

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

01168
3
2ej

**LOS SISTEMAS EXPERTOS Y LA
INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES.
ANÁLISIS DE SU NATURALEZA Y
APLICACIÓN.**

JUAN MANUEL FERNÁNDEZ PEÑA

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES)**

CIUDAD UNIVERSITARIA
1995

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Ami esposa Ma. de los Angeles Sumano
por su apoyo y paciencia**

**A mis hijos:
Pablo
Raúl
Diego**

**A mi madre Eloisa Peña vda. de Fernández
por su cariño e insistencia**

**A mi asesor de tesis,
Dr. Jaime Jiménez Guzmán
por su orientación, apoyo y amistad.**

Contenido

	pág
Introducción	1
Capítulo 1. Aspectos generales de los sistemas expertos.	4
1.1 Naturaleza de los sistemas expertos.	5
1.2 El experto y la naturaleza de su destreza.	7
1.3 Estructura de un sistema experto.	10
1.4 Aplicaciones:	14
1.4.1 Sistemas de interpretación.	15
1.4.2 Sistemas de predicción.	15
1.4.3 Sistemas de diagnóstico.	16
1.4.4 Sistemas de monitoreo.	16
1.4.5 Sistemas de diseño.	17
1.4.6 Sistemas de planeación.	17
1.4.7 Sistemas de depuración.	17
1.4.8 Sistemas de reparación.	18
1.4.9 Sistemas de instrucción.	18
1.4.10 Sistemas de control.	18
Capítulo 2. La base de conocimiento.	19
2.1 Tipos de conocimiento.	19
2.2 Formas de representar el conocimiento.	21
2.2.1 Métodos planos.	22
2.2.1.1 Formas lógicas	22
2.2.1.1.1 Cálculo de predicados.	22
2.2.1.1.2 Otras lógicas.	26
2.2.1.1.3 Sistemas para mantener la verdad.	26
2.2.1.2 Reglas de producción.	28
2.2.1.3 Árboles de decisión.	31
2.2.2 Representaciones estructuradas.	33
2.2.2.1 Redes semánticas.	33
2.2.2.2 Marcos.	35
2.2.2.3 Orientación a objetos.	37
2.2.3 Redes neuronales.	38
2.2.4 Sistemas de pizarrón.	42
2.3 Conocimiento impreciso.	43
2.3.1 Métodos probabilísticos.	43
2.3.1.1 Enfoque bayesiano.	44
2.3.1.2 Métodos Ad-hoc.	45
2.3.2 Teoría de la evidencia de Dempster-Schafer.	49
2.3.3 Teoría de las posibilidades.	51
2.4 Adquisición del conocimiento.	53

2.4.1 Formas de adquisición de conocimiento.	54
2.4.2 Etapas en la adquisición de conocimiento.	55
2.4.3 Inferencia de conocimiento.	56
Capítulo 3. La máquina de inferencia.	60
3.1 Funcionamiento básico de una máquina de inferencia.	60
3.1.1 El proceso de búsqueda:	61
3.1.2 Estrategias de búsqueda.	63
3.2 Inferencia basada en sistemas de reglas.	65
3.3 Metaconocimiento y mecanismos de explicación y justificación.	67
Capítulo 4. Los Sistemas Expertos y la Investigación de Operaciones.	71
4.1 Delimitación del campo de los Sistemas Expertos.	72
4.2 Algunos conceptos de la Inv. de Operaciones. relevantes a la comparación.	74
4.3 Comparación general.	77
4.4 Revisión de aplicaciones reportadas.	80
4.4.1 Análisis de decisiones, ofertas y negociación.	81
4.4.2 Defensa y seguridad internacional.	82
4.4.3 Distribución, redes y planeación.	82
4.4.4 Cuidado de la salud e industrias del sector servicios.	83
4.4.5 Interfaces con la computación.	83
4.4.6 Manejo de recursos naturales, energía y medio ambiente.	84
4.4.7 Optimización.	84
4.4.8 Producción y secuenciación, inventarios y manejo de materiales.	84
4.4.9 Simulación, implementación y evaluación de modelos estocásticos.	84
4.4.10 Sistemas sociales y sector público.	85
4.4.11 Procesos estocásticos y sus aplicaciones.	85
4.5 Estado general de los Sistemas Expertos.	88
Capítulo 5. Sistemas basados en conocimiento y la I. de O.	91
5.1 Sistemas basados en conocimiento.	91
5.2 Sistemas de conocimiento profundo.	94
5.3 Sistemas basados en conocimiento operativo.	95
5.3.1 Paradigma Hombre-Máquina.	95
5.3.2 Sistemas de información inteligentes.	96
5.3.3 Sistemas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones.	98
5.4 Sistemas auxiliares.	99
5.4.1 Sistemas exploratorios.	99
5.4.2 Sistemas híbridos.	100
Conclusiones	102
Referencias.	106

Lista de figuras.

	pág
1-1 Estructura de un sistema experto.	11
1-2 Parte operativa de un sistema experto.	13
2-1 Ejemplos de representación de conocimiento en cálculo de predicados.	23
2-2 Ejemplo de sistema para mantener la verdad.	27
2-3a Ejemplo de regla de XCON	28
2-3b Ejemplo de regla tomada de [MIL90]	29
2-3c Ejemplo de regla tomado de [MOS86]	29
2-4 Tabla de decisión.	30
2-5 Ejemplo de regla con imprecisión.	31
2-6 Árbol Y-O.	32
2-7 Árbol de decisión.	32
2-8 Ejemplo de red semántica.	33
2-9 Ejemplo de red semántica con elementos ES-UN y PARTE-DE.	35
2-10 Ejemplo de marcos.	36
2-11 Ejemplo de red neuronal.	39
2-12 Regla con factores de certidumbre.	45
2-13 Efecto de evidencias convergentes.	47
2-14 Encadenamiento de evidencias.	48
2-15 Distribución de posibilidades.	53
2-16 Proceso de adquisición de conocimiento.	54
2-17 Árbol de decisión generado.	58
3-1 Obtención de metaconocimiento.	69
4-1 Clasificación de Gory y Scott-Morton para las actividades de una empresa.	76
5-1 Clasificación de sistemas basados en conocimientos.	92

Lista de Tablas.

	pág
1-I Clasificación de los sistemas expertos.	16
2-I Formas básicas de representar el conocimiento.	22
2-II Valores de credibilidad (ejemplo).	51
2-III Formas de adquisición de conocimiento.	54
2-IV Casos clasificados.	57
2-V Clases formadas en primera etapa.	57
4-I Ramas de la I. de O. según ORSA.	81
4-II Sistemas por rama de la I. de O.	86
4-III Clasificación por tipo.	87
4-IV Resultados cruzados.	87
4-V Clasificación por dominio.	89
4-VI Clasificación por estado de desarrollo.	89
4-VII Clasificación por tipo de aplicación.	89
4-VIII Áreas de aplicación de sistemas expertos en Inglaterra.	90
C-I Resumen comparativo. Elementos comunes.	102
C-II Resumen comparativo. Diferencias.	103

Introducción

Los sistemas expertos, programas de computadora que pretenden emular el comportamiento de los expertos humanos en la solución de problemas, se habían venido desarrollando más o menos en silencio. Hasta hace pocos años eran patrimonio casi exclusivo de los investigadores en Inteligencia Artificial, pero esta situación cambió, comenzando a popularizarse. Inicialmente se hicieron famosos en terrenos de la medicina y de algunas áreas industriales, ligadas al control de equipos, pero en los últimos cinco años han invadido muchas otras disciplinas.

En particular, dentro de la Investigación de Operaciones (I de O) ha ganado adeptos entusiastas, así como algunos opositores. Este interés puede notarse en los números recientes de las principales publicaciones, como la revista de la ORSA, Omega, y boletines de diversas sociedades relacionadas con la I de O. Es notable también el gran número de trabajos sobre sistemas expertos (SE) que se presentan en congresos de I de O.

Los SE son resultado del avance de la Inteligencia Artificial (IA), una rama de la computación que se ha desarrollado muy asociada con la I de O, compartiendo a veces algunos métodos. Son un resultado que surgió del fracaso del enfoque original de la IA, que pretendía lograr algoritmos de solución de problemas en general. En la década de los sesenta se dieron cuenta que el requisito fundamental para simular el comportamiento inteligente residía en el conocimiento, más que en los algoritmos para usar éste. Así surgieron los SE, basados en conocimientos de áreas muy restringidas del quehacer humano.

Al decir de algunos expertos en IA, sus técnicas van permeando el medio donde se emplean, sustituyendo lentamente a otras. Tal parece ser el caso de los SE, que aún sin ser aceptados "oficialmente", van desarrollándose a la sombra de otras aplicaciones más tradicionales.

De la lectura de diferentes reportes acerca de las bondades de los SE, a veces exageradas por los autores, surgió el interés por conocer qué tan útiles podrían resultar, especialmente en el caso de la I de O. Esta inquietud se ve justificada por el hecho de que parece requerir de poca inversión para su desarrollo, lo cual es importante en países como el nuestro, que pretenden integrarse al mundo de los países más desarrollados y además porque su desarrollo, aun cuando no logre concluir con un sistema totalmente terminado, logra mejorar el rendimiento de las empresas, al permitirles sistematizar el conocimiento empírico que han acumulado.

Durante la búsqueda de material para el presente trabajo, se hizo evidente que los SE son apenas una parte de un conjunto de sistemas que aún no están completamente configurados, pero que representan alternativas en el proceso de búsqueda de solución a problemas; estos son los sistemas basados en conocimiento. Es posible que éstos tengan un impacto importante sobre otras disciplinas, incluyendo la I de O. Estos sistemas representan una gama muy amplia de aplicaciones, que ligan los sistemas computarizados tradicionales con los prototipos en desarrollo en la frontera de la IA, y algunos sistemas de apoyo a la toma de decisiones.

Los SE, en términos generales, consisten de tres grandes componentes: la base de conocimiento, un algoritmo de búsqueda (llamado máquina de inferencia) y una interfaz con el usuario, que usualmente será "lego" en la materia de que pretende ser experto el sistema.

La base de conocimiento contiene la codificación del conocimiento de un área, expresado mediante algún formalismo. Usualmente toma la forma de reglas de producción, que tienen sus raíces en los albores de la teoría de autómatas y de la programación.

La máquina de inferencia, como se dijo, es, en lo fundamental, un algoritmo de búsqueda, aplicado a buscar soluciones empleando el conocimiento codificado. Su característica más notable es su simplicidad, ya que la importancia mayor reside en el conocimiento.

La interfaz es un medio por el cual el usuario proporciona a la máquina los datos de su problema y solicita resultados y explicaciones acerca del proceso.

Con estos sencillos elementos, reducidos aún más por el uso de esqueletos que proveen de máquina de inferencia e interfaz, los SE han logrado resolver problemas importantes, generando ganancias notables en algunos casos.

Tal parece que la década de los noventa verá aún grandes avances en el terreno de los sistemas expertos, por lo cual se consideró importante realizar este trabajo, con el objetivo central de analizar y delimitar su naturaleza, extendiéndose un poco a los sistemas basados en conocimiento, y a estudiar su relación con la I de O, tratando de evaluar su impacto en la práctica de ésta.

Los objetivos de este estudio son:

- precisar la naturaleza de los SE, así como de las partes que los forman;
- reunir un buen número de ejemplos de aplicación en aspectos relacionados con la I de O;

- analizar los puntos de convergencia, así como las diferencias entre la I de O y los SE;
- organizar la información disponible acerca de los sistemas basados en conocimiento, que aún no aparece sistemáticamente en la literatura.
- estimar el futuro desarrollo de los SE y de los SBC y su relación con la I de O.

Para el logro de tales objetivos, el trabajo se divide en dos grandes partes: una que describe los SE y especialmente sus dos componentes fundamentales: la base de conocimiento y la máquina de inferencia, y otra que se enfoca al análisis de la relación entre los SE (y los SBC) y la I de O.

La primera parte consiste de tres capítulos, que se organizan así: el primero contiene una descripción general de los SE, así como una discusión acerca de las características deseables en un experto; el segundo se dedica a una revisión exhaustiva de las diversas formas de representar conocimiento, incluyendo formas deterministas y otras relativas al conocimiento impreciso; el tercero se enfoca al estudio de las diferentes posibilidades de la máquina de inferencia, así como de algunos factores que tienen relación con su buen funcionamiento, y que a veces olvidan los constructores de SE.

La segunda parte consiste de dos capítulos y un apéndice. El capítulo cuatro se dedica a analizar la relación entre I de O y SE, se describen sus campos de aplicación, sus características y otros elementos. Así mismo se hace una revisión sistemática de un conjunto de ejemplos de aplicación, mismos que se encuentran descritos en el apéndice. El capítulo cinco contiene la sistematización de los sistemas basados en conocimiento, analizando su relación con la I de O y presentando algunos ejemplos.

Capítulo 1

Aspectos generales de los sistemas expertos.

Desde hace unos diez años se comenzó a popularizar el término "sistema experto" (SE) para referirse a algún programa de computadora que pretendía emular la actuación de un experto humano. Tales productos, cuyo origen se remonta a la década de los sesenta [RIC83], recogen por una parte la experiencia de la investigación en el área de Inteligencia Artificial, que debió abandonar sus pretensiones originales de construir máquinas inteligentes "en general" y concentrarse en dominios muy restringidos. Por otra parte, la construcción de sistemas basados en reglas que se emplean en algunas industrias y cuyo origen puede rastrearse hasta los sistemas de producción de Post (ver Hayes-Roth [HAY85]).

Al pretender emular a un experto, así sea en áreas muy limitadas, se hace necesario aclarar en qué consiste la destreza de una persona y cómo se manifiesta. Por este camino, diversos autores coinciden en asignar a los expertos características como la resolución de problemas, la explicación de los resultados, la capacidad de aprendizaje y otras [WIN85]. Ahí surgen un buen número de interrogantes acerca de la posibilidad de cumplir con tales características y -concretamente- si los llamados sistemas expertos las satisfacen, o en qué grado se les puede considerar como tales.

Aún cuando el debate apenas comienza, los SE han ganado adeptos en gran número de áreas de desarrollo, especialmente donde deben tomar decisiones basándose en información incompleta, mal estructurada o con un gran número de variables que interactúan. Este campo, tradicionalmente atendido por la I. de O. a través de su rama de teoría de decisiones y a través de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS por sus siglas en inglés), se cruza con muchas disciplinas, como la Medicina, la Química, la Psicología, la Ingeniería y la Administración, permitiendo aplicar métodos y experiencias de orígenes muy diversos, como son los sistemas de producción, el cálculo de predicados, la lógica difusa y otros.

En este capítulo se determina qué es un "sistema experto", y en qué consiste su destreza, tomando como referencia las cualidades atribuidas a los expertos humanos; luego se discute su organización típica, así como algunas variantes; finalmente se presentan algunos ejemplos seleccionados de la literatura reciente, que servirán como enlace para el siguiente capítulo.

1.1 NATURALEZA DE LOS SISTEMAS EXPERTOS.

Al revisar la literatura se encuentran muy diversas definiciones de sistema experto, que enfatizan más o menos alguna de sus características, de manera más o menos formal, según el uso que se reporta. Como punto de partida se seleccionó la siguiente, tomada de Moser y Christoph [MOS87]:

"Un sistema experto es básicamente un conjunto de programas de computadora y conocimiento codificado, que interactúan de tal modo que el sistema razona y resuelve problemas, emulando los procesos lógicos de la mente humana."

El hecho de consistir de uno o más programas aparece explícitamente en un gran número de trabajos, como en Behestian y Salchenberger [BEH87], Hayes-Roth et al [HAY83], Hansen y Messier Jr. [HAN86], Olave et al [OLA88], Efstathiou y Mamdani [EFS86a], Helferich et al [HEL87] y Rich [RIC83]. En otros casos parece dejarse sobreentendido.

En cuanto al conocimiento que debe incluir un sistema de esta naturaleza, queda supuesto en muchos casos, siendo explícito en otros como Behestian y Salchenberger [BEH87], Hansen y Messier Jr. [HAN86], Helferich et al [HEL87], O'Keefe [OKE85] y Olave et al [OLA88]. En el caso de Behestian y Salchenberger, se orienta a una representación específica del conocimiento: las reglas, concepto que toma de Hayes-Roth et al [HAY83] y que corresponde a la versión más común de los SE.

En cuanto al razonamiento, aparece en diversas formas según el autor: técnicas de razonamiento de inteligencia artificial, de acuerdo a Behestian y Salchenberger [BEH87]; razonamiento lógico, según Olave et al [OLA88]; modelo computacional de razonamiento humano, en opinión de Weiss y Kulikowski [WEI83]; y queda implícito en otros, refiriéndose siempre a los expertos humanos a quienes se supone imita.

Weiss y Kulikowski [WEI83] precisan que el razonamiento debe llegar a las mismas conclusiones que un experto humano ante el mismo problema.

En la definición arriba citada se indica que los SE resuelven problemas. Al respecto, parece haber tres posiciones definidas, que posiblemente correspondan a diferentes clases de sistemas expertos. Las posiciones son:

- a) aceptación optimista del hecho de que un sistema experto resuelve problemas, apoyada explícitamente por Moser y Christoph [MOS87], por Hansen y Messier Jr. [HAN86], por Helferich et al [HEL87], y por Raghavan [RAG87], y tácitamente por un gran número de sistemas específicos y productos comerciales.
- b) rechazo a priori de esta posibilidad, limitándolos a meros soportes intelectuales para el experto humano, como lo anota Hendry [HEN87].

c) posición cautelosa, como en el caso de Behestian y Salchenberger "... pueden tener la habilidad de diagnosticar problemas y/o recomendar soluciones" [BEH87], o considerando al sistema experto como un complejo hombre-máquina, donde el experto humano (o el humano no tan experto) tiene un papel importante en la solución de problemas, aportando creatividad y nuevos cauces de acción al enfrentar situaciones imprevistas (Roth, Bennett y Woods [ROT87]). Otra opinión similar es la de Shemer [SHE86], quien sugiere que los sistemas expertos que enfrentan problemas abiertos y que requieren creatividad, serán asistentes, más que reemplazo para el humano. O, según O'Keefe, "dados suficientes datos, puede realizar deducciones razonadas que pueden ayudar al usuario a tomar decisiones" [OKE85].

El último aspecto considerado en la definición es el de la emulación de los procesos lógicos de la mente humana, que en la mayoría de los casos aparece circunscrito a imitar "expertos humanos" (Olave et al [OLA88], Efstathiou y Mamdani [EFS86a], Behestian y Salchenberger [BEH87], y Rich [RIC83]).

Un aspecto importante que aparece en algunos casos es el alcance del dominio de destreza de los SE, que aparece como muy limitado en muchos casos [OLA88], pero que es ampliado en algunos sistemas nuevos, como en [MOS87]. En general se le deja muy vago, hablándose de "un dominio", sin especificar cuál, por ejemplo Winston y Brown [WIN79].

Otros aspectos, incluidos en algunas definiciones, son los siguientes:

- parte de su poder descansa en el uso de heurísticas [HAN86];
- conocimientos extraídos de un experto humano, Hansen y Messier Jr. [HAN86], Helferich et al [HEL87];
- el razonamiento incluye aspectos simbólicos y cuantitativos Olave et al [OLA88];
- uno de sus principales objetivos es apoyar al ser humano en la toma de decisiones Raghavan y Chand [RAG87].

Otros elementos que se apartan del tema central corresponden a aquellos que consideran a los sistemas expertos como una forma de codificar el conocimiento de los expertos humanos, y así poder preservarlo y ponerlo al alcance de personas menos experimentadas. Esta posición es presentada por Hayes-Roth et al [HAY83], Barcoy y Blanning [BAR88] y Weiss y Kulikovsky [WEI83].

De lo anterior, se desprenden tres aspectos fundamentales que se analizarán más a fondo: la naturaleza de la destreza, cómo se organizan el conocimiento y los programas que permiten el razonamiento, y el uso que se les da a tales sistemas.

1.2 EL EXPERTO Y LA NATURALEZA DE SU DESTREZA.

En la sección anterior se observó que todas las definiciones y opiniones acerca de los SE utilizan como medida al experto humano, tomando la palabra experto muy en serio, como dicen Brachman y sus colaboradores [BRA83], dando por conocidas sus características. En realidad, no resulta tan fácil saber en qué consiste la destreza de un experto; ya que los diccionarios dan definiciones casi circulares y los autores de SE citan características más o menos generales, como se verá en esta sección. Sin embargo, aparecen dos características que parecen estar siempre incluidas en el concepto de experto y de destreza: conocimiento y habilidad para aplicarlo.

Si se consultan los diccionarios convencionales, se obtendrán definiciones como éstas:

- "Experto: Práctico, Hábil, Experimentado" (1)
- "Expertamente: Diestramente, con práctica y conocimiento" (1).
- "Experto: 1) Muy diestro. 2) de un experto. Alguien que es muy diestro o bien informado en algún campo especial"(2).
- "Experto: Experimentado, práctico, pronto, diestro"(3).
- "Destreza: [...] dominio, conocimiento".(3)
- "Destreza: habilidad, arte, propiedad con que se hace una cosa"(4).
- "Diestro: hábil, experto, sagaz para manejar negocios"(4).

Como puede notarse, de una u otra forma se insiste en el conocimiento y la habilidad.

Buscando mayor precisión en los autores de SE, se obtienen descripciones que involucran conocimiento y práctica en diferentes formas. Weiss y Kulikowski consideran que los libros reúnen conocimientos acerca de la explicación de los fenómenos, pero rara vez explican cómo, cuándo y dónde aplicarlos [WEI83]. Consideran que los expertos aplican métodos basados en la experiencia obtenida al enfrentar muchos problemas difíciles y específicos.

Hansen y Messier Jr. consideran que el conocimiento especial, el juicio y la experiencia son el patrimonio del experto, donde el conocimiento especial reviste la forma de reglas empíricas y heurísticas [HAN86].

1 Diccionario Léxico Hispano.

2 Webster's

3 Velázquez

4 Diccionario Enciclopédico Quillet

Brachman y sus colaboradores, consideran que el experto maneja conocimiento especializado (dominio estrecho), apoyado en una erudición general y en los "trucos del negocio" [BRA83].

Hayes-Roth et al [HAY83], Helderich y sus colaboradores [HEL87] y otros, consideran que los expertos condensan su experiencia en reglas empíricas que asocian situaciones con acciones.

En general, todos los autores dan vuelta en torno a estos mismos conceptos, de los cuales cabe destacar la mención explícita al juicio, que hacen Hansen y Messier Jr. [HAN86] y Hayes-Roth et al [HAY83], y que aparece supuesto en los demás.

En lo referente a la habilidad de un experto, Brachman et al consideran que el experto produce resultados de alta calidad y en un tiempo mínimo [BRA83].

En cuanto al conocimiento, que resulta voluminoso, cambiante y difícil de caracterizar según Rich [RIC83]; puede decirse que está formado por descripciones, relaciones y procedimientos, además de conceptos, restricciones y regulaciones del dominio, de acuerdo con Waterman y su coautor [WAT81]. Las descripciones incluyen reglas acerca de cómo aplicarlas e interpretarlas en situaciones específicas.

Las relaciones pueden ser de varios tipos, entre las que se consideran: taxonómicas, definicionales y empíricas. Estas relaciones deben considerarse en un sentido más o menos amplio, ya que no siempre es posible determinarlas con precisión, como se haría en un modelo analítico o estadístico, sino que a veces se trata de asociaciones cualitativas o poco científicas en un sentido tradicional (al respecto, ver el trabajo de Phelps [PHE86]).

Los procedimientos indican las operaciones necesarias para manipular los elementos anteriores, y pueden ser de muchos tipos, incluyendo la aplicación de modelos específicos para resolver partes de un problema.

Diversos autores hacen notar que gran parte del conocimiento resulta incompleto, inexacto o incierto (O'Keefe [OKE85], Helderich et al [HEL87]), que puede ser subjetivo (O'Keefe [OKE85]) y que se ve mezclado con ruido (Stefik [STE83]).

El conocimiento así planteado puede estar al alcance de personas que aún no son lo suficientemente expertas, las cuales deben emplear un tiempo largo para hallar la solución. Según Brachman y sus colaboradores, el experto posee además algunas reglas de más alto nivel (metarreglas), que le permiten reducir el espacio donde realiza la búsqueda de una solución [BRA83].

Más adelante en este trabajo se regresa al tema del conocimiento, siendo suficiente la explicación anterior para los fines de esta sección.

Recapitulando, un experto requiere de conocimientos, capacidad de juicio, y habilidad para obtener una solución, sin embargo, estas características son difíciles de identificar. Así, hace falta un procedimiento o reglas de selección que permitan precisar la existencia de un experto. De acuerdo con Hansen y Messier Jr., un experto se puede caracterizar por las actividades siguientes [HAN86]:

- a) resuelve problemas;
- b) explica los resultados obtenidos;
- c) aprende de las decisiones tomadas;
- d) reestructura su conocimiento;
- e) cambia o rompe las reglas cuando es necesario;
- f) busca ayuda cuando el problema lo rebasa.

Winston, al criticar los actuales sistemas de reglas, considera elementos muy semejantes a los anteriores y agrega la capacidad de razonar a diferentes niveles [WIN85]. Esto último puede relacionarse con lo expresado por Brachman et al, al indicar que los expertos emplean reglas de mayor nivel para aproximarse a la solución [BRA83]. La explicación es considerada de importancia por Blanning [BLA87c], Gere y Stanton [GER88], O'Keefe [OKE85] y Moreau [MOR88]. El aprendizaje aparece destacado en el trabajo de Moreau. Según estos últimos, la capacidad de explicar los resultados se encuentra asociada con la erudición general.

Un enfoque algo diferente es el de Stefik, quien indica como actividades genéricas de un experto las siguientes [STE83]:

- a) interpretación: analiza datos para determinar su significado;
- b) diagnóstico: localiza fallas en un sistema, basando su interpretación en los datos observados;
- c) monitoreo: interpreta señales en forma continua, colocando alarmas o llamadas de atención para saber cuándo es necesaria su intervención;
- d) predicción: establece el curso futuro a partir de modelos del pasado y del presente;
- e) planificación: prepara programas de acciones a realizar para alcanzar metas;
- f) diseño: establece especificaciones para crear objetos que satisfacen requerimientos particulares.

Este enfoque presenta actividades que son desarrolladas por el experto, a diferencia del anterior, que más bien describe actitudes del experto. Ambos se complementan, ofreciendo un panorama más completo de estos individuos.

Un elemento importante a considerar es el hecho de que los expertos encuentran soluciones satisfactorias a problemas específicos, pero que muchas veces no son óptimas. Este hecho es muy conocido en diversas áreas del conocimiento, y entre ellas en la I de O, donde los clientes prefieren muchas veces una solución razonable en un tiempo corto, que una solución óptima a largo plazo (O'Keefe [OKE85]).

Hasta ahora se ha presentado al experto a través de tres niveles: qué lo hace un experto, cuáles son sus actividades y cuáles son sus actitudes. Con esto se tienen elementos suficientes para regresar a los SE y analizar cómo los integran en su estructura y funcionamiento.

1.3. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA EXPERTO.

En la literatura de sistemas expertos se presentan un gran número de variantes de lo que podría considerarse la estructura de un SE. En muchos casos se omiten partes, dándolas como sabidas. En esta sección se presenta una descripción amplia, que engloba a la mayoría de los casos particulares y que puede tomarse como punto de partida para enriquecerla o limitarla según sea necesario.

En la Figura 1-1 se presenta un diagrama muy general de lo que puede considerarse un SE, abstraída de diversos autores y especialmente de Moser y Christoph [MOS87]. En ella se observan los cinco elementos principales involucrados en este tipo de sistemas: los expertos, los usuarios, el sistema de adquisición de conocimiento (SAC), la base de conocimiento (BC), el mecanismo de razonamiento (MR) y la interfaz con el usuario.

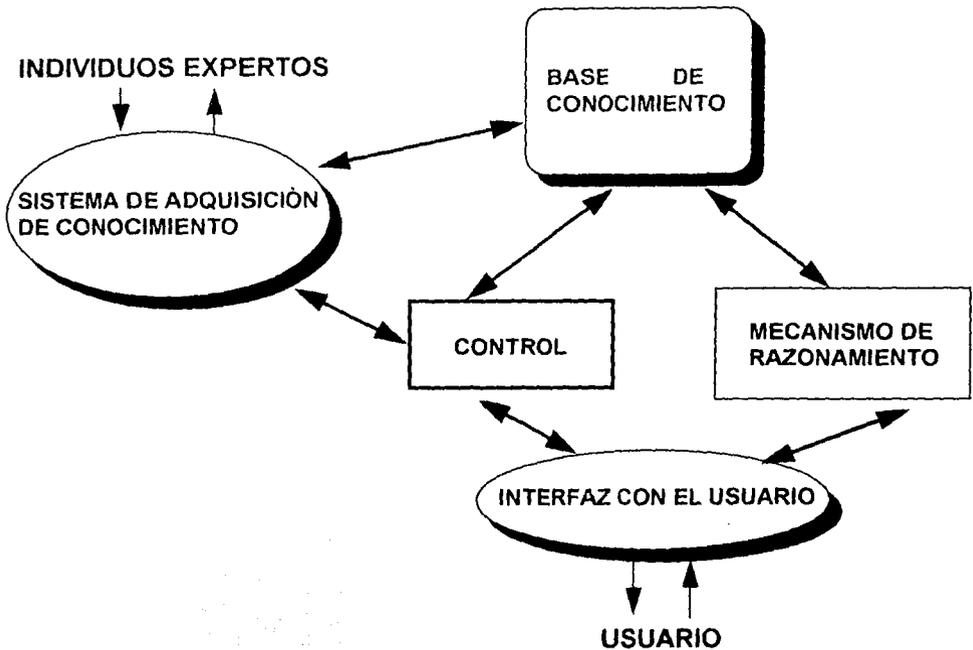


Figura 1-1 Estructura de un Sistema Experto.

Según Moser y Christoph, en un sistema administrador experto deben incluirse expertos en administración (quizá los propios usuarios), expertos técnicos, para los elementos críticos de la toma de decisiones, y expertos en computación, cuyo trabajo principal es el apoyo a los anteriores en la carga de la BC [MOS87]. Morris y O'Neill consideran que este último papel corresponde más bien al profesional de la información, quien se encuentra más calificado para ayudar a codificar el conocimiento a un experto [MORR88].

Los usuarios son personas inexpertas o los propios expertos, que emplean el sistema para resolver problemas (como equipo o el sistema solo) o bien como un apoyo.

La base de conocimiento es el almacenamiento del conocimiento general más o menos permanente, adquirido de los expertos humanos, y el conocimiento temporal y específico suministrado por el usuario. Mucho se ha discutido la naturaleza de esta base y su "superioridad" sobre el concepto más general de base de datos. La diferencia reside en la interpretación que de ella se hace, siendo por lo demás equivalentes.

El sistema de adquisición de conocimiento se emplea para crear y actualizar la parte permanente de la base de conocimiento. En ocasiones este sistema se halla separado del resto y en otras, forma parte del conjunto, aprendiendo de los problemas que va enfrentando.

El mecanismo de razonamiento es un autómata que emplea el conocimiento almacenado en la base de conocimiento para generar hipótesis, diagnósticos y soluciones acerca de los problemas que se intentan resolver. En general se ha buscado que este mecanismo sea independiente del conocimiento específico que maneja.

La interfaz con el usuario es un subsistema que pretende ser "amistoso" y se procura que el diálogo entre el usuario y el sistema sea "natural". Esta es un área que, a pesar de sus avances, se encuentra aún muy lejana de sus objetivos.

La base de conocimiento se puede estructurar de muy diversas maneras: por medio de cálculo de predicados de primer orden, por reglas de producción, por redes semánticas o por medio de marcos. El primero se ve favorecido por todo el desarrollo matemático que lo soporta y por los lenguajes derivados de PROLOG [COL85], que han logrado un gran desarrollo, apoyándose en el método de resolución. Este tema se tratará ampliamente en el siguiente capítulo.

El mecanismo de razonamiento llamado también máquina de inferencia, va asociado a la forma de representación del conocimiento, y se trata de lograr su independencia respecto del dominio de interés. En la práctica, se construyen mecanismos generales con una interfaz genérica, que se emplean para desarrollar rápidamente prototipos de SE. Este tema se desarrollará en el capítulo 3.

Ignorando por el momento el sistema de adquisición de conocimiento, ausente en las versiones comerciales de sistemas expertos, se tratará más en detalle la estructura de la parte operativa de un sistema experto, basada en Hayes-Roth et al [HAY83]. Ver Figura 1-2.

