En la fase de decisión, el motor de inferencia lo que hace es esto: teniendo en cuenta los datos que hay, analiza qué conocimiento es relevante, qué conocimiento está asociado a esa información. Entonces de toda la base de reglas, él selecciona un subconjunto de reglas

Figura 5
Ciclo de funcionamiento de un motor de inferencias



que tengan que ver con eso. Es la etapa de restricción. Luego que ha seleccionado esas reglas ejecuta la parte más importante que es la equiparación. Hace una equiparación entre esos datos y los lados izquierdos de las reglas, dependiendo del modo de razonamiento. Efectúa una cotejación entre los datos y las reglas, para ver qué datos o qué reglas se pueden ejecutar, y si son varias se presenta lo que se denomina un conjunto conflicto, y el sistema tiene que resolverlo. Es decir, si él puede aplicar varias reglas, con cuál de ellas se queda. Tiene que utilizar una estrategia de resolución de conflictos.

Una vez que ha resuelto el conflicto selecciona solamente una regla y entra en la fase de ejecución que es el disparo de la regla. El disparo de la regla consiste simplemente en la parte derecha de la regla, es decir la conclusión o la acción la incorpora a la base de datos. Recuerden que en la base de conocimientos tenemos hechos y reglas. Al aplicar una regla se puede generar un nuevo hecho y este nuevo hecho se actualiza o se da de alta en la base de hechos y el sistema pregunta si ha logrado la meta.

Si es así, termina; si no, encadena con otro ciclo. O sea estos ciclos se encadenan con otros hasta que encuentra la meta, o si no la encuentra entonces termina señalando el fracaso.

Veamos, por ejemplo, un caso sencillo. En la figura 6 tenemos una base de conocimiento que consta de una base de reglas donde tenemos esas nueve reglas.

Figura 6
Base de conocimiento

- R₁: Si B y D y E ENTONCES F
 - R₂: Si D y G ENTONCES A
 - R₃: Si C y F ENTONCES A
 - R₄: Si B ENTONCES X
 - R₅: Si D ENTONCES E
 - R₆: Si A y X ENTONCES H
 - R₇: Si C ENTONCES D
 - R₈: Si X y C ENTONCES A
 - R₉: Si X y B ENTONCES D
- HECHOS: B,C
META: H

Supongamos que aparte de esas nueve reglas tenemos los siguientes hechos (estos son aseraciones, son hechos conocidos, están tomados como verdaderos): sabemos que es verdad "B" y es verdad "C", y queremos establecer la meta "H"; queremos saber si "H" es verdad o no.

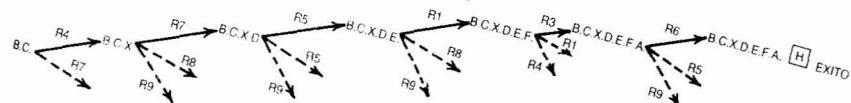
El motor de inferencia ejecuta su ciclo. Les hablaba que él tenía un subsistema de inferencia que tiene varios niveles. Uno de los niveles es el modo de razonamiento.

Existen dos modos básicos de razonamiento. Un modo hacia adelante, es decir, dirigido por los datos. El parte desde los datos y va efectuando un encadenamiento de sus razonamientos hacia adelante hasta obtener la meta. Pero existe otro modo de razonamiento que es hacia atrás. El dice: bueno, para establecer la meta H ¿qué tengo que conocer? Para obtener H necesito tal, para obtener esta necesito tal otra, hasta lle-

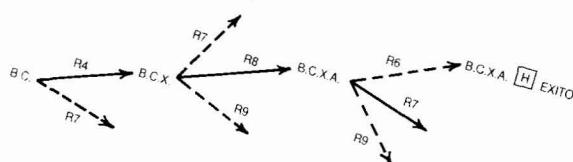
gar a las condiciones iniciales de los estados terminales que son, digamos así, las condiciones mínimas que se deben cumplir, y la compara con su base de hechos y dice: esto que yo necesito para establecer H lo tengo, entonces es verdad que he conseguido la meta.

