

# INTEGRACIÓN Y COMPLEJIDAD EN SISTEMAS MULTIEXPERTOS

Alberto Sanfeliu

Instituto de Cibernética

Diagonal 647, 08028 Barcelona (Spain)

## Curriculum

Alberto Sanfeliu obtuvo la titulación de Ingeniero y Doctor Ingeniero Industrial en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en 1978 y 1982 respectivamente. De 1975 a 1979 estuvo en el Instituto de Cibernética (UPC-CSIC) de Barcelona. Durante un periodo de dos años realizó trabajos de investigación en Purdue University (USA) en el departamento del Prof. K.S.Fu. Actualmente es Profesor titular en el area de conocimientos "Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial" en la UPC y realiza su labor investigadora en el Instituto de Cibernética. Es en la actualidad Presidente del IAPR Technical Committee on Syntactic Pattern Recognition y Presidente del Grupo Técnico de Reconocimiento de Formas (CEA-IFAC). Ha publicado en diversas revistas internacionales y nacionales y es coeditor en diversos libros y revistas. Su investigación actual se centra en temas relacionados con robótica, principalmente en visión por computador, desde la perspectiva de las areas de Inteligencia Artificial y Reconocimiento de Formas.

## Resumen

Sistemas para diagnosticar averías en redes telefónicas o para interpretar escenas de robótica hacen uso de diversos especialistas que realizan tareas conjuntamente. Algunos de estos especialistas amenudo están diseñados como sistemas expertos y otros con metodología algorítmica, lo que hace necesario la integración de diversas técnicas y estructuras de representación. Cuando la diversidad de técnicas es elevada y la flexibilidad de actuar con criterios diversos es un requisito, entonces los sistemas deben estar implementados bajo estructuras de control y representación no convencionales, es

decir bajo la filosofía de sistemas de comportamiento "inteligente". En este trabajo se hace una somera presentación de algunos de estos problemas y la utilización de estos criterios para la resolución de un sistema multiexperto dedicado a la interpretación de escenas de tipo industrial, fundamentalmente para su aplicación en tareas de ensamblaje (PIRS).

## 1 Introducción

La dificultad de integración entre diferentes tipos de representación y control en sistemas complejos hace necesario su resolución por métodos que aporten mayor flexibilidad que los convencionales. Sistemas para diagnosticar averías en redes telefónicas (Vesonder y otros, 1983) o para ayudar al diseño de circuitos VSLI (Kowalski y Thomas, 1984) o para diagnosticar enfermedades (Shortliffe, 1976), son algunos ejemplos. Entre los métodos que van adquiriendo mayor aceptación están los basados en técnicas de inteligencia artificial principalmente en el uso de sistemas multiexpertos. Estos sistemas presentan múltiples ventajas, pero su realización encuentra enormes dificultades cuando es necesario integrar técnicas y formas de representación.

En los sistemas complejos, pueden actuar a la vez diversos sistemas expertos que entre ellos solo intercambian alguna información, pero que disponen de datos y reglas diferentes, o bien otros procesos de tipo algorítmico. Así por ejemplo, en el sistema de diagnóstico de redes telefónicas (ACE), el sistema experto se basa en otro de tipo convencional (CRAS) utilizado para adquirir datos y realizar los procesos previos. A partir de estos datos actúa el experto sacando conclusiones y enviando en algunos casos información adicional a la base de datos común que posteriormente puede ser utilizada por ambos especialistas. En este caso, la complejidad e integración es reducida al ser solo necesario intercambiar datos a través de una única base de conocimientos. En otros casos, por ejemplo en el diseño de circuitos VSLI las bases de conocimientos son diversas y la complejidad aumenta.

Cuestiones tales como la representación y control, son temas que están íntimamente ligados y que determinan los aspectos de complejidad e integración. En este artículo

describiremos someramente algunos de aspectos y presentaremos la solución adoptada para un sistema multiexperto orientado a la interpretación de escenas de ensamblaje en robótica.

## 2 . Sistemas multiexpertos : integración y complejidad

Los sistemas que trabajan en tareas interdisciplinarias, como por ejemplo en robótica, necesitan diversos especialistas que tienen varios modos de actuación, en línea o fuera de línea, y con estrategias de búsqueda diferentes , por ejemplo en anchura o profundidad. A menudo estos especialistas se basan en métodos conocidos que pueden ser formalizados mediante algoritmos, pero que precisan de una base de datos específica. Por otro lado, hay otros especialistas que no pueden ser formalizados, ya sea por la dificultad de formalizarlos o por el gran número de variables que intervienen, y normalmente son resueltos por medio de heurística. Estos especialistas son los candidatos para ser implementados por medio de sistemas expertos.