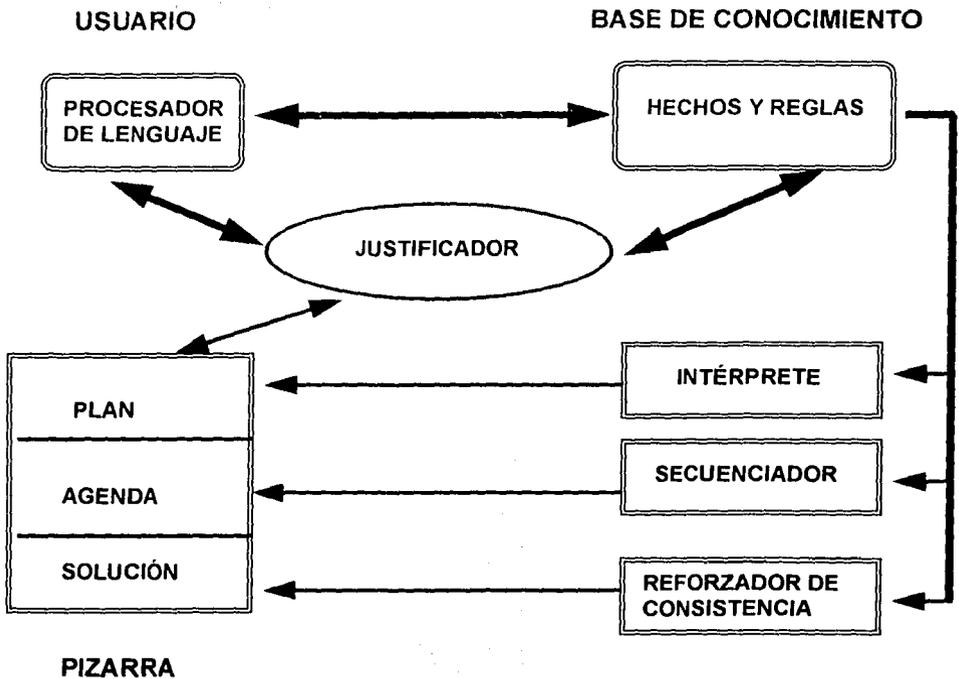


Figura 1-2.- Parte operativa de un Sistema Experto

El procesador del lenguaje se encarga de la comunicación con el usuario (la Interfaz de la Fig. 1-1), manejando un lenguaje orientado al problema, empleando recursos gráficos. La base de conocimientos contiene reglas, datos y heurísticas.

El justificador ofrece explicaciones acerca de la cadena de razonamientos que llevaron a una conclusión o acerca de la necesidad de que sea respondida una pregunta (por el usuario).

En la pizarra se tiene un plan general, con metas, estados del problema y el contexto de ellos; una agenda que indica las acciones que esperan a ser procesadas y la "solución" formada por hipótesis y decisiones tomadas.

El intérprete aplica reglas. El secuenciador indica el orden conveniente para las reglas. El reforzador de consistencia verifica que el avance de la solución sea consistente.

Este esquema general es muy completo y supera la realidad de la mayoría de los sistemas existentes, que se conforman con un intérprete sencillo y en vez de pizarra se emplea un anexo de la propia base de conocimiento.

En ocasiones, en sistemas didácticos o de juguete, el sistema experto se ve reducido a su mínima expresión: un intérprete que va aplicando reglas y pidiendo al usuario respuestas binarias, con una base de conocimiento que constituye un árbol binario de decisiones. Tal es el caso de paquetes como Knowledge Pro y VP Expert⁵.

1.4 APLICACIONES.

En sus diez o quince años de existencia como tales, los SE han pasado de ser una curiosidad de la comunidad dedicada a la Inteligencia Artificial, a productos comerciales con compañías dedicadas exclusivamente a su desarrollo. En los últimos años se han desarrollado innumerables aplicaciones, algunas de las cuales difícilmente se justifican, ya sea porque existen algoritmos tradicionales más eficientes, o por tener muy baja calidad. En esta sección se presentan brevemente algunas de las aplicaciones más conocidas, y una selección de aplicaciones en el área de Investigación de Operaciones.

La idea de construir sistemas expertos en dominios más o menos restringidos, surgió como una respuesta ante el fracaso de los sistemas resolvedores generales de problemas (Rich [RIC83], Winston [WIN85], en referencia a los "general problem solvers"). Hayes-Roth y sus colaboradores [HAY83], atribuyen a Feigenbaum (1977) el haber precisado los elementos fundamentales, al proponer que el poder de un sistema experto deriva del conocimiento que posee y no de los formalismos y esquemas de inferencia particulares que emplea. Por esos años comienzan a aparecer proyectos que llegarían a producir sistemas expertos conocidos.

Algunos de los primeros sistemas fueron: DENDRAL (Buchanan y Mitchel [BUC77], [BUC78a]; Buchanan y Feigenbaum [BUC78b]; Feigenbaum, Buchanan y Lederberg [FEI81]; Lindsay et al. [LIN80]), MACSYMA (Martin y Fateman [MAR71]), EXPERT (Weiss, Kulikowsky y Safir [WEI78], Weiss y Kulikowsky [WEI79]), CADUCEUS (Pople, Mayers y Miller [POP75]; Pople [POP81]), MYCIN (Shortliffe [SHO76]), R1 (McDermott [MCD80]), PROSPECTOR.

Las aplicaciones de los SE pueden clasificarse de muchas maneras, dependiendo del objetivo que se tenga para ello. En la literatura se pueden encontrar diversas listas de SE clasificados con diferentes criterios, como en los trabajos de Buchanan [BUC88], Hayes-Roth [HAY83] y Blanning [BLA87a]. También existen criterios menos formales en cada trabajo que los menciona y los organiza para su presentación. En este análisis se utilizará un enfoque que separa los sistemas según la actividad genérica que desarrollan, basado en el artículo citado de Hayes-Roth y en el de Closs, Helferich y Young [CLO88], y que corres-

⁵Knowledge Pro es un producto para desarrollo de sistemas basados en conocimiento, que incluye un módulo de generación de bases de conocimiento que de hecho construyen un árbol de decisiones.

ponde en parte a la distinción de actividades de un experto, tal como se presentaron en la sección 1.2. A las propuestas de los autores mencionados se agregó una categoría para incluir a los sistemas de tipo general. En la tabla 1-I se presenta un resumen que se discute a continuación.

De los tipos de sistemas listados en la tabla 1-I, los cuatro primeros corresponden con lo que Weiss y Kulikowsky llaman "modelo clasificatorio" [WEI83], Closs y sus colaboradores "sistemas de diagnóstico" [CLO88] y Winston llama "modelos de análisis" [WIN85]. Los dos siguientes serían lo que Winston considera "de síntesis" y Closs denomina "sistemas planificadores", denominación que también usa Grant, quien considera les falta para ser aceptados como expertos [GRA86]. Los primeros comparten características de organizar los datos de entrada de manera que elijan una alternativa, que explique una situación o seleccione un tratamiento; los segundos se orientan a organizar elementos dispersos de manera que cumplan una función y satisfagan una serie de restricciones. Por otra parte, los sistemas de monitoreo, depuración y reparación corresponden a los que Closs y sus colaboradores denominan "de dirección de operaciones".

1.4.1 Sistemas de interpretación. Estos se emplean para tareas de vigilancia a sistemas de diversos tipos, que incluyen sistemas industriales, para entendimiento de voz, análisis de imágenes, determinación de estructuras y otras tareas relacionadas con reconocimiento de patrones. En general operan recibiendo datos y asignándoles un significado simbólico.

Algunos ejemplos de este tipo de sistema son: HEARSAY II y III [ERM80] que se emplean para reconocimiento de lenguaje hablado; SEA, que se utiliza para analizar datos sísmicos y localizar posibles explosiones nucleares [MAS88]; un sistema de análisis de imágenes oceanográficas de satélite, que se emplea para estudiar corrientes marinas en el Atlántico [THO89]; SEI empleado para evaluar personal de investigación en el IIE [ESC89]; GA1 que infiere estructuras de DNA a partir de datos de segmentos parciales [STE78]. También se consideran en esta categoría los sistemas de auditoría, como los descritos en Moser y Christoph [MOS87]. Otro tipo de sistemas de esta categoría son los empleados para analizar otros sistemas, como SYS-AIDE, usado para el análisis de sistemas de información [SHE86].

1.4.2 Sistemas de predicción. Estos emplean algún modelo, al que aplican los datos observados para generar posibles escenarios futuros. Se utilizan para predicción de cosechas, pronósticos de clima y otros problemas de pronóstico.

Este tipo de sistemas aparecen poco en la literatura, quizá porque requieren de otras funciones para ser de más utilidad. A manera de ejemplo, puede citarse el sistema de predicción de inventarios de una distribuidora de productos farmacéuticos reportado por Camiro y Rodríguez [CAM87]. De acuerdo con Hayes-Roth y sus colaboradores estos sistemas aún están en etapa de experimentación [HAY83].

TABLA 1-1
Clasificación de Sistemas Expertos.

CATEGORÍA	PROBLEMA QUE ENFRENTA
Interpretación	Inferir descripciones de situaciones a partir de datos de sensores.
Predicción	Inferir posibles consecuencias de situaciones dadas.
Diagnóstico	Inferir funcionamientos defectuosos de un sistema a partir de sus síntomas.
Monitoreo	Comparar observaciones contra debilidades supuestas en un plan.
Diseño	Configurar objetos sujetos a restricciones.
Planeación	Diseñar secuencias de acciones.
Depuración	Prescribir remedios para corregir funcionamientos defectuosos.
Reparación	Diseñar y ejecutar un plan para administrar un remedio a un problema diagnosticado.
Instrucción	Diagnosticar, depurar y reparar el comportamiento de un grupo de estudiantes.
Control	Interpretar, predecir, reparar y monitorear el comportamiento de un sistema.
Generales	Su función depende de las bases de conocimiento que empleen, o sirven como esqueleto para construir otros sistemas.

1.4.3 Sistemas de diagnóstico. Este es el tipo de sistemas expertos más común. Se utilizan para asociar irregularidades en el comportamiento de un sistema con las causas posibles. Entre otros usos, se aplican a la medicina, la electrónica, la geología y los sistemas de cómputo.

Como ejemplos, se pueden citar los siguientes: MYCIN, para diagnóstico de enfermedades infecciosas [SHO76]; ASEA, empleado para localizar fallas en centrifugas [HIR87]; AI-SPEAR dedicado a la localización de fallas en unidades de cinta magnética de Digital Equipment [BIL84].

1.4.4 Sistemas de monitoreo. Estos se emplean para observar la ocurrencia de ciertas debilidades hipotéticas de un sistema, que pueden destruir su función o propósito. Se les utiliza en plantas nucleares, tráfico aéreo, seguimiento de pacientes y administración fiscal. Este campo de aplicación está menos desarrollado, y apenas comienzan a aparecer sistemas completos, que vayan más allá de prototipos de laboratorio.

Entre éstos se pueden incluir algunos sistemas para monitoreo fiscal, como TAX Advisor [RAG87]. También se tiene el sistema YES/MVS, que se emplea para monitorear al sistema

operativo MVS de IBM [GRI84]. También se puede incluir el sistema reportado por Thompson y sus colaboradores, que monitorea redes de drenaje y asesora a los operadores de la red [THO88].

1.4.5 Sistemas de diseño. Estos sistemas emplean una lista (o base de datos) de objetos diversos, y otra de especificaciones a satisfacer; generan un conjunto de tales objetos y las relaciones entre ellos, de tal manera que cumplan con una serie de restricciones. En ocasiones se incluye la minimización de una función objetivo, generalmente sobre costos u otros elementos indeseables en el diseño. Se les encuentra en el ensamble de computadoras, en la construcción de edificios, y en la elaboración de presupuestos.

Entre los ejemplos de este tipo de sistemas se tienen varios empleados en las fábricas de computadoras, como el sistema XCON (también reportado como R1), y los sistemas XSEL y XSITE de Digital [BAC89]. También se incluyen algunos de los sistemas de diseño asistido por computadora (CAD), como RETWALL, para diseño y selección de estructuras de retención de tierra [Trabajo de Hutchinson reportado en JAI88]; DICE, para generar diseños preliminares de edificios [BAR84]; y HI-RISE, para el diseño de estructuras de edificios muy altos [MAH84].

1.4.6 Los sistemas de planeación. Estos son similares a los de diseño, pero en este caso se aplica sobre objetos que realizan funciones y debe establecerse una secuencia para su operación, de manera que cumplan una meta. Emplean un modelo de comportamiento de los objetos para inferir los efectos de su inclusión en las actividades planeadas. Se les utiliza, entre otras aplicaciones, en la programación de robots, el desarrollo de proyectos, el establecimiento de rutas en redes y en programación automática.

Como ejemplos de estos sistemas, se pueden citar los siguientes: un sistema de planeación educativa reportado por Reyes y sus colaboradores [REY88], FIXER, dedicado a la secuenciación de actividades de mantenimiento [GRA86], HI CLASS, para la planificación de secuencias de ensamblado de microcomputadoras (citado en el trabajo de Buchanan [BUC88]), CSS para la planificación de actividades de relocalización, reinstalación, y reorganización de equipos de cómputo grandes (citado en el mismo trabajo de Buchanan [BUC88]).

1.4.7 Los sistemas de depuración. Estos sistemas emplean funciones de planeación, diseño y predicción, para producir recomendaciones acerca de la corrección de un problema diagnosticado. En sus formas más sencillas se adhieren a un sistema de diagnóstico, donde cada diagnóstico tiene asociado un remedio. En general, este remedio debe prescribirse de manera que se cumplan una serie de restricciones que pueden no estar presentes en el problema de diagnóstico (por ejemplo, en el caso médico, las restricciones acerca de medicamentos a los que sea sensible el paciente).

Entre los ejemplos de este tipo de sistemas, se tiene el sistema MACIE que emplea redes neuronales para problemas médicos, químicos, económicos y otros [GAL88].

1.4.8 Sistemas de reparación. Los sistemas de esta clase son similares a los anteriores, pero además deben poseer funciones ejecutivas para realizar el remedio prescrito. Entre otras aplicaciones, se les emplea (poco aún) en sistemas de mantenimiento de computadoras, de redes y de automóviles.

En la literatura consultada no se encontraron referencias a sistemas específicos, completos y que estén trabajando. A manera de ejemplo de lo que podrán llegar a ser, puede verse el trabajo de Navarro y Vásquez acerca de un prototipo de mantenimiento [NAV87].

1.4.9 Sistemas de instrucción. Estos tienen una orientación similar a los dos anteriores, pero están enfocados a problemas de enseñanza, para lo cual construyen descripciones hipotéticas del conocimiento de un alumno, con las cuales interpretan su comportamiento ante un problema, diagnostican fallas en su conocimiento, prescriben un remedio apropiado y planean una interacción tutorial para corregir la falla.

Aunque existen pocos ejemplos de estos sistemas, pueden citarse TVX, sistema tutorial para usuarios de equipos VAX [BIL85], y BUGGY que se emplea para diagnóstico y corrección de errores al realizar operaciones de sustracción (citado en el trabajo de Buchanan [BUC88]).

1.4.10 Sistemas de control. Los sistemas de esta clase se orientan al gobierno adaptativo del comportamiento de un sistema, aplicando repetidamente funciones de interpretación, predicción, diagnóstico, planeación y monitoreo. Se pueden utilizar, entre otras cosas, para administración de negocios y control de tráfico aéreo.

También de este tipo de sistemas existen pocos ejemplos, por lo cual solo se menciona uno, referente a un sistema de control de frenado de trenes, de la empresa Hitachi (Trabajo atribuido a Feigenbaum, citado en [BUC88]).

Capítulo 2

La base de conocimiento

En el capítulo anterior se pudo notar la importancia del conocimiento en los sistemas expertos, hasta el punto de ser un elemento central, agrupado en lo que se En el capítulo anterior se hizo énfasis en la importancia del conocimiento en los conoce genéricamente como base de conocimiento. Ahora bien, el conocimiento, por su naturaleza, resulta voluminoso, difícil de representar y organizar [RIC83]. Acerca de su representación existen muchas propuestas diferentes, con más o menos partidarios, que incluyen desde formas antiguas de organizar la información, como los espacios de estados y los árboles de decisión, hasta los sistemas de conocimiento asociativo, y las redes neuronales.

Un elemento importante a considerar, es el manejo del conocimiento inexacto, incompleto, impreciso, subjetivo, o cambiante con el tiempo. Este tipo de conocimiento ha recibido atención teórica, pero se han logrado pocos avances prácticos en los sistemas reales. Para su manejo, se han propuesto diferentes formalismos que se fundamentan en la teoría de probabilidades o en los métodos de la lógica difusa.

Cuando crece la base de conocimiento, resulta difícil estar seguro de su consistencia y completez, por lo que se hace necesario emplear métodos auxiliares para su análisis. Sobre este tema existe aún poca información, por lo que se tratará brevemente.

El llenado de la base de conocimiento es otro aspecto muy importante, ya que el conocimiento de los expertos debe ser obtenido, organizado, codificado y alimentado al sistema. Este proceso, conocido como adquisición del conocimiento, tiene diversas alternativas, pero aún representa un punto débil de los sistemas expertos.

En este capítulo se tratarán varios de los aspectos mencionados, comenzando por los tipos de conocimiento que se pueden manejar, pasando luego a un recorrido por las formas básicas de representación. Más adelante se tratarán una serie de alternativas para el manejo de información imprecisa, que incluirán los métodos más difundidos. Finalmewnte se introducirá el tema de la adquisición de conocimiento, revisando algunas de las alternativas disponibles.

2.1. TIPOS DE CONOCIMIENTO.

En la solución de un problema se requiere de conocimiento de diversas categorías: acerca de los objetos o entidades que intervienen, relaciones entre ellas, reglas aplicables a situaciones dadas, metaconocimiento para modificar el uso de las anteriores, y formas adicionales para ayudar al proceso o mantener la consistencia de la base de conocimiento.

En la mayoría de la literatura consultada, este aspecto se toca muy superficialmente, dejando oscuros muchos puntos. Donde puede hallarse información más precisa es en los reportes específicos de algunos sistemas, como por ejemplo PROSPECTOR [BEN84], PROTON [SAW88], GOLD [LIS88], SEA [MAS88] y otros.

En el capítulo anterior se mencionaron diversos elementos que componen el conocimiento: descripciones, relaciones, reglas empíricas, restricciones, conceptos y procedimientos de aplicación citados en [HAY83].

De acuerdo a Fikes y Kehler, el conocimiento que se requiere en un sistema experto incluye las siguientes categorías: descripciones de comportamiento, definiciones de vocabulario, objetos y relaciones; reglas de decisión, hipótesis, hechos inciertos, procesos, restricciones, heurísticas, hechos disyuntivos y situaciones típicas [FIK85].

Los elementos anteriores, en cualquiera de las versiones, pueden -siguiendo a Hayes-Roth y sus colaboradores- agruparse en dos componentes del conocimiento:

- a) descripciones simbólicas, que incluyen los objetos que participan en el problema y sus relaciones, definitorias y empíricas;
- b) procedimientos para manipular las descripciones, buscando ampliarlas a situaciones específicas.

Por otra parte, si se considera que los sistemas expertos, como ocurre con gran número de sistemas de inteligencia artificial, siguen el modelo de sistemas de producción ([NIL80], [RIC83]), entonces se pueden distinguir los elementos siguientes en el conocimiento:

- i) descripción de los estados posibles de un problema,
- ii) reglas de cambio de estado,
- iii) datos del problema específico,
- iv) heurísticas empleadas en el razonamiento (o búsqueda de solución).

Las reglas de cambio de estado y las heurísticas se asocian en la búsqueda de soluciones, por lo cual se las puede incluir en el punto b) de arriba; la descripción de los estados corresponde al punto a); solo queda sin considerarse el punto de los datos del problema, que corresponden a elementos no estructurados, que se irán integrando con el conocimiento conforme se vaya razonando. Estos incluyen datos proporcionados por el usuario y datos contenidos en bancos de datos. Estos últimos pueden llegar a ser dominantes en algunos casos; ver por ejemplo [WOR84].

Así pues, para efectos del presente trabajo se considerarán tres tipos de conocimiento:

- a) descripciones simbólicas,
- b) datos (no simbólicos),
- c) procedimientos de aplicación.

El término simbólico se emplea para indicar que ese tipo de conocimiento toma los datos como los emplea un experto, sin tratar de reducirlos a un código.

Las descripciones simbólicas pueden representarse en un solo conjunto, de manera homogénea o bien en varios grupos, ya sea empleando diferentes métodos - como por ejemplo en SEA [MAS88] donde se consideran reglas de emparejamiento, reglas de inferencia, y reglas de mantenimiento de la verdad - o como subconjuntos separados que juegan papeles más o menos independientes, llamados a veces fuentes de conocimiento ([BAR87], [SAW88], [WOR84]). De cualquier manera, el conocimiento se expresa en una o más de las formas que se describen en la siguiente sección.

2.2 FORMAS DE REPRESENTAR EL CONOCIMIENTO.

La gran mayoría de los autores que describen sistemas expertos en general, o sugieren métodos de diseño o aplicación de los mismos, suponen como punto de partida, sin ofrecer más pruebas, que la representación básica del conocimiento se da a través de las reglas llamadas "de situación y de acción" o "SI-ENTONCES" (ver [HAY85]). Sin embargo, autores como Blanning [BLA87c] y Gero [GER88], listan otras formas de representación, algunas de las cuales son efectivamente citadas en sistemas específicos, mientras que otras son aún experimentales. Las diferentes alternativas mencionadas pueden agruparse como en la Figura 2-1 y se explican a continuación.

Antes de discutir formas específicas de representación, conviene detenerse un poco en el concepto de representación. Según Winston, debe entenderse por representación "un conjunto de convenciones sintácticas y semánticas que hacen posible describir cosas" [WIN85].

Aunque la definición en sí es vaga, proporciona una idea intuitiva de lo que se requiere, centrando la atención en los dos aspectos del tema: el puramente sintáctico y el semántico. El segundo es olvidado con frecuencia, suponiendo que el constructor de sistemas expertos sabrá cómo emplear una forma cualquiera de representación. En la práctica ocurre que se dá importancia decisiva a la sintaxis, originando confusiones. Estas se observan entre formas similares, como las reglas y el cálculo de predicados, donde el programador descuidado mezcla proposiciones lógicas con otros elementos.

Tabla 2-I Formas básicas de representar el conocimiento.

MÉTODOS	FORMAS
Planos	Lógica Reglas Árboles de decisión
Estructurados	Redes semánticas Marcos Orientados a Objetos
Paralelos	Redes neuronales

2.2.1 Métodos planos.

Bajo el título de "métodos planos" se pueden agrupar una serie de formas de representación del conocimiento que guardan básicamente hechos, y relaciones entre ellos. En la práctica, varias de estas formas resultan intercambiables, como se verá más adelante. En algunos casos, la base de conocimiento corresponde a una base de datos relacional.

2.2.1.1 Formas lógicas.

Cuando se comenzó a trabajar en el problema de representar conocimientos, una forma que surgió de modo natural fue la del cálculo de predicados de primer orden (en adelante cálculo de predicados), que tiene a su favor toda la experiencia acumulada por los matemáticos y los científicos que lo utilizan como lenguaje formal. El cálculo de predicados tiene algunas ventajas y muchas limitaciones. Estas últimas han motivado el desarrollo de otras lógicas como la de mantenimiento de la verdad (TMS), la lógica multivaluada y otras. A continuación se describen algunos elementos de éstas.

2.2.1.1.1 Cálculo de predicados.

El cálculo de predicados es el resultado de la maduración y refinamiento de los métodos matemáticos de deducción, es un lenguaje formal de gran utilidad. En este trabajo sólo se tratarán los aspectos útiles para la representación de conocimientos. Si se desea estudiarlo más a fondo puede consultarse un texto como [SHO67] o [CUE85].

El cálculo de predicados utiliza constantes y variables, sobre las cuales se dice algo, y predicados que representan lo que se dice de aquellas dentro de algún dominio. Los predicados pueden aplicarse a una o más constantes, variables o combinaciones de ellas. Cuando se aplica a dos o más elementos, el predicado corresponde al concepto de relación entre ellos. Además de los elementos anteriores, pueden emplearse funciones sobre las constantes y variables, cuyo contradominio es el mismo conjunto de constantes.

Cada predicado puede ser cierto o falso. Se puede negar (\neg) y pueden unirse por medio de conjunción (\wedge), disyunción (\vee) e implicación (\Rightarrow), formando expresiones conocidas como fórmulas bien formadas, que pueden ser válidas o no.

Las variables pueden ser afectadas por cuantificadores: universal ($\forall x$), y existencial ($\exists x$), que significan "para todo valor de la variable x", y "existe al menos un valor de la variable x", respectivamente.

El conocimiento se representa en dos formas: los hechos, como predicados aplicados a un elemento del dominio del problema (que puede ser una constante o una variable), y relaciones entre elementos, representados por predicados con varios parámetros (ver: Figura 2-1). Con estos elementos se pueden construir expresiones.

Los predicados pueden verse como funciones que tienen como dominio el espacio de elementos del problema (o productos anteriores del mismo), y como contradominio el conjunto {cierto, falso}.

Hechos	Tomador_de_decisiones(x) Tomador_de_decisiones(Pedro) Producto(w)
Relaciones	Costo_de(x,y) Costo_de(x,10000)
Expresiones	$\forall x$ Producto(x) \Rightarrow $\exists w$ Costo_de(x,w) Producto(w) \wedge Costo_de(w,10000) \Rightarrow Comprar(w)

Figura 2-1 Ejemplos de representación de conocimiento en cálculo de predicados.

Para manejar el conocimiento representado en expresiones de cálculo de predicados, éstos se convierten en una forma canónica, libre de cuantificadores, y luego se aplica algún método de inferir consecuencias o probar la validez de una expresión, a partir de un conjunto de expresiones que se sabe son válidas. Tradicionalmente se emplean una serie de teoremas y equivalencias conocidas, como las leyes de DeMorgan, el "modus ponens" y el "modus tollens" para transformar las expresiones y derivar consecuencias.

Cuando se trató de emplear el cálculo de predicados en una computadora, se hizo necesario contar con algún método más sencillo, fácil de automatizar. Este resultó ser el método de resolución de Robinson (ver: [NOR85], [MAN74]), el cual se inicia convirtiendo todas las expresiones a la forma llamada cláusular, donde una cláusula es una expresión sin cuantificadores, en la cual sólo aparecen los predicados con los operadores de negación y disyunción. En vez de la expresión que se desea probar se toma su complemento, el cual se convierte también en cláusulas. Por ejemplo, si se tiene la expresión:

$$(\forall x) \text{Producto}(x) \Rightarrow (\exists y) \text{Costo_de}(x,y)$$

se convierte a las cláusulas

$$\neg \text{Producto}(x) \vee \text{Costo_de}(x, f(x))$$

donde $f(x)$ es una función sobre la variable x que corresponde intuitivamente al costo del producto x .

El método de resolución opera por contradicción y va tomando pares de cláusulas donde existan predicados que puedan unificarse y produzcan una cláusula única más sencilla, como se ve en el ejemplo siguiente. El proceso termina cuando se llega a una contradicción (cláusula vacía, \cdot) o no puede resolverse ningún par de cláusulas. En el primer caso, la validez de la expresión se considera probada y en el segundo caso no probada.

Dado que el cálculo de predicados es únicamente semidecidible, este método de resolución resulta más útil al ser usado por refutación.

Suposiciones aceptadas:

- a) $\text{Producto}(\text{papel})$
- b) $\text{Costo_de}(\text{papel}, 10000)$
- c) $\text{Producto}(w) \wedge \text{Costo_de}(w, 10000) \Rightarrow \text{Comprar}(w)$

Cláusula correspondiente a expresión c):

$$c) \neg \text{Producto}(w) \vee \neg \text{Costo_de}(w, 10000) \vee \text{Comprar}(w)$$

Teorema a probar:

$$d) \text{Comprar}(\text{papel})?$$

Teorema negado:

$$d) \neg \text{Comprar}(\text{papel})$$

Resolución:

- c) con d) se resuelve en:
 - e) $\neg \text{Producto}(\text{papel}) \vee \neg \text{Costo_de}(\text{papel}, 10000)$
- b) con e) se resuelve en:
 - f) $\neg \text{Producto}(\text{papel})$
- a) con f) se resuelve en la cláusula vacía.

Por lo tanto: $\text{Comprar}(\text{papel})$ es cierto.

Un ejemplo notable de representación de conocimiento empleando cálculo de predicados lo constituye la representación del Acta de Nacionalidad Británica, realizada por Sergot y sus colaboradores [SER86]. En ese proyecto, representaron toda el acta de nacionalidad en forma lógica, lo cual les permitió evaluar sus aciertos, debilidades y potencialidades, para

usarlas en otras leyes. Como las leyes son ambiguas por naturaleza, el convertirlas a un lenguaje formal, se descubren lagunas y se pueden explorar alternativas.

En la actualidad el método de resolución se emplea mucho en una forma diferente, concretada en el lenguaje PROLOG (ver [COL85], [NOR85]). El lenguaje PROLOG emplea cláusulas, conocidas como cláusulas de Horn, un poco diferentes a las mencionadas anteriormente. Las cláusulas de Horn tienen a lo más una fórmula atómica sin negaciones; sólo emplean negaciones, conjunciones e implicación, y todas tienen una de las formas siguientes:

$$1) a \leftarrow b^1 \wedge b^2 \wedge \dots \wedge b^n$$

$$2) a \leftarrow$$

$$3) \leftarrow b^1 \wedge b^2 \wedge \dots \wedge b^n$$

$$4) \leftarrow$$

La última corresponde a la contradicción; la segunda se usa para aseveraciones generales o particulares (hechos) incondicionales. La tercera se emplea para negación de cuantificadores existenciales. La más empleada es la del primer tipo, que corresponde a una expresión condicional (implicación). En la notación convencional, la primera forma se expresa así:

$$b^1 \wedge b^2 \wedge \dots \wedge b^n \Rightarrow a$$

Las cláusulas normales mencionadas anteriormente, se pueden convertir a cláusulas de Horn a través de manipulaciones algebraicas. A manera de ejemplo se tiene:

cláusula normal: $a \vee b \vee \neg c \vee d$

reorganizando: $\neg(\neg(a \vee b \vee \neg c)) \vee d$

aplicando la equivalencia $\{p \Rightarrow q \text{ equivale a } \neg p \vee q\}$:

$$\neg(a \wedge b \wedge \neg c) \Rightarrow d$$

finalmente, aplicando De Morgan:

$$\neg a \vee \neg b \vee c \Rightarrow d$$

reescribiendo:

$$d \leftarrow \neg a \vee \neg b \vee c$$

la última es una cláusula de Horn.

El lenguaje Prolog ha sido muy empleado en la realización de sistemas expertos y otros basados en conocimiento. Entre ellos puede citarse el trabajo de Thompson y sus colaboradores [THO88], que se usa para asesorar a los empleados de las redes de drenaje de varias ciudades de Australia.

2.2.1.1.2 Otras lógicas.

El cálculo de predicados ha sido una herramienta muy útil, pero está limitada por el hecho de manejar enunciados que pueden tomar sólo dos valores: cierto o falso, mientras que la realidad tiene características más complejas, como se aprecia en los ejemplos siguientes: "es muy cercano a la verdad", "el precio es bajo" o "casi todos los valores de x cumplen con el predicado $P(x)$ ".

Para tratar estos casos se emplea otra lógica, como la lógica borrosa. Esta última, originada por Zadeh, está siendo considerada para la representación del conocimiento. Este tema se tratará en la sección de conocimiento impreciso.

Otra limitación del cálculo de predicados se refiere al manejo del tiempo en forma explícita. Este tema se ha evitado en general en los sistemas expertos, pero existen ya lógicas temporales.

Otro punto donde resulta limitado el cálculo de predicados se refiere a sus propiedades monotónicas, que obliga a considerar una expresión siempre cierta o siempre falsa, pero no a "corregir" su valor. En los casos reales, donde los expertos tienen que trabajar con información incompleta y elaborar hipótesis con valor provisional, se requiere de más flexibilidad. Para cubrir estos aspectos se han seguido diversos enfoques, como los sistemas para mantener la verdad (Truth maintenance systems), propuestos por Doyle (citado en [RIC83] y la dialógica [GON85]. Esta última aún se encuentra en sus comienzos, por lo cual no se tratará.

2.2.1.1.3 Sistemas para mantener la verdad (SMV).

Los SMV se originaron en el trabajo de Doyle (citado en [RIC83]) y constituyen sistemas de razonamiento no monótono. En general se le utiliza como apoyo a otros sistemas dentro del experto, como puede verse en [FIL88], [SAW88] y [MAS88]. A continuación se describe su operación básica, tomando la información principalmente de [RIC83].