Veámoslo en la figura 7. Vamos a mirar un poco cómo razonaría hacia adelante. Por ejemplo observemos la parte de arriba, la parte de los hechos conocidos. Aquí está haciendo un razonamiento dirigido por los datos, un razonamiento hacia adelante: parte de los hechos conocidos que son B y C, luego mira qué reglas puede aplicar, observa que si se conoce B y C las reglas que se pueden aplicar son las reglas 4 y 7. Observen la regla 4: si B da X. Por ejemplo, la regla 1 no la puede activar, porque para activarla necesita B, D y E, en cambio para activar la regla 4 solamente necesita B. Para la regla 7 solamente necesita C. En ese caso ve que puede activar esas dos reglas, por lo tanto se presenta un conflicto.

Figura 7



(a)



(b)

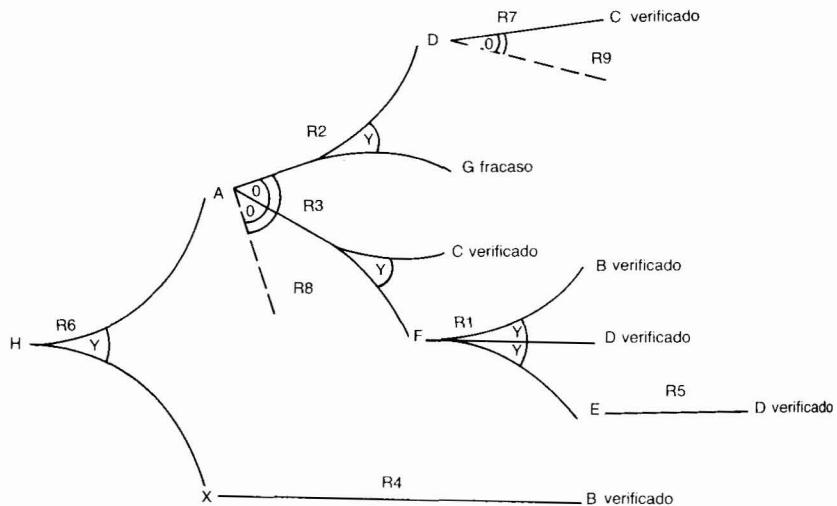
Partiendo de B y C dice: se pueden activar las reglas 4 y 7. Ahí tenemos un árbol que nos está expresando esa situación. En la resolución de conflictos elige una, la regla 4, luego al aplicarla establece un nuevo hecho que es X, con lo cual se amplía la base de datos, la base de hechos y luego vuelve y encadena con otro ciclo. Ve ya, teniendo la X, qué reglas se pueden aplicar: la regla 7, la regla 8 y la 9 y así continúa el proceso. Si quieren mirémoslo aquí de esta manera: ahí lo que estamos haciendo es una estrategia en profundidad, se va generando un árbol de búsqueda donde partiendo de B y C se genera B, C, X y él siempre está siguiendo la rama de la derecha y haciendo una búsqueda en profundidad hasta alcanzar la meta que es H.

Ahora bien, en esa estrategia nosotros podemos fijar el nivel hasta el cual se puede llegar. Si él no llega en un determinado nivel a la meta, puede efectuar lo que se denomina un *backtracking* o sea un retroceso: como él dejó reglas que se hubieran podido disparar y no se hizo, esas reglas quedan como reglas pendientes, y el sistema se puede devolver por esa rama y comienza a

mirar hasta encontrar la meta. En caso de haber disparado todas las reglas posibles y no lograr la meta dice que no se puede establecer, es decir, ésta es falsa.

Observen ahora que en esa estrategia, en la segunda, la B, hubiera alcanzado la meta más rápido aplicando primero la regla 4, luego la regla 8. Ahí el sistema está razonando hacia adelante y está utilizando una estrategia en profundidad, o sea esto lo podemos interpretar como un sistema de diagnóstico médico: yo doy los síntomas que tiene un paciente, doy una sintomatología del paciente y le pregunto al sistema si el paciente tiene determinada enfermedad, y el sistema razonando hacia adelante parte de esos síntomas y trata de alcanzar esa meta, trata de ver si esa enfermedad se establece con esos síntomas. Pero lo que vamos a hacer ahora es razonar al revés: se le pregunta si tiene el paciente una determinada enfermedad; para obtener esa conclusión necesitamos tener cierta información, y para establecerla qué otra necesitamos. Ese sería un razonamiento hacia atrás o dirigido por la meta. En la figura 8 vemos nuestra meta H. Por ejemplo es-