Si estos dos grupos de técnicas actúan sobre los mismos datos pero enfocados de forma diferente, lo más apropiado suele ser unificar todos los datos en una única base de datos, por ejemplo, en robótica entre especialistas de percepción y de planificación. Los primeros para tareas de reconocimiento o interpretación de escenas necesitan características concretas del objeto, es decir, el contorno o el nivel de gris, que sean accesibles de forma inmediata sin necesidad de un laborioso trabajo de deducción en la estructura geométrica y física. Por otro lado, el planificador de trayectorias tiene que razonar con la estructura geométrica, por ejemplo, rectas o planos, para encontrar la trayectoria en función de las restricciones del entorno y de los objetos. En este caso, el planificador precisa que el objeto esté descrito por planos o rectas y que se pueda acceder a ellos eficientemente.

En este ejemplo, los dos especialistas trabajan con un mismo objeto pero precisan información estructurada de forma diferente ya que los objetivos persiguídos son distintos. Hasta el momento, la mayoría de soluciones a este problema han estado dirigidas en la utilización de bases de datos diferentes fundamentalmente por motivos de tiempo

de cálculo y de espacio necesario. Aunque la solución es eficiente en casos sencillos, cuando se trabaja en tareas con mayor grado de complejidad, la eficiencia en algunos casos se convierte en complejidad en la mayoría, sobre todo por razones de integridad y flexibilidad. La unificación de la base de datos resuelve los problemas planteados, pero tiene como desventaja la necesidad de obtener la información de cada especialista y con ello se reduda en un aumento de tiempo de cálculo y espacio. La solución al problema es ardua y hasta el momento pocos sistemas la están tratando con toda su amplitud. Más adelante presentaremos un posible camino de solución utilizado en el sistema PIRS (Perception Interpretation Robotic System) (Sanfeliu, 1986).

Otro problema, es el control del flujo de información entre especialistas en sistemas complejos. Los sistemas conocidos de gobierno de un sistema multiexperto, (de tipo ascendente, descendente, heterárquico o de pizarra), son aplicables a unos u otros sistemas en función del tipo de problema y su complejidad. Por ejemplo, en sistemas de reconocimiento de formas, el gobierno general es de tipo ascendente porque a priori están perfectamente delimitadas las características y el dominio del problema. Asimismo, los sistemas de diagnóstico de enfermedades (Shortliffe, 1976) usando sistemas expertos, suelen ser de tipo ascendente porque parten de los síntomas para establecer las hipótesis del tipo de enfermedad. En cambio, otros sistemas del tipo de interpretación del lenguaje natural (Erman y otros, 1980), o de interpretación de escenas exteriores (Hanson y Riseman, 1978) hacen preciso el uso de estrategias generales de gobierno más flexibles. Así en la interpretación del lenguaje general se han utilizado estructuras de pizarra, o en la interpretación de escenas exteriores estrategias heterárquicas. Actualmente la tendencia es mezclar algunas de estas dos últimas para resolver problemas concretos. El problema aparece en el momento de seleccionar una de ellas en sistemas multiexpertos. En la siguiente sección comentaremos más en detalle este apartado.

Finalmente está el problema de la validación de un sistema multiexperto puesto que a medida que se aumenta la complejidad resulta más difícil esta tarea. La experiencia obtenida a lo largo de los años, hace patente la necesidad de plantear los sistemas de la forma más modular posible y así, poder aislar cada parte del sistema e investigarlo individualmente. Esto no es posible en algunos casos, pero al menos permite tratar los

sistemas dentro de márgenes razonables. Por ejemplo, en la interpretación de escenas del sistema ACRONYM (Brooks, 1981), cada una de las tareas es independiente del resto.

### 3 Tipos de representación y control general

Los tipos de representación más comunes de información simbólica en sistemas expertos pueden resumirse en : lógica de predicados de primer orden, sistemas basados en reglas, redes semánticas y marcos ("frames")(Barr and Feigenbaum, 1982). A estos hay que añadirles todos los de representación específica, por ejemplo, para describir la información geométrica de un objeto se puede usar la representación CSG (Constructive solid geometry)(Goos y Hartmanis, 1980). Dependiendo del tipo de problema hay representaciones más acordes que otras.