Los SMV consisten de reglas o proposiciones que constituyen nodos, que en todo momento se encuentran en uno de dos estados **IN (creído)**, cuando se les cree ciertos y **OUT (no creído)**, cuando no se les cree ciertos (nótese que no quiere decir que sea falso). Cada nodo tiene asociadas dos listas de apuntadores a otros nodos; una que indica las razones que apoyan el creerlo cierto y otra las que apoyan lo contrario (ver Fig. 2-2). El estado y las listas asociadas pueden cambiar conforme avanza el proceso de solución, y cuando se

encuentra una inconsistencia, el sistema retrocede tratando de restablecer un conjunto mínimo que sea consistente.

La justificación de un nodo puede darse en dos formas: con listas de apoyo (LA) y con prueba condicional (PC). La primera es como se describió antes. La prueba condicional tiene un consecuente que resulta de una lista de hipótesis que deben estar en IN y otra lista de hipótesis que deben estar en OUT. Cuando las hipótesis se cumplen, el consecuente también estará en estado IN.

Todas las listas de apoyo pueden ser vacías, cuando no se requieren elementos que lo justifiquen, es decir, cuando son hechos o axiomas.

Parte del razonamiento para hallar el día, hora y lugar para realizar una reunión entre varias personas.	
(1) Día(R) = Miércoles	(LA () (2))
(2) Día(R) ≠ Miércoles	
(3) Hora(R)=1400	(LA (57, 103, 45) ())
(4) CONTRADICCIÓN	(LA (1,3) ())
(5) NO-BUENO N-1	(PC 4 (1,3) ())

Figura 2-2 Ejemplo de sistema para mantener la verdad (Adaptado de [RIC83]).

La lista de hipótesis OUT se utiliza para razonamientos por omisión, de tal manera que se invalide si aparece otra evidencia.

Además de los nodos anteriores, se utilizan otros nodos llamados de contradicción, que registran las hipótesis causantes de una inconsistencia, por si más adelante sufren alguna modificación.

Los SMV se emplean como complemento de otros, ya que no generan inferencias, sino que mantienen la consistencia de la base de conocimiento. En este papel son empleados en el sistema SEA de Mason y sus colaboradores [MAS88], dedicado a la interpretación de datos sísmológicos, donde participa junto a un sistema de reglas, una red semántica y un mecanismo de control especial. Otra aplicación es en el sistema KEE, el cual acepta reglas, métodos (orientados a objetos), programas y marcos. Este sistema se emplea como base para construir sistemas de apoyo a la toma de decisiones, como por ejemplo un sistema para el estudio del despacho de mercancías en una red de transporte (ver [FIL88]).

2.2.1.2 Reglas de producción.

De acuerdo a la mayoría de los reportes de sistemas expertos, el método más empleado para representar el conocimiento es el de reglas. En nuestro caso se llama reglas a secas, o reglas de producción, reglas SI-ENTONCES o reglas SITUACION-ACCION. En cualquier caso, se trata de representar el conocimiento en parejas (antecedente -> consecuente), que se aplican siempre que se cumple el antecedente.

Las bases de esta forma de representación pueden llevarse hasta los sistemas de producción de Post y desarrollos posteriores como los algoritmos de Markov (ver [NIL80]). En ocasiones se distinguen dos tipos de reglas: las que asocian dos estados del problema (el actual y el futuro), llamadas reglas de producción y las que asocian una serie de condiciones con una serie de acciones (sus consecuencias), llamadas reglas Si-Entonces o reglas situación-acción. En la figura 2-3 se muestran algunas reglas típicas.

Nombre de la Regla: Configurará dispositivo; propose; 200a; seleccionar dispositivo

SI

C1 The current step of the process of configuring devices involves proposing alternatives;

C2 and no device has been chosen;

C3 and there is at least one unconfigured device;

C4 and the process of selecting a device has not been yet proposed;

C5 and no problem has been identified concerning selecting a device;

THEN

A1 Propose to go through the process of selecting a device

Fig 2-3 a) Ejemplo de regla de XCON[BAR89], traducida.

IF: The desired rate of return on the investment is greater than 10 percent, and

The amount of investment experience of the client is moderate, and

The area of investment is natural resource development

THEN: There is evidence that the name of the stock to invest in is Georgia Pacific.

Figura 2-3 b) Ejemplo de regla tomado de [MIL90].

```

IF
  Cashneeds="High", AND
  Cashflow="Low", AND
  Marketvalue="High"
THEN Probability =90 THAT
  "Business must be divested"

```

Figura 2-3 c) Ejemplo de regla tomado de [MOS86].

En los sistemas de reglas originales no existía jerarquía ni orden, por lo que en cada momento debían analizarse todas las reglas cuyo antecedente se cumple, originando lentitud en el proceso y riesgos de caer en iteraciones infinitas. En la actualidad las reglas se organizan de manera que no todas se consultan siempre, originando así que el sistema sea no monótono.

En muchos casos las reglas se confunden con el cálculo de predicados, ya que las cláusulas de Horn y las reglas de producción son equivalentes. De hecho, el lenguaje PROLOG puede considerarse un sistema de reglas que opera con un mecanismo de resolución [NOR85].

Entre los sistemas basados en reglas pueden citarse: PROSPECTOR [BEN84], XCON [BAC89] y SEA [MAS88].

En algunos casos, como en PROSPECTOR [BEN84] o en GOLD [LIS88], se agrupan las reglas en forma de árbol (para evitar las iteraciones infinitas), ya sea a partir de los hechos o para tratar de justificar una hipótesis. A veces se les llama sistema causal (ver [WAT81], [BEN84]).

Los sistemas de reglas son apoyados por varios de los autores más citados en el tema de sistemas expertos como Hayes-Roth, quien considera que con ellos se puede atacar un gran número de problemas complejos e incluso afirma que:

"Actualmente, los sistemas basados en reglas constituyen la mejor forma disponible para codificar el conocimiento de los expertos acerca de cómo resolver problemas" [HAY85].

Entre las ventajas que considera, incluye el hecho de que estos sistemas se van adaptando hasta determinar la mejor sucesión de reglas a ejecutar para resolver un problema, y también el hecho de que la propia sucesión permite explicar las conclusiones [HAY85].

Dentro del área de I de O se encuentran numerosas aplicaciones en torno a sistemas de reglas, como puede verse - entre otros - en los trabajos de Kusiak [KUS87a,b],

[KUS88a,b,c], Kersten [KER87], [KER88], Efstathiou [EFS84a,b] y Blanning [BLA87]. Algunos autores consideran que esta forma permite representar el conocimiento heurístico de los expertos, que se resisten a ser simulados a través de otros métodos.

Los sistemas de reglas están relacionados con las tablas de decisión, donde se tiene una serie de condiciones que - de cumplirse - activan un conjunto de acciones (ver Fig. 2-4). La diferencia fundamental entre ambos métodos se refiere a las condiciones, que en una tabla de decisión cubren todas las posibles combinaciones, mientras que en un sistema de reglas sólo se incluyen las que se consideran necesarias. Este hecho simplifica el trabajo, ya que si se tienen cien variables binarias, se tendrían 2^{100} condiciones diferentes, que resultan difíciles de manejar en forma exhaustiva.

Las tablas de decisión se utilizan fuertemente como reemplazo de las reglas en sistemas expertos llamados de segunda generación, donde se construyen particiones de las reglas en tareas, cada una de las cuales se representa en una pequeña tabla, que puede llamar a otras. Estos sistemas se escriben en lenguajes convencionales como C.

CONDICIONES	VALUACIONES			
	Cierto		Falso	
Costo < 10,000 Calidad > 6	Cierto	Falso	Cierto	Falso
ACCIONES				
Adquirir 100	X			
Adquirir 10		X	X	
Buscar otro proveedor			X	X
Mecanismo de emergencia				X

Figura 2-4 Tabla de decisión

En situaciones donde el conocimiento es determinístico, las reglas operan en forma adecuada. Para manejar información imprecisa se les agregan mecanismos de tipo probabilístico o de otro tipo, como se verá en la sección de conocimiento impreciso, originando reglas como las que se muestran en la Figura 2-5.

Si flujo_de_efectivo = Aceptable
Y fondos_en_banco = Muy buenos
Entonces Aceptar solicitud

Figura 2-5 Ejemplo de regla con imprecisión

El manejo de muchas alternativas inciertas va llevando estos sistemas a problemas de manejo, donde resultan mejores otros métodos como lo hacen notar Dhar y Pople [DHA87], Zadeh [ZAD86] y otros.

Cuando se toman subconjuntos de reglas sin circuitos formando un sistema causal, las reglas pueden representarse como un árbol Y-O, como lo hace notar Winston [WIN85]. En efecto, los árboles Y-O consisten en nodos relacionados por medio de dos tipos de arcos: los que representan alternativas (arcos O) y los que deben cumplirse al mismo tiempo (arcos Y), como se ve en la Figura 2-6. Los árboles Y-O tienen muchas aplicaciones relacionadas con ingeniería y la toma de decisiones, como los árboles de fallas empleados en estudios de confiabilidad [PRA77].

La equivalencia entre reglas y árboles Y-O se puede observar en sistemas como [LIS88], donde se mencionan explícitamente los arcos Y y los arcos O.

2.2.1.3 Árboles de decisión.

Otra forma de representar conocimiento, asociada a la de reglas, es la de árboles de decisión. Estos árboles han sido empleados ampliamente en el análisis de decisiones, aunque su utilidad es más bien de tipo didáctico, ya que su representación gráfica requiere de mucho espacio y es difícil de manejar (ver [PRA80]). En la figura 2-7 se muestra un ejemplo.

Los árboles de decisión se utilizan para algunas aplicaciones en los sistemas expertos, como el trabajo de Thompson y sus colaboradores, quienes los emplean junto con predicados en Prolog [THO88]. También se mencionan en relación al sistema JANUS [RAG88].

En otros casos se les menciona asociados al proceso de preparación de las reglas para la base de conocimiento inicial, como una herramienta para verificar consistencia y completez, o para inducir reglas a partir de ejemplos (ver [OLA88]), como se discute en la sección 2.4.3.

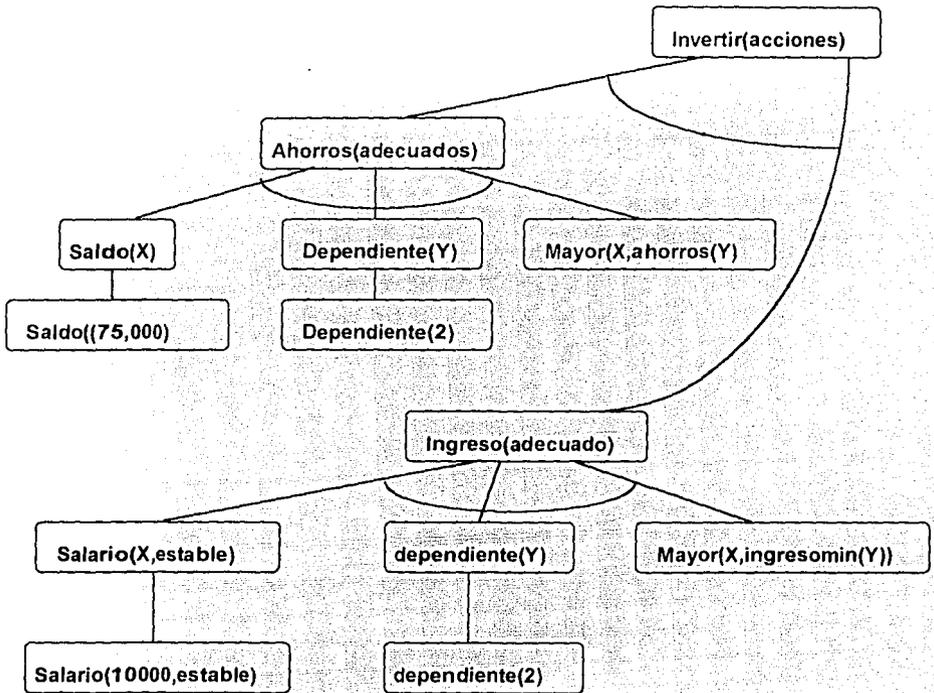


Figura 2-6 Arbol Y-O (Adaptado de [LUG93])

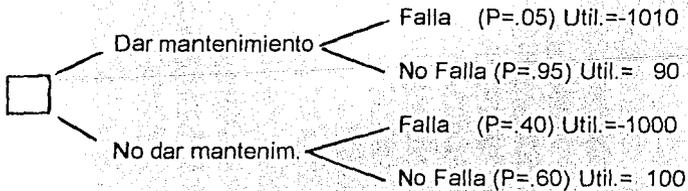


Figura 2-7 Árbol de decisión

2.2.2 Representaciones estructuradas.

Las representaciones anteriores fueron calificadas de "planas" ya que no existe referencia a-priori entre ellas y además porque cada elemento (regla o cláusula) constituye una relación relativamente aislada. En esta sección se tratarán varias formas que suponen que existen relaciones que van asociadas, constituyendo verdaderas estructuras de conocimiento. Al igual que las diversas formas planas pueden verse como equivalentes, las formas estructuradas son intercambiables entre sí, y lo que las diferencia es la facilidad de manejo o las operaciones predeterminadas que cada una supone.

2.2.2.1 Redes semánticas.

Una red semántica es una red formada por nodos que representan elementos del problema, y arcos etiquetados que representan relaciones entre ellos. De acuerdo con Rich en su origen se les aplicó a la representación de significado de palabras del idioma inglés; después se les ha empleado para representar una gran variedad de problemas [RIC83]. En la figura 2-8 se muestra un ejemplo.

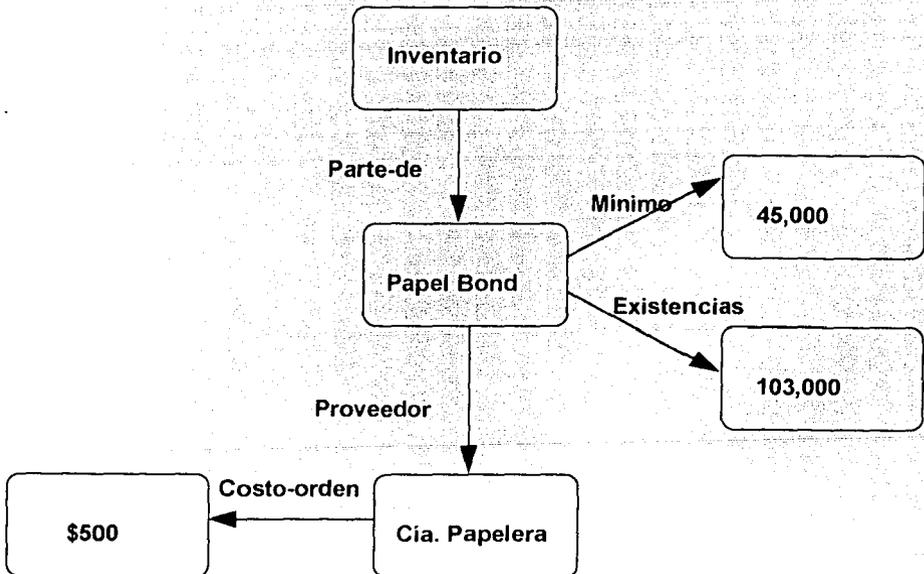


Figura 2-8 Ejemplo de red semántica.
(Relaciones en mayúsculas)

Los elementos que pueden representarse varían con el problema. De acuerdo con Winston, en general se representan objetos, acciones o eventos [WIN85], y según Greenspan, entidades, eventos y restricciones [GRE84]. Las relaciones siempre se dan entre pares de tales elementos.

Las redes semánticas constituyen una herramienta gráfica fácil de intuir, muy útil para representar el conocimiento, pero su semántica, a pesar de su nombre, no es muy precisa. Para darle precisión se debe asociar a algún lenguaje formal, que le quite peso a lo intuitivo y permita su manipulación. Winston propone tres alternativas de formalización [WIN85]:

- a) Establecer equivalencia con un método formal, como el cálculo de predicados.
- b) Asociándola a programas que hacen lo que se desea significar.
- c) Asociarla a una descripción en un subconjunto preciso del lenguaje natural.

La primera forma se emplea mucho en sistemas expertos, especialmente cuando se construyen en lenguajes basados en Prolog. El camino es en dos sentidos, ya que a veces se agrupan las reglas o predicados formando redes (ver [CAS86]).

Algunos autores consideran que las redes semánticas pueden representarse empleando el formalismo de las bases de datos relacionales (ver [SHE86]), lo cual ha sido confirmado por el autor de este trabajo.

El segundo camino, asociarlas a programas, es el empleado en los sistemas que utilizan la orientación a objetos, que se discute en la sección 2.2.2.3.

Finalmente, la alternativa de asociarlas con subconjuntos de lenguaje natural, es útil en el papel, pero no siempre fácil de automatizar. Sin embargo ha tenido importancia en la preparación de bases de conocimiento y especialmente en el aprendizaje a partir de analogías (ver [WIN85]). En la práctica esta forma se mezcla con la primera, ya que resulta relativamente fácil construir predicados a partir de frases en un lenguaje natural restringido.

Dentro de las relaciones posibles existen dos que son muy empleadas y que sirven para formar taxonomías y jerarquizar objetos: la relación ES-UN y la relación PARTE-DE (ver Figura 2-9). Ellas se pueden aplicar a organización y abstracción.

La relación ES-UN (o INSTANCIA-DE) asocia elementos con clases generales, cuyas características pueden heredarse. Esta propiedad se emplea para dar al elemento valores de omisión, en ausencia de más datos.

La relación PARTE-DE permite asociar un elemento con otro que lo contiene como componente, permitiendo así la visión de un problema a diferentes niveles. En esta forma, los atributos de las componentes vienen a quedar en el último nivel de la red, pudiendo asociarse a partir de la relación PARTE-DE.

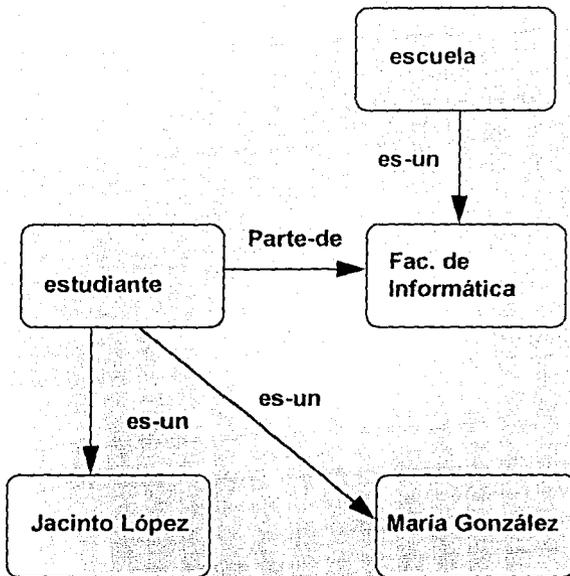


Figura 2-9 Ejemplo de red semántica con relaciones ES-UN y PARTE-DE

En algunas redes, cuando se maneja el concepto de herencia, se agrega un elemento conocido como demonios. Estos son procedimientos para calcular valores ausentes, que se activan automáticamente, aún cuando no se les invoque. Estos procedimientos aparecerán como nodos de la red, conectados con un arco etiquetado "si se requiere" [WIN85].

Las redes semánticas se emplean en diferentes sistemas basados en conocimiento, sean expertos o no. Algunos ejemplos son: el proyecto TAXIS [GRE84] que las emplea para representar el conocimiento de un problema y establecer los requerimientos de un sistema de información; en SYS-AIDE [SHE86] que las combina con el enfoque sistémico para el análisis de sistemas; SEA [MAS88] que se emplea en el análisis de sismogramas, y en el esqueleto para el desarrollo de sistemas expertos que convierte reglas a redes [CAS86].

2.2.2.2 Marcos.

La construcción de modelos empleando redes llevó a la facilidad de heredar propiedades, como se vió en la sección anterior. Este hecho indica que la representación y análisis de nuevas situaciones no necesita partir de cero, sino que puede aprovechar lo que ya se sabe, organizado en estructuras obtenidas de la experiencia [RIC83], de donde surge la idea de marco o forma.

Un marco es una estructura formada por una serie de nodos y arcos etiquetados, que describe una clase de objetos y que contiene huecos para describir aspectos específicos de las instancias particulares de esa clase (ver [RIC83] y [WIN85]). Estos huecos pueden llenarse con datos externos o con valores de omisión o por algún otro procedimiento (ver fig. 2-10).

Una de sus ventajas principales es que permiten conocer las relaciones por adelantado [WIN85], y aprovechar así las propiedades de herencia.

Los sistemas de marcos emplean mucho las relaciones SUBCLASE-DE y MIEMBRO-DE, similares a las relaciones ES-UN de las redes semánticas, que permiten representar jerarquías entre clases (SUBCLASE-DE) o bien de pertenencia a una clase (MIEMBRO-DE) [FIK85].

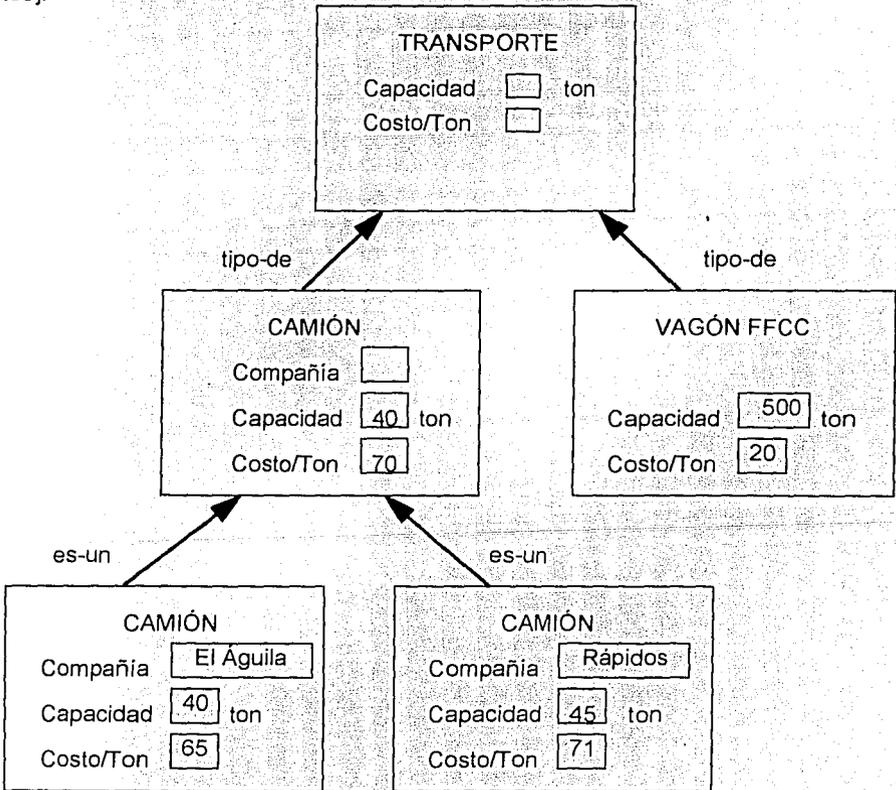


Figura 2-10. Ejemplo de marcos.

En la práctica, los marcos y las redes semánticas son equivalentes, al menos en lo que se refiere a representación de conocimiento. De acuerdo a Gero, ambas representaciones son isomorfas [GER88]. En su utilización puede haber diferencias por la estructura predeterminada de un marco. Al igual que las redes semánticas, los marcos pueden representarse como bases de datos relacionales [GRA88].

De acuerdo con Fikes y Kehler los marcos son la estructura que mejor capta la forma en que los expertos visualizan su conocimiento y constituyen una forma concisa de representarlo [FIK85]. También mencionan la existencia de métodos para inferir resultados a partir de los marcos, pero indican que el uso del conocimiento almacenado se tiene que realizar con procedimientos externos, usualmente escritos en lenguajes orientados a objetos o en LISP. Este aspecto lleva al enfoque de objetos que se discute en la sección siguiente.

Algunos sistemas que emplean marcos son los siguientes: PROTON [SAW88], prototipo para sistemas expertos; el sistema que ayuda a empleados del sistema de alcantarillado reportado por Thompson y sus colaboradores [THO88]; KEE y KRL citados en [FIK85].

2.2.2.3 Orientación a objetos.

Las redes y los marcos son estructuras declarativas de representación del conocimiento. Una alternativa corresponde al enfoque prescriptivo, propio de los lenguajes de programación típicos, que se conoce como orientación a objetos (ver [JAC87] y [DAN88]).

El enfoque orientado a objetos construye descripciones que representan clases de objetos, en forma similar al concepto de registro y establece un conjunto de operaciones que pueden aplicarse a esa clase, denominados métodos. Los métodos son ejecutados cuando los objetos son invocados por mensajes.

Cuando se modela un problema, los datos individuales constituyen atributos de algún objeto, y sólo puede modificarse a través de un método establecido para esa clase.

Las clases pueden formar una jerarquía donde existen subclases y metaclases. Entre ellas se emplean mecanismos de herencia similares a los empleados en los marcos.

El enfoque de orientación a objetos se originó con los trabajos de Dahl y sus colaboradores, que se concretaron en el lenguaje SIMULA (citado en [DAN88]) y en su forma actual se benefició del desarrollo de SMALLTALK, de Goldberg y sus colaboradores (citado en [JAC87]).

El enfoque orientado a objetos puede verse como una metodología de diseño [JAC87], aún cuando no se empleen lenguajes orientados a objetos, pero puede sacarse provecho de ellos, así como el cálculo de predicados y los sistemas de reglas aprovechan el lenguaje Prolog.

La programación orientada a objetos es similar a la programación lógica, ya que separa el diseño de los detalles de implementación, como lo hacen notar Danforth y Tomlinson [DAN88].

En cuanto a estructura de conocimiento, este método está muy relacionado con los marcos, ya que éstos requieren de aquella para su manejo, como lo mencionan Fikes y Kehler [FIK85]. Casi se podría decir que los modelos de objetos y los marcos son dos aspectos de una misma representación, donde los marcos hacen énfasis en la parte descriptiva y los objetos incluyen también los aspectos programáticos. Un sistema que lo emplea es PROTON [SAW88], ya mencionado anteriormente. También se le menciona en el sistema KEE [FIL88].

En su trabajo Dhar y Pople [DHA87] presentan una discusión de las ventajas de este tipo de modelos frente a los enfoques de reglas.

2.2.3 Redes neuronales.

Las representaciones mencionadas en las secciones anteriores, a pesar de sus diferencias, conservan algunas características comunes. Una de las más importantes es el hecho de que el conocimiento se trata de hacer explícito, ya sea en reglas, redes semánticas u otra forma. Para hacer explícito el conocimiento, se presupone que existe algún método de adquisición de éste, que permite codificarlo y luego emplearlo (el proceso de adquisición de conocimiento se tratará más adelante). Este supuesto acerca de la posibilidad de codificar el conocimiento no se cumple siempre, o al menos no siempre resulta sencillo el realizarlo. Es el caso cuando el experto descansa su habilidad principalmente en heurísticas y no existe mucho conocimiento definido acerca del problema.

Una alternativa a los métodos anteriores, que es capaz de manejar conocimiento no explícito y aún tratar de explicarlo, es la conocida como redes neuronales o sistemas conexionistas.

Las redes neuronales, como se las denominará en este trabajo, tienen su origen en los trabajos de McCulloch y Pitts [MCC48], desarrollados más tarde con el nombre de **Perceptrones** (ver [Minsky o Arbib]). A mediados de la década de los setenta, su desarrollo fue suspendido, atribuyéndose este hecho a la crítica realizada por Minsky y Papert. En los últimos años ha vuelto a surgir como una forma importante de representar y procesar conocimiento. Para los fines de este trabajo se tratará únicamente una de sus formas más sencillas.

Las redes de neuronas pueden considerarse básicamente como una serie de nodos etiquetados (neuronas), conectados por arcos con peso. Puede tratarse de una red sin ciclos (feedforward) o con ellos (feedback). En la figura 2-11 se muestra un ejemplo.

De acuerdo con Gallant [GAL88], una red neuronal puede caracterizarse por la descripción de tres elementos: las neuronas, la topología de la red y las propiedades dinámicas. La descripción de las neuronas indica su estructura individual, sus entradas y salidas. La

topología indica la manera en que están conectadas una con otras. Las propiedades dinámicas indican cuando calcular las salidas de las diferentes neuronas y cuando actualizar su estado: todas a la vez, en secuencia o al azar.

Dependiendo de la forma concreta de los tres elementos, se pueden formar muy diversos modelos, llegando a algunos extremadamente complicados (ver por ejemplo el artículo de Josin [JOS87]).

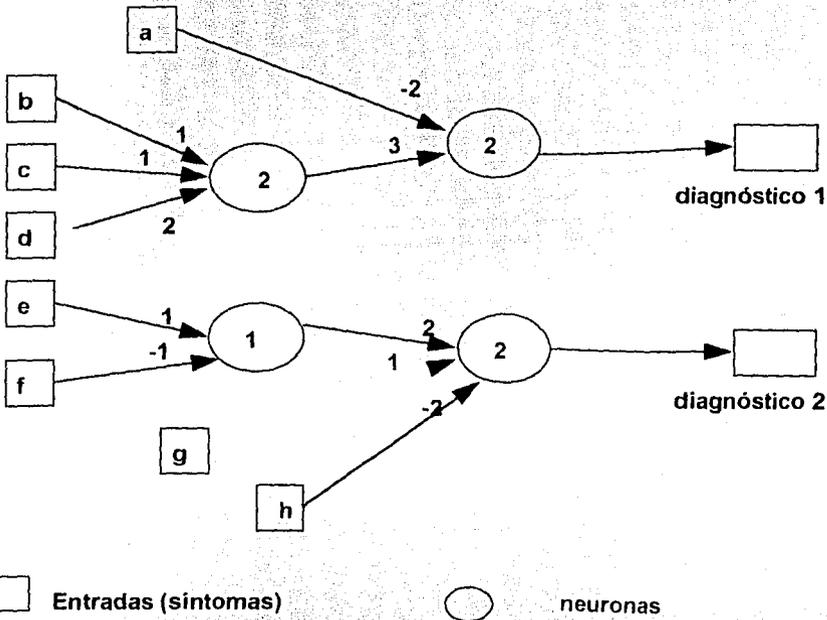


Figura 2-11. Ejemplo de red de neuronas.

En cualquier modelo de este tipo se tiene un subconjunto de neuronas que representan las entradas a la red y cuyo estado depende del exterior, y otro subconjunto de neuronas que representan las salidas y cuyo estado se comunica al exterior. Todas las demás se consideran neuronas intermedias. En ocasiones, para simplificar su tratamiento, se utiliza una neurona cero que siempre tiene salida con valor UNO y que se conecta con todas las demás, de manera que el peso de los arcos que corresponden a esta neurona pueden funcionar como un umbral de activación de la neurona a donde llega.

El modelo general de red neuronal puede describirse como sigue, empleando la versión de [GAL88]:

Neuronas. Cada una con una sola salida, entradas discretas con valores $\{-1,0,+1\}$ o continuas en $[0,1]$. La salida de la neurona i ésima (S_i) se obtiene a través de las fórmulas siguientes:

$$S_i = \sum_{j=0}^n w_{ij} u_j$$

$$u'_i = f (S_i)$$

donde u_j es el estado actual de la neurona j , u'_i es el estado futuro de la neurona i , $f(\cdot)$ alguna función y w_{ij} es un peso asignado al arco que une las neuronas j e i .

Se supone que existe una neurona cero con salida fija en el valor uno y conectada con todas a través de los pesos w_{0j} , conocidos también como umbrales.

Topología. La red se forma conectando celdas más o menos autónomas con arcos entre ellas, y cada arco tiene un peso que indica la relación entre ambas; si es positivo indica una relación directa, refuerzo, y si es negativo indica una relación inversa, llamada inhibición; cuando es cero, indica que no existe relación, por lo que puede eliminarse ese arco.

Un subconjunto de celdas, $\{u_1, \dots, u_p\}$, constituye las entradas y su salida es igual a la entrada.

Propiedades dinámicas. Estas dependerán del problema bajo estudio.

El modelo clásico de red neuronal, conocido también como red discriminante lineal, tiene las características siguientes:

Las neuronas tienen entrada, estado y salida discretas en $\{-1,0,+1\}$. Las fórmulas correspondientes a su funcionamiento son:

$$S_i = \sum_{j=0}^n w_{ij} u_j$$

$$u_i = \begin{cases} +1 & \text{si } S_i > 0 \\ -1 & \text{si } S_i < 0 \\ 0 & \text{si } S_i = 0 \end{cases}$$

$u_0 = 1$; u_1, \dots, u_p son entradas.