Figura 8



tamos utilizando un árbol, y/o entonces para establecer H yo necesito conocer a A y a X, para establecer a X yo necesito conocer a B, la regla 4, pero B es un hecho conocido que está en la base de hechos, por lo tanto esa rama está verificada. Lo que haría falta es saber si se establece la condición A. Hace una confrontación sobre el lado derecho y se realiza el proceso contrario. Entonces ve que para obtener A se puede hacer mediante la aplicación de la regla 2, o la regla 3 o la regla 8. Primero explora la posibilidad de la regla 2. Para obtener A mediante la regla 2 necesita a D y a G, para obtener D por la regla 7 necesita a C, pero C es un hecho conocido, por lo tanto la condición de D es verificada. Haría falta conocer a G, pero sin embargo, como está en la base, observen que G no hay manera de obtenerlo y en vista de que no aparece G en los lados derechos de la regla, el sistema establece una condición de fracaso, como fracasa por el lado de la G y así fracasaría por los lados de la regla 2 y va a la regla 3. Sin embargo toda la experiencia se va incorporando. En la regla 3 ve que necesita la C y la F; la C es un hecho que está en la base; para establecer la F necesita mediante la regla 1, a B, D y E; B es un hecho verificado; D también, ya lo había establecido mediante la regla 2, y finalmente lo que le queda establecer es la E, pero por la regla 5 necesita D que ya se ha verificado, por lo tanto así establece que se puede alcanzar la meta H y respondería si a la pregunta.

Bien. Con esto doy una idea de lo que son más o menos los sistemas expertos. Ahora voy a hablar de la integración entre los sistemas expertos y bases de datos, lo que se denomina bases de datos expertas.

5.

BASES DE DATOS EXPERTAS

Las dos tecnologías, la I.A. y Bases de Datos, son tecnologías que han crecido paralelamente. Hasta hace algunos años no se habían comunicado y ahora se está haciendo un esfuerzo de inves-

tigación y desarrollo muy importante en ese campo.

De una parte tenemos que la I.A. puede hacer aportes fundamentales a las bases de datos. Entre los aportes tenemos las interfa-
ses en lenguaje natural para consultas, la optimización semántica de consultas, la representación semántica de restricciones de integridad y el diseño inteligente de bases de datos.

El problema del lenguaje natural no está resuelto, pero cuando nosotros tenemos un universo del discurso cerrado, muy acotado, nosotros sabemos, por ejemplo, sobre una base de datos, qué tipo de preguntas vamos a hacer. En ese caso podemos hacer preguntas en castellano, preguntas en lenguaje natural y esas preguntas pueden ser transformadas en expresiones del SQL, un lenguaje típico de consulta de base de datos.

En este campo sí ha habido éxito y se ha utilizado bastante.

Una cosa importante con las consultas, sobre todo en sistemas relacionales, es que los tiempos de respuesta son críticos, por lo que existen unas técnicas para optimizar. Cuando uno hace una consulta a un sistema de base de datos relacional, en el fondo lo que está ejecutando es una secuencia de operadores relacionales. El problema es que la aplicación de determinados operadores antes que otros puede afectar, computacionalmente hablando, el resultado de la consulta. Por cualquier forma se obtiene la misma respuesta pero la una puede ser más eficiente que la otra y existen unas técnicas, unos mecanismos de optimización de esas consultas; sin embargo esos algoritmos tienen sus limitaciones. Lo que se hace es utilizar heurística, técnicas de inteligencia artificial para optimizar las consultas.

También tenemos la representación semántica de restricciones de integridad. Las restricciones de integridad que normalmente uno maneja en bases de datos relacionales, son las dependencias funcionales, pero existen muchas otras

restricciones de integridad que se expresan como reglas, reglas como las que les acabo de mencionar. El manejo de las restricciones de integridad se hace como se haría el manejo en un sistema inferencial basado en reglas. Así también podemos construir sistemas expertos de diseño inteligente de bases de datos. Es decir, ya saben que uno de los dominios de aplicación de los sistemas expertos es el diseño, luego se pueden usar heurísticas que nos ayuden a diseñar bien las bases de datos.