En lo que hace referencia a las representaciones de información simbólica, existen preferencias en función del problema al que se dirijan. Una de las representaciones más completas es la basada en la lógica de predicados de primer orden (Nilsson,1980), que presenta como ventaja su generalidad y "complitud" en cuando al razonamiento. Esta técnica de representación permite incluir información declarativa (fundamentalmente de "hechos") e información procedural mediante la inclusión de como proceder en el flujo (o control) del razonamiento. Además gran parte de las otras representaciones no son más que un caso particular de esta. La desventaja de esta representación reside en que su utilización en cuanto a razonamiento es, en general, co-NP-completo, es decir que tiene una complejidad en tiempo de orden exponencial. Debido a esta restricción, se ha reducido su utilización a problemas que requieran razonamiento lógico en una base de datos reducida o en base de datos híbridas.

Los sistemas basados en reglas no son más que una versión restringida de las basadas en lógica de predicados, pero que por su sencillez son enormemente útiles en problemas en donde el conocimiento sea de tipo declarativo, y en los que los datos o las reglas incorporan información imprecisa. Para ello separa la base de conocimientos del control, incluyendo en este último la metodología de razonamiento con incertidum-

bre. Esta representación es muy útil cuando se dispone de información declarativa y el conocimiento no está estructurado, pero no es muy aconsejable, por ejemplo, en la descripción física de objetos. Por su enorme sencillez es esta una de las representaciones más usadas, aunque normalmente su estructura práctica no suele ser pura, sino más bien un sistema híbrido entre sistema de producciones y sistema secuencial.

Las redes semánticas surgieron del estudio de memorias asociativas y ha venido a ser una de las representaciones más potentes que se disponen por varias razones, entre las que se encuentra la facilidad de interconectar información conceptual a diferentes niveles y poder razonar a través de ella, la incorporación del tiempo (Brachman y Levesque, 1985), y los atributos específicos en cada concepto. Además las redes semánticas permiten agrupar grupos de conceptos que describen declarativamente el espacio de los cuantificadores universales. Las redes semánticas son fundamentalmente apropiadas para describir conceptos que estén relacionados, por ejemplo la descripción de navíos o la descripción del sistema cardiovascular.

Los marcos pueden considerarse como un caso específico de redes semánticas, aunque algunos autores prefieren distinguir ambas representaciones. En un principio los marcos (frames) agrupan información de un concepto a través de la descripción de sus partes; y se conectan a otros marcos por medio de los registros (slots). En sí la representación global es de tipo de red semántica aunque las formas de razonamiento difieren. Los marcos son muy útiles para describir estructuras o conceptos relacionados.

Cada una de estas representaciones está mejor orientada a ciertos tipos de representación del conocimiento, sobre todo en cuanto al razonamiento a través del conocimiento. Esto lleva consigo que en sistemas multiexpertos no sea factible utilizar una única base de representación del conocimiento y sea necesario aprovechar las ventajas de algunas de estas representaciones, aunque siempre tratando de minimizar las representaciones para reducir los problemas de coherencia e integridad de los datos.

El control global de un sistema es otro de los elementos básicos en la estructura de un sistema multiexperto, porque de él depende como se va a gobernar el flujo de información del sistema. Existen en la actualidad, fundamentalmente cuatro tipos de control global denominados ascendente, descendente, heterárquico y de pizarra. El ascendente o guiado por los datos, está orientado a tareas en las que se parte de la

hipótesis que su resolución puede ser conseguida de una sola vez a partir de los datos que se disponen. Así por ejemplo, en problemas de diagnóstico automático, si se puede relacionar unívocamente los síntomas con la enfermedad, un sistema con control ascendente es suficiente para diagnosticar la enfermedad. El problema reside en que a menudo no existe una relación unívoca entre los síntomas y la enfermedad, ya sea por que solo se dispone de información parcial o por la imprecisión de los datos.

El control de tipo descendente parte de los objetivos y trata de imponerlos en los datos, tanto sea para verificar su existencia como para guiar y obtener la información necesaria. Por ejemplo en problemas de ayuda son de enorme utilidad, así en la concesión de créditos personales, el sistema puede guiar al cliente por medio de preguntas que no son más que los datos que precisa para llegar a la meta. Este tipo de control es útil cuando se quiere guiar la búsqueda a partir de los datos del objetivo, así como en sistemas de verificación de datos.