Este tipo de neuronas son llamadas **Neuronas de McCulloch y Pitts**. La función $f(\bullet)$ realiza lo que se conoce como lógica de umbral (ver [MCC48]).

La red no tiene ciclos; solo existe comunicación hacia adelante y las neuronas se numeran de acuerdo a su conexión; formando así un orden parcial. Los pesos son enteros y $w_{ij} = 0$ si no hay conexión entre las neuronas j e i o bien $j \geq i$.

Propiedades dinámicas: se evalúa cada neurona en el orden de su índice y su estado se actualiza antes de pasar a evaluar la siguiente.

Los modelos de redes neuronales almacenan su conocimiento principalmente en su topología [JOS87], y una de sus características importantes es que ésta puede adaptarse mediante un proceso de entrenamiento, es decir, aprende a través de ejemplos, modificando los pesos de los arcos.

Un sistema basado en una red neuronal, una vez entrenado con ejemplos, puede ofrecer resultados, sobre todo en problemas de tipo clasificatorio, al cual corresponden los problemas de diagnóstico. Además de dar resultados, si se observan todas las neuronas, la red puede ofrecer una explicación de la manera en que llegó a una conclusión. Al respecto, en el trabajo de Galland se menciona que al terminar un proceso se generan reglas que explican el resultado a partir de la red entrenada, lo cual permite crear sistemas de reglas a partir de la red neuronal, en problemas donde es difícil codificar el conocimiento por otras formas [GAL87].

El sistema reportado por Galland, denominado MACIE, procede en dos etapas: entrenamiento y explotación. En la primera establece su topología y en la segunda produce resultados en forma interactiva con el usuario. Es capaz de llegar a resultados con datos incompletos.

En el trabajo de Josin [JOS87] se menciona una aplicación de redes neuronales al problema del agente viajero. En este caso, el proceso de aprendizaje se guía por una función objetivo que debe optimizarse. Esta aplicación se cita frecuentemente, pero sin suficiente justificación. Según Dayhoff, las redes neuronales, en su variante conocida como **redes de Hopfield**, se pueden emplear para optimización, y cita el caso del agente viajero.

Desafortunadamente, no resulta práctico para más de diez ciudades, con lo cual queda por abajo de lo que se ha logrado por métodos tradicionales [DAY90].

2.2.4 Sistemas de pizarrón.

En las secciones anteriores se presentaron una serie de formas básicas que se emplean para representar el conocimiento en diversos sistemas. En la realidad, estas formas rara vez se presentan puras, más bien se combinan, siendo muy frecuentes las combinaciones de redes semánticas con reglas, marcos con reglas, marcos con módulos orientados a objetos, reglas con cálculo de predicados, y reglas con sistemas para mantener la verdad. Además de todos estos sistemas híbridos, existen desarrollos especiales como es el caso de los sistemas de pizarrón.

Los sistemas de pizarrón (SP) surgen de la consideración de que el conocimiento no siempre proviene de una sola fuente y que a veces se requieren varios expertos para resolver un problema. Así pues, reconociendo esta situación, el conocimiento debe estructurarse de acuerdo a estas consideraciones.

Este modelo (o metáfora según Winston [WIN85]), funciona como sigue: existen varias fuentes de conocimiento, ya sean expertos o bases de conocimiento, las cuales se emplean para generar hipótesis, datos y aportaciones a la solución. Estas fuentes de conocimiento no pueden comunicarse entre sí, excepto a través del pizarrón [WOR84].

La pizarra se organiza en diversas áreas o niveles y cada fuente tiene acceso únicamente a dos o tres de ellos, a los que resulta relevante. La activación de las fuentes de conocimiento debe garantizar que se active una sola a la vez, existen varias formas de decir cual. En la más general, todas las fuentes tienen importancia similar y son activadas cíclica o aleatoriamente.

Las fuentes de conocimiento pueden ser sistemas de reglas, módulos prescriptivos (programas convencionales) o módulos interactivos. En sistemas que emplean grandes bases de datos, las fuentes de conocimiento pueden ser módulos de consulta a dichas bases.

Uno de los primeros sistemas expertos reportados, que usan este enfoque es el sistema HEARSAY (en sus versiones II y III) [], dedicado a reconocimiento de voz. En proyectos surgidos de éste se ha desarrollado el control de la atención a las diferentes fuentes de conocimiento, empleando métodos de secuenciación, semejantes a los empleados en sistemas operativos. En ocasiones se pasa el control a una fuente de conocimiento específica para ese fin.

Otra variación posible es el establecimiento de "grupos de interés" entre fuentes de conocimiento, con pizarrones locales a esos grupos [WIN85].

En cualquier caso, con estos enfoques se tienen problemas similares a los que se encuentran en la toma de decisiones por medio de comités, y se pueden emplear sus experiencias (puede consultarse el trabajo de Berstein y sus colaboradores [BER86]).

Además de HEARSAY, se encuentran menciones de los sistemas ACF (Ayuda al mantenimiento de Bell Labs) y VISON (reconocimiento de imágenes) (citados en [WOR84]).

2.3 CONOCIMIENTO IMPRECISO.

Las formas de representación de conocimiento presentadas en las secciones anteriores, especialmente las formas planas y estructuradas, suponen que el conocimiento disponible se conoce con exactitud y está completo. En la realidad esto ocurre pocas veces, por diversas causas, como pueden ser: imprecisión inherente de los conceptos, fuentes de información no totalmente confiables, margen de error en mediciones [BHA86].

El uso de reglas heurísticas en la derivación de resultados, aún aplicadas a conocimientos exactos, lleva a cierta imprecisión, por la naturaleza misma de dichas reglas. Esto se agrava cuando la información inicial no es "exacta".

En ocasiones un problema con información precisa puede trabajarse en forma imprecisa, para obtener resultados aproximados a bajo costo (en tiempo y recursos computacionales).

En todos estos casos se requiere de métodos adicionales para representar la imprecisión de los hechos y las relaciones entre ellos. Para hacerlo existen varias alternativas, unas numéricas y otras simbólicas; unas basadas en la teoría de probabilidades y otras apartándose de ella. En esta sección se presentan algunas de tales opciones, agrupadas como sigue:

Métodos probabilísticos.

Métodos numéricos no probabilísticos.

La aplicación de cualquiera de estos métodos a la representación del conocimiento depende de la forma particular que se haya elegido, aunque resulta similar para los métodos planos y los estructurados. En adelante se supondrá que se emplea el método de reglas, que es el más usado.

2.3.1 Métodos probabilísticos.

Para tratar la información imprecisa se usa desde hace tiempo, la teoría de probabilidades. Esta constituye una colección de conocimientos y métodos probados y confiables, por lo cual representan un buen punto de partida. En esta sección se tratará el método clásico (Bayesiano), los sistemas causales y los factores de certidumbre, que son métodos ad-hoc.

Al emplear la teoría de probabilidades, se supone lo siguiente según Bathnagar y Kanal [BHA86]:

En la base de conocimientos existe un conjunto finito de proposiciones (hechos, relaciones, etc), que se denominará P , tal que si p está en P , entonces $\neg p$ también está en P , si p y q están en P , entonces $p \wedge q = \text{falso}$ implica que $(p \vee q)$ está en P .

Al conjunto P se le aplica una medida de probabilidad

$$M: P \rightarrow [0, 1]$$

$$\text{tal que: } M(\text{falso})=0, M(\text{cierto})=1$$

$$\text{Si } p, q \text{ en } P, \text{ entonces } M(p \vee q) = M(p) + M(q),$$

$$M(p) + M(\neg p) = 1$$

$$\text{Si } (p \Rightarrow q) = \text{cierto entonces } M(q) \geq M(p).$$

Estos elementos, con otros de la teoría de probabilidad se emplearán para representar hechos inexactos o desconocidos.

Los principales problemas que surgen en la aplicación de la teoría de las probabilidades son su interpretación y la asignación de probabilidades.

La interpretación de probabilidades, según Bhatnagar y Kanal, puede ser de dos tipos: como un grado de confirmación de la proposición o como una frecuencia relativa en el límite.

En cuanto a la asignación, una vez elegida una interpretación, al menos en el campo de sistemas expertos, resulta ser principalmente subjetiva, ya que mucho del conocimiento depende del experto humano y su experiencia.

2.3.1.1 Enfoque bayesiano

De acuerdo a lo anterior, los partidarios de emplear probabilidades en la representación del conocimiento, generalmente emplean el enfoque Bayesiano, para tomar decisiones y sobre todo para inferir. La base de este método consiste en asignar probabilidades a priori a las diversas proposiciones desconocidas, empleando como base las relaciones establecidas entre las proposiciones. En la mayoría de los sistemas estas relaciones se expresan como reglas, o como relaciones contenidas en las redes semánticas o en los marcos.

A partir de los elementos anteriores, empleando el teorema de Bayes y toda la metodología asociada (ver por ejemplo [OBR75]), se pueden calcular probabilidades a posteriori cuando se conozca nueva evidencia, como puede ser cuando el usuario consulte al sistema experto.

Una limitación del empleo directo de este enfoque resulta del número de variables, ya que las distribuciones de probabilidad irán complicándose rápidamente conforme crezca el sistema, y además se volverá difícil de recalcular cuando se obtenga nueva evidencia [WIS88].

Para resolver el problema, sin abandonar completamente sus bases, se han seguido dos caminos: el empleo de modelos causales, o bien la adopción de métodos ad-hoc que simplifiquen el cálculo de las probabilidades. El segundo ha tenido más éxito práctico, y existen diversos autores que les han buscado interpretación probabilística. En las siguientes subsecciones se tratarán brevemente.

2.3.1.2 Métodos ad-hoc.

Aunque se han empleado los sistemas causales en diversos sistemas expertos, en la práctica aún resultan complicados para su manejo, especialmente si se considera que la naturaleza de los SE obliga al proceso simbólico más que al numérico, y en aquel existe una gran dosis de subjetividad. Así, en algunos casos se prefiere relajar el formalismo de la teoría de probabilidades. Dos casos importantes son los de MYCIN y PROSPECTOR. En el primero se usaron los llamados factores de certidumbre, que han merecido mucha atención y en el segundo, con un sentido ligeramente diferente, se emplean las razones de verosimilitud.

En ambos casos se trata de medidas asignadas a priori por el experto humano y que se asocian principalmente a las reglas (ver Figura 2-12).

```
[3] if the spill = acid
and the odor of the spill is known
  choose situation:
    if the spill does have a pungent/choking odor,
      let the material of the spill be hydrochloric acid with certainty .7;
    if the spill does smell of vinegar,
      let the material of the spill be acetic acid with certainty .8
```

Figura 2-12 Regla con factor de certidumbre.
Tomada de [BUC85], correspondiente al sistema ROSIE

A. Factores de certidumbre.

En el sistema MYCIN y aquellos que emplean el esqueleto EMYCIN, las reglas incluyen un valor para el consecuente principal y otro para el alterno, que se conocen como factores de certidumbre (CF). Un CF es un valor en el intervalo $[-1, 1]$, donde el

valor -1 expresa que la proposición es totalmente falsa; el de +1 indica que es totalmente cierta y el cero que no hay información para decidir. En la práctica, según Barstow y sus colaboradores, se consideran valores afirmativos entre 0.2 y 1 y negativos entre -1 y -0.2 [BAR85]. Los factores de certidumbre provienen de valores probabilísticos llamados medida de credibilidad (MB) y medida de incredibilidad (MD) determinados a priori como sigue, tomado de [RIC83],

$$MB(h,e) = \begin{cases} 1 & \text{si } P(h)=1 \\ \frac{\max(P(h/e), P(h)) - P(h)}{\max(1,0) - P(h)} & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$MD(h,e) = \begin{cases} 1 & \text{si } P(h)=0 \\ \frac{\min(P(h/e), P(h)) - P(h)}{\min(1,0) - P(h)} & \text{de otro modo} \end{cases}$$

donde h es una hipótesis y e es una evidencia (que puede corresponder a consecuente y antecedente, respectivamente). El factor de certidumbre se calcula como sigue:

$$F(h,e) = MB(h,e) - MD(h,e)$$

Como en una base de conocimiento las evidencias no se dan aisladas, es necesario saber como combinarlas. Esto se logra de acuerdo a las fórmulas siguientes [RIC83], correspondientes a una estructura como en la figura 2-13

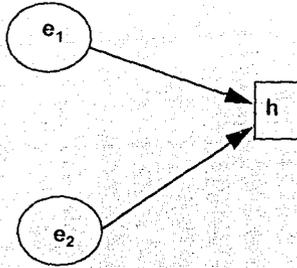


Figura 2-13 Efecto de dos evidencias convergentes.

$$MB(h, e_1 \wedge e_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } MD(h, e_1 \wedge e_2) = 1 \\ MB(h, e_1) + MB(h, e_2)(1 - MB(h, e_1)) & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$MD(h, e_1 \wedge e_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } MB(h, e_1 \wedge e_2) = 1 \\ MD(h, e_1) + MD(h, e_2)(1 - MD(h, e_1)) & \text{de otro modo} \end{cases}$$

A este tipo de combinación se le llama paralela [HEC86].

La forma de combinar valores para dos o más hipótesis tiene inspiración en la teoría de conjuntos borrosos de Zadeh, aunque se aplica a valores con fundamento probabilístico, según el juicio de los expertos humanos [RIC83], [HEC86].

Para no retroceder a las probabilidades, se pueden calcular directamente los factores de certidumbre cuando aparecen nuevas evidencias, como [HEC86], correspondientes a la Fig 2-13:

$$CF(h, e_1 \wedge e_2) = \begin{cases} CF(h, e_1) + CF(h, e_2) - CF(h, e_1)CF(h, e_2) & \text{si } CF(h, e_1) > 0 \text{ y } CF(h, e_2) > 0 \\ \frac{CF(h, e_1) + CF(h, e_2)}{1 - \min(|CF(h, e_1)|, |CF(h, e_2)|)} & \text{si son de signo contrario} \\ CF(h, e_1) + CF(h, e_2) + CF(h, e_1)CF(h, e_2) & \text{si } CF(h, e_1) < 0 \text{ y } CF(h, e_2) < 0 \end{cases}$$

A veces se considera también el encadenamiento secuencial donde una evidencia (posiblemente experimental) soporta otra evidencia (posiblemente teórica), la cual a su vez está asociada a una hipótesis (ver Figura 2-14). En este caso el factor de certidumbre se calcula como [HEC86]:

$$CF(h, e_2) = \begin{cases} CF(e_2, e_1) CF(h, e_1) & \text{si } CF(e_2, e_1) \geq 0 \\ -CF(e_2, e_1) CF(h, \neg e_1) & \text{si } CF(e_2, e_1) < 0 \end{cases}$$

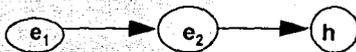


Figura 2-14 Encadenamiento de evidencias.

Como se mencionó antes, se han hecho intentos para interpretar probabilísticamente estos factores y también para reencauzarlos dentro de la teoría aceptada, al respecto puede consultarse [HEC86] y [WIS86].

B. Tasas de verosimilitud.

En PROSPECTOR y otros SE que usan su sistema de adquisición de conocimiento, llamado KAS, se emplean otros formalismos. El conocimiento se estructura como una red que incluye tres tipos de arcos: lógicos, reglas de inferencia y ligas de contexto. Cada nodo tiene un factor de certidumbre en el intervalo [-5, +5], correspondiente al intervalo de probabilidades [0, 1]. Estos factores inicialmente son probabilidades a priori y se van convirtiendo en valores a posteriori conforme se obtienen evidencias.

Cuando dos nodos se conectan por arcos lógicos (\wedge , \vee , \neg), el factor de certidumbre se calcula empleando los métodos de conjuntos borrosos de Zadeh ([BEN84], [LIS88])

- para \wedge , el mínimo de los factores antecedentes,
- para \vee , el máximo de ellos,
- para \neg , se cambia el signo al factor del antecedente.

Cuando los arcos son de inferencia, la regla contiene dos valores llamados factores de verosimilitud; el primero llamado de suficiencia (LS), que se aplica cuando el antecedente es cierto, y otro, llamado de necesidad (LN), que se aplica cuando el antecedente es falso (ambos en [-5,+5]). Usualmente, si $|\text{factor}| > 1$ se toma como cierto (o falso) y si no, se considera desconocido [LIS88]. Estos factores corresponden formalmente a las definiciones de [LIS88]:

$$LS = \frac{p(E/H)}{p(E/\bar{H})}$$

$$LN = \frac{p(\bar{E}/H)}{p(E/\bar{H})}$$

donde E representa una evidencia y H una hipótesis. Dependiendo del factor de certidumbre del antecedente y las tasas de verosimilitud, se actualiza el factor de certidumbre del consecuente de la regla, y luego se propaga a otros nodos.

Al igual que los factores de certidumbre de MYCIN, los de PROSPECTOR han sido reducidos a interpretaciones probabilísticas, aunque siguen empleándose en forma intuitiva más que formal.

2.3.2 Teoría de la evidencia de Dempster-Schafer.

La principal limitación de la teoría de las probabilidades reside en la asignación de probabilidades a los eventos, hechos y relaciones, que es la razón por la que surgieron los métodos ad-hoc. Una alternativa a este relajamiento es la construcción de otra teoría que resulte de mayor utilidad, es el caso de la teoría de la evidencia de Dempster-Shafer.

Esta teoría puede describirse como sigue (ver [BHA86],[YEN89]). Supóngase que se tiene una variable, q, que puede tomar valores en el conjunto Φ . Supóngase también que existe un espacio de proposiciones, E, que involucran a q, y que puede establecerse un mapeo multivaluado

$$\Gamma: E \rightarrow P(\Phi)$$

donde $P(\Phi)$ es el conjunto potencia de Ω , a veces denotado como 2^Φ . Si además se tiene una distribución de probabilidad del espacio E , se puede inducir una asignación de probabilidades, llamada asignación básica en el espacio Φ , denotada como:

$$m(A): P(\Phi) \rightarrow [0,1]$$

al elemento A se le llama focal.

El valor de $m(A)$ se obtiene de la ecuación siguiente:

$$m(A) = \frac{\sum_{\omega(e)=A} p(e)}{1 - \sum_{\omega(e)=\emptyset} p(e)}$$

En caso de que ninguna proposición mapee al elemento vacío, el denominador de la ecuación anterior se reduce a uno.

Regresando a la variable q , en situaciones de incertidumbre se podrá afirmar cuando más que "su verdadero valor está en B ", donde $B \in P(\Phi)$. Esto se denota también como " q es un elemento de B ".

Ahora bien, el cálculo de la distribución de probabilidades de Φ (a partir de $m(\cdot)$) puede ser complejo, por lo que se prefiere manejar únicamente dos cotas para cada conjunto B de interés. Estas se conocen como credibilidad de B ($Bel(B)$) y plausibilidad de B ($Pis(B)$), definidas como sigue:

$$\begin{aligned} Bel(B) &= \sum_{A \subseteq B} m(A) \\ Pis(B) &= \sum_{A \cap B = \emptyset} m(A) \end{aligned}$$

Así, el intervalo $[Bel(B), Pis(B)]$ es el que corresponde a la probabilidad de B .

Dentro de esta teoría se acepta la ignorancia como una posibilidad, y el complemento de un conjunto B sólo tiene su propia credibilidad, que no es necesariamente el complemento de la credibilidad de B . Cuando más valdrá lo suficiente para que sea válida la relación:

$$Bel(B) + Bel(B') \leq 1$$

La diferencia $(1 - (Bel(B) + Bel(B')))$ es el grado de ignorancia.

La ignorancia completa se caracteriza por los valores $Bel(A)=0$ y $Pls(A)=1$.

Además de los valores anteriores, se puede calcular otro, conocido como número de vulgaridad (Q), que se obtiene con la fórmula siguiente:

$$Q(A) = \sum_{B \in \mathcal{H}} m(B)$$

En la tabla 2-II, se presenta un ejemplo de asignación de valores de acuerdo a esta teoría, que supone se tiene una variable que puede tomar los valores a, b o c. A partir de ellos se forman los conjuntos posibles para analizarlos: {a}, {b}, ..., {a,b,c}.

Tabla 2-II.
Valores de credibilidad (ejemplo).
Tomado de [BHA86]

Conjunto (B)	$m(B)$	$Bel(B)$	$Pls(B)$	$Q(B)$
{a}	0.2	0.2	0.5	0.5
{b}	0.1	0.1	0.7	0.7
{c}	0.1	0.1	0.5	0.3
{a,b}	0.2	0.5	0.9	0.3
{a,c}	0.0	0.3	0.7	0.1
{b,c}	0.3	0.5	0.6	0.4
{a,b,c}	0.1	1.0	1.0	0.1

De acuerdo con Bhatnagar y Kanal, los valores mencionados se pueden interpretar geoméricamente como sigue: B sería un área, $m(B)$ su masa probabilística (no toda reside en B), $Pls(B)$ la máxima masa que puede asignarse a B, y $Q(B)$ la máxima masa que puede moverse a otros conjuntos.

El enfoque de Dempster-Schafer para el manejo de incertidumbre ha venido creciendo en los últimos años, pero no ha obtenido un apoyo práctico notable, por el poco desarrollo de los métodos de razonamiento. También existen problemas para recalcular $m()$ cuando aparece nueva evidencia.

Un sistema que emplea este enfoque es GERTIS, usado para el diagnóstico médico, apoyado en una jerarquía de hipótesis [YEN89].

2.3.3 Teoría de las posibilidades.

Otro enfoque que se separa de la teoría de las probabilidades es la de las posibilidades de Zadeh, desarrollada sobre sus teorías de conjuntos y lógica borrosos. Esta teoría considera una serie de valores posibles para una variable y le asigna a cada uno un número entre

cero y uno, sin restringirlos a que sumen uno, cada uno de los cuales miden la posibilidad de que ocurra ese valor.

Como una introducción poco formal, puede tomarse el ejemplo siguiente, atribuido a Zadeh, citado por [BHA86]:

"Se sabe que Hans come X huevos para desayunar, $X \in U = \{1, 2, \dots\}$. Entonces se puede construir la siguiente distribución de posibilidades $P(U)$:

U	1	2	3	4	5	6	7	8
P(U)	1	1	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2

la cual indica la facilidad con que Hans se come X huevos".

Más formalmente, de acuerdo a [MAR87], si se tiene una variable X que toma valores en un dominio U_X y A subconjunto de U_X representa los valores que puede tomar X , entonces se tiene:

$$\mu_A(u): U_X \rightarrow [0, 1]$$

es una medida de pertenencia del valor de $u \in U_X$ al conjunto A , que puede verse como la compatibilidad del valor u con el concepto que representa A .

La medida μ_A puede emplearse para construir la distribución de posibilidades de la variable X , denominada Π_X , como sigue:

$$\text{para toda } u \in U_X, \Pi_X(u) = \mu_A(u).$$

Cuando A contiene un solo elemento, se dice que el valor de X es preciso, e impreciso en otro caso.

Además, A puede ser un conjunto borroso (es decir, sus límites no son precisos), y en ese caso el valor será borroso.

De acuerdo con Martin-Clouaire y Prade, la distribución de posibilidades no es muy sensible a ligeros cambios [MAR], y así, en la práctica para construir la distribución de posibilidades, se procede de la siguiente manera: se determina el conjunto de valores totalmente posibles (donde $\mu_A(u) = 1$), luego los totalmente imposibles (donde $\mu_A(u) = 0$) y luego se interpola linealmente entre los extremos de los casos anteriores. En general, se obtienen distribuciones como la de la figura 2-15.

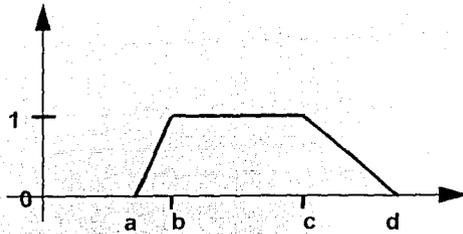


Figura 2-15 Distribución de posibilidades.

Para su manejo computacional, estas distribuciones se parametrizan como un cuádruplo (a,b,c,d), de acuerdo a la figura 2-15, donde se tiene [BON86]:

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 0 & \text{si } u < a \\ (1/c)(u-a+c) & \text{si } a-c \leq u < a \\ 1 & \text{si } a \leq u < b \\ (1/d)(b+d-u) & \text{si } b < u \leq b+d \\ 0 & \text{si } u > b+d \end{cases}$$

2.4 ADQUISICION DE CONOCIMIENTO.

El proceso de adquirir conocimiento es largo y difícil. El transferirlo a una máquina también lo es, al grado de considerársele uno de los mayores, si no el mayor, de los problemas de los SE (Feigenbaum, citado por [QUI87]. El problema general de adquisición de conocimiento rebasa los límites de este trabajo, por lo que esta sección se concretará a tratar el tema en relación a la carga de la base de conocimientos de un sistema experto.

El término adquisición de conocimiento, en este contexto, se define como el proceso de extraer conocimiento de un experto humano, o de una fuente equivalente, y transferirlo a un programa [BUC83]. Así planteado, el problema no parece tan grave, hasta que se considera el hecho de que los expertos rara vez estructuran su conocimiento en forma tal que sea fácil transferirlo a una representación formal en una computadora.

El conocimiento que debe ser adquirido incluye diversas componentes, como se discutió anteriormente, y dentro de ellas destaca el conocimiento estratégico, referente a qué hacer en determinadas situaciones. Este conocimiento es el que propiamente requiere la habilidad del experto y es el que resulta más difícil de formalizar.

2.4.1 Formas de adquisición del conocimiento.

De acuerdo con Buchanan y sus colaboradores, el conocimiento puede provenir de diversas fuentes y ser adquirido de diversas formas, como se muestra en la tabla 2-III [BUC87], que es congruente con el diagrama general de la figura 2-16.



Figura 2-16 Proceso de adquisición de conocimiento.

TABLA 2-III

Fuentes y formas de adquisición de conocimiento

Fuente de conocimiento	Forma de adquisición
Experto humano	Ingeniero del conocimiento (entrevistas)
Experto humano	Editor inteligente
Datos de casos	Programa inductivo
Textos	Programa para entender textos

El ingeniero de conocimiento es el encargado de extraer los conocimientos del experto y codificarlos de manera que sean aceptados por el SE. Hasta ahora el ingeniero de conocimiento es el diseñador del sistema, quien generalmente sabe de computación, quizá un poco de problemas de decisiones, muy poco del tema del experto y casi nada de técnicas de obtención de conocimiento. Actualmente existen grandes problemas en la comunicación entre el experto y el ingeniero, que hacen dudar de este camino. Por otra parte, existen autores que piensan que los SE generarán nuevos papeles para expertos en comunicación, que son quienes podrían realizar esa extracción del conocimiento.

Una alternativa que pretende resolver el problema de comunicación entre el experto humano y el ingeniero de conocimiento, es el programa editor inteligente. Se trata de un programa que ayuda a la codificación del conocimiento directamente con el experto, sin intermediarios. Esto puede hacerse cuando ya existe una base de conocimiento inicial, que sirve de punto de partida para agregar nuevas reglas o estructuras de conocimiento. El experto puede emplear el SE con datos de prueba y verificar que sus nuevos elementos funcionen correctamente. Este tipo de editores deben llevar registro de los cambios, quién los hizo, cuándo, qué elementos quedaron pendientes, etc.[BUC83]. Dentro del sistema, estos datos ayudarán a documentar el sistema y servirán para las funciones de explicación,

ya que de alguna manera constituyen metaconocimiento. Este tema se tratará en el siguiente capítulo.

Los programas para entender textos son considerados como una opción futura, que se encuentra apenas en una etapa inicial de investigación. En [BUC83] se mencionan los trabajos de Badre.

La alternativa de programas inductivos se refiere a programas que aprenden a partir de ejemplos y de ahí inducen el conocimiento. Esta posibilidad parece prometedora a futuro, aunque se encuentra también en experimentación, pero para algunos resulta ser la única alternativa práctica para resolver el problema. Así, por ejemplo, según McDermott: "El único enfoque realista al problema de adquisición de conocimiento es automatizar el proceso" (Citado en [QUI87]). De acuerdo con Michie "el problema de adquisición de conocimiento se prodrá resolver si y sólo si se aprende de ejemplos" (Citado en [QUI87]). Esta forma se discute un poco más adelante.

2.4.2 Etapas en la adquisición de conocimiento.

Cualquiera que sea la forma de adquisición del conocimiento, ésta requiere de una planeación adecuada. Para realizar un sistema experto sobre un problema en particular, se requiere de cubrir las etapas siguientes (según [BUC83]):

a) Identificación: en esta etapa se determinan los aspectos importantes del problema, sus características, los que intervendrán en él (expertos, ingenieros de conocimiento, etc.), los recursos disponibles y las metas que se pretende satisfacer.

b) Conceptualización: en esta etapa se determinan los conceptos básicos involucrados en el problema, sus relaciones, qué datos se proporcionarán, cuáles se inferirán, qué hipótesis existen, cómo se organizan, etc.

c) Formalización: aquí se analiza y completa el espacio de hipótesis, se establece cómo se ligan entre sí y se define la granularidad (es decir, los elementos mínimos que se manejarán); se analiza el modelo subyacente en el comportamiento del experto en ese campo (puede ser de tipo matemático, de comportamiento, etc.).

d) Implementación de un prototipo: en esta etapa se integra el conocimiento obtenido en un sistema prototipo, empleando paquetes comerciales de tipo general (conocidos como shells).

e) Pruebas: aquí se evalúa el prototipo, observando su comportamiento ante problemas conocidos. En especial se verifican las reglas de inferencia (ver capítulo siguiente).

f) Revisión: al concluir las pruebas, se revisa el prototipo y se incorporan los cambios necesarios. El proceso se repetirá hasta contar con un prototipo aceptable, y en ese

momento se puede diseñar el SE definitivo, cuidando los aspectos de eficiencia y facilidad de uso para los usuarios finales.

Las etapas anteriores corresponden al desarrollo de muchos sistemas reportados, pero en la actualidad se están desarrollando nuevos métodos, adaptando los de ingeniería de software. Todo esto se encuentra en una etapa de experimentación, y no se puede decir que haya un método probado para desarrollar un SE, y en especial su base de conocimiento.

2.4.3 Inferencia de conocimiento.

Considerando las dificultades para obtener el conocimiento de los expertos, se han desarrollado métodos para aprender a partir de ejemplos. Algunos trabajos iniciales en esta área son los de Winston acerca de inferencia a partir de similitudes [WIN79] y muy especialmente los trabajos de Quinlan [QUI87], cuyo sistema ID3 ha sido punto de partida de un gran número de trabajos y programas, como el paquete Knowledge-Pro. También deben citarse los trabajos de Buchanan y Feigenbaum para el sistema METADENDRAL, el cual aprende y construye reglas sobre compuestos químicos, y el sistema AQ11 de Michalsky, que aprende reglas acerca del diagnóstico de enfermedades de plantas (citados en [BUC83]).

De acuerdo con Gero, el problema de aprendizaje "es uno de generalización a partir de un conjunto de ejemplos; de encontrar reglas que puedan representar a una colección dada de instancias y que puedan servir para formar una teoría acerca de una colección mucho mayor" [GER88].

Según Quinlan, resulta más fácil documentar casos completos que articular el conocimiento empleado en resolverlos. Así, si se tuviera un gran número de casos documentados, al enfrentar un nuevo problema se podría seleccionar uno similar y usarlo como guía. Ahora bien, este enfoque resulta impráctico por el volumen de la información que habría que almacenar, y por la dificultad de adaptar ese conocimiento a nuevas situaciones. Como alternativa se ofrece la de extraer las regularidades de un grupo pequeño de casos y tratar de inferir reglas generales, válidas en muchos otros [QUI87].

Para construir el árbol de decisiones se comienza tomando una variable, y usando sus diferentes valores para formar clases según el resultado obtenido (ver tablas 2-IV y 2-V). Luego, para cada clase se forman subclases empleando otras variables, hasta que cada clase contenga sólo un resultado posible. En general, siempre es posible construir un árbol de esta naturaleza, pero puede resultar con clases de un solo elemento. Por tanto, debe agregarse que se desea un árbol mínimo.