Ahora veamos en la figura 9 qué aporte hacen las bases de datos a la inteligencia artificial.

Figura 9
Aportes de las bases de datos a la inteligencia artificial

- * Almacenamiento de grandes volúmenes de datos.
- * Recuperación eficiente.
- * Control y concurrencia.
- * Seguridad y Protección.
- * Modelos semánticos de datos y representación del conocimiento.

Fundamentalmente el primero es el más interesante. ¿Por qué? Porque los sistemas expertos de primera generación tipo Mycin lo que hacían era lo siguiente: cuando el sistema iba a entrar en funcionamiento a nivel de sesión cargaba en memoria principal toda la base de reglas y la base de datos, y todos los procesos se ejecutaban en memoria principal; entonces el sistema se convierte en cierta forma en un manejador de datos. Pero un manejador de datos muy elemental; allí existe una memoria de trabajo en la cual el sistema va agregando y quitando... Por tanto hace un manejo de datos muy trivial y todo el proceso lo realiza en memoria principal; no puede estar almacenando en memoria secundaria e ir trayendo. Aquí es donde intervienen fundamentalmente las bases de datos: el poder hacer que los sistemas exper-

tos, todo lo que es su parte de manipulación de datos, descansen sobre un sistema de bases de datos; que podamos almacenar las reglas en memoria secundaria, en disco y sobre todo el almacenamiento de grandes cantidades de datos cuando se tienen ya bastantes hechos, y que el sistema pueda ir trayendo y almacenando en memoria externa.

Las bases de datos aportan mucho en lo que les es propio, en la recuperación eficiente, en el control y concurrencia. Estos elementos no los tienen los sistemas expertos de primera generación, no tienen control y concurrencia, tampoco seguridad y protección. Pero hay un aspecto también muy importante que es el de los modelos semánticos de datos. A raíz de las limitaciones semánticas que tienen los modelos clásicos de datos (el relacional, el red y el jerárquico), surgieron a mediados de los 70 una serie de modelos que incorporaban más semántica. El más famoso de esos es el modelo entidad-relación de Chen. Pero no solamente es el modelo de Chen; surgen una serie de modelos funcionales y otras series de modelos de datos. Modelos que incorporan semántica. Las técnicas de representación del conocimiento tradicionales se han visto afectadas positivamente por esos modelos. Todo lo que es el modelo de datos y el modelo de reglas, es decir el modelo del conocimiento asicional y procedural, se está trabajando de forma uniforme, bajo un solo modelo de representación, que incorpora muchas cosas de los modelos semánticos de datos, como las restricciones de integridad.

Fruto de la interacción entre sistemas expertos y bases de datos ha aparecido lo que se denomina bases de datos inteligentes, que pueden surgir de diferentes formas y diferentes vías. Una es como una extensión de los sistemas expertos, o como una extensión de los sistemas de bases de datos, y la otra vía es como una integración de ambos. Uno tiene un sistema experto concreto y lo que hace es extenderlo, o un sistema de base de datos y lo que hace es extenderlo, es decir, trata de manejar conjun-

tamente las funciones de manipulación de datos y las funciones deductivas, agregándole al sistema del que uno parte aquello que le falta, o alternativamente tomando dos sistemas diferentes y acoplándolos, comunicándolos, integrándolos.

Sin embargo existe otra vía que es diseñar bases de datos inteligentes, independientemente de un sistema experto o un sistema de base de datos, que incorpore los elementos fundamentales de ambos, las características óptimas de cada uno de ellos: de las bases de datos todo lo que va a ser la manipulación de la base de hechos, y de los sistemas expertos todo lo que son las funciones deductivas. Y haciendo una abstracción de las bases de datos y de los sistemas expertos también se pueden configurar bases de datos inteligentes.

Voy a mirar rápidamente algunas de estas estrategias. Observemos la figura 10:

Aquí tenemos unas estrategias de integración. Basicamente lo que se denomina una aproximación homogénea y una aproximación heterogénea.