El control de tipo heterárquico es una combinación de un control de tipo ascendente y otro descendente, conjugando las ventajas de ambos métodos. Es decir, una parte del sistema actúa de forma ascendente y la otra descendente, aunque en algunos casos pueden estar integradas ambas estructuras. Este tipo de control es uno de los más usados en los sistemas actuales debido a que en la mayoría de ellos hay partes conocidas a priori y que pueden ser gobernadas a partir de los datos y otras a partir de los objetivos. Un ejemplo de estas últimas, son los sistemas de visión por computador donde el paradigma de "hipótesis-verificación" utilizado para reconocer e interpretar una escena, se amolda adecuadamente a esta estructura de control.

Siempre y cuando la estrategia de resolución de un sistema se conozca a priori y no sea necesario modificarla en el funcionamiento del sistema, los tipos de control global descritos son suficientes para gobernar un sistema de cualquier tipo de complejidad conjugando además la máxima eficiencia del sistema. Ahora bien, si el sistema necesita cambiar su estrategia de funcionamiento en función de los resultados obtenidos por especialistas del sistema, por ejemplo en la interpretación del habla, entonces es más adecuado utilizar una estructura de control de pizarra. Este tipo de control se basa en el principio, que diversos especialistas actúan independientemente sobre el mismo problema y plantean su resolución al coordinador general. Éste, en función de los

resultados de cada especialista decide quién y cuando tiene que actuar sobre el sistema. Por ejemplo en un sistema de visión por computador, diversos especialistas en el reconocimiento de escenas (el de reconocimiento de árboles, o el de carreteras para escenas al exterior), pueden informar al coordinador de sus interpretaciones parciales y este decide quién tiene que continuar la búsqueda. Esta estructura de control es muy útil en sistemas de interpretación, aunque presenta el inconveniente del enorme tiempo de proceso, ya que cada especialista actúa de forma independiente.

## 4 El sistema PIRS

Un sistema multiexperto dedicado a la interpretación de escenas 3D a partir de varias fuentes de percepción (denominado PIRS), que se está construyendo en el Instituto de Cibernética, plantea varios de los problemas generales de integración y complejidad enumerados previamente. Los objetivos del sistema se pueden resumir en :

- Identificar los objetos de una escena de tipo industrial.
- Verificar los cambios acontecidos en una escena en tareas de supervisión.
- Identificar un objeto dentro de la escena.
- Adquirir (aprender) nuevas piezas por medio de visión por computador y de un sistema CAD.
- Predecir y razonar con la información de diversos sensores.

En la actualidad se está trabajando en el primero de estos objetivos.

### 4.1 Descripción

El sistema se basa en varios paradigmas, el de "hipótesis-verificación", el de "concentrar la búsqueda" y el de "predecir información", todos orientados a controlar y reducir la búsqueda en la escena. El primer paradigma es de nivel general en cuanto no se

dispone de información a priori de los objetos subyacentes en la escena. Su forma de funcionamiento consiste en emitir hipótesis sobre los posibles objetos que intervienen en la escena después de las etapas de adquisición, tratamiento y obtención de características, y verificarlos hasta interpretar la escena. Esta estrategia general ha sido utilizada previamente por otros autores en sistemas de interpretación de escenas entre los que destaca el ACRONYM (Brooks, 1980), y el VISIONS (Hanson y Riseman, 1978).

El paradigma de "concentrar la búsqueda" es de tipo local en cuanto que se restringe su actuación a las etapas de verificación y predicción, y su meta es reducir la búsqueda concentrándose únicamente en aquellos aspectos que lo requieran. Este paradigma es también muy conocido y cada vez más usado en los sistemas de interpretación para eliminar la búsqueda explosiva. El tercer paradigma, "predecir información" tiene carácter general y está orientado como el predecesor a reducir la búsqueda cuando se dispone de información a priori o cuando no se tienen hipótesis válidas de interpretación. Este paradigma se ha usado en pocos modelos de interpretación, por ejemplo en el ACRONYM, pero con una estructura restringida.

El esquema genérico de funcionamiento del PIRS, puede verse en la Fig.1, en donde se detallan diversos componentes de las dos etapas diferenciadas: la de obtención de datos de la escena (guiada por los datos) y la de interpretación. Su estructura de control es de tipo mixto heterárquico y de pizarra, la primera para el conjunto de actuación del sistema y la segunda para controlar la interpretación. La etapa guiada por los datos está constituida por los procesos que se realizan sobre la escena hasta extraer la información básica de los objetos y de la escena. En esta etapa intervienen entre otros, procesos de filtrado, detección de bordes, obtención de regiones, extracción del contorno exterior y obtención de características primarias que servirán en la elaboración de las hipótesis iniciales. La obtención de características puede ser de dos tipos: una genérica en donde se extraen características fijas, y otra específica que depende de las peticiones de la etapa de interpretación.