Tabla 2-IV
Casos clasificados
 (Tomado de [QUI87])

observación	temp. (°F)	humedad (%)	viento	decisión
lluvia	71	96	si	no jugar
lluvia	65	70	si	no jugar
nublado	72	90	si	jugar
nublado	83	78	no	jugar
lluvia	75	80	no	jugar
nublado	64	65	si	jugar
soleado	75	70	si	jugar
soleado	80	90	si	no jugar
soleado	85	85	no	no jugar
nublado	81	75	no	jugar
lluvia	68	80	no	jugar
lluvia	70	96	no	jugar
soleado	72	95	no	no jugar
soleado	69	70	no	jugar

Tabla 2-V
Clases formadas en primera etapa

observación = soleado

Temp (°F)	humedad (%)	viento	decisión
75	70	si	jugar
80	90	si	no jugar
85	72	no	no jugar
72	95	no	no jugar
69	70	no	jugar

observación = nublado

Temp (°F)	humedad (%)	viento	decisión
72	90	si	jugar
83	78	no	jugar
64	65	si	jugar
81	75	no	jugar

observación = lluvia

Temp (°F)	humedad (%)	viento	decisión
71	96	si	no jugar
65	70	si	no jugar
75	80	no	jugar
68	80	no	jugar
70	96	no	jugar

Desde 1976 se sabe que no es posible garantizar la obtención del árbol mínimo (Hyafil y Rivet, citados en [QUI87]), por lo que se deben emplear criterios heurísticos para hallar un "buen" árbol. Esta es una diferencia de enfoque entre los diversos autores, empleándose métodos estadísticos (Monger y Hart) o basados en teoría de la información [BAI88].

Arbab y Michie (citados por [QUI87]) propusieron el empleo de árboles lineales, donde en cada etapa de decisión se tenga a lo más una rama que se subdivide. Con este criterio se logran árboles más sencillos.

Un problema con estos métodos es que el resultado aparece muy obscuro para el experto y para el usuario potencial. Considerando que los SE dependen casi totalmente en su representación de conocimiento, resulta grave esta situación. Sin embargo, con el empleo de árboles lineales se ha logrado reducir mucho, creando árboles más sencillos y claros.

Otros problemas que deben enfrentarse al tratar de inferir conocimiento a partir de ejemplos son: ejemplos mal clasificados, atributos especificados insuficientemente y ruido en los datos.

Para ilustrar el proceso de inferencia, en la figura 2-17 se representa el árbol obtenido de la tabla 2-6, tomada del trabajo de Quinlan [QUI87].

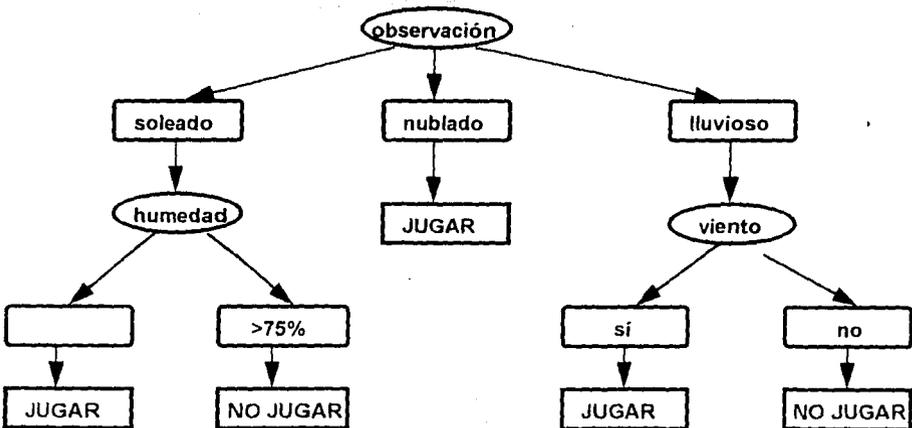


Figura 2-17 Arbol de decisión generado

Un ejemplo de aplicación de estos métodos se presenta en el trabajo de Olave y sus colaboradores [OLA87], que infiere reglas para calificar el desempeño de los administradores de empresas públicas en Pakistán.

Algunos autores prefieren mezclar la inferencia con la codificación de conocimiento de expertos, como en el de Stirling [ST188], usado en problemas de una acería.

CAPITULO 3

La máquina de inferencia.

En el capítulo inicial se presentaron las diversas partes que constituyen un sistema experto. De ellas, en el capítulo anterior se discutieron diversas maneras de configurar las bases de conocimiento, que es el elemento que permitirá un comportamiento semejante al del experto humano. Ese conocimiento por sí solo no basta, sino que debe emplearse para aplicarlo a problemas específicos y obtener soluciones. Esta función corresponde a lo que se conoce como máquina de inferencia, que será tratada en este capítulo.

De acuerdo con Efstathiou y sus colaboradores, la máquina de inferencia es un conjunto de programas que utilizan la base de conocimiento y los datos de un caso particular y producen una recomendación experta [EFS86b]. En este capítulo se discutirán sus funciones y una serie de características de su organización y funcionamiento.

La máquina de inferencia realiza un proceso de búsqueda, similar a los empleados en otras áreas de la Inteligencia Artificial, y de otras disciplinas, como la Investigación de Operaciones. Estos procesos de búsqueda deben considerar una serie de criterios para funcionar adecuadamente, que incluyen la representación de los estados por los que irá pasando, las formas de emparejar las reglas con los estados, y la resolución de conflictos entre reglas.

Dentro del proceso de inferencia se incluye generalmente el proceso de explicar la necesidad de proporcionar determinados elementos al SE, y el de justificar los resultados obtenidos. Estos procesos se asocian a veces con la interfaz entre usuario y sistema, pero descansan en el razonamiento seguido, e incluso lo influyen.

Muchos de los elementos que se discuten en este capítulo son de tipo general y se aplican a casi todos los métodos de representación de conocimiento, a excepción de las redes neuronales. Además se destacan algunos conceptos en forma particular.

Considerando que la mayoría de los SE emplean reglas para representar el conocimiento necesario para realizar inferencias, se dará énfasis a este tipo de representación de conocimiento.

3.1 FUNCIONAMIENTO BASICO DE UNA MAQUINA DE INFERENCIA.

Como fue expuesto anteriormente, el propósito fundamental de la máquina de inferencia de cualquier sistema experto es el de aplicar el conocimiento general almacenado en la base de conocimiento a problemas específicos, buscando obtener una solución. Este proceso de búsqueda es común a muchas otras áreas y tipos de sistemas, encontrándose en problemas

de investigación de operaciones, métodos numéricos convencionales, problemas de autómatas y diversas aplicaciones de inteligencia artificial. El proceso de búsqueda de solución puede resumirse así:

- Se tiene un espacio de estados posibles de un problema;
- Se tienen un estado inicial y uno final;
- Se debe encontrar un camino entre el estado inicial y el final.

En ocasiones se considera que la máquina de inferencia realiza la función de razonar con el conocimiento disponible. La búsqueda del camino y el razonamiento se toman como equivalentes.

La máquina de inferencia opera básicamente con la parte de la base de conocimiento que se denominó procedimientos en el capítulo anterior, y que en muchos casos toma la forma de reglas de producción o predicados lógicos. En este capítulo en general se hablará de reglas de producción.

3.1.1 El proceso de búsqueda.

Cualquier problema de búsqueda enfrenta varios problemas críticos para su buen funcionamiento [RIC83]:

- la representación de los estados;
- la selección de la regla que conviene aplicar en cada momento;
- la resolución de conflictos cuando existen varias reglas aplicables;
- el problema del contexto;
- la dirección de la búsqueda.

La representación de los estados está muy relacionada con la representación de conocimiento elegida, y es muy común el uso de redes semánticas y marcos, que en muchos casos pueden convertirse en estructuras de datos más sencillas, o bien en una base de datos relacional, como en el trabajo de Shemer [SHE86]. Como este aspecto ya se trató en el capítulo anterior, no se abundará más en él.

La selección de una regla es un problema sencillo cuando se tienen unas pocas, pero se complica cuando el sistema crece hasta tener varios miles, como en el caso de XCON [BAR88]. En ese caso, deben emplearse algoritmos adicionales que permitan elegir rápidamente. Algunos métodos son el indizar las reglas [RIC83], el agrupamiento de reglas en tareas o etapas [WIN85] y el empleo de metarreglas [LEN83]. Para aparear una regla

con el estado que guarda el proceso en determinado momento, deben emparejarse las partes que lo forman, ya sean variables, relaciones o estructuras completas.

La selección de reglas aplicables puede dar como resultado más de una regla aplicable en cierto momento. A veces esta situación se debe a inconsistencias de la base de conocimiento, pero puede deberse también a la naturaleza del problema. En este último caso, que es el más frecuente, la estrategia empleada para la búsqueda puede asumir la decisión, o puede optar por probar diversas alternativas. Ahora bien, el que existan varias reglas aplicables no quiere decir necesariamente que haya un conflicto entre ellas, ya que pueden resultar equivalentes. El conflicto se presenta cuando sus salidas tienen una intersección no vacía, en cuyo caso se habla del grado del conflicto como la cardinalidad de dicha intersección [LI_87].

La resolución de los conflictos entre reglas se realiza de acuerdo a su naturaleza: si es problema de consistencia lo mejor es prevenirlo analizando la base de conocimiento (ver [LIU87] para un ejemplo empleando redes de Petri). Cuando el conflicto se halla en la naturaleza del problema, se puede analizar la importancia relativa de las variables que afecta cada una. En general, en su solución se emplean algunos conceptos similares a los de la programación concurrente [LI_87].

Cuando se está realizando un proceso de búsqueda, el grado de detalle de los estados puede oscurecer la toma de decisiones, originando un gran número de deducciones inútiles sobre variables que no son relevantes en esa etapa [GER88]. En términos generales resulta difícil determinar el grado de detalle adecuado en cada momento. A este problema se le conoce como problema de contexto (ver [RIC83]). En general, los SE no enfrentan esta situación, aunque se menciona que es deseable que los SE puedan razonar en diversos niveles, lo cual les permitiría un avance más rápido hacia la solución.

Otro elemento que debe considerarse es la dirección de la búsqueda, que en algunos autores acapara toda la atención, minimizando los puntos antes presentados. Todo proceso de búsqueda tiene tres direcciones posibles [WIN85]:

- "hacia adelante", llamada también orientada por los datos,
- "hacia atrás", conocida como orientada por metas, y
- "en ambos sentidos", conocida también como reducción de distancia.

Las tres formas tienen sus ventajas y desventajas, y muchas veces son equivalentes, especialmente las dos primeras.

En el caso de orientación por los datos, el proceso toma los datos conocidos y busca con ellos alguna regla aplicable, observando el antecedente. El proceso continúa hasta llegar a un estado meta, o no encontrar ninguna regla aplicable.

En forma similar, la orientación por metas toma una meta, que puede ser una hipótesis, y la va comparando con los consecuentes de las reglas, buscando qué datos la harían válida. El proceso se repite hasta hallar datos que justifiquen la suposición, o no existan reglas aplicables. Este método es muy usado en sistemas de diagnóstico, y en problemas del tipo de prueba de teoremas [RIC83]. De acuerdo con Weis y Kulikowsky, esta orientación es menos eficiente y más difícil de implementar que la anterior, pero en cambio resulta más fácil su manejo, ya que no se requiere ordenar las reglas como a veces se debe hacer en el método "hacia adelante" [WEI83].

En algunos casos se emplean los dos métodos para complementarse. Localizan una meta con búsqueda "hacia adelante" y luego emplean la búsqueda "hacia atrás" para tratar de identificar otros datos que proporcionen apoyo adicional o se lo reduzcan. (P.ej. Prospector [BEN86]).

La búsqueda bidireccional considera que en todo momento existe una distancia que separa el estado actual de la meta, y trata de reducirla, buscando a partir de ambos extremos, haciendo parte del camino "hacia adelante" y parte "hacia atrás". Tiene el riesgo de que ambas búsquedas se crucen sin encontrarse en un punto medio.

Para elegir una dirección se consideran tres aspectos: el número de estados iniciales (finales), el factor de ramificación, y la necesidad de explicar [RIC83]. Cuando se tienen pocos datos iniciales y los estados finales se desconocen y pueden ser muchos, el número de estados menor favorece a una búsqueda "hacia adelante". En cambio, si existen muchos estados iniciales y solo unas cuantas metas posibles, conviene realizar la búsqueda "hacia atrás".

El factor de ramificación se refiere al número de caminos que parten de un estado o llegan a él, según la dirección elegida. Generalmente conviene elegir la dirección que tenga menor factor de ramificación.

La necesidad de explicar se encuentra presente en algunos problemas y especialmente en los SE. La explicación se aplica a los resultados y también a las solicitudes de datos que haga el sistema al usuario. En caso de requerirse tales explicaciones, conviene un sistema que busca "hacia atrás".

Para mayor discusión de las posibles direcciones, ver [RIC83], [NIL80], [WIN85].

3.1.2 Estrategias de búsqueda.

La máquina de inferencia, de cualquier forma que resuelva los problemas mencionados en la sección anterior, tendrá dos componentes importantes: la estructura de datos y el algoritmo de búsqueda (a veces llamado estrategia de búsqueda) [HEI88].

La estructura de datos será la materialización de la representación de los estados, y el algoritmo debe incluir los aspectos de selección de reglas, resolución de conflictos, el

problema del contexto y el control de la dirección de la búsqueda. Además, debe considerar las peculiaridades de representación de conocimiento, especialmente cuando se emplea conocimiento inexacto.

La mayoría de los SE reportados no aclaran la estrategia de búsqueda empleada, excepto en lo referente a detalles del manejo de inexactitudes y en relación a si es "hacia adelante" o "hacia atrás". Algunos autores aseguran que el método de búsqueda es poco importante, siempre que se tenga una adecuada representación del conocimiento (ver [HAY85]). En todo caso, parece haber unas pocas estrategias básicas, que pueden hallarse en casi todos los textos de Inteligencia Artificial (por ejemplo [NIL80], [RIC83], [WIN85]). Aquí se presentan algunas, descritas brevemente.

A. Genera y prueba. Este método localiza una regla aplicable y con ella cambia su estado; comprueba si es un estado terminal y en caso afirmativo se detiene, en caso contrario, busca otra regla y así sigue hasta encontrar el estado final o no hallar regla. En caso de no encontrar reglas aplicables, generalmente emplea una técnica de retroceso ("backtracking"), para localizar un punto de reinicio de la búsqueda sin tener que deshacer todo lo avanzado.

Este método puede mejorarse si se revisan las reglas alternas en cada estado y se prefiere siempre la que se acerque más a la meta deseada, pero resulta un poco riesgoso en algunos casos, ya que puede generar un camino de tramos cortos al inicio y que luego llegue a un punto donde no puede avanzar, o solo puede hacerlo con un camino muy largo.

B. Búsqueda en amplitud. Este método localiza todas las reglas aplicables al estado en que se encuentra la búsqueda y luego todas las sucesoras de cada uno de los nuevos estados, y así sucesivamente, hasta hallar el estado final deseado. Este método resulta muy lento y complicado, pero si existe solución la encuentra seguramente.

C. Elige el mejor(A*). En este método se localizan todas las reglas aplicables y se analizan los estados a que conduce cada una de ellas, luego se elige la mejor de acuerdo a una función que combina una medida estática de bondad del camino recorrido, con otra de tipo heurístico que indica el grado de cercanía entre ese estado y el estado final.

A diferencia de los dos métodos anteriores, que son exhaustivos y sistemáticos, este último no verifica todos los caminos posibles, y por ello puede omitir la mejor solución. La ventaja es que convierte en posible el hallar una solución para problemas donde no sería factible hallarla por los otros métodos, debido al número de estados que deben revisar.

Este método presenta grandes similitudes con la forma que tienen los expertos humanos para elegir una alternativa de entre varias, al menos como se supone que lo hacen en circunstancias ideales.

De los métodos mencionados, en muchos SE reportados se emplea el primero, por ser uno de los más fáciles de implementar, especialmente cuando se tienen pocas reglas. Es el caso de los sistemas basados en el lenguaje PROLOG. Una desventaja de este método es la posibilidad de caer en ciclos infinitos si existe una regla que pueda resultar recursiva. Otra, menor, reside en el orden de selección de reglas, que puede obligar a una secuenciación manual para mejorar el funcionamiento del sistema.

Las estrategias mencionadas se pueden aplicar a sistemas orientados por metas, orientados por datos o bidireccionales.

3.2 INFERENCIA BASADA EN SISTEMAS DE REGLAS.

En un sistema basado en conocimiento, sea experto o no, el proceso de búsqueda puede descansar sobre reglas que se apoyan en el resto del conocimiento o bien realizarse por medio de procedimientos de tipo prescriptivo, asociados a determinados estados. Este segundo enfoque se emplea en diversos sistemas que emplean técnicas de Inteligencia Artificial, pero resulta poco conveniente para los SE, ya que no se cumpliría la separación del conocimiento de la parte operativa del sistema. Es por esto que se emplean reglas para indicar los cambios de estado posibles, independientemente de la forma de representación del conocimiento del problema en sí. Estas reglas se conocen como reglas de inferencia y forman parte del conocimiento almacenado en la base de conocimiento.

Cuando se emplean reglas, la máquina de inferencia se convierte básicamente en un intérprete que realiza un ciclo permanente con dos pasos [HAY85]:

- identificar reglas aplicables;
- aplicar una para resolver o simplificar el problema.

En el camino puede ser necesario pedir datos adicionales y proporcionar explicaciones, pero de momento se omiten.

De acuerdo con Winston, los sistemas de reglas pueden ser de tipo analítico o de síntesis [WIN85, cap. 6]. En el primer caso se orientan a problemas que consisten en armar una solución a partir de una gran variedad de elementos, de tal forma que se satisfagan algunas restricciones. Estos problemas requieren muchas veces de grandes bases de datos que les proporcionen los elementos disponibles y sus características. Un ejemplo muy citado de este tipo de sistemas es XCON[BAR89], dedicado a sintetizar equipos VAX a partir de un gran número de partes disponibles (algunas equivalentes o agrupadas), de manera que se satisfagan los requerimientos de un cliente y la disponibilidad de la planta.

El otro tipo de sistemas, el más empleado en SE, se orienta a deducir un resultado de entre un conjunto más bien pequeño, a partir de una serie de hechos disponibles. Este tipo de problemas son llamados clasificatorios por Weiss y Kulikovsky [WEI83]. A ellos corresponden los problemas de diagnóstico, que son de los más reportados en la literatura de SE. Ejemplos de ellos son PROSPECTOR [BEN84] y MYCIN [BUC84], y los de planeación, según Dechter y Michie (citados en [QUI87]).

Los sistemas de reglas pueden emplear dos métodos para llegar a una solución: encadenamiento de reglas, y resolución. Este último se emplea especialmente en sistemas programados en PROLOG. El encadenamiento de reglas puede ser más eficiente, ya que se presta a aplicar métodos no exhaustivos de búsqueda, y al empleo de heurísticas. En algunos casos se construye una red causal con las reglas, de manera que se acelera la búsqueda. Este procedimiento se emplea, por ejemplo, en PROSPECTOR, en su operación por lotes, donde se revisa un grupo de problemas similares en forma automática [BEN86].

Entre las reglas de inferencia se pueden distinguir tres tipos [WEI83]:

- las que asocian hechos (datos) con hechos: reglas DD;
- las que asocian hechos con hipótesis: reglas DH;
- las que asocian hipótesis con hipótesis: reglas HH.

Las reglas DD permiten inferir datos no suministrados por el usuario, a partir de aquellos que sí proporcionó. Las reglas DH asocian datos fuente o inferidos con las hipótesis del sistema. Por último, las reglas HH permiten asociar hipótesis entre sí, estableciendo una jerarquía entre ellas. De acuerdo con Weiss y Kulikowsky el orden conveniente de ejecución es el siguiente: primero las DD, luego las DH y finalmente las HH.

Dentro de las reglas de control de búsqueda es usual contar con algún mecanismo de manejo de incertidumbre, como los mencionados en el capítulo anterior. Esta incertidumbre se aplica en varios niveles: en los datos que forman el antecedente, en el cálculo del consecuente y en la regla que conviene utilizar. En la mayoría de los casos reportados se prefiere la simplicidad a la precisión, ya que se ha demostrado la utilidad de algunos sistemas aunque no cuenten con métodos muy precisos [RIC83].

El manejo de imprecisión es muy importante para no descartar hipótesis únicamente por la ausencia de un dato, ni aceptarla por su sola aparición [EFS86a]. En la vida real, los usuarios humanos prefieren que un SE les ofrezca resultados con una indicación de su grado de certeza, a que les den soluciones absolutas.

Los sistemas de reglas, a pesar de sus éxitos, tienen aún mucho camino por recorrer, como lo indican [WIN85] y [HAY85], quienes consideran que les faltan, entre otros, los siguientes elementos:

- una metodología adecuada para verificar la consistencia y completéz de conjuntos de reglas;
- una teoría de organización del conocimiento que les permita crecer sin perder inteligibilidad;
- métodos para integrarlos fácilmente en sistemas convencionales;
- formas de representar elementos de sentido común.

En cuanto a la consistencia, se emplean varios enfoques, unos de tipo estático y otros dinámicos. Los primeros verifican las reglas antes de operar el sistema, empleando redes causales, árboles de decisión [WIL87] o redes de Petri [LIU87]. Se verifican dinámicamente agregando a las otras reglas un sistema para mantener la verdad (ver sección 2.-) o un sistema dialógico como el presentado en el trabajo de González[y Noriega GON85].

Los otros elementos son materia de desarrollo hasta la fecha, habiéndose avanzado poco. En relación a la representación del sentido común, se han realizado algunos trabajos, pero falta mucho para que resulten aplicables.

3.3 METACONOCIMIENTO Y MECANISMOS DE EXPLICACION Y JUSTIFICACION.

La mayoría de los autores están de acuerdo en que una característica muy importante de los SE es la capacidad de explicar sus resultados y justificar sus peticiones de datos adicionales [BRA83]. También se habla mucho de que el SE tiene que manejar cierto tipo de metaconocimiento, es decir conocimiento acerca de su propio conocimiento. En la práctica, los mecanismos de explicación y justificación corresponden a aspectos específicos del metaconocimiento.

Si todo el conocimiento se concretara en reglas de la misma importancia, la máquina de inferencia debería recorrer todas ellas en cada paso de decisión, lo cual sería impráctico para cualquier SE real. En general, los expertos humanos manejan conocimiento de diferentes niveles, que les permite acelerar la rapidez del razonamiento [WIN85], [BLA87c]. El poder estructurar el conocimiento en varios niveles corresponde a una reflexión acerca del propio conocimiento, para saber cuando aplicarlo. Las heurísticas, mencionadas en varias partes de este trabajo, corresponden a este tipo de conocimiento, que ayuda a decidir la regla que conviene aplicar. su utilización es más evidente en los sistemas que utilizan búsqueda no exhaustiva.

Algunos autores, como Lenat y sus colaboradores [LEN83], y Laurière [LAU88], consideran que el conocimiento se puede organizar en niveles, como sigue:

- i) reglas de orden 0: descansan en hechos, ecuaciones o teoremas;

ii) reglas de orden 1: heurísticas, juicios inexactos, reglas "de dedo", asesoría inconsistente;

iii) reglas de orden 2: metarreglas que permiten decidir acerca de la utilidad de una determinada base de conocimiento, o de cómo utilizarla. A este nivel se utilizan reglas que permiten elegir las reglas más convenientes según la situación específica: las más baratas, las más precisas, las que dan soluciones menos riesgosas; etc.

Las reglas de orden cero son aquellas que se ocurren primero a los expertos y que pueden encontrarse en libros de texto. Las de orden uno son como una corrección a las fallas que se encuentren con las de orden cero, y resultan más difíciles de establecer; corresponden a la experiencia del experto, ganada con la aplicación práctica de sus conocimientos. Las de orden dos sirven como corrección a las de orden uno, para decidir cuándo vale la pena aplicar un procedimiento o cambiarlo, sin aplicar reglas a ciegas. Corresponde a un nivel alto de experiencia, a un verdadero experto.

De cualquier forma que el SE llegue a una solución, el usuario deseará saber cómo llegó a ella. Esta explicación debe estar asociada a la representación de conocimiento, para poder relacionar la explicación con los resultados. Algunos sistemas ofrecen como explicación una relación de las reglas que emplearon para llegar a la solución, indicando el orden en que fueron aplicadas y su relación. Algunos autores consideran que este tipo de explicación, más bien una traza, es útil para el diseñador del sistema, pero no para el usuario final, para el cual puede ser muy obscura [WEI83]. Sin embargo este tema no parece haber logrado mucha atención ni acuerdo.

En cuanto a las preguntas que el sistema debe hacer al usuario en el curso de su operación, Weiss y Kulikowsky consideran que el sistema debe comenzar con pocos datos y solicitar únicamente los que realmente necesite para su proceso de inferencia [WEI83]. Las preguntas se realizan usualmente en forma de cuestionario, aunque algunos sistemas son capaces de aceptarlas en un subconjunto formal de algún lenguaje natural. En sistemas como MYCIN, ante una pregunta del sistema el usuario puede contestar preguntando ¿por qué? y el sistema le despliega una justificación, basada principalmente en las reglas que requieren del dato solicitado.

Algunos sistemas incluyen en cada regla un texto que la explica, de manera que al aplicar una regla, se cuenta con una explicación menos obscura, más cercana al usuario. Este enfoque aparece, por ejemplo, en XCON [BAR89].

Aunque los avances en este campo son limitados, en teoría la justificación puede abarcar no sólo las reglas específicas, sino la forma de las mismas reglas, su organización, el método de búsqueda, quién y cuándo "cargó" una regla específica, etc. La propia forma de representar el conocimiento no inferencial es un indicador de metaconocimiento, que puede ser necesario hacer explícito [LEN83].

De acuerdo con Lenat y sus colaboradores, el conocimiento y el metaconocimiento se generan como se ve en la figura 3-1.

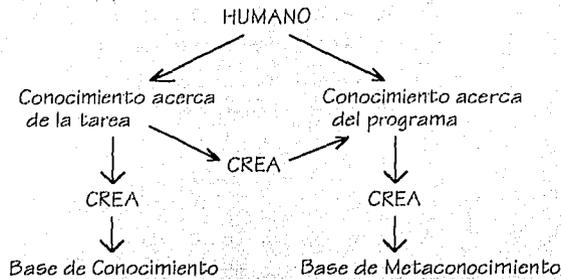


Figura 3-1 Obtención de metaconocimiento.

Tomado de [LEN83]

El contar con metaconocimiento en un sistema, tiene las aplicaciones siguientes, de acuerdo a Lenat y sus colaboradores:

- ayuda a seleccionar reglas,
- registra hechos informativos acerca del conocimiento (p.ej. autor y fecha de las reglas),
- justifica y explica las reglas,
- permite localizar fallas simples al crear nuevas reglas,
- justifica la arquitectura del SE,
- permite adaptar el SE a diferentes ambientes para su operación,
- modela las habilidades del programa.

La primera no requiere mucha explicación, ya que se refiere al uso de metaconocimiento en la resolución de conflictos entre reglas. La segunda y la tercera corresponden a la capacidad de explicación ordinaria del sistema.

La cuarta categoría tiene aplicación cuando el sistema mismo permite aprender nuevas reglas, las cuales pueden ser validadas por la propia base de conocimiento, evitando fallas simples de sintaxis, reglas que nunca se usan, etc.

La justificación de la arquitectura del sistema va más allá de la operación ordinaria de un SE, y serviría para diseñadores de este tipo de sistemas, al igual que la última aplicación.

La sexta aplicación se refiere a adaptar el SE a diferentes ambientes (equipo, bases de datos disponibles, etc.), de manera que pueda ser usado más ampliamente.

Todas estas aplicaciones son más bien deseables que observables en la mayoría de los sistemas reportados hasta ahora, ya que pocos de ellos pasan de una explicación más o menos simple, ligada a las reglas.

CAPITULO 4

Los Sistemas Expertos y la Investigación de Operaciones

En los capítulos anteriores se han discutido diversos elementos relativos a los Sistemas Expertos (SE); de una u otra forma todos ellos se inscriben en procesos de toma de decisiones, ya sea para substituir al experto humano o bien como un apoyo a éste. Esta ubicación de los SE hace que su campo de aplicación se cruce con otras disciplinas, y muy especialmente con la I de O, que por mucho tiempo ha sido una de las que más apoyo han proporcionado a los dirigentes y administradores de todo tipo de empresas. De acuerdo con Ribar y Willingham, ambas disciplinas tienen una meta general común: mejorar la eficiencia y la efectividad de la toma de decisiones [RIB87], concepto que también se encuentra en Raghavan y Chand [RAG87].

El hecho de que se traslape el campo de aplicación de dos disciplinas no es raro, pero siempre genera ciertos recelos por parte de los practicantes de cada una de ellas. Esto sucede en el caso de la I de O, como puede notarse observando la literatura reciente. En efecto, en los últimos años, en revistas típicas del área, han aparecido artículos donde se discute el tema (por ejemplo [HEN87], [PHE86], [GRA86], [RIB87] y [OKE85]). Algunos autores tratan de minimizar la importancia de los SE, mientras que otros la aumentan. Sin embargo, el hecho real es que han ido ganando terreno, como puede verse por el número creciente de trabajos incluidos en las publicaciones periódicas, como Computers and Operations Research, la revista de la ORSA o el European Journal of Operational Research, y aceptados en congresos especializados (por ejemplo los congresos conjuntos ORSA-TIMS).

Un elemento que obscurece a veces la discusión acerca del potencial de los SE es la falta de precisión en cuanto al alcance del término, por lo cual es necesario delimitar su contenido, separándolo de otros sistemas que, sin ser expertos propiamente, comparten algunas de sus características. Esta delimitación permitirá, además, estudiar las posibilidades de estos otros sistemas.

La I de O es una disciplina bastante madura, que requiere de poca discusión. Sin embargo, para centrar el estudio comparativo de su relación con los SE, se hace necesario precisar algunos aspectos acerca de su naturaleza, su campo de aplicación y métodos de trabajo.

En este capítulo se delimitará el campo de los SE, para luego compararlo con el de la I de O. Esto se hará después de revisar algunos conceptos básicos de esta última. La comparación será primero en el plano teórico, analizando las áreas de aplicaciones comunes; luego se revisarán los casos reales que se presentan en la literatura, para

luego analizar algunos reportes de tipo general, terminando con algunas apreciaciones sobre su desarrollo en México.

4.1 DELIMITACION DEL CAMPO DE LOS SISTEMAS EXPERTOS.

A lo largo de los capítulos anteriores se han presentado diversas características de los SE, de las cuales conviene recordar algunas que serán relevantes para la comparación con la I de O.

Los SE se enfocan generalmente a problemas

- complejos,
- donde no existen métodos para lograr soluciones óptimas, o cuando los hay no resultan prácticos,
- que requieren de procedimientos subjetivos y heurísticos, tomados de los expertos humanos,
- que emplean razonamiento cualitativo o simbólico,
- en dominios generalmente muy estrechos.

Además, Raghavan y Chand consideran muy importante el hecho de que los SE se orientan más a la solución del problema que al apoyo del tomador de decisiones [RAG87].

Un elemento importante, implícito en la naturaleza de los SE, es el de que su realización resulta de esfuerzos interdisciplinarios [RAG88], ya que intervienen el o los expertos de la disciplina, el experto en representación del conocimiento, quizá algún experto en computación y el o los usuarios finales del sistema.

Otro aspecto importante de los SE es que emplean un enfoque de continuo desarrollo, a través de la implementación sucesiva de prototipos [GRA86]. Esto corresponde a lo que O'Keefe llama "paradigma de aprendizaje" [OKE85].

Los SE deben parte de su éxito al hecho de que pretenden razonar como lo hacen los humanos, llegando rápidamente a soluciones satisfactorias, aún cuando éstas no sean óptimas y quizá ni se acerquen a lo óptimo [PHE86]. Este comportamiento corresponde al que asume un tomador de decisiones en la vida real, donde con frecuencia no hay tiempo de buscar una mejor solución.

El funcionamiento de los SE depende fuertemente de heurísticas, que permiten evitar la lentitud de las búsquedas algorítmicas, al precio de perder la garantía de hallar una

solución. El uso de heurísticas se destaca en muchos autores, como en [RIB87] y [GRA88].

Un hecho implícito en la definición de SE es el uso necesario de la computadora para su implementación.

Un elemento importante en el terreno de los SE es la imprecisión en el establecimiento de sus límites, debido principalmente a que se trata de una idea con poco tiempo de vigencia. A pesar de que se habla ya de la "segunda generación" de SE [art frances], aún no se tiene una idea clara de su alcance. En muchos casos se consideran SE de primera generación a programas construidos por medio de reglas, que emplean generalmente el método de resolución del cálculo de predicados, dedicados principalmente a aplicaciones industriales. La segunda generación incluye sistemas con varios subexpertos, dedicados a diferentes conocimientos, que interactúan ordenadamente para hallar soluciones. Muchos de estos sistemas están regresando a técnicas de programación clásica.