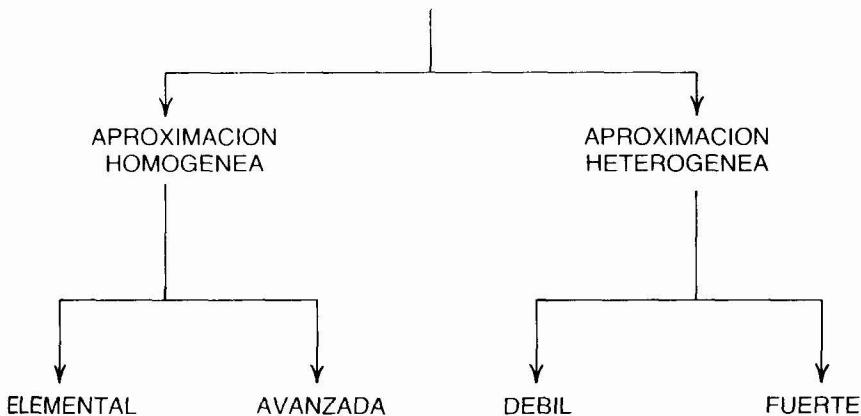
En la aproximación homogénea tenemos la situación típica de los sistemas expertos de primera generación y el caso también de Prolog, donde el sistema hace un manejo de datos, pero muy elemental. En la aproximación homogénea lo que hallamos es que dentro de un mismo sistema tenemos incorporadas las funciones de manipulación de datos y las funciones deductivas. Pero, por ejemplo, en el caso de Prolog maneja reglas y hechos; lo que pasa es que no hace distinción entre ambos, hace un manejo uniforme para el todo. Son cláusulas tanto el conocimiento asencial como el procedural. Pero ¿qué sucede? Que el manejo de los datos es muy elemental, y no solamente en Prolog sino en los sistemas expertos tradicionales.

En la aproximación homogénea vamos a distinguir entre la elemental y la avanzada. La elemental es la que les acabo de mencionar.

Existe una aproximación homogénea avanzada que consiste en tomar un sistema experto y hacer que se convierta en un eficiente manejador de datos. En otras palabras, hacer que él sea casi lo

Figura 10

**Estrategias de integración
ORIENTADAS A LOS SISTEMAS EXPERTOS**



misimo que un sistema gestión de bases de datos, o sea incorporar las mismas funciones y la misma eficiencia. Esto es típico con Prolog; se le han incorporado funciones de manipulación de datos. Sin embargo, esto tiene una dificultad y es que hay que efectuar un gran esfuerzo de implantación, hay que generar mucho código para hacer que un sistema como Prolog sea un buen manejador de datos.

Existe también otra estrategia, que no es tomar un sistema experto y extenderlo de alguna manera, sino decir: bueno, ¿por qué no cogemos dos sistemas distintos y los comunicamos? No tenemos que ponernos a construir todas esas propiedades. Entonces esa es la aproximación heterogénea. ¿Por qué? Porque allí tenemos perfectamente diferenciados un sistema experto y un sistema de base de datos y cada uno cumple una función. El sistema experto se va a dedicar a la parte deductiva y el sistema de bases de datos al manejo de datos. Lo que vamos a hacer es un acoplamiento entre los dos, una interfase entre los dos. Pero existen dos estrategias: una interfase débil y una interfase fuerte. En la interfase débil, fundamentalmente lo que se hace es distinguir dos fases diferenciadas: una, el sistema experto, le hace unos requerimientos, unas consultas al sistema de base de datos, carga esa información en su memoria (hay una memoria auxiliar), efectúa los procesos de razonamiento y una vez ha concluido vuelve y la envía al sistema de base de datos para que la almacene.

Sin embargo esto tiene el inconveniente de que son dos fases perfectamente diferenciadas y en el ciclo completo hay que esperar a que cada fase termine y se inicie la otra, y además cada vez que el usuario haga una pregunta diferente vuelve y juega, es decir vuelve a iniciar el ciclo.