A partir de estos datos se entra en la etapa de interpretación, en donde pueden intervenir los módulos de clasificación, verificación y predicción. En función de estos y de los extraídos en la etapa guiada por los datos, se realizan las hipótesis iniciales

(los objetos candidatos que están en la escena) y para cada una de ellas se obtiene la posición y orientación de cada uno de los modelos reconocidos. Si el proceso ya está en fase de interpretación se puede obtener de la primera etapa únicamente información concierne a un aspecto concreto, por ejemplo la obtención de una arista en una zona de la escena.

.Ya que de todas las hipótesis solo algunas pueden ser ciertas, la fase de clasificación inicia una serie de procesos con un doble objetivo. Por un lado, averigua el grado de certeza de que el objeto pueda ser alguno de los modelos seleccionados, y por otro, extrae información de lo que no se ha encontrado en la escena pero que debería estar para que fuese el modelo seleccionado. Con la información suministrada por el clasificador se pasa a la fase de verificación en donde se trata de completar la información del objeto en lo que respecta a la clasificación, es decir se busca a través de las características obtenidas o examinando de nuevo la escena aquellos datos que faltan. Por ejemplo, si en la imagen se ha perdido una arista, a través del conocimiento de los planos que la generan puede comprobarse su existencia. En caso que ninguna de las hipótesis haya obtenido el grado de certeza suficiente para poder pasar esta fase, entonces debe actuar el predictor para obtener las hipótesis pausibles.

El módulo de verificación está basado en una serie de razonadores orientados a inferir información de la estructura (razonador geométrico), de la propiedades físicas (razonador simbólico y sobre las características físicas), de las relaciones objeto-entorno y de las relación objeto-dominio (razonador simbólico). Una de las aplicaciones de este último son en tareas de supervisión por ejemplo, en donde es más importante encontrar alguna característica determinante que tratar de razonar sobre la estructura geométrica del objeto. En la Fig. 2, se muestran algunos de los razonadores y planificadores utilizados en esta fase, en la que los planificadores tienen por misión, reducir y ordenar la búsqueda, y redistribuir las tareas en función de los recursos disponibles y de las estrategias generales consideradas.

El módulo de predicción (predictor) está detinado reducir el tiempo de búsqueda en una escena cuando se conoce a priori los objetos que la componen, alguna característica destacable o relaciones objeto-entorno o objeto-dominio. En este caso, el predictor trata de hallar los elementos necesarios para reducir la búsqueda, razonando con la estructura

geométrica, física del objeto y con la simbólica (etapas similares a la del verificador), y teniendo en cuenta los recursos disponibles y las estrategias generales consideradas. La información del predictor es por ejemplo, la forma de guiar la segmentación, que características hay que tomar en cuenta en la clasificación y como hay que realizar la verificación. Todo ello permite a priori gobernar la extracción y reconocimiento de los objetos de una escena.

Estas tres fases están gobernadas por el interpretador a través de un sistema multi-experto que explicaremos a continuación.

## 4.2 Representación y control

El sistema PIRS planteó la necesidad de tomar en cuenta un sistema de representación y control que permitiera tener diferentes tipos de datos y de técnicas. Por ejemplo, en el sistema se agrupan tanto técnicas algorítmicas como no algorítmicas, es decir técnicas de clasificación puramente basadas en la metodología de reconocimiento de formas y técnicas de sistemas expertos basadas en metodología de inteligencia artificial (en la Fig. 3 se muestran las funciones del interpretador en relación a la base de conocimientos). Por lo que respecta a representación, tanto hay datos de tipo geométrico como las reglas necesarias que regulan las relaciones objeto-dominio.

Haciendo balance de la heterogeneidad del sistema y tomando en cuenta lo expuesto en el apartado 3, se ha diseñado el sistema con estrategia general de estructura heterárquica y dentro del interpretador con estructura mixta, heterárquica y de pizarra (Hayes-Roth, 1985). La estrategia heterárquica viene motivada por la problemática propia de los sistemas de visión. Por un lado es necesario poder actuar sin información a priori, es decir, a partir de los datos de la imagen hay que reconocer los objetos que la componen utilizando únicamente los datos de la propia imagen, lo que es un proceso típicamente ascendente. Por otro lado, una vez se dispone de esta información, hay que analizarla a partir de los modelos de referencia. Esta tarea puede hacerse de forma ascendente como un proceso de reconocimiento de formas, siempre y cuando se conozca en profundidad toda la información de la escenas y las relaciones entorno-objeto y dominio-objeto, pero en general para sistemas de gran flexibilidad

como el PIRS, no se parte de dicha información con lo que esta tarea debe realizarse de forma descendente y con estructura en pizarra.