A pesar de la poca definición acerca del alcance del término **Sistema Experto**, existen algunos esfuerzos por acotarlo. Fernández y Jiménez [FER90] discuten ampliamente el tema de los límites, interpretando gran número de opiniones de autores que trabajan en diversos campos. Concluyen que los criterios para considerar experto a un sistema son:

- que su base de conocimiento debe ser independiente de sus mecanismos de búsqueda de soluciones o inferencia.
- que su mecanismo de inferencia debe ser heurístico y no algorítmico.
- que el sistema debe incluir alguna forma de metaconocimiento, principalmente el necesario para explicar sus resultados y justificar su demanda de datos.
- que deben proporcionar un alto rendimiento y que su "tamaño" no es trivial.
- que deben ser capaces de manejar conocimiento incompleto o impreciso.
- que deben ser capaces de aprender (modificar su base de conocimiento).

Los tres primeros criterios constituyen condiciones necesarias que debe cumplir un sistema para considerarse "experto". Los demás representan características deseables en los S.E., y que separan los sistemas profesionales de los prototipos de laboratorio o sistemas demostrativos "de juguete". En la práctica, los S.E. en uso no siempre satisfacen los dos últimos criterios.

Algunos autores son más estrictos y consideran imperativo que para que un sistema sea considerado experto, debe resolver el dominio de problemas para el que fue

diseñado, dejando fuera a los sistemas que ayudan o cooperan en la búsqueda de una solución (Buchanan [BUC84], Raghavan y Chand [RAG87]). Para los fines de este trabajo resulta conveniente aceptar el criterio estricto, que deslinda a los SE de otros sistemas, que se discutirán en el próximo capítulo.

4.2 ALGUNOS CONCEPTOS DE I DE O, RELEVANTES A LA COMPARACION.

Para fines de comparación entre SE e I de O, conviene revisar la naturaleza de esta última, aunque se trate de conceptos establecidos desde hace años. Como punto de partida puede tomarse la siguiente definición, correspondiente a la United Kingdom Operational Research Society (tomada de [HEN87]):

"La Investigación de Operaciones es la aplicación del método científico a problemas complejos, de administración y dirección de grandes sistemas de hombres, máquinas, material y dinero, en la industria, los negocios, el gobierno y la defensa. Su enfoque distintivo es el desarrollo de modelos científicos del sistema, incorporando medidas de factores tales como oportunidad y riesgo, con los cuales se predice y compara contra los resultados de decisiones, estrategias o controles alternos. Su propósito es ayudar a la administración a determinar científicamente sus políticas y acciones."

Esta definición incluye los elementos de la definición clásica expuesta por Ackoff y Sassieni [ACK71] que está presente en casi todos los textos. Sin embargo, conviene destacar dos elementos que se pierden un poco en la definición: el hecho de que la I de O se aplica por equipos interdisciplinarios y que las soluciones pretenden beneficiar a la organización como un todo.

Esta definición es muy amplia, como sus posibilidades de aplicación, por lo que se hace necesario agregar algunos elementos más específicos.

La I de O se aplica a problemas donde se tienen varios cursos de acción, con diferentes ventajas y costos. El tomador de decisiones debe elegir uno, de acuerdo a alguna preferencia, objetiva o subjetiva, cumpliendo además con las restricciones que imponga la empresa o el medio ambiente donde se da el problema. Es decir, los problemas corresponden a procesos de decisión. La relación entre la I de O y la toma de decisiones es muy estrecha, apareciendo explícita o implícitamente en la mayoría de los autores (por ejemplo en Prawda [PRA77] y el grupo CONDOR [CON88]).

Otro aspecto importante de la I de O es el uso del enfoque de sistemas [GRA88], que obliga a analizar el problema desde un punto de vista más general del que se suponía inicialmente, buscando alternativas que difieren de los procedimientos habituales del sistema donde se da el problema.

Para enfrentar los problemas, la I de O construye modelos, generalmente matemáticos, sobre los cuales estudia las diversas alternativas y donde ensaya las soluciones

propuestas [RIB87]. El proceso de construcción de modelos es generalmente secuencial, con excepción de algunos ciclos de realimentación [GRA86]. El modelo se trata de construir en forma científica (formal), rigurosa, que produzca resultados cuantificables [PHE86]; se aplica toda la experiencia matemática acumulada por la ciencia.

Las soluciones que se buscan sobre los modelos construidos, se orientan a la optimización, que se logra generalmente estableciendo un algoritmo [OKE85], [RIB87]. Estos algoritmos resultan a veces tan importantes que se les confunde con la I de O, como en el caso del método Simplex o el método minimax. El aspecto de la optimalidad de la solución es de gran importancia, aún cuando no se logra en muchos casos, debiendo aceptarse soluciones subóptimas, ya sea porque no existe un algoritmo que garantice la localización de la solución óptima, o porque el logro de dicha solución resulta impráctico, por el costo o la duración. El hecho de que el algoritmo debe hallar una solución, cualquiera que esta sea, destacado por autores como [RIB87], es el último nivel aceptable en el enfoque algorítmico (por debajo de él ni siquiera se tendría un algoritmo). Este nivel resulta lo único alcanzable cuando el problema es muy complejo o requiere demasiados recursos computacionales para obtener una solución con alguna pretensión de optimalidad.

Por otra parte, las soluciones, de acuerdo con Hillier y Lieberman, deben ser prácticas, de tal forma que puedan ser empleadas por el tomador de decisiones [HIL89].

Los problemas que no tienen solución analítica ni algoritmo que los resuelva, se manejan por medio de modelos de simulación o "emulación" [PRA77].

La implementación de algoritmos de I de O, así como la simulación, se realiza generalmente con el apoyo de equipo de cómputo, sin el cual un buen número de los problemas reales no tendrían solución práctica. La relación entre la I de O y la computación se ha mantenido desde el nacimiento de ambas disciplinas, y en ocasiones se les llega a confundir en sus aplicaciones a los negocios.

Una de las aplicaciones de computación en el terreno de la I de O que resulta relevante para este trabajo es la correspondiente a los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (SATD), que de acuerdo con Raghavan y Chand deben ser interactivos [RAG88]. Estos sistemas, en uso desde hace tiempo, incluyen en sus niveles de complejidad más bajos a los sistemas de procesamiento de datos, y en los más altos, a los sistemas que permiten ensayar diversos modelos a un problema dado. El énfasis en estos sistemas, como herramientas de la I de O, está en el apoyo, es decir, son sistemas que ayudan al tomador de decisiones, sin pretender sustituirlo ni ofrecerle soluciones.

Otro aspecto importante para la comparación es el relativo al tiempo. Algunos problemas varían con el tiempo, o bien su solución se deberá implementar a través de varias etapas, que dependen entre sí. Esta situación se presenta en el análisis de decisiones de las empresas.

Aparte de lo que "hace" la I de O, conviene situar el campo donde se aplica. La I de O se aplica en muchas actividades humanas, especialmente en las ciencias físicas, la economía, las ingenierías y las ciencias sociales [CON88]. Sin embargo, se le sitúa predominantemente en el terreno de la empresa. Dentro de ésta se presentan diversos tipos de problemas, desde los operativos con alto grado de estructuración hasta los de tipo estratégico, totalmente inestructurados. El sentido de estructura se refiere a la existencia de modelos formales. De acuerdo a la clasificación de Gory y Scott-Morton [GOR71] (ver Fig. 4-1), la I de O se sitúa fundamentalmente en el campo de los problemas estructurados. Sin embargo, la teoría de decisiones se extiende a los problemas semiestructurados. Debe notarse que los problemas que se consideran semiestructurados, en algún momento pueden convertirse en estructurados.

Actividades administrativas.

Tipo de decisión	Control Operativo	Control Administrativo	Planeación estratégica	Apoyo necesario
Estructurada	Reorden de inventario	Prog. lineal en manufactura	Localización de una planta	Sistemas de información, modelos de I de O
Semiestructurada	Comercio de acciones	Preparar presupuesto	Análisis de adquisición de capital	Sistemas de apoyo a toma de decisiones
Inestructurada	Seleccionar cubierta de revista	Contratar administrador	Desarrollo de portafolios	Intuición

Figura 4-1. Clasificación de Gory y Scott-Morton para las actividades de una empresa [GOR71]

Anthony [ANT65] propone una clasificación similar a la de Gory y Scott-Morton. Mitra agrega un nivel inferior al operativo, que denomina "monitoreo de control", que se aplica tanto a las aplicaciones industriales como a las financieras [MIT86]. Un aspecto importante que se agrega a esta clasificación es el **alcance** de cada nivel. Para el monitoreo y la operación se tiene un alcance muy limitado, que crece para el nivel de administración y se abre completamente en el nivel estratégico. Paralelo a esta apertura de alcance, crece también el nivel de incertidumbre que debe considerarse.

Otra alternativa de clasificación es la de Simon, que emplea únicamente dos niveles: estructurado y no estructurado, correspondiendo al primero los sistemas de información por computadora y los modelos matemáticos, incluyendo los de I de O. En

el nivel inestructurado se incluyen la teoría de decisiones, los métodos de solución heurística y otros métodos de Inteligencia Artificial [SIM60].

La I de O se aplica, en las áreas ya descritas, siguiendo un procedimiento aceptado y suficientemente establecido, equivalente al propuesto por varios autores como Davis y McKeown [DAV86] y Grant [GRA86]:

- a) Identificación, observación y planteamiento del problema.
- b) Construcción de un modelo que represente el sistema bajo estudio.
- c) Generar o deducir una solución a partir del modelo.
- d) Prueba y evaluación del modelo y la solución (evaluación ex-ante).
- e) Implantación y control de la solución.
- f) Evaluación de la solución implantada (evaluación ex-post).

Este procedimiento es importante para distinguir la aplicación formal de la I de O del uso de alguno de sus modelos dentro de otras disciplinas, donde usualmente se limitan a ajustar el problema a un modelo preexistente (prog. lineal, inventarios, colas, redes, etc.) y ejecutar algún programa que realiza el algoritmo y produce una solución, que se aplica sin preocuparse mucho por la evaluación.

La I de O tiene algunas limitaciones, una de las más importantes es la factibilidad de los algoritmos. En efecto, aún cuando se conoce un método para resolver óptimamente un problema dado, muchas veces no se puede aplicar a problemas reales, debido a la naturaleza combinatoria de los posibles caminos de solución que deben ser explorados. Un buen ejemplo es el problema del Agente Viajero, para el cual se conocen diversas soluciones, pero que funcionan sólo para un número reducido de nodos, decayendo rápidamente para un número moderado de nodos. En la práctica, los problemas reales involucran miles de ellos. Cuando sucede esto, se aplican soluciones subóptimas, o parciales. Muchos métodos descansan en el uso de heurísticas.

4.3 COMPARACION GENERAL.

Para realizar una comparación entre la I de O y los SE, buscando establecer el papel de estos últimos, es necesario establecer un marco de referencia. Con éste, se podrán analizar diferentes aspectos. Antes de entrar a discutir este marco conviene aclarar que la comparación es pertinente, considerando la existencia de trabajos de diferentes autores que analizan algunos puntos, desde diversos puntos de vista. Estos trabajos se han mencionado a lo largo de la tesis y se tratarán en esta sección, por lo que se omite el detallarlos aquí.

Esta sección se exploraran los aspectos comparables de ambas disciplinas, sin llegar a conclusiones sobre el valor real de cada una, lo cual se presentará más adelante. Antes de evaluar a fondo estos aspectos, se deberán analizar las evidencias ofrecidas por los diversos sistemas en uso, que son la materia de la siguiente sección.

Continuando con la estructura de la sección anterior, se pueden establecer como partes del marco comparativo las siguientes:

a) Naturaleza de ambas disciplinas.

La comparación de la naturaleza de ambas disciplinas ha sido discutida por Phelps [PHE86], Grant [GRA86], Raghavan y Chand [RAG87]. En general puede decirse que las dos se orientan al soporte de los responsables de tomar decisiones, siendo realizados por equipos interdisciplinarios.

Fuera de esos elementos comunes existen muchas diferencias, ya que una se orienta específicamente a resolver problemas en áreas muy limitadas (los SE), imitando el comportamiento de los expertos humanos; mientras que la otra se orienta a resolver problemas en forma óptima, sin cuidar la similitud con los métodos humanos, y en general se aplica sobre un campo muy amplio, ya que debe considerar toda la empresa.

Una diferencia más se refiere a la optimalidad de la solución, que es un requisito en la I de O (o al menos un objetivo central), mientras que los SE se orientan a encontrar una buena solución, aún cuando sea apenas parcial.

b) Campo de acción de cada una.

El campo de acción de cada una se ha discutido con menor cuidado, pero está claramente establecido en el trabajo de Raghavan y Chand [RAG87] y en el de Mitre [MIT86], donde ambos sitúan la I de O en el área de los problemas estructurados, mientras que los SE se aplican más a problemas semiestructurados y no estructurados, ya que descansan en heurísticas y reglas empíricas de los expertos, donde generalmente no existen representaciones formales. Sin embargo, la teoría de decisiones, y con ella los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, caen también en el área de problemas semiestructurados, donde se traslapan con los SE.

Por otra parte, en el área estructurada existen muchos problemas sin solución práctica; estos problemas pueden representarse de forma diferente, permitiendo resolverlos con SE. En la sección siguiente se presentan varios casos de este tipo. La justificación viene de la equivalencia de las representaciones de ambas disciplinas (por ejemplo los problemas de programación lineal se pueden

convertir a sistemas de reglas o a cálculo de predicados, como atribuyen a Dantzig en el trabajo de Dhar y Rang[DHA90]).

c) Método de cada una.

La I de O emplea el método descrito en la sección anterior. El elemento central es la construcción de un modelo formal del sistema bajo estudio. Por su parte, los SE también construyen un modelo del sistema bajo estudio, pero de naturaleza diferente, aunque también formal. La primera emplea modelos analíticos, de preferencia, o estadísticos cuando se requiere, incluyendo la simulación. La segunda emplea modelos descriptivos, que muchas veces expresan relaciones no muy claras entre los elementos del problema. A pesar de la diferencia, esta es más aparente que real, pues, como se mencionó antes, existen equivalencias entre ambas formulaciones. Además, los sistemas de reglas tienen elementos en común con los sistemas causales de la Estadística, y corresponden a modelos de redes, usuales en la I de O.

El uso intensivo de heurísticas se apunta como un elemento fundamental del método de los SE, pero no es extraño a la I de O, ya que algunos métodos de optimización las emplean.

El otro elemento importante de los métodos de I de O, que les da mucho peso, es la eficiencia lograda con los algoritmos de optimización, en comparación con el rendimiento relativamente pobre de los SE. Sin embargo, se mencionó que éstos han comenzado a emplear técnicas de programación convencional, con lo cual la diferencia tiende a desaparecer.

d) Etapas de cada disciplina donde se aplica la otra.

El método empleado por la I de O presenta algunas etapas donde los SE se pueden emplear en sustitución del experto humano, mientras que en otras no. En el planteamiento y análisis del problema, definitivamente no existen SE, ni se prevé su aparición, capaces de realizarlo por sí solos, aunque existen auxiliares para esta labor.

En la etapa de construcción del modelo, cuando se trata de problemas estructurados, sí existen SE capaces de realizar la tarea. Se han realizado, por ejemplo, sistemas para formular problemas de programación lineal [FIG88].

En la derivación de soluciones también se pueden emplear, especialmente cuando no existen soluciones algorítmicas prácticas, como sucede en algunos problemas de programación entera [DHA90]. Desde un punto de vista teórico, casi cualquier modelo de I de O podría realizarse con SE, aunque no serían tan eficientes.

La etapa de evaluación del modelo y de las soluciones son otro campo donde los SE no se han desarrollado, pero que podrían hacerlo en algunos casos. Sin embargo, aún en los sistemas nuevos se prefiere dejar esta parte a métodos tradicionales como la simulación [MOR90].

La implantación de la solución es un área donde existen SE, especialmente de los más simples, que se conocen como "SE de tiempo real", porque se conectan a equipos industriales y operan en línea con ellos. Por ejemplo el dedicado al control de calderas, reportado en el trabajo de Treviño y sus colaboradores [TRE89].

La supervisión del funcionamiento de la solución es otro campo de aplicación de los SE, como se mencionó en el capítulo uno (ver tabla 1-I), aunque por ahora no existen muchos sistemas de este tipo. A manera de ejemplo puede citarse el trabajo de Thompson y sus colaboradores [THO88].

En conclusión, la labor del investigador de operaciones podría ser reemplazada parcialmente por una colección de SE, o por un sistema que contenga varios expertos coordinados. Sin embargo, este enfoque no parece muy incitante para los implementadores, que prefieren los sistemas híbridos.

Por otra parte, la I de O tiene diversas aplicaciones en el campo de los SE. Siguiendo la estructura de éstos, pueden mencionarse:

En cuanto a la base de conocimiento, la I de O puede ayudar a establecer heurísticas y a establecer formas de decidir cursos de acción, empleando teoría de decisiones y otros conocimientos.

En la máquina de inferencia es donde más ayuda pueden recibir los SE, ya que la I de O ha trabajado ampliamente el tema de búsqueda de caminos para resolver problemas. De hecho, los SE utilizan a veces algoritmos de optimización como parte de su trabajo (por ejemplo NUDGE, citado en [OKE85]).

4.4 REVISIÓN DE APLICACIONES REPORTADAS.

Con el fin de tener una visión más amplia del potencial de los SE en la I de O, se presentan una serie de aplicaciones reportadas, muchas de las cuales han servido directamente para la elaboración del presente trabajo. Para organizar de alguna manera la presentación de las aplicaciones de SE en áreas clásicas de la I de O, se emplearán las ramas consideradas en el boletín de la Operations Research Society of America, tal como aparecen en su número de enero febrero de 1983 (vol 31, núm. 1), que se listan en la tabla 4-I.

Tabla 4-1
Ramas de la I de O según ORSA

- 1) Análisis de decisiones, ofertas y negociación.
 - 2) Defensa y seguridad internacional.
 - 3) Distribución, redes y planeación.
 - 4) Cuidado de la salud e industrias del sector servicios.
 - 5) Interfaces con la computación.
 - 6) Manejo de recursos naturales, energía y medio ambiente.
 - 7) Optimización.
 - 8) Producción y secuenciación, inventarios y manejo de materiales.
 - 9) Simulación, implementación y evaluación de modelos estocásticos.
 - 10) Sistemas sociales y el sector público.
 - 11) Procesos estocásticos y sus aplicaciones.
-

Haciendo una revisión de la literatura se encuentran ejemplos de casi todas las ramas, con posibilidades de que pronto sean todas, o al menos que se apoyen en métodos derivados de los SE. A continuación se presentan algunos ejemplos de cada una de las ramas.

4.4.1 Análisis de decisiones, ofertas y negociación.

En esta rama existen diversos sistemas expertos y otros que no lo son, pero se encuentran asociados, muchos de ellos como apoyo a la toma de decisiones, sirviendo en un papel de consultores o tomando diversos papeles para analizar situaciones desde diferentes puntos de vista. Como ejemplo se pueden citar:

JANUS: sistema que explora diferentes roles en el proceso de toma de decisiones, estructurando las alternativas en forma jerárquica [RAG88].

DRONA: sistema que estructura las alternativas para toma de decisiones, organizándolas por metas [RAG88].

En el terreno de las negociaciones, es importante el sistema NEGOPLAN [KER87], que permite construir sistemas particulares para establecer negociaciones. En el trabajo de Kersten se menciona una aplicación a las negociaciones de paz para el Medio Oriente realizadas en Campo David. Con el mismo paquete se construyó un prototipo de sistema para negociar con terroristas, que permite identificar rápidamente el tipo de terrorista, y luego ayuda a establecer posibles cursos de acción [KER88].

Otros sistemas interesantes son: un SE para estudiar la posibilidad de desincorporar una parte de una empresa [MOS87]; REVEAL, sistema para asesorar en cuestiones de mercadeo [EFS86b] y el sistema que ayuda a decidir si se otorgan tarjetas de crédito de BANCOMER (mencionado en diversas pláticas y congresos nacionales).

4.4.2 Defensa y seguridad internacional.

En esta rama aparecen reportados muy pocos sistemas, debido a restricciones a la publicación de resultados en este campo, aunque se menciona aquí y allá la existencia de prototipos de SE para aplicaciones militares. A falta de ejemplos de tipo militar, se puede citar el sistema SEA [MAS88], que ayuda a la seguridad internacional como una herramienta de análisis de datos de posibles explosiones nucleares no autorizadas.

En la rama de Procesos, secuenciación, etc., se mencionan varios sistemas empleados en labores de defensa.

4.4.3 Distribución, redes y planeación.

Dentro de esta rama existen muchos ejemplos de sistemas que pueden considerarse expertos. Su papel es importante en problemas que carecen de una solución por medio de optimización convencional (por limitaciones de tiempo o recursos de cómputo), y también se utilizan en la búsqueda de heurísticas aplicables a los algoritmos tradicionales, llegando así a sistemas híbridos, que emplean técnicas cualitativas y cuantitativas.

Un buen ejemplo de este enfoque es el sistema RACS [DHA90], que resuelve problemas de asignación de horarios en una universidad, logrando soluciones aún donde los sistemas tradicionales no lo consiguen. A pesar de sus logros, su

principal resultado es la generación de heurísticas para mejorar los algoritmos de programación entera que se usan para atacar estos problemas.

Otra área donde se generan SE correspondientes a esta rama de la I de O es la de finanzas, donde se les emplea en la generación de planes de inversión, como por ejemplo el sistema PLANPOWER [MIL90], que prepara planes personales, según los requerimientos del cliente.

Otros ejemplos de sistemas de esta rama son: ODYSSEY [BLA88b] que prepara planes de viajes de negocios, OMEGA [BLA87b] que ayuda en la asignación de personal, GESPI [BRE90] que ayuda en la preparación de itinerarios y solución de conflictos ferroviarios, y ALTO [POT89], que resuelve problemas de rutas de transporte.

4.4.4 Cuidado de la salud e industrias del sector servicios.

Dentro de esta rama, en la parte relativa al cuidado de la salud, se tiene un gran número de SE orientados directamente al diagnóstico médico, pero pocos de otra naturaleza. Uno de los ejemplos que se tienen es el sistema reportado por Bowen y Payling [BOW87], que se emplea en el análisis de rendimiento en servicios de salud en Inglaterra.

Es importante destacar que los sistemas de diagnóstico médico tienen un campo de aplicación adicional en el entrenamiento de médicos, al permitir comparar sus diagnósticos con los de los expertos, ya sea en casos reales o hipotéticos.

Dentro del sector servicios, existen muchos sistemas, que corresponden a otras ramas, por lo cual no se les menciona otra vez. Sin embargo, es importante referirse a los sistemas como XCON [BAR89], empleados en las grandes compañías manufactureras de computadoras, que permiten la configuración de sistemas complejos de cómputo.

4.4.5 Interfaces con la computación.

Esta rama es un tanto redundante al hablar de los SE, ya que necesariamente son parte de la interfaz entre I de O y computación. Específicamente, muchos sistemas son híbridos que toman elementos de la I de O y técnicas de computación, no sólo de la Inteligencia Artificial, sino de técnicas convencionales y lenguajes de programación tan tradicionales como C y Pascal.

De cualquier forma, ya que la I de O ha manejado mucho tiempo la realización de sistemas de información como parte de su quehacer, conviene mencionar al SE de sistemas de información reportado por Heinrich [HE188], que realiza labores de análisis y diseño.

4.4.6 Manejo de recursos naturales, energía y medio ambiente.

Dentro de esta rama se puede mencionar el sistema reportado por Thomason [THO89], que ayuda al estudio de la corriente del Golfo de México, con datos de diversos eventos que se presentan. Este trabajo lo realiza analizando imágenes de satélite.

Además de éste, se tienen diversos sistemas aplicados a redes de distribución de energía eléctrica, pero como también corresponden a otras ramas, no se incluyen en este apartado.

4.4.7 Optimización.

En esta rama no se localizaron sistemas que directamente correspondan al tema de optimización, pero varios de los sistemas mencionados en otras ramas representan alternativas a la optimización tradicional. Por ejemplo, Gupta considera algunos sistemas de secuenciación, como el de Grant [GRA86], como ejemplos de optimización con SE [GUPT89]. Con un enfoque similar, el sistema RACS, que se mencionó en Planeación, es una alternativa a la optimización empleando programación entera.

4.4.8 Producción y secuenciación, inventarios y manejo de materiales.

Esta es una rama fecunda en SE, especialmente en el campo de la secuenciación, con algunos ejemplares dedicados a los inventarios. Entre los de secuenciación se pueden mencionar como ejemplo: NUDGE [BLA87a] para planear reuniones de negocios, ISIS II [BLA87a], para secuenciación industrial, ESS [GUP89] para secuenciación de envío de partes para una celda flexible de producción, y el sistema de secuenciación de envíos reportado por Filman [FIL88].

En cuanto a inventarios, pueden citarse los sistemas MRP II [CLO88], el del Naval Supply Center [HEL87] para manejo de órdenes vencidas, FIXER [GRA86] que secuencia actividades de mantenimiento de aviones, y LIMBO [CAM87], sistema para control de distribución de medicamentos.

4.4.9 Simulación, implementación y evaluación de modelos estocásticos.

Esta rama está brindando muchos ejemplos de SE y también de otros basados en conocimiento, especialmente de tipo híbrido. En cierta forma era de esperarse, ya que el enfoque de objetos mencionado en el capítulo dos, en

relación a la representación de conocimiento, tiene su origen en la simulación, especialmente empleando SIMULA.

Entre los sistemas que pueden mencionarse, se tiene: SQS [BLA87a], orientado a problemas de líneas de espera, KBMC [MUR89] orientado a la construcción automática de modelos, KBS que conduce simulaciones y realiza ajustes a los modelos, y OVAS [RAO88] que verifica la validez de corridas de simulación con modelos de eventos discretos.

En algunos problemas se cuenta con conocimiento formal que permite estudiar posibles soluciones, pero no existen expertos que encuentren las soluciones en el tiempo disponible (muy corto), además de que las situaciones en que se presentan los problemas son altamente cambiantes. En estos casos, a veces se construyen simuladores de esos problemas, basados en el conocimiento formal, para generar conocimiento heurístico que permita respuestas rápidas. Este conocimiento se utiliza para formar un SE que se puede validar contra la simulación.

4.4.10 Sistemas sociales y sector público.

En esta rama existen pocos ejemplos reportados, quizá porque en ella resulta más difícil financiar proyectos del tipo de los SE. De cualquier forma, se tiene el sistema reportado por Olave y sus coautores, desarrollado para evaluar el rendimiento de empresas públicas en Pakistán [OLA88], y el de monitoreo del sistema de alcantarillado reportado por Thompson y sus colaboradores [THO88].

Recientemente se han comenzado a emplear SE en estudios de impacto ambiental, planeación urbana y en estudios de vocación de uso de suelos, problemas de gran importancia en el cuidado del medio ambiente y el adecuado uso de los recursos naturales. Al respecto pueden verse los trabajos de Ortolano y Perman [ORT87], Davis y Grant [DAV87], Findikaki [FIN86], y Han y Kim [HAN88].

4.4.11 Procesos estocásticos y sus aplicaciones.

En esta rama no se encontró ningún reporte de sistema experto, ni parece existir alguno específico.

El trabajo de Gupta [GUPT89] contiene una discusión de diversas aplicaciones, presentadas con otro enfoque, y que resulta recomendable consultar.

En el apéndice I se lista un conjunto de SE mencionados en la literatura consultada, con una serie de elementos informativos. Con relación a ese conjunto se contruyeron varias tablas: la 4-II que presenta la distribución de SE por categoría de I de O, la 4-

III, que separa los sistemas por tipo, de acuerdo a la clasificación de la tabla 1-I, y la 4-IV presenta resultados cruzados entre categorías de I de O y tipos de sistema, eligiendo las categorías más frecuentes, que resultaron ser "Producción, secuenciación, Inventarios y Manejo de materiales", "Decisiones, oferta y negociación" y "Distribución, redes y planeación".

Las tablas 4-II y 4-III presentan los resultados separados según el estado de avance reportado para cada sistema en: prototipo, en uso y no reportado ("p", "u" y "n" respectivamente).

Para la tabla 4-II se agregaron dos categorías que no corresponden a ramas de la I de O: la de "Estadística", que agrupa sistemas orientados a esta disciplina, que resulta de gran utilidad, y la de "Sistemas industriales" para sistemas que tienen relación con la I de O, pero no se lograron clasificar con precisión en alguna rama, debido a la escasa información disponible.

TABLA 4-II
Sistemas por rama de la I de O

RAMA	p	u	n	Núm	%
Decisiones, oferta y negociación	9	8	9	26	32.10
Prod. Secuen., Invent. y manejo de mat.	3	13	6	22	27.16
Distribución, Redes y Planeación	1	5	4	10	12.35
Simulación y mod. Estoc.	3	1	5	9	11.11
Sistemas Industriales		4		4	4.93
Estadística		2	1	3	3.70
Sistemas Sociales y S. P.		2		2	2.47
Salud y sector servicios	1	1		2	2.47
Defensa y seguridad internacional		1		1	1.23
Int. a la Computación	1			1	1.23
Rec. naturales, energía y medio ambiente		1		1	1.23
Optimización					0
Procesos Estocásticos					0
TOTAL	18	38	25	81	

Como puede verse en la tabla anterior, las primeras cuatro categorías dominan a las demás, representando el 82.72%.

En la siguiente tabla, al organizar los sistemas por tipo, solo una quedó sin clasificar, debido a falta de información detallada acerca del mismo.

TABLA 4-III
Clasificación por tipo

Tipo de Sistema	p	u	n	Núm	%
Diagnóstico	8	15	10	33	40.74
Planeación	4	11	9	24	29.63
Diseño	2	7	6	15	18.52
Predicción	2	1		3	3.70
Control	1	2		3	3.70
Monitoreo		2		2	2.47
Instrucción					
Interpretación					
Reparación					
Depuración					
Otros	1			1	1.23
TOTAL	18	38	25	81	

En la tabla anterior puede observarse que con solo tres tipos de sistemas se alcanza el 88.89% del total. De esos tipos, el de diagnóstico corresponde al más frecuente, mientras que la suma de los de diseño y planeación -similares en estructura- superan al número de los de diagnóstico. Esta división corresponde, en términos generales, con actividades importantes de la I de O.

En la tabla 4-IV (a continuación) puede observarse la asociación tan fuerte que existe entre los sistemas de decisiones y el tipo "diagnóstico", mientras que los sistemas de producción, secuenciación, etc. aparecen asociados a los sistemas de planeación. Esta situación corresponde a lo que podría esperarse por la naturaleza de las aplicaciones de cada una de las ramas.

TABLA 4-IV
Resultados Cruzados

Rama	Diag.	Plan.	Diseño	Total
Decis., etc	17	1	1	19
Prod., etc.	4	16	2	22
Distr., etc.	2	6	2	10
Simul., etc.	3	1	4	8
TOTALES	26	24	9	59

4.5 ESTADO GENERAL DE LOS SE

A pesar de los ejemplos mencionados y de la gran promoción que han recibido los sistemas expertos en los últimos años, resulta conveniente considerar un panorama general de uso práctico de estos sistemas. Este tipo de análisis no es frecuente, quizá por la propia inseguridad de los promotores de dichos sistemas. Sin embargo, se sabe, por noticias no documentadas, que en el año de 1990 se ha frenado un poco el mercado de productos relacionados con los SE, atribuyéndose a la saturación de soluciones a problemas pequeños y a la dificultad de pasar a problemas mayores, para lo cual las herramientas aún están en el laboratorio.

De cualquier forma, es conveniente establecer algunos hechos en relación al éxito real de los SE, al menos hasta donde lo permita la información disponible. En esta sección se tratarán los casos reportados de los EEUU, Japón y la Comunidad Europea, así como un breve resumen de la situación en México.

En los EEUU se han realizado gran número de trabajos donde se revisan los SE existentes, y en ellos se encuentran ejemplos en todos los niveles de la clasificación de Gory y Scott-Morton presentada al inicio del capítulo (Fig. 4-1) (ver [BUC84], [HAY83], [BEH87]). Sin embargo, estos estudios omiten mencionar si se encuentran en operación normal o son prototipos. Tampoco se menciona si son exclusivos de su realizador o se venden a otras empresas. Behestian y Salchenberger presentan un estudio acerca del uso de SE en negocios, orientado precisamente a analizar el grado de interés real por los SE, de las empresas de tipo industrial y financiero [BEH87].

El resultado del estudio, en términos generales, es que la mayoría de las empresas, al nivel de la administración, están interesadas en lo general y se observa su desarrollo, pero no tienen planes inmediatos de inversión en ellos. Al mismo tiempo, parece ser que los SE se van filtrando en las empresas de abajo hacia arriba, por desarrollos del personal técnico, más que por decisiones gerenciales. Sin embargo, existen compañías que sí manifestaron estar empleando SE o tener planes para adquirirlos. Algunos de los SE en uso son de tipo financiero. La razón principal que se argumentó en contra de los SE fue su costo, que no se consideró adecuado en relación a la ganancia que producen.