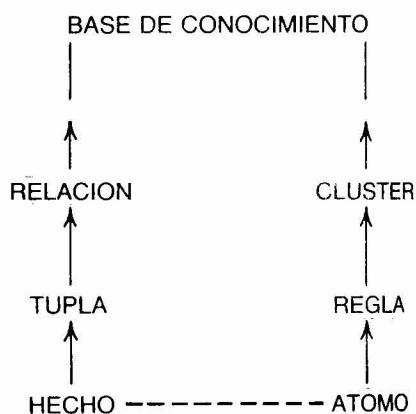
En cambio en la aproximación heterogénea fuerte, esa comunicación entre el sistema experto y la base de datos es dinámica, en la medida en que va nece-

sitando cosas las va solicitando a la base de datos y también si está metido en un ciclo de razonamiento puede interrumpirlo y hacer solicitud de nueva información, o sea el manejo es mucho más dinámico y eficiente.

Ahora veamos un poco la idea de las bases de datos expertas en la figura 11. Básicamente lo que se hace es crear una base de conocimiento donde tenemos dos niveles: un nivel orientado a los datos, a los hechos y otro a las reglas. Lo que se hace es establecer unos niveles de abstracción, de organización de la información. En el caso de las bases de datos relacionales la unidad mínima es el hecho, el dato y la agregación de esos datos nos forma un registro que en el modelo relacional recibe el nombre de tupla; la organización de esas tuplas nos conforma una tabla, y un conjunto de tablas es la base de datos.

Figura 11

Bases de datos expertas



Pues bien. Lo interesante de esto es que se ha tratado un poco de imitar o hacer lo mismo para lo que es la base de reglas. Tenemos una unidad fundamental que es el átomo, que puede ser, por ejemplo, una de esas ternas de que hablábamos: objeto - atributo - valor; eso puede ser el átomo. La agregación de esos átomos conforma una regla y de las reglas se traslada directamente

a la base de reglas. La base de reglas era un conjunto de reglas. Sin embargo aparece la noción del "cluster". El "cluster" trata de hacer una agregación del mismo nivel de la relación; ello es importante porque este es uno de los problemas en el manejo de la base de reglas: que de pronto, con la información que tenemos y necesitamos hacer un razonamiento no es necesario cargar toda la base de reglas, sino solamente aquellas reglas que tengan que ver con nuestra información. Es decir, se pueden distinguir desde el punto de vista estructural o funcional. Se puede establecer una especie de dominios o contextos; por ejemplo, si nosotros vamos a tratar sobre enfermedades de determinado tipo no es necesario traernos toda la base de reglas, sino aquellas que tengan que ver con esa información. O también estructuralmente; eso lo han hecho matemáticamente manejando una noción matemática muy importante y elemental, la de la conectividad. Tratar de establecer unos árboles o grupos de reglas que estén conectadas entre ellas; entonces no es necesario traer aquellas reglas que estén desconectadas. Esa es una parte importante: tratar de definir estos contextos. Eso ayuda mucho en el proceso de razonamiento. Con esto quedaría terminada la parte de las bases expertas. Voy a hacer una mención de la parte más crítica que hay en sistemas expertos.

7. APRENDIZAJE AUTOMATICO

Hay una rama que es la del aprendizaje automático, el "machine learning". Dentro de él existen varios paradigmas; uno es, por ejemplo, el razonamiento por analogía. Puedo definir formalmente un problema como una cuaterna que tiene un estado inicial, un conjunto de operadores, un conjunto de estados y un estado meta, y puedo trabajar matemáticamente y definir cuándo dos problemas son isomorfos. Lo interesante en el razonamiento por analogía es que muchas veces el sistema puede resolver el problema razonando análoga-

mente a como había resuelto otro problema. Esta rama ha sido trabajada mucho por Jaime Carbonell de la Universidad Carnegie Mellon, y es muy importante. Existen otras ramas dentro del aprendizaje automático pero una de las más utilizadas es la de inducción.

Se han trabajado sistemas que inducen las reglas. Partimos de situaciones particulares, inducimos, vamos de lo particular a lo general, es decir a partir de una serie de datos o de hechos tratamos de generar unos patrones, una información de más alto nivel, conceptualmente más rica. Lo que se hace es que, por ejemplo, en medicina necesitamos establecer cómo un médico determina qué reglas usa para ciertas enfermedades. Eso es muy difícil. Pero a lo mejor debemos coger un historial clínico, una base de datos, un archivo donde se tenga información de cómo ese médico frente a determinados casos en particular efectuó el diagnóstico, y partiendo de esos casos particulares se puede hacer una inducción y nosotros generar las reglas.