La estructura mixta del interpretador es consecuencia de la interacción entre los tres módulos, el clasificador, el verificador y el predictor. Según el tipo de información que se disponga en la escena, el sistema estará más o menos guiado por el interpretador, es decir si de la escena no se dispone de información a priori y las hipótesis iniciales avalan una interpretación rápida, entonces el sistema actuará de forma descendente guiada por el interpretador. En caso contrario, si bien se dispone de información a priori o las hipótesis iniciales no son suficientemente clarificadoras, entonces cada uno de los módulos actuará de forma independiente, indicando al interpretador las acciones que tomarían en cada caso, siendo este último el árbitro y conductor de la secuencia de operaciones a realizar.

Existen diferentes formas de comunicar estos procesos en lo que se refiere a las bases de datos intermedias. Amenudo, esta interrelación se hace a través de varias bases de datos intermedias, cada una con su propia estructura, pero esta técnica presenta problemas en cuanto es necesario que el interpretador tenga acceso a gran parte de las hipótesis que se vayan generando. Por ello se ha construido una estructura en agendas que presenta diversas ventajas (Hayes-Roth, 1985). La estructura en agendas puede verse en la Fig. 5. Cada una de estas agendas contiene mensajes codificados según :

*Numero/Tipo - de - mensaje/Estado/Datos*

El "Número" es una cifra correlativa que identifica a un mensaje, el "Tipo-de-mensaje" indica como hay que leer la información que dispone este mensaje, el "Estado", en que situación se encuentra esta información (si ha sido o no utilizada, etc...) y los "Datos", la información propia del mensaje. Los mensajes son leídos y grabados por cada uno de los procesos principales. Así por ejemplo, una vez se han extraído las características de la imagen (las regiones, el contorno exterior, la descripción por rectas, etc...) estas son enviadas a una agenda en forma de mensaje. Esta estructura de agenda facilita enormemente las tareas de comunicación entre procesos y da flexibilidad al sistema.

El interpretador es el módulo principal que controla a los demás procesos, el clasificador, el verificador y el predictor. Para ello cuenta con una estructura de sistema de producciones, combinando conocimientos propios de gobierno y de interpretación. En él están las estrategias generales de interpretación, la guía de los procesos dentro de cada una de las estrategias, y la forma de como conjugar los diferentes recursos. El interpretador es en sí, un sistema experto que activa a los procesos de clasificación, verificación y predicción, y que decide la actuación de ellos en función del estado de la interpretación.

El clasificador realiza dos procesos uno el de obtención de las hipótesis primarias y otro de obtención de la medida de similitud (Sanfeliu, 1984) entre cada objeto de la imagen y los modelos seleccionados inicialmente. Ambos procesos tienen estructura algorítmica. El analizador tiene una doble misión, por un lado calcula la medida de similitud entre el objeto encontrado y el modelo, y por otro envía a la agenda la parte de la estructura que no ha encontrado en el análisis. Por ejemplo, si falta una superficie, el clasificador envía a la agenda información sobre esta superficie y a su vez los valores de clasificación. Este módulo está estructurado en forma algorítmica, y hace uso de información orientada al reconocimiento de objetos.

El verificador se basa en una estructura diferente. Su base de control es un sistema de producciones que gobierna los subprocesos de razonamiento y planificación a partir de la información de la agenda y de la guía del interpretador. Los subprocesos de razonamiento tienen estructuras diversas: el razonador geométrico presenta una estructura de sistema de producciones y su razonamiento es de tipo algebraico; el razonador geométrico-físico, por un lado, presenta estructura de sistema de producciones y por otra de red semántica en donde está toda la información concerniente al objeto; y el razonador simbólico, que es el que tiene la misión de razonar con el objeto-entorno, el objeto-dominio y los objeto-sensores, presenta una estructura de sistema de producciones. Cada razonador tiene integrado un planificador que reduce y ordena la búsqueda. El predictor se basa en una estructura similar a la del verificador.