A pesar de estos resultados, aparecen cada vez más reportes de sistemas en uso diario, donde se registra un alto grado de ganancia originada por el uso de los mismos. Dentro de éstos, son notables los de las compañías de computadoras, notablemente Digital [BAC89].

Por otra parte, en Japón, país que tiene los planes más concretos de aplicación de las técnicas de Inteligencia Artificial, cuenta con un gran número de SE en uso. En un reporte bastante detallado, Motoda [MOT90] presenta datos concretos que se sintetizan en las siguientes tablas (tablas 4-V, 4-VI, 4-VII). En resumen, este autor considera que las técnicas de Inteligencia Artificial, y especialmente los SE, se están

extendiendo a todas las empresas de su país, buscando resultados prácticos, y que se ha pasado de una primera fase de estudio de cómo construir un SE, a una segunda fase orientada más bien a qué clase de SE debe construirse. Los diversos autores consultados a lo largo de este trabajo muestran ese cambio. Es posible que exista un número mayor de aplicaciones exitosas de los SE en Japón, pero no se reflejan en la literatura por tratarse de sistemas clasificados como secreto industrial.

TABLA 4-V
Clasificación por dominio

Dominio del Sistema	Núm. de Sistemas
Banca, Bolsa, Crédito	35
Seguros	32
Servicios no manufactureros	30
Metalurgia	40
Ing. Civil y construcción	68
Electricidad y gas	27
Petroleo e Industria Química	46
Industria pesada	16
Maquinaria y automóviles	62
Electrónica (no computadoras)	16
Otras manufacturas	29
Total	401

TABLA 4-VI
Clasificación por estado de desarrollo

Prototipo	23.7 %
Pruebas en campo	20.2 %
En uso	47.1 %
A la venta	07.7 %
Otros	01.3 %

TABLA 4-VII
Clasificación por tipo de aplicación

Diagnóstico	38.4 %
Planeación	25.2 %
Diseño	16.5 %
Control	05.2 %
Otros	14.7 %

En la Comunidad Europea también se trabaja sobre los SE, aunque no existen informes tan precisos como el japonés. Sin embargo, por las referencias disponibles se puede observar un uso creciente de este tipo de sistemas. Por la naturaleza de los proyectos financiados bajo el acuerdo ESPRIT, deben contar con respaldo tanto académico como empresarial, con lo cual se garantiza, hasta cierto punto, que serán sistemas de uso práctico y no meros juguetes de laboratorio. En cuanto a datos concretos, el reporte de RADA [RAD90] presenta la situación en Inglaterra, del cual se reproduce una tabla que indica el uso de sistemas expertos, de acuerdo a un estudio de 1986 (ver tabla 4-VIII).

TABLA 4-VIII
Áreas de aplicación de SE en Inglaterra

Medicina	16
Diagnóstico de fallas	11
Procesos Industriales	11
Finanzas	05

De acuerdo con este estudio, citando reportes del Departamento de Comercio de Inglaterra, se concluye que la industria de los SE en Japón, Francia, Alemania Federal e Inglaterra era más o menos igual en 1989, pero con un mayor índice de crecimiento en Japón.

Otros resultados de interés reportados en el citado trabajo, son los siguientes: En los EEUU e Inglaterra los SE se orientan más hacia la industria electrónica y la Computación, mientras que en Japón y Alemania se orientan más a la construcción de plantas industriales y a las ramas de Ingeniería Mecánica.

En el caso de México, no se ha encontrado un reporte acerca de la situación real de los SE. En los congresos del tema se aprecia un gran desarrollo en aspectos teóricos y prototipos, pero pocos resultados concretos. De las referencias que se han consultado se puede observar que los pocos sistemas que se reportan en uso son de tipo industrial, basados en reglas, a veces orientados a trabajo en tiempo real. En el campo financiero no parece haber sistemas en uso, a pesar de existir referencias verbales de sistemas experimentales en casas de bolsa y bancos. De datos informales que se escuchan en congresos y otras reuniones, puede suponerse que existen más SE en operación, que no se reportan por razones de confidencialidad.

CAPITULO 5

Sistemas basados en conocimiento y la I de O.

El capítulo anterior se dedicó a la comparación de los SE y la I de O, para lo cual se diferenciaron aquellos de otros sistemas, con los que comparten algunos métodos, particularmente el uso de bases de conocimiento. Originalmente, al iniciar este trabajo se consideraban únicamente los SE, pero conforme se fue desarrollando, se hizo evidente que no solo existen otros sistemas basados en conocimientos, sino que, además, estos parecen tener mayor aplicación en el campo de la I de O.

Los sistemas basados en conocimiento cubren un área mayor que los SE, pero cargan menos atributos capaces de despertar la animosidad de los investigadores de otras áreas, y además cuentan con más posibilidades, ya que pueden manejarse como híbridos de diversas técnicas, superando así a los sistemas puros. Estos sistemas, avanzan hacia lo que Raghavan llama Sistemas Inteligentes de Soporte a la Toma de Decisiones.

En este capítulo se desarrolla el tema de los Sistemas basados en Conocimiento, ampliando la discusión a algunos elementos generales de la Inteligencia Artificial que les dió origen, y se explora su relación con la I de O.

5.1 SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO.

El enfoque de separar el conocimiento acerca de un problema del procedimiento computacional para usarlo existe teóricamente desde hace cincuenta o sesenta años; ha sido siempre una alternativa a la programación por medio de lenguajes imperativos, pero de uso relativamente limitado hasta hace pocos años. En ese tiempo, apenas se usaron algunos sistemas basados en tablas (look-up tables), que corresponden básicamente a autómatas, y que son herederos de los sistemas de Post y los algoritmos de Markov.

En la actualidad, gracias a la Inteligencia Artificial, se van popularizando diversos desarrollos con un enfoque basado en el conocimiento. En sus inicios, el producto más notable -y publicitado- fue el sistema experto, de donde se generalizó el término para un gran espectro de aplicaciones. En este trabajo se denominará "Sistema basado en conocimientos" o SBC a cualquier sistema computacional donde el conocimiento acerca de un problema o su solución se encuentra identificable y separado del procedimiento mismo de solución, ya sea en forma de base de conocimientos, tablas o heurísticas. Así pues, para aprovecharlos mejor, conviene distinguir los diferentes tipos de SBC. En la Fig. 5-1 se presenta una posible clasificación de SBC, empleando tres

grandes criterios: el grado de completéz de un producto, el nivel de conocimiento requerido y el grado de estructuración de los problemas que enfrenta.

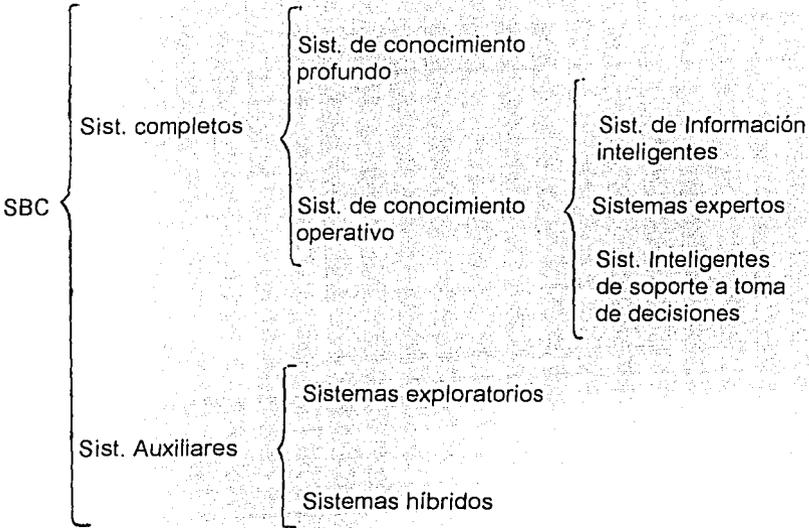


Fig. 5-1. Clasificación de sistemas basados en conocimientos (SBC)

La primera división separa los sistemas terminados de aquellos que son parte de sistemas con otro enfoque o solamente herramientas de investigación. Los sistemas completos se separan en dos ramas de acuerdo al nivel de conocimientos empleado. Actualmente se encuentran reportes de dos niveles: el llamado conocimiento profundo y el que puede denominarse operativo, llamado también conocimiento superficial. Este último es el más conocido, ya que los sistemas de este tipo resultan más sencillos de realizar y llevan a resultados prácticos, aunque limitados, en poco tiempo y se reduce muchas veces a extraer, del experto, o de un conjunto de ejemplos, una serie de reglas de acción, suficientes para resolver problemas típicos con o sin la ayuda del experto o de alguna persona no tan experta.

Los sistemas de conocimiento profundo se encuentran aún en proyecto, y son mencionados por unos cuantos autores, como por ejemplo Moreau [MOR88] y Aeh [AEH88], o vislumbrados en las críticas a los de conocimiento operativo, como en el caso de Winston [WIN85]. En general, los autores que reportan SBC no indican el tipo de conocimiento necesario para sus proyectos, pero puede notarse que la gran

mayoría son, sin lugar a dudas, sistemas de conocimiento operativo. En la sección 5.2 se tratarán brevemente los sistemas de conocimiento profundo.

Los sistemas basados en conocimiento operativo (o SBC a secas) pueden separarse en tres ramas según el grado de estructuración de los problemas que enfrentan. Así, empleando el esquema de Gory y Scott-Morton ya utilizado en el capítulo anterior, se tendrían tres ramas, como se mostró en la Figura 5-1: Los Sistemas de Información Inteligentes (SII), los Sistemas Expertos (SE) y los Sistemas Inteligentes de apoyo a la toma de decisiones (SIATD). Esta división corresponde también a lo que Raghavan llama "paradigma Hombre-Máquina", y que se discute más adelante.

Los SII corresponden a formas alternas de programar los sistemas de información tradicionales, orientados a los problemas operativos de la empresa, con ventajas de flexibilidad y adaptación al usuario a través del uso de heurísticas o separando el conocimiento en tablas auxiliares. Estos sistemas aparecen mencionados, con otros nombres, en textos de bases de datos como el de Wiederhold [WIE84], y entre ellos caen muchos de los sistemas reportados como expertos (por ejemplo todos los sistemas que hacen una serie de preguntas de respuesta binaria, con las cuales seleccionan una respuesta en forma determinista, que corresponde directamente a una consulta a una base de datos, aunque organizada de otra manera o programada en Prolog). Entre los SII podrían incluirse también algunos sistemas, ya tradicionales, que emplean modelos de I de O con uso de heurísticas para hacer factible la búsqueda de solución a un problema, como el SE RACS mencionado anteriormente [DHA90].

Los Sistemas Expertos (SE) han sido ampliamente discutidos en el trabajo, por lo cual no se tratarán aquí.

La tercera rama, los Sistemas Inteligentes de Apoyo a la Toma de Decisiones, SIATD, son, más que sistemas per se, socios del experto humano en el proceso de toma de decisiones, enfrentando problemas semiestructurados o de plano sin estructura.

En otro nivel se sitúan los sistemas auxiliares, que no son propiamente SBC en toda la extensión del término. Entre ellos se tienen los sistemas exploratorios, que son herramientas de investigación, orientados a la búsqueda de heurísticas adecuadas, a la exploración de caminos o al modelado de sistemas. De alguna forma pueden considerarse SE incompletos o SIATD en desarrollo; quizá hasta avances en la formulación de Sistemas de conocimiento profundo, pero en otros casos no aspiran a esos fines, sino más bien a permitir al humano profundizar en el conocimiento de problemas para los cuales no se tiene suficiente experiencia.

Algo similar ocurre con los sistemas híbridos, que son resultado del desarrollo convergente de los sistemas tradicionales y los sistemas expertos. Estos emplean muchas veces técnicas de simulación y algoritmos de optimización de la I de O. Dentro de esta categoría pueden situarse muchos de los llamados "orientados a objetos", que vienen a resultar de la cruce de lenguajes prescriptivos (tradicionales) con

representación de marcos (basados en conocimiento). Algunos, como Moreau [MOR88] consideran a estos sistemas un paso adelante de los SE.

En las secciones siguientes se analizarán los sistemas mencionados y se explora su potencial para la I de O.

5.2 SISTEMAS DE CONOCIMIENTO PROFUNDO.

Los sistemas de conocimiento profundo aparecieron después del éxito inicial de los SE, al observarse que estos empleaban principalmente el conocimiento superficial, o que tenía manifestaciones visibles, como en la gran mayoría de sistemas de diagnóstico, que utilizan conjuntos de síntomas visibles para determinar la posible falla o enfermedad. Un sistema de conocimiento profundo busca ir más allá, hasta el conocimiento de las componentes del sistema bajo estudio, aprovechando información que no aparece visible directamente. Este enfoque permite localizar fallas o resolver problemas no evidentes, o aún problemas que no han sido observados suficientemente como para establecer reglas del tipo empleado por los SE convencionales. Según Sykes et al, los sistemas de conocimiento profundo son más resistentes porque emplean razonamiento inherente a la estructura del sistema, más que atajos y heurísticas, y se parecen más a los expertos humanos, quienes construyen un modelo mental del sistema bajo estudio y son capaces de diagnosticar problemas nunca vistos [SYK88].

Por otra parte, los sistemas de conocimiento profundo se distinguen de modelos matemáticos, como los empleados tradicionalmente en aplicaciones computacionales de las ingenierías y las ciencias, en que emplean modelos simbólicos de las componentes y del funcionamiento del sistema a tratar, y utilizan las diversas representaciones y métodos que se describieron para los SE.

En la literatura se encuentran pocas referencias de estos sistemas, quizá porque resultan más complejos que los SE y requieren mayores recursos de cómputo. Se les encuentra asociados a problemas de ingeniería, especialmente a procesos industriales, y muy relacionados con la simulación, bajo el término simulación cualitativa.

Un ejemplo de este tipo de sistemas es el trabajo, citado antes, de Sikes y sus coautores [SYK88], quienes presentan el desarrollo de un sistema de diagnóstico de sistemas físicos empleando simulación cualitativa. El sistema se emplea para diagnosticar turbinas de avión y otros dispositivos semejantes. La metodología empleada puede resumirse en los pasos siguientes:

- a) Se realiza un proceso de modelado del sistema físico, incluyendo componentes, estados, atributos de entrada y de salida, valores elegibles, funciones de transferencia de las componentes e interconexión.

- b) El modelo se convierte a una red de SE donde cada uno de ellos corresponde a una componente. La interconexión corresponde a la del modelo.
- c) Se "corre" el modelo variando restricciones y se construye una tabla de decisión que asocie síntomas y fallas.
- d) Se descompone la información obtenida en relaciones elementales, asociando cada una con algún valor de un atributo.
- e) Se combinan las relaciones obtenidas con información acerca de la fiabilidad de las componentes y los costos de obtener los valores, construyendo un procedimiento óptimo de búsqueda.
- f) Se combina lo anterior con una interfaz adecuada y se tiene un sistema de diagnóstico.

Del ejemplo anterior puede verse que este tipo de sistemas comparte elementos de un SE y otros de sistemas convencionales. También puede verse la relación natural entre este enfoque y la I de O.

Otro ejemplo es el sistema VANESA, reportado por Moreno et al, que emplean la simulación cualitativa para resolver problemas de tráfico en la ciudad de Valencia [MOR90]. Aunque este sistema emplea técnicas similares a las descritas, corresponde más bien a sistemas híbridos, por lo cual se le menciona en la sección correspondiente.

5.3 SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO OPERATIVO.

Se entenderá como sistemas basados en conocimiento operativo aquellos donde se emplea conocimiento de un área bien delimitada de conocimiento, suficiente para identificar un problema y proponer soluciones, parciales o totales, en cualquier forma. Para estudiar estos sistemas resulta útil considerar tanto el tipo de problemas que enfrentan, como el enfoque que siguen. Para precisar mejor la situación de estos sistemas resulta útil el modelo denominado "Paradigma Hombre-Máquina", que se describe a continuación.

5.3.1 Paradigma Hombre-Máquina.

El **paradigma Hombre-Máquina** de Raghavan y Chand, puede resumirse así, a partir de su trabajo [RAG88]: una persona tiene un problema con varias alternativas, unas considerando el problema original y otras que profundizan en problemas subyacentes. Esa persona cuenta con una máquina, en sentido amplio, que le puede ayudar en la solución de su problema. Acerca de la situación se deben responder las preguntas siguientes:

- a) ¿Como se reparten el hombre y la máquina el conocimiento, la habilidad y el trabajo?
- b) ¿Qué roles juega el hombre?
- c) ¿Qué roles juega la máquina?
- d) ¿Quién resuelve el problema?

Dependiendo de las respuestas a tales preguntas se tendrán diferentes tipos de sistemas. Los más relevantes para el tema que se trata son los tres que dichos autores consideran alternativas "puras":

1) La máquina sirve únicamente de soporte en el proceso de toma de decisiones, por lo cual el hombre es quien resuelve el problema. Dependiendo del papel exacto de la máquina y del reparto del conocimiento, se podrá tratar de sistemas de información con bases de datos, sistemas basados en hojas de cálculo o sistemas que permiten emplear varios modelos, y que son los más propiamente llamados sistemas de soporte a la toma de decisiones.

2) La máquina controla el proceso, solicita datos al hombre y finalmente produce una solución. Esta alternativa es el extremo contrario a la anterior e incluye sistemas específicos para un problema y también a los sistemas expertos.

3) La máquina y el hombre se asocian en la solución del problema; el control va y viene entre los dos. Esta alternativa puede situarse entre las anteriores, e incluye diversas posibilidades de aprovechamiento de la capacidad de la máquina y las habilidades humanas. En este nivel se pueden situar algunos de los sistemas basados en conocimientos, como los que Raghavan y coautores llaman "Sistemas inteligentes de soporte a la toma de decisiones".

Así pues, según estos autores se puede distinguir entre diversos sistemas de soporte a la toma de decisiones y los sistemas expertos conociendo dónde se encuentra el control del proceso: en el hombre o en la máquina, o en ambos como equipo.

En las secciones siguientes se tratarán las ramas mencionadas al inicio del capítulo como sistemas de conocimiento operativo, que -en forma un tanto simplista- pueden corresponder a las categorías descritas.

5.3.2 Sistemas de Información Inteligentes (SII).

Los sistemas de información se han empleado mucho tiempo como un apoyo a las labores de la empresa, especialmente en las de tipo operativo. Dentro de ellos, los sistemas de bases de datos permiten obtener información en forma interactiva y

rápida, por lo cual son la base de muchos sistemas de oficina. Sin embargo, estos sistemas, en su mayoría, requieren de cierta experiencia en el uso del manejador de bases de datos que se emplea, para localizar información que carece de una llave perfectamente identificada. Por ejemplo, si se desea información acerca de los elementos legales o normativos que resulten aplicables a un problema dado, puede requerirse un proceso largo de búsqueda, o se deberán limitar las consultas a casos específicos. Si la información se requiere para tomar una decisión, ambas posibilidades resultan inadecuadas.

Como alternativa, desde hace años se ha considerado la conveniencia de darle cierta "inteligencia" a los manejadores de bases de datos, pero ha sido hasta la llegada de los sistemas basados en conocimientos que se comienza a llevar a cabo. Actualmente se han realizado un gran número de sistemas que emplean conocimientos, en mayor o menor grado, para facilitar las consultas, desde sistemas de reglas asociados a las bases de datos, hasta sistemas que permiten consultas a partir de ejemplos.

A continuación se describen unos cuantos sistemas como ejemplo, algunos de los cuales aparecen reportados como sistemas expertos; la decisión de incluirlos aquí es del autor de este trabajo, considerando sus características publicadas. Entre ellos algunos corresponden a sistemas de bases de datos y otros son más similares a programas de I. de O.

- a) Taxis: sistema basado en conocimiento que ayuda a precisar los requerimientos de un sistema de información, desarrollado dentro de un proyecto más amplio, por Greenspan y otros [GRE84].
- b) Sistema experto taxonómico reportado por Panhurst [PAN86] y que ayuda en la clasificación de especies (en sentido amplio).
- c) Sistema experto en reconocimiento de madera, desarrollado en el INIREB (ahora Instituto de Ecología) por Garrido [GAR89]. Este sistema permite identificar una madera por sus características y recomendar tratamientos para su preservación.
- d) Sistema experto para ayudar en la evaluación de personal académico del I.I.E., desarrollado por Escobedo [ESC89]. Este sistema es un auxiliar en las revisiones periódicas a que se somete el trabajo de los investigadores, tanto para su contratación como para su promoción.
- e) HERREN, descrita como herramienta informática para representar normativas, aplicada a las instalaciones eléctricas. El trabajo es de San Gil y otros [SAN90].
- f) Sistema experto en la planeación de la producción óptima de papel, reportado por Ramírez [RAM90], que se aplica a organizar los pedidos, armonizando los

diferentes cortes necesarios de tal forma que se minimice el desperdicio. Este sistema está más cerca de un sistema típico de I. de O. que de un S.E.

g) En IBM de México se desarrolló un sistema experto en llenado de reportes técnicos de mantenimiento a equipos, que resultaba una tarea que los técnicos evadían. El sistema les permite reportar fácilmente y con precisión el trabajo realizado. Según la información con que se cuenta, este sistema está en uso actualmente. Por su naturaleza corresponde a los sistemas descritos en esta sección.

Si se analiza la extensa variedad de sistemas reportados como expertos se encontrarán muchos casos que realmente corresponden a esta categoría.

5.3.3 Sistemas Inteligentes de Apoyo a la Toma de Decisiones (SIATD).

Los SII y los SE corresponden a sistemas donde el hombre y la máquina, respectivamente, tienen el control del proceso de solución de problemas. El caso restante ocurre cuando ambos comparten el conocimiento e interaccionan como un equipo. Como no existe información suficiente acerca de sistemas que puedan caracterizarse en forma precisa de esta manera, la mayor parte de los que aquí se describen corresponde a posibles sistemas, tomando un buen número de sugerencias del trabajo de Raghavan y Chand ya mencionado.

Los SIATD serían sistemas donde el experto humano y el artificial discuten el problema, intercambian y negocian sus juicios y preferencias, para finalmente llegar a una solución en forma conjunta. Su dominio está en los problemas semiestructurados y en los no estructurados, que es donde resulta más difícil tomar decisiones. Dos formas posibles de realizarlos serían:

a) Un sistema que permita un proceso de diálogo donde el experto artificial recomienda una solución inicial, el humano pide explicaciones, que recibe y luego sugiere alternativas que son criticadas por la máquina. Después de varias iteraciones se llega a una solución mejorada, logrando que aprendan tanto el experto humano como la máquina. El proceso puede modificarse cambiando los papeles.

b) Un sistema donde la parte artificial se informa ampliamente del problema y lo estructura interactivamente con el humano; luego revisa el modelo para localizar inconsistencias. Después, la máquina ofrece estímulos a la creatividad del humano, asumiendo diversos papeles, tales como: personalidad agresiva, enfoque conservador o "abogado del diablo".

Estos sistemas pueden verse también como expertos en entrenamiento, que eventualmente serán liberados al haber alcanzado un cierto nivel de efectividad en la solución de problemas. Visto de otra forma, puede ser un socio del experto humano,

con el cual pueda discutir y desarrollar ideas, sin temor al plagio, como ocurre a veces entre humanos.

Un ejemplo de sistema desarrollado con este enfoque, aún cuando no cubre todos los elementos mencionados, es el de Shemer, que es un sistema de soporte al análisis de sistemas, cooperando con el humano en la etapa de modelado [SHE86]. El sistema emplea un modelo general basado en relaciones y va construyendo modelos específicos de sistemas en forma interactiva, verificando que existan todos los elementos necesarios para luego desarrollar soluciones confiables. La aplicación principal de este trabajo es en el campo de los sistemas de información. Cabe recordar que la etapa de análisis es una de las más importantes en ese terreno, y una de las que requieren mayor experiencia.

5.4 SISTEMAS AUXILIARES.

Además de los sistemas completos y relativamente autónomos, existen un gran número de sistemas que van "creciendo", orientados a terminar como un sistema experto u otro tipo de sistema como los mencionados en la sección anterior, pero que aún se hallan en etapas de desarrollo. Junto a ellos se pueden colocar sistemas que emplean técnicas de manejo de conocimiento junto a otras de tipo convencional. En esta sección se analizarán brevemente estos dos tipos de sistemas que completan el panorama del uso de conocimientos en los sistemas computacionales.

5.4.1 Sistemas Exploratorios.

Son aquellos que emplean técnicas de representación de conocimientos, pero que no pretenden, en su estado actual, llegar a ser sistemas expertos o SIATD. Algunos corresponden a prototipos orientados a la construcción de tales sistemas, pero en su mayoría se limitan a servir como herramienta para explorar problemas difíciles, buscando soluciones parciales o heurísticas útiles. Constituyen herramientas muy valiosas para los investigadores de cualquier disciplina, incluyendo destacadamente a la I. de O., como se verá en algunos de los ejemplos.

Shemer [SHE86] reporta un sistema basado en conocimiento que ayuda al analista de sistemas en la etapa de análisis, empleando un modelo relacional. Como el autor lo indica, no pretende llegar a ser un sistema experto, sino un socio del investigador, para llegar juntos a entender y modelar el sistema bajo estudio.

Thomason [THO89] presenta un reporte de un sistema orientado a la interpretación de corrientes oceanográficas en el Golfo de México, buscando la ocurrencia de eventos significativos. Según el reporte, reconoce patrones, predice imágenes, busca evidencias y deduce resultados de situaciones semejantes. Por el tipo de trabajo, se trata de una auxiliar del investigador.

con el cual pueda discutir y desarrollar ideas, sin temor al plagio, como ocurre a veces entre humanos.

Un ejemplo de sistema desarrollado con este enfoque, aún cuando no cubre todos los elementos mencionados, es el de Shemer, que es un sistema de soporte al análisis de sistemas, cooperando con el humano en la etapa de modelado [SHE86]. El sistema emplea un modelo general basado en relaciones y va construyendo modelos específicos de sistemas en forma interactiva, verificando que existan todos los elementos necesarios para luego desarrollar soluciones confiables. La aplicación principal de este trabajo es en el campo de los sistemas de información. Cabe recordar que la etapa de análisis es una de las más importantes en ese terreno, y una de las que requieren mayor experiencia.

5.4 SISTEMAS AUXILIARES.

Además de los sistemas completos y relativamente autónomos, existen un gran número de sistemas que van "creciendo", orientados a terminar como un sistema experto u otro tipo de sistema como los mencionados en la sección anterior, pero que aún se hallan en etapas de desarrollo. Junto a ellos se pueden colocar sistemas que emplean técnicas de manejo de conocimiento junto a otras de tipo convencional. En esta sección se analizarán brevemente estos dos tipos de sistemas que completan el panorama del uso de conocimientos en los sistemas computacionales.

5.4.1 Sistemas Exploratorios.

Son aquellos que emplean técnicas de representación de conocimientos, pero que no pretenden, en su estado actual, llegar a ser sistemas expertos o SIATD. Algunos corresponden a prototipos orientados a la construcción de tales sistemas, pero en su mayoría se limitan a servir como herramienta para explorar problemas difíciles, buscando soluciones parciales o heurísticas útiles. Constituyen herramientas muy valiosas para los investigadores de cualquier disciplina, incluyendo destacadamente a la I. de O., como se verá en algunos de los ejemplos.

Shemer [SHE86] reporta un sistema basado en conocimiento que ayuda al analista de sistemas en la etapa de análisis, empleando un modelo relacional. Como el autor lo indica, no pretende llegar a ser un sistema experto, sino un socio del investigador, para llegar juntos a entender y modelar el sistema bajo estudio.

Thomason [THO89] presenta un reporte de un sistema orientado a la interpretación de corrientes oceanográficas en el Golfo de México, buscando la ocurrencia de eventos significativos. Según el reporte, reconoce patrones, predice imágenes, busca evidencias y deduce resultados de situaciones semejantes. Por el tipo de trabajo, se trata de una auxiliar del investigador.

Muchos sistemas basados en redes neuronales pertenecen a esta categoría, ya que parte de su valor reside en modelar un problema a partir de casos de ejemplo, al tiempo que se "entrena" la red. Al tener una red lista, ésta se constituye en conocimiento acerca del problema y sus soluciones, que puede ser transferido a otras representaciones. Un ejemplo es el presentado por Gallant [GAL88], donde la red neuronal genera un conjunto de reglas de producción, que sirven como justificación de su actividad y que pueden cargarse a un esqueleto de SE convencional.

Muchos sistemas que se reportan como expertos probablemente son sistemas de esta categoría, ya que no se realizaron para actuar solos, sino más bien como un auxiliar del experto.

Dentro de la categoría de sistemas exploratorios se consideran también aquellos que son prototipos parciales de un sistema en desarrollo. Su origen puede encontrarse en la convergencia de dos enfoques "de moda": la construcción de prototipos rápidos como técnica de la ingeniería de software y la realización de sistemas expertos. Como esta última es una forma de trabajo que aún no cuenta con amplio respaldo, deben mostrarse resultados en etapas tempranas del proyecto, lo cual permite, además, conocer mejor el problema que se enfrenta.

En este caso, como en otros donde se emplea la técnica de moda, no todos los sistemas que se inician con miras a realizar un S.E. logran sus objetivos, ya sea por la naturaleza del problema o por falta de conocimientos expertos, o simplemente por falta de apoyo para continuar. Sin embargo, muchas veces los prototipos logrados son útiles, aún cuando no se encuentren en su estado final. Muchos sistemas famosos comenzaron su vida como prototipos sencillos, como por ejemplo XCON, de la compañía Digital, que comenzó como el prototipo llamado R1 [MCD80].

5.4.2 Sistemas Híbridos.

Una categoría de sistemas basados en conocimiento que parece ganar terreno es la de los sistemas híbridos, donde se mezclan con métodos y lenguajes de programación convencional (a veces llamada "clásica"). Esta es un área que ha crecido con sistemas que pretendieron ser expertos, pero que requirieron de complementos tradicionales; sistemas que, siendo expertos, necesitan contrastar sus propuestas contra otros resultados; y de sistemas convencionales que, ante la imposibilidad de hallar soluciones prácticas en algunos casos o aspectos de un problema, optan por agregar módulos basados en conocimiento.

En esta categoría se incluyen en gran número los sistemas relacionados con la simulación, que reúne varias de las características mencionadas. Entre éstos se pueden citar los siguientes: DRAGON, sistema asociado a otro que maneja líneas de espera permite establecer las cargas para equipos ICL 2900, durante fases de preparación con el fin de ofrecer propuestas a los clientes [KEE86]. VANESA, reportado por Moreno y sus colaboradores [MOR90], es un sistema de control de

tráfico en España, el cual busca soluciones que son probadas en un simulador anexo. Otro ejemplo es el sistema reportado por Ramana, que es un módulo anexo a un simulador, que conduce simulaciones, y realiza cambios basados en reglas y heurísticas. Uno más, es el reportado por Taylor y Hurrión [TAY88], asociado a un sistema de simulación de líneas de espera, que asiste al investigador en el diseño de experimentos, y la interpretación y análisis de resultados.

Otro caso es el sistema de Villalobos [VIL90], que se asocia a un sistema de análisis de series de tiempo, ayudando en la selección del modelo más adecuado a los datos con que se cuenta.

De los ejemplos mencionados, puede notarse que este tipo de sistemas aparece muy asociado a la obtención de conocimientos a través de la experimentación, que luego se transferirá a otros sistemas, sean expertos, convencionales o de toma de decisiones. Incluso existe un sistema orientado a obtener experiencia en un área donde no existen expertos, pero donde se puede caracterizar y simular el comportamiento de los sistemas en estudio.

Entre los sistemas reportados, se tienen varios relacionados con el empleo de optimización, del que resulta ilustrador el caso reportado por Dhar y Ranganathan [DHA90], donde se tenía un problema de asignación de cargas y horarios en una universidad. La solución tradicional, empleando algoritmos de programación entera, era rápida, si existía, pero cuando no la había, el proceso de convergencia era muy lento y no indicaba la existencia de solución. Como alternativa se desarrolló un SE, el cual era más lento, pero siempre daba una solución, ya fuera la óptima o una parcial, cuando no existía una total; los administradores usaban esta solución parcial para completar una factible. Finalmente, se estableció un sistema que combina la parte experta para buscar soluciones y probar heurísticas, y un sistema convencional, que aprovecha las heurísticas generadas para mejorar la selección de elementos durante el proceso.