Eso se puede hacer partiendo de unos archivos, o también en nuestro proceso de interacción con el experto podemos plantearle de una manera más general cuáles son los parámetros fundamentales a tener en cuenta y partiendo de unos ejemplos generar las reglas. Una técnica es la de la rejilla. En estas técnicas se establecen primero unos parámetros; por ejemplo, el de la Figura 12 es un sistema para selección de personal. Qué sería lo importante a tener en cuenta de la persona que se va a seleccionar: sería su inteligencia, sus ideas; en fin, se establecen unas características y sus opuestas, por ejemplo: para inteligente sería tonto o algo así, y se hace un trabajo bipolar, es decir se le dice al experto que maneje un rango de 1 a 5, donde el 1 estaría más próximo a esta característica, el 1 sería inteligente y el 5 todo lo contrario, un 3 sería más o menos en la mitad. En la figura tenemos 10 candidatos, y la evaluación dada por el experto: candidato 1 inteli-

Figura 12
B.R. Gaines, M.L.G. Shaw

Table 1. Repertory grid from a manager on staff appraisal

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	
intelligent 1	1	1	4	5	3	3	5	2	3	5	1 diez
willing 2	1	2	4	5	1	1	4	3	1	2	2 unwilling
new boy 3	1	2	3	5	4	4	4	1	4	3	3 old sweats
little supervision reqd 4	3	1	4	5	2	1	5	2	2	3	4 neeed supervisión
motivated 5	1	1	4	5	2	2	5	3	3	2	5 less motivated
reliable 6	3	2	2	5	1	1	5	1	2	3	6 not so reliable
mild 7	3	4	5	2	2	3	1	5	4	5	7 abrasive
ideas men 8	1	1	5	4	2	3	1	3	4	4	8 staid
self starters 9	2	1	5	5	1	3	5	3	4	5	9 need a push
creative 10	1	1	5	5	2	3	4	3	4	5	10 non-creative
helpful 11	4	3	4	2	3	5	1	4	5	5	11 unhelpfull
professional 12	1	2	3	3	2	1	5	2	4	4	12 les professional
overall rating high 13	2	1	3	4	1	2	5	2	3	4	13 overall rating low
messers 14	2	2	5	4	3	5	1	5	3	1	14 tidy

gente, el candidato 2 también, pero el candidato 4 sería tonto. Y así partiendo de estos ejemplos y mediante unas técnicas matemáticas que involucran la lógica difusa (hay algo de probabilidad allí y hasta de lógica modal), podemos inferir unas reglas. Partiendo de esos ejemplos tratamos de establecer cuáles son los patrones generales que el experto está usando en la evaluación.

Hemos visto, pues, algo de sistemas expertos, algo de juegos, algo de integración de bases de datos y sistemas expertos, algo de aprendizaje automático. Quedan otras áreas de la inteligencia artificial como la robótica, el lenguaje natural, etc., que son también muy importantes. Por ejemplo, las redes neuronales se están usando mucho para esta labor de aprendizaje automático. ¿Por qué? Porque las redes neuronales están apropiadas para el manejo de grandes volúmenes de datos. El hace un

filtrado de las características esenciales y con base en ello conforma patrones más generales.

En conclusión, podemos decir que la Inteligencia Artificial es una ciencia joven con multitud de dominios o áreas de aplicación.

En la actualidad existe un gran interés por la Inteligencia Artificial, tanto de profesionales de diferentes ramas del saber que ven en ella la posibilidad de resolver problemas propios de su dominio, como del público en general. Desafortunadamente también comienza a haber muchos desilusionados, debido a que se crearon falsas expectativas en torno a la I.A. y también a un estancamiento ocasionado por la falta de investigación básica y la excesiva orientación hacia las aplicaciones inmediatas. A pesar de ello, la perspectiva futura de esta ciencia es muy prometedora.