La base de conocimientos del sistema global está constituida por diversos tipos de representación debido a la diversidad de información necesaria (Fig.4). Los objetos están descritos por un lado por una base de datos de "fronteras" (Goos y Hartmanis,

1980), destinada al diseño de la pieza y a su representación, y por otro por una red semántica (Fig.6) en donde se relacionan las propiedades geométricas con las físicas, así como las escenas con los objetos. Esta red semántica tiene sus nodos definidos como marcos en los que en los registros están las propiedades geométricas y físicas. Las relaciones entre los nodos son de diversos tipos como por ejemplo "Parte de". Dentro de esta red, las relaciones entre superficies están descritas por gramáticas arbol-grafo (Sanfeliu y Fu, 1982), lo que permite realizar la medida de similitud entre el objeto y el modelo según el algoritmo descrito en (Sanfeliu, 1984).

Las relaciones objeto-entorno, objeto-dominio, de los sensores y de las estrategias, están representados según representaciones de sistema de producciones, habiendo diferentes bases de datos. La información de los sensores no solo describe las características entre ellos sino que además va a permitir razonar en la estructura del objeto según el sensor que se utilice, es decir incorpora información de que reglas deben aplicarse para transformar los objetos en las partes percibidas. Este último punto es de gran utilidad para que el predictor y el verificador puedan dirigir la búsqueda sin tener que hacer transformaciones posteriores y sin tener que basarse en una base de datos específica.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se presentan dos problemas importantes en cuanto a la realización de sistemas multiexpertos, la representación y el control, que determinan su complejidad y dificultad de integración. La representación es uno de los problemas básicos en cuanto a la eficiencia de razonamiento y funcionamiento, la flexibilidad en modificar y estructurar información, y suele ser uno de los elementos esenciales en lo que se refiere a la versatilidad del sistema en diferentes entornos y dominios de aplicación. Por otro lado, el control es el elemento que determina el funcionamiento del sistema y la base de su comportamiento "inteligente", es decir que permita resolver situaciones no previstas inicialmente.

En este trabajo se presenta la resolución de un sistema multiexperto orientado a la interpretación de escenas a partir de sensores. En él se abordan los problemas de representación por medio de la elección de dos tipos de estructuras de tipo simbólico,

una red semántica y una basada en reglas, y una de tipo geométrico (de fronteras) para representar los objetos. Estas representaciones se conjugan gracias a la utilización de especialistas que permiten obtener información de cada una de ellas. En lo que se refiere al control se ha elegido una estructura híbrida que combina una heterárquica y otra de pizarra. La primera se usa para gobernar el conjunto, y entre las dos para gobernar al interpretador y a sus módulos integrantes. Esta combinación va a permitir dotar al sistema de un alto grado de versatilidad.

## 6 Referencias

- Barr A. and Feigenbaum E.A. The handbook of artificial intelligence. *Pitman Books Limited, 1982.*
- Brachman R.J. and Levesque H.J. Readings in knowlegde representation. *Morgan Kaufmann Publ., Inc., Los Altos, 1985.*
- Brooks R.A. Symbolic reasoning among 3D models and 2D images. *In Computer Vision (J.M.Brady ed.), North Holland, Amsterdam, New York, 1981.*
- Erman L.D., Hayes-Roth F., Lesser V.R. and Reddy D.R. The Hearsay-II speech understanding system: Integrating knowlegde to resolve uncertainty. *Computing Surveys 12, 1980, pp.213-253.*
- Goos G. and Hartmanis J. Computer aided design modelling, systems engineering, CAD-systems. *In Lecture Notes in Computer Science n. 89, Springer-Verlag, New York, 1980.*
- Hanson A.R. and Riseman E.M. Segmentation of natural scenes. *In Computer Vision Systems (A.R. Hanson and E.M. Riseman), Academic Press, New York, 1978.*
- Hayes-Roth B. A blackboard architecture for control. *Artificial Intelligence 26, 1985, pp.251-321.*

- Kowalski T.J. and Thomas D.E. The VSLI design automation assistant: an IBM system/370 design. *IEEE Design and Test*, vol.1, n. 1, Feb. 1984.
- Sanfeliu A. A distance measure based on tree-graph-grammars: A way of recognizing hidden and deformed 3D complex objects. *7th Int. Conference on Pattern Recognition, Montreal, Canada, July 30-Aug. 2, 1984.*
- Sanfeliu A. PIRS: Sistema de percepción interpretación para robótica. *Informe interno Instituto de Cibernética, 1986.*
- Sanfeliu A. and Fu K.S. Tree graph grammars for pattern recognition. *In Lecture Notes in Computer Science n. 153, Graph-Grammars and Their Application to Computer Science (Ehrig H, Nagl M., and Rozenberg G. eds.) Springer-Verlag, New York, 1983, pp. 349-368.*
- Shortliffe E.H. Computer-based medical consultations: MYCIN. *Elsevier-North Holland, New York, 1976.*
- Vesonder G.T., Stolfo S.J., Zielinski J.E., Miller F.D. and Copp D.H. ACE: an expert system for telephone cable maintenance. *Proc. 8th IJCAI, 1983, pp.116-121.*

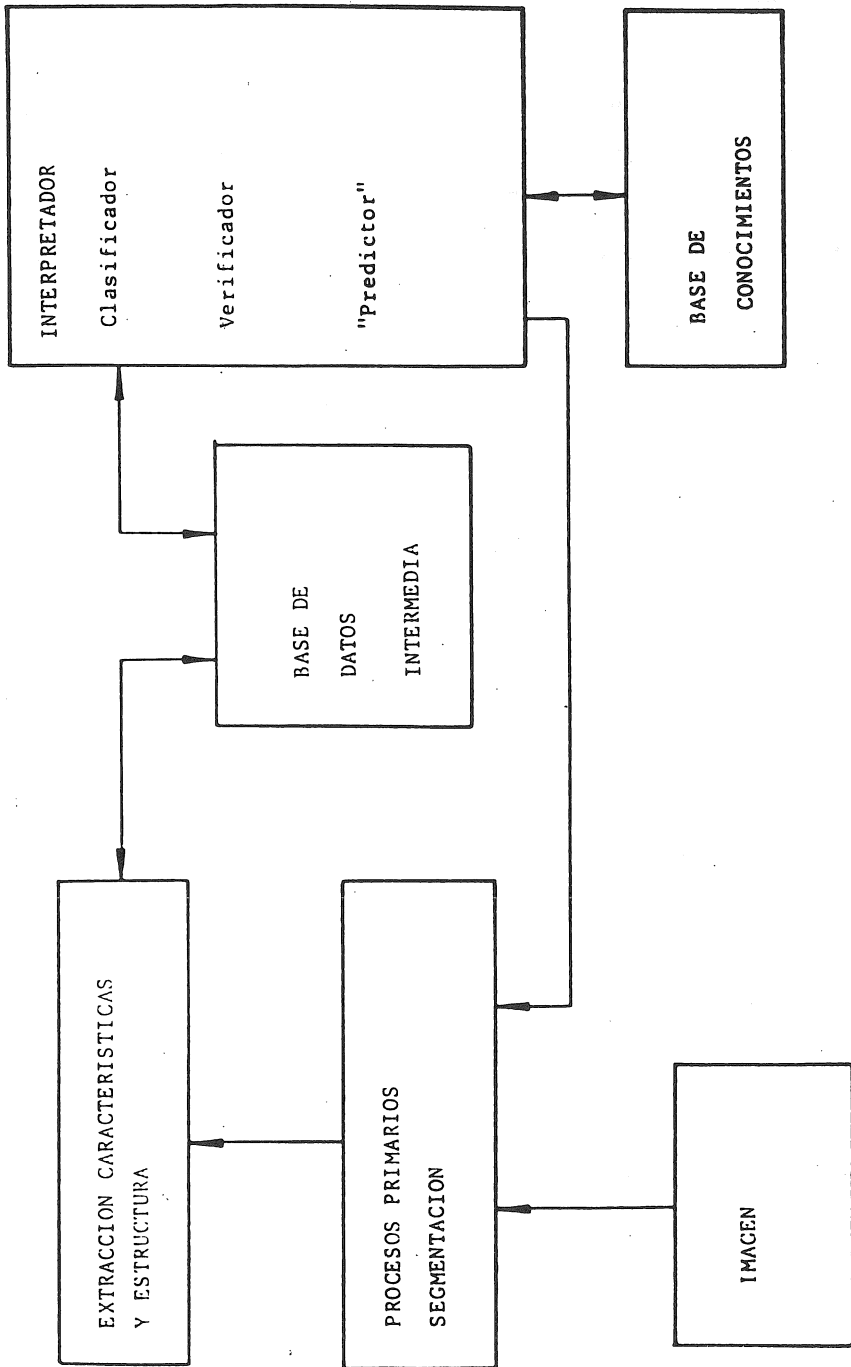


Fig. 1 - Diagrama global del sistema PIRS