CONCLUSIONES

Al concluir este trabajo se hace necesario recapitular acerca de lo que pueden aprovechar entre sí los campos de I de O y de los SE, o en general de los sistemas basados en conocimiento. Estas reflexiones se presentan en grupos, tratando de darles cierta organización. Primeramente se discuten algunas similitudes y diferencias entre I de O y SE. En segundo término, se discute la relevancia real de los SE en la I de O en la actualidad. Después se amplía la discusión a los sistemas basados en conocimiento y la metodología asociada a ellos. Finalmente se presentan algunas opiniones del autor, surgidas del mismo desarrollo del trabajo.

COMPARACIÓN DE LA I de O CON LOS SE.

De lo expuesto en los capítulos 1 a 4, especialmente en el último, puede extraerse un resumen como el que se muestra en las tablas C-I y C-II, donde se presentan elementos comunes y diferencias, respectivamente, entre la I de O y los SE.

TABLA C-I

Resumen comparativo. Elementos comunes.

Meta: ayudar al tomador de decisiones.
Realización por equipos interdisciplinarios.
Construcción de modelos.
Uso intensivo de la computadora.

TABLA C-II
Resumen comparativo. Diferencias.

Investigación de operaciones	Sistemas expertos
Modelos matemáticos, cuantitativos	Modelos simbólicos y cualitativos.
Desarrollo secuencial de los modelos	Desarrollo por prototipos
Orientación a solución algorítmica y óptima.	Orientación a solución aceptable, basada en heurísticas
	Enfoque de aprendizaje.
Manejo explícito del tiempo.	En general no consideran el tiempo, aún en casos donde podría ser relevante.
Manejo reducido de datos subjetivos.	Manejo importante de datos subjetivos.
Manejo de imprecisión e información incompleta por métodos de probabilidad clásica	Manejo de imprecisión e información incompleta por medios variados: probabilidad, Dempster-Schafer, teoría de las posibilidades.

La tabla C-II se refiere a características en las que difieren, en general, los sistemas basados en la I de O y los sistemas expertos. Sin embargo hay algunas excepciones: las heurísticas, que son empleadas en algunos procesos de optimización de I de O; el uso de modelos cuantitativos en algunos sistemas expertos; el uso de elementos subjetivos y borrosos en análisis de decisiones.

Estos elementos traslapados, además de los francamente compartidos, han originado la confusión que existe en la actualidad, y en el futuro pueden generar nuevos enfoques donde se complementen ambas disciplinas.

RELEVANCIA DE LOS SE EN LA I de O.

De la comparación de las tablas anteriores, así como de los ejemplos citados en el capítulo cuatro, se podría pensar que los SE pueden compararse con gran parte de las actividades de la I de O. Sin embargo, no parece ser la intención de los que desarrollan SE, concentrándose más bien en algunos aspectos prometedores, como la teoría de decisiones, la planeación, la simulación y como herramienta de diagnóstico en una gran variedad de situaciones.

Precisamente las actividades mencionadas forman parte del quehacer del experto en I de O, por lo cual es muy probable que los SE seguirán ganando terreno, aunque sin substituir los métodos clásicos, que conservan su ventaja cuando son aplicables, particularmente por la disponibilidad de métodos de optimización.

Los SE pueden reemplazar, y lo hacen, a otros sistemas de I de O, cuando resulta costeable y existe suficiente experiencia codificable o modelos más o menos estables, o bien cuando fracasan los métodos tradicionales, como es el caso de algunos sistemas de planeación que emplean técnicas de optimización.

Precisamente en relación al costo se presenta otra ventaja de los SE frente a otros métodos, ya que el desarrollo de éstos, especialmente en su fase de prototipo, requiere de poca inversión en cuanto a recursos computacionales, y el trabajo de sistematización del conocimiento, necesaria para la base de conocimiento, resulta útil para la empresa donde se realiza, aún cuando no se llegue a terminar el SE.

Los SE son de gran ayuda para la I de O en aquellas áreas que presentan aspectos poco formales, con grandes cantidades de información imprecisa o simplemente con problemas no estructurados. En estos campos, más que solución, los SE pueden ser empleados como herramientas de exploración, para estudiar alternativas o descubrir heurísticas.

IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO.

Los sistemas basados en conocimiento, por tratarse de un concepto más general, resultan, cuando menos en teoría, de mayor relevancia para la I de O que los SE. Estos sistemas permiten una gran gama de opciones, desde los sistemas de conocimiento profundo, ahí donde existen modelos cualitativos (o que puedan transformarse en ellos) sólidos, hasta los sistemas auxiliares de la investigación en áreas donde no existen métodos factibles, pasando por los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y los sistemas híbridos. Estos últimos parecen ser los dominantes en los últimos trabajos disponibles, y abren un gran campo a la I de O, no sólo en su propio quehacer, sino exportando sus métodos como partes integrantes de sistemas para otras aplicaciones.

Es necesario enfatizar la revitalización que han traído los sistemas basados en conocimiento a los métodos de simulación, permitiendo aplicaciones industriales y de tipo administrativo para problemas complejos.

También es digna de notarse el apoyo mutuo que se dan los métodos tradicionales de optimización y los sistemas basados en conocimiento, permitiendo resolver problemas que, de otra manera, habrían quedado sin solución o con soluciones de baja calidad.

LA I de O COMO APOYO PARA LOS SE.

Hasta ahora se han discutido los SE como reemplazo de otras técnicas, y se revisaron diversas aplicaciones en el campo de la I de O. Por otra parte, esta última, a lo largo de su desarrollo, ha acumulado experiencia y una serie de métodos de utilidad para otras disciplinas. En el caso de los SE, y de los sistemas basados en conocimiento,

también tiene mucho que aportar para su desarrollo futuro. A manera de ejemplo, se tienen las técnicas de teoría de decisiones y muchos aspectos de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, técnicas de búsqueda, que pueden ayudar a mejorar las máquinas de inferencia de los SE, y muchos elementos de computación tradicional que se han desarrollado asociados con la I de O.

REFLEXIONES FINALES.

Al comenzar el presente trabajo, el autor tenía en mente la inquietud de explorar la relevancia de los SE dentro del campo de la I de O, dentro de un marco general de desconfianza hacia el tema, con pocas excepciones, y con cierta convicción personal de que los propios SE habían sido demasiado publicitados e inflados, por lo que convenía delimitarlos y reducirlos a su verdadero nivel. Durante el desarrollo del trabajo, a través de conferencias, lecturas y entrevistas con diversas personas relacionadas con ambos campos, se confirma la desconfianza de aquellos que practican la I de O en nuestro país, aún cuando aceptan algunas de sus aplicaciones, especialmente en el área de planeación, o como herramientas auxiliares.

Por otra parte, se pudo constatar que los SE se están usando, no sólo en países de mayor desarrollo, sino en el nuestro, si bien el uso de tales sistemas es experimental o "extraoficial" por el momento. Al respecto, cabría recomendar a los expertos en I de O que analizaran el terreno de los SE con mayor cuidado, para aprovechar sus cualidades, sin esperar a que otros lo hagan.

Finalmente, en este trabajo y otro relacionado [FER90], el autor constató que, efectivamente, los SE han sido sobrepúblicados y que un gran número de éstos son poco más que ejercicios o sistemas de "juguete", más o menos novedosos. Sin embargo, para su sorpresa y posterior entusiasmo, conoció los sistemas basados en conocimiento, que abren un gran número de nuevas perspectivas a la I de O, tanto en aspectos relacionados con la toma de decisiones, como la simulación y aún los métodos de optimización. Al respecto, la recomendación es que no se deje pasar la oportunidad de construir sistemas más flexibles, inteligentes y humanos, aprovechando la posibilidad de los sistemas inteligentes de apoyo a la toma de decisiones o de los sistemas híbridos. Para los investigadores de aspectos relativamente teóricos, el uso de sistemas experimentales puede ser una gran ayuda en el descubrimiento o refinamiento de métodos para resolver casi óptimamente problemas complejos.

Referencias Bibliográficas.

- [ACK71] Ackoff, R.L. y M.W. Sasieni *Fundamentos de la Investigación de Operaciones* Limusa Wiley, México, 1971.
- [AEH88] Aeh, R. K. *Knowledge systems in business and industry*. J. of Systems Management, Nov. 1988, p 7-9
- [BAC89] Bachant, J. and E. Soloway *The engineering of XCON* CACM, v 32, n 3, pp 311-317, march 1989
- [BAI88] Baim, P. W. *A method for attribute selection in inductive learning systems*. IEEE Tra. on Pattern An. and Machine Intelligence, v 10, n 6, nov. 1988, pp 888-896
- [BAR84] Barnes, S. *DICE: Design Interface for Civil Engineering*. Master Thesis, Carnegie Mellon University, 1984.
- [BAR87] Barkocy, B. E. and R. W. Blanning *Expert systems as competitive weapons*. Proceedings of Expert Systems in Business '87, Learned Information Inc. Medford, NJ.
- [BAR88] Barkocy, B. E. and R. W. Blanning *Expert systems in industry: actual and potential applications*. in: Applied Expert Systems, E. Turban and P.R. Watkins (Ed). Elsevier, North-Holland. 1988
- [BAR89] Barker, V.E. y D.E. O'Connor *Expert systems for configuration at Digital: XCON and beyond*. CACM vol 32, n-m 3, pp 298-319, march 1989.
- [BEH87] Behestian, M. and B. Salchenberger *An Empirical Study of the Use of Business Expert Systems* ORSA-TIMS Joint National Meeting, oct. 1987
- [BEN86] Benson, I. *PROSPECTOR: an expert system for mineral exploration*. En [MIT86], pp 17-26
- [BHA86] Bhatnagar, R.K. y L.N. Kanal *Handling uncertain information: a review of numeric and non numeric methods*. en [KAN86], p 3-25

- [BIL84] Billmers, M. and Swartout, M. *AI-SPEAR: Computer systems failure analysis tool* en Proc. European Conf on Artificial Intelligence, Italia, sept. 1984
- [BIL85] Billmers, M. and Carifio, M. *TVX: an expert system advisor for VMS* en Proc. Conf. on HUMAN Interface, 1985
- [BLA72] Blalock, H.M. *Social Statistics*, 2nd. ed. McGraw-Hill, International Students Edition, Tokio, 1972.
- [BLA87a] Blanning, R. W. *Expert modelbase systems: the state of the art*. National Computer Conference, 1987; pp 13-17.
- [BLA87b] Blanning, R. W. *Expert systems as an organizational paradigm*. Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems, December 1987, Pittsburgh, Pennsylvania, pp 232-240
- [BLA87c] Blanning, R. W. *The application of metaknowledge to information management* Human Systems management, v.7, pp 49-57, 1987.
- [BON81] Bonczek, R.H., Holsapple, C.W., Whinston, A.B. *Foundations of decision support systems* Academic Press, 1981
- [BON86] Bonissone, P., and K.S. Decker *Selecting uncertainty calculi and granularity. An experiment in trading-off precision and complexity*. en [KAN86] pp 217-248
- [BOW87] Bowen, T. and L. Payling. *Expert systems for performance review*. J. Opl. Res. Soc. vol 38, no. 10, pp 929-934, 1987.
- [BRA83] Brachman, R.J., S. Amarel, C. Engelman, R.S. et al. *What are expert systems?* En [HAY83], cap 2.
- [BRE90] Bregand, E., F. Charles, R. Watremez. *GESPI: un système expert de planification*. Flux. Revue de la société des ingénieurs de l'école supérieure d'électricité, No. 131, pp 20-23, avril 1990.
- [BUC84] Buchanan, and Shortliffe *Rule-based expert systems: the MYCIN experiments of the Stanford Heuristic Programming Project* Addison-Wesley, 1984
- [BUC83] Buchanan, B.G., D. Barstow, et al. *Constructing an Expert System*. en [Hay83] pp 127-168

- [BUC84] Buchanan and Shortliffe (Eds.) *Rule-based Expert Systems: the MYCIN experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*. Addison-Wesley, Reading, Mass. 1984
- [BUC88] Buchanan, B. *Expert Systems: Working Systems and Research Literature*. en Savory, S.E. (Ed) "Expert Systems in the Organization", Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1988.
- [CAM87] Camiro, R.G. Y L.M. Rodríguez *Sistemas Expertos en la Industria: El caso Bytec-Autrey* Memorias IV Reunion Nacional de Inteligencia Artificial,
- [CAS86] Castillo, L., J. González, E. Liñán y V. Huerta *Un esqueleto integrado de reglas para desarrollo de S.E. en tiempo real*. III Reunión de trabajo sobre Inteligencia Artificial, Oaxaca, Oax., marzo 1986.
- [CLO88] Closs, S.M., O.K. Heflerich, S.J. Young. *Knowledge-based systems: achieving the potential in logistics*. Dialog Systems, working document library no. 880-950
- [COL85] Colmerauer, A. Prolog in 10 figures CACM.v 28, n 12, dec 88, pp 1296-1310
- [CON88] CONDOR (Committee on the next decade in O. R.) *Operations Research: the next decade* Operations Research, v 36, num. 4, pp 619-637, july-august 1988.
- [CUE85] Cuenca, José *Lógica Informática*. Alianza Informática, Madrid, 1985.
- [DAN88] Danforth and Tomlinson *Type theories and object-oriented programming* ACM Computing surveys v 20 n 1, march 1988, pp 29-72
- [DAV86] Davis y McKeown *Modelos cuantitativos para administración* Gpo. Ed. Iberoamérica, México, 1986. Trad. de 2a. ed.
- [DAV87] Davis, J. R. and I. W. Grant *ADAPT: a knowledge-based decision support system for producing zoning schemes*. Environment and Planning B: Planning and design, v 14, pp 53-66, 1987
- [DHA87] Dhar, V. and H.E. Pople *Rule based versus structured based models for explaining and generating expert behavior*. CACM, v 30, n 6, june 1987, pp 542-555.
- [DHA90] Dhar, V. y N. Ranganathan *Integer programming vs expert systems; an experimental comparison* CACM, v 33, num 3, pp 323-336, march 1990

- [DOU85] Doukidis, G. I. and R. J. Paul *Research into expert systems to aid simulation model formulation.* J. Opl. Res. Soc. v 36, no 4, 1985, 319-325
- [DUD87] Duda, R.O. et al *Syntel: using a functional language for financial risk assessment* IEEE Expert, v 2, p 18-31, fall 1987 (citado en [MIL90])
- [EFS86a] Efstathiou, J. and E. M. Mamdani *Expert systems and how they are applied to industrial decision making* En [MIT86], pp 3-16
- [EFS86b] Efstathiou, J., V. Bajkovic and M. Bohanec *Expert systems and rule based decision support systems* En [MIT86], pp 165-174
- [ERM80] Erman, L. D., F. Hayes-Roth, V. Lesser, D. Reddy *The Hearsay II speech understanding system: integrating knowledge to resolve uncertainty.* Computing Surveys, vol 12, no. 2, pp 213-253, 1980.
- [ESC89] Escobedo, H. *Sistema Experto para la evaluación del personal de investigación del IIE.* Tesis lic. en Informática, U.V., julio de 1989.
- [FER90] Fernández, J.M. y J. Jiménez *¿Qué tan experto es un sistema experto? Una propuesta de clasificación.* VI Reunión Nacional de Inteligencia Artificial, 1989. Limusa. pp 395-410.
- [FIG88] Figueroa, U. *MYTRAS: Sistema Experto en el planteamiento de problemas lineales.* Tesis Lic. en Informática, Fac. Estadística e Informática, Univ. Veracruzana, 1988.
- [FIK85] Fikes, R. and T. Kehler *The role of frame-based representation in reasoning* CACM, v 28, n 9, sep 85, pp 904-920
- [FIL88] Filman, R.E. *Reasoning with worlds and truth maintenance in a knowledge-based programming environment.* CACM vol 31, n. m 4, pp 382-401, 1988.
- [FIN86] Findikaki, I. *SISES: an expert system for site selection* Expert systems in Civil Engineering, M.L. Maher and C.N. Kostem (eds), pp 182-192 1986.
- [FIN88] Finlay, P. N., G. J. Forsey and J. M. Wilson *The validation of expert systems. Contrasts with traditional methods.* J. Opl. Res. Soc. v 39, no 10, 1988, pp 933-938
- [GAL88] Gallant, S.I. *Connectionist expert systems* CACM v 31, n 2, feb 88, pp 152-169

- [GAR88] Garduño, G. *Sistema experto borroso para la identificación bacteriana en laboratorios nacionales*. Memorias de 30 años de computación en México, UNAM 1988, pp 1217-1228. (vol 2)
- [GAR89] Garrido, M.E.P. *Sistema experto en madera SEENMA*. Tesis Lic. en Informática, U.V., Fac. de Estadística e Informática, 1989.
- [GER88] Gero, J. and R. Stanton (Eds) *Artificial Intelligence Developments and Applications*. North-Holland Elsevier, Amsterdam, 1988
- [GON85] Gonzalez E. y P. Noriega. *Los sistemas dialógicos y algunas de sus aplicaciones*. II Reunión de trabajo sobre Inteligencia Artificial, marzo 1985, pp 55-57
- [GOR71] Gory, G.A., Scott-Morton, M.S. *A framework for management information systems*. Sloan Management Review, v 13 num 1, pp 55-70, fall 1971
- [GRA86] Grant, T.J. *Lessons for O.R. from A.I.: a scheduling case study*. J. Opl. Res. Soc. vol 37, no. 1, pp 41-57, 1986.
- [GRE84] Greenspan, S.J. *Requirements Modeling: a Knowledge Representation Approach to Software Requirements Definition*. Computer Research Group, Univ. of Toronto, Technical Report CSRG-155, march 1984.
- [GRI84] Griesmer, J.H., Hong, S. J. et al. *A continuous real-time expert system* en Proc. AAAI-84, Austin Texas, agosto 1984.
- [GUP89] Gupta, M.C., C. Judi, Y.P. Gupta and S. Balakrishnan *Expert scheduling system for a prototype flexible manufacturing cell: a framework*. Computers and Operations Research, V. 16, No. 4, pp 363-378, 1989
- [GUPT89] Gupta, Y.P. and D.C.W. Chin *Expert systems and their applications in production and operations management*. Computers and Operations Research, V 16, No. 6, pp 567-582, 1989.
- [HAN86] Hansen, J.V. and W.F. Messier Jr. *A Knowledge-based Expert System for auditing advanced computer systems*. European Journal of Operational Research, 26(1986) 371-379
- [HAN88] Han, S. and T. J. Kim *ESSAS: expert system for site analysis and selection*. Computers, environment and urban systems, v 12, n 4, pp 239-252, 1988 (Pergamon Press.)

- [HAY83] Hayes-Roth, F., D.A. Waterman & D.B. Lenat (Ed) *Building Expert Systems* Addison-Wesley, Reading, 1983
- [HAY85] Hayes-Roth, F. *Rule-based systems* CACM, v 28, no. 9, pp 921-932, 1985.
- [HEC86] Heckerman, D. *Probabilistic interpretation for MYCIN's certainty factors.* en KAN86, pp 165-195
- [HEI88] Heinrich, S. and E. Chrysler. *An expert system for system design.* J. of System Management, Nov. 1988, pp 17-25
- [HEL87] Helderich, O.K., L.A. Taylor, S.J. Trecha *Artificial Intelligence/Expert Systems in Logistics: Putting the theory into practice.* Dialog Systems, working document library number 870-312, 1987
- [HEN87] Hendry, L.C. *The Potential Impact of Artificial Intelligence on the Practice of O. R.* European Journal of Operational Research, 28(1987) 218-225
- [HEN88] Henson, T. *A. I. and simulation: the diversity of applications.* Proc. of the SCS Multiconference on AI and Simulation, Feb 1988, San Diego, CA.
- [HIL89] Hillier, F.S. y G.S. Lieberman *Introducción a la Investigación de Operaciones* McGraw-Hill, México, 1989, 2a. ed en español, trad de 4a. ed.
- [IAC89] Iacono, G. *Assessing the credit of industrial companies* 2nd. International Symposium on Artificial Intelligence, Monterrey, N.L., 1989, McGraw-Hill.
- [JAC87] Jacky, J.P. and I. J. Kalet *An object-oriented programming discipline for standard Pascal* CACM v 30, n 9, pp 772-776
- [JAI88] Jain, D., M.L. Maher *Combining expert systems and CAD techniques* en [GER88].
- [JEA90] Jean-Bart, B; P. Robin *Le temps réel et l'Intelligence Artificielle Flux.* Revue de la Société des ingénieurs de l'école supérieure d'électricité, No. 131, pp 14-19, avril 1990.
- [JOH89] Johnson-Laird, P.N. *Human Experts and Expert Systems.* en Murray, L.A. and J.T.E Richardson (Eds) "Intelligent Systems in Human Context. Oxford University Press, Oxford, 1989, pp 35-46
- [JOS87] Josin, G. *Neural network heuristics* Byte, oct 87, pp 183-192.

- [KAN86] Kanal, L.N. and J.F. Lemmer (Eds). *Uncertainty in Artificial Intelligence*. North-Holland Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [KEE86] Keen, M. J. R. *Expert systems in ICL* in: Computer assisted decision making, G. Mitra (Ed), North-Holland, 1986, pp 59-69
- [KER87] Kersten, G. E. and S. Szpakowicz *Rule-based formalism and preference representation: an extension of Negoplan*. ORSA-TIMS joint conference ...
- [KER88] Kersten, G.E., W. Michalowski, S. Matwin and S. Szpakowicz *Representing the negotiation process with rule-based formalism*. Theory and Decision, v 25 (1988) 225-257.
- [KUS87a] Kusiak, A. *Designing Expert systems for Scheduling of automated manufacturing*. Industrial Engineering, v 19, no. 7, 1987, pp 42-46
- [KUS87b] Kusiak, A. *An Expert system for Group Technology*. Industrial Engineering, v 19, no. 10, 1987, pp 56-61
- [KUS88a] Kusiak, A. and S.S. Heragu *KBES: a knowledge-based system for equipment selection*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v 3, no. 3, pp 97-109, 1988.
- [KUS88b] Kusiak, A. and G. Finke *Selection of process plans in automated manufacturing systems*. IEEE Journal of Robotics and Automation, v 4, no. 4, 1988, pp 397-402
- [KUS88c] Kusiak, A. and S.S. Heragu *Knowledge-based system guides machine layout in flexible manufacturing system*. Industrial Engineering, v 20, no. 11, 1988, pp 48-53
- [LAU88] Laurière, J.L. *Intelligence artificielle, tome 2. Représentation des connaissances*. Eyrolles, Paris, 1988.
- [LEN83] Lenat, D., J. Doyle, M. Genesereth, I. Goldstein, H. Schrobe *Reasoning about reasoning* en HAY83, cap 7, pp 219-239
- [LI 87] Li, T., C.J. Barter, and C. Yu *MULTIPLE: a rule based design tool with output conflict resolution* en GER88, pp 207-215
- [LIS88] Lister, R., K. Ali, R. Buda, C. Horsfall, W. Buntine *GOLD. An Expert System for mineral identification from reflectance spectra*. [GER88], pp 33-48

- [LIU87] LIU, N.K. and T. Dillon *Detection of consistency and completeness in expert systems using numerical Petri nets* en GER88, pp 119-134
- [LUG93] Luger, G. and W. Stubblefield, *Artificial Intelligence, second ed.* Benjamin Cummins, Redwood City, 1993.
- [MAH84] Maher, A. *Knowledge-based expert system for preliminary structural design of high rise buildings.* Ph. D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Carnegie Mellon University, 1984.
- [MAN74] Manna, Z. *Mathematical theory of computation* McGraw-Hill, New York, 1974.
- [MAR87] Márquez Díaz-Canedo *Decisiones financieras con sistemas expertos. Un caso real.* Mesa redonda, Academia Mexicana de Ingeniería y el Instituto Mexicano de Sistemas. 1987.
- [MAS88] Mason C.L., R.R.Johnson, R.M.Searfus, D.Lager *SEA. An Expert System for nuclear testban treaty verification.* en [GER88] pp 17-32
- [MCC48] McCulloch, W.S. and W. Pitts *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity.* Bull. of Mathematical Biophysics, v 5, 1948.
- [MCD80] McDermott, J. *R1. a rule-based configurer of computer systems.* Tech. rep. CMU CS-80-119 Dept. of Computer Science, Carnegie-Mellon Univ. 1980.
- [MIL90] Miller, R. M. *Computer Aided Financial Analysis* Addison-Wesley Reading Mass., 1990
- [MIT86] Mitra, G. (Ed) *Computer Assisted Decision Making.* North-Holland, Amsterdam, 1986.
- [MOR88] Moreau, R. *Computers as a tool for managers of Research Centers* UNESCO, may 18, 1988
- [MOR90] Moreno S., F. Toledo, F. Rosich, P. Barrachina y G. Martín *VANESA: una aplicación de los sistemas basados en conocimiento a la gestión del tráfico urbano de Valencia.* Segundo congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial. julio 1990. Limusa. pp 539-548.
- [MORR88] Morris, a. and M. O'Neill *Information professionals- roles in the design and development of expert systems?* Information Processing and Management, v 24, no. 2 pp 173-181, 1988

- [MOS87] Moser, J. y R. Christoph *Management Expert Systems (MES): a framework for development and implementation* Information Processing and Management, vol 23, no.1, 1987
- [MOT90] Motoda, *The current status of expert systems development and related technologies in Japan* IEEE Expert, Aug. 1990, v 5, num. 4, pp 3-...
- [MUR89] Muralidar, K. and M. Tretter. *The evolution of an DSS for electric utility load research*. Computers and Operations Research, V 16, No. 3, pp 247-256, 1989.
- [NAV87] Navarro, J. C. y P. Vasquez. *Proyecto "SIEXMAN"*. IV Reunión Nacional de Inteligencia Artificial, México, 1987.
- [NIL80] Nilson, Nils J. *Principles of Artificial Intelligence* Tioga Publishing Co., Palo Alto, California.
- [NOR85] Noriega, P. *La lógica de Prolog*. Memorias de la II reunión de trabajo sobre Inteligencia Artificial, México, 1985.
- [OBR77] Obregón S., I. *Teoría de la probabilidad*. Limusa Wiley, México, 1977.
- [OKE85] O'Keefe, R. M. *Expert Systems and operational research. Mutual benefits*. J. Opr. Res. Soc. v 36, no 2, 1985, p 125-129
- [OLA88] Olave, M., N. Lavrac y B. Cestnik *Application of Expert Systems to the Evaluation of Managerial Performance in Public Enterprises of Developing Countries* OMEGA, Vol 16, no. 4, pp 353-362, 1988
- [ORT87] Ortolano, L. and C. D. Perman *Applications to urban planning: an overview*. The Journal of the American planning association, v 53, n 1, pp 98-103, 1987.
- [PAN86] Pankhurst, R. J. *A package of computer programs for handling taxonomic databases*. Computer Applications in Biosciences, v 2, n1, pp 33-39, 1986.
- [PHE86] Phelps, R. I. *Artificial Intelligence. An overview of similarities with O. R.* J. Opl. Res. Soc. v 37, no 1, 1986, pp 13-20
- [POT89] Potvin, J-Y, G. Lapalme, and J-M. Rousseau *ALTO: a computer system for the design of vehicle routing algorithms*. Computers and Operations Research, V 16, No. 5, pp 451-470, 1989.

- [PRA77] Prawda, J. *Métodos y modelos de la Investigación de Operaciones*, vol 1. Limusa, Wiley, México 1977
- [QUI87] Quinlan, J. R. *Induction, knowledge and expert systems* en [GER88], pp 253-271
- [RAD90] Rada, R. *Expert systems in the UK*. IEEE Expert, vol. 5, núm 4, pp 12-17
- [RAG87] Raghavan, S. and D.R. Chand *Expert systems and decision support systems*. Symposium Towards Fifth Generation Computing Systems, Madras, feb. 27, 1987.
- [RAG88] Raghavan, S. and D. Chand *Intellectual support in CASE environments*. 2nd. International Symposium on Computer aided software engineering, july 12-15, 1988.
- [RAM90] Ramírez, A. *Sistema de planeación de la producción óptima del papel*. Segundo congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial. Jul de 1990. Limusa. pp 603-620.
- [RAO88] Rao, M.J. y R.G. Sargent *An experimental advisory system for operational validity*. en [HEN88], pp 245-250.
- [REY88] Reyes, M. E. M. González, E. Cauich y R. Tello. *SEXPE. Sistema experto para la planeación educativa*. Memorias de 30 años de computación en México, UNAM, 1988, pp 1193-1216 (vol 2).
- [RIB87] Ribar, G. S. and John Willingham *Expert systems and Operations Research. A case study*. ORSA-TIMS joint conference, oct. 1987.
- [RIC83] Rich, E. *Artificial Intelligence* - Mc Graw-Hill
- [ROT87] Roth, E. M., K.B. Bennett and D.D. Woods *Human Interaction with an "intelligent" machine*. Int. Journal of Man-Machine Studies, v27, pp 479-525, 1987.
- [SAN89] Sánchez J.M. y J.W. Priest *Knowledge-based producibility decision maker*. 2nd. International Simposium on Artificial Intelligence, Monterrey 1989 McGraw-Hill pp. 1-26
- [SAN90] San Gil, J., T. Gómez y G. Vargas *Técnicas de ingeniería del conocimiento para representación de normativas*. Segundo congreso Iberoamericano de Inteligencia Artificial, jul 1990. Limusa. pp 3-18.

- [SAW88] Sawamoto, J., S. Shindo, Y. Hosono, H. Kubono et al. *PROTON: An expert system tool on the PSI*. [GER88], pp 85-100
- [SER86] Sergot, M.J., F. Sadri, R.A. Kowalski, F. Kriwaczek, et al. *The British Nationality Act as a logic program*. CACM, v 29, n 5, may 1986, pp 370-387
- [SHE86] Shemer, I. *SYS-AYDE: An expert aide to system analysis*. The Israel Institute of Business Research, Tel Aviv University, working paper 887/86, january 1986.
- [SHO67] Shoenfield, J.R. *Mathematical Logic*. Addison Wesley, Reading, Mass. 1967
- [SHO76] Shortliffe, E. H. *Computer-based medical consultation: Mycin*. American Elsevier, New York, 1976.
- [SIM60] Simon, H.A. *The new science of management decision*. Harper and Row, New York, 1960.
- [SPI86] Spiegelhalter, D. J. *Probabilistic reasoning in predictive expert systems*. en KAN86, pp 47-67
- [STE78] Stefik, M. *Inferring DNA structures from segmentation data*. Artificial Intelligence, No. 11, pp 85-114, 1978.
- [STE83] Stefik, M., J. Aikins, et al. *Basic Concepts for Building Expert Systems*. en Hayes-Roth et al, 1983, cap 3.
- [STI88] Stirling, D. and W. Buntine *Process routing in a steel mill: a challenging induction problem*. en [GER88], pp 301-314.
- [TAY88] Taylor, R.P. y R.D. Hurrion *An expert advisor for simulation experimental design and analysis*. en [HEN88], pp 238-245
- [THO88] Thompson, J., J. Delaney, B. Marksjo, R. Sharpe, et al. *An expert system to give advice to operators of a metropolitan water supply, drainage and sewerage network*. en [GER88], pp 49-64
- [THO89] Thomason, M.G. *Knowledge-based analysis of satellite oceanographic images*. Int. Journal of Intelligent Systems, vol 4, n m 2, pp 143-154, summer 1989
- [TRE89] Treviño, G., García, M. y Madariaga, A. *SECAL: Sistema experto en calderas*. Memorias de la VI reunión nacional de Inteligencia Artificial. Limusa, México, 1989.

- [WAT81] Waterman, D.A. and M. Peterson *Models of Legal Decision Making*. Rand Report R-2717-ICJ, 1981.
- [WEI83] Weiss, S. and C. A. Kulikowsky *A practical guide to design expert systems*. Chapman and Hall, London, 1983.
- [WIE84] Wiederhold, G. *Introducción a las bases de datos*. McGraw-Hill, M_xico, 1984. Trad. 2a. ed.
- [WIL84] Williams, G. *SAGE: an expert system shell* en [MIT86], pp 89-94
- [WIL87] Williams, G.J. *Combining decision trees* en GER88, pp 273-289
- [WIN79] Winston, P. and R. Brown *Artificial Intelligence. An MIT perspective*. MIT Press, Cambridge Mass., 1979.
- [WIN85] Winston, P. *Artificial Intelligence*. Reading, Massachusetts, Addison Wesley, 1985
- [WIS86] Wise, B.P. y M. Henrion *A framework for comparing uncertain inference systems to Bayesian decision theory*. en KAN86 pp 69-83
- [WOR84] Worden, R. *Blackboard systems*. en [MIT86], pp 95-106
- [YEN89] Yen, J. *A Dempster-Schafer approach to diagnosing hierarchical hypotheses*. CACM, v 32, n. 5, 1989, pp 573-585
- [ZAD86] Zadeh, L.A. *Is probability theory sufficient for dealing with uncertainty en Artificial Intelligence? A negative view*. en [KAN86], pp 103-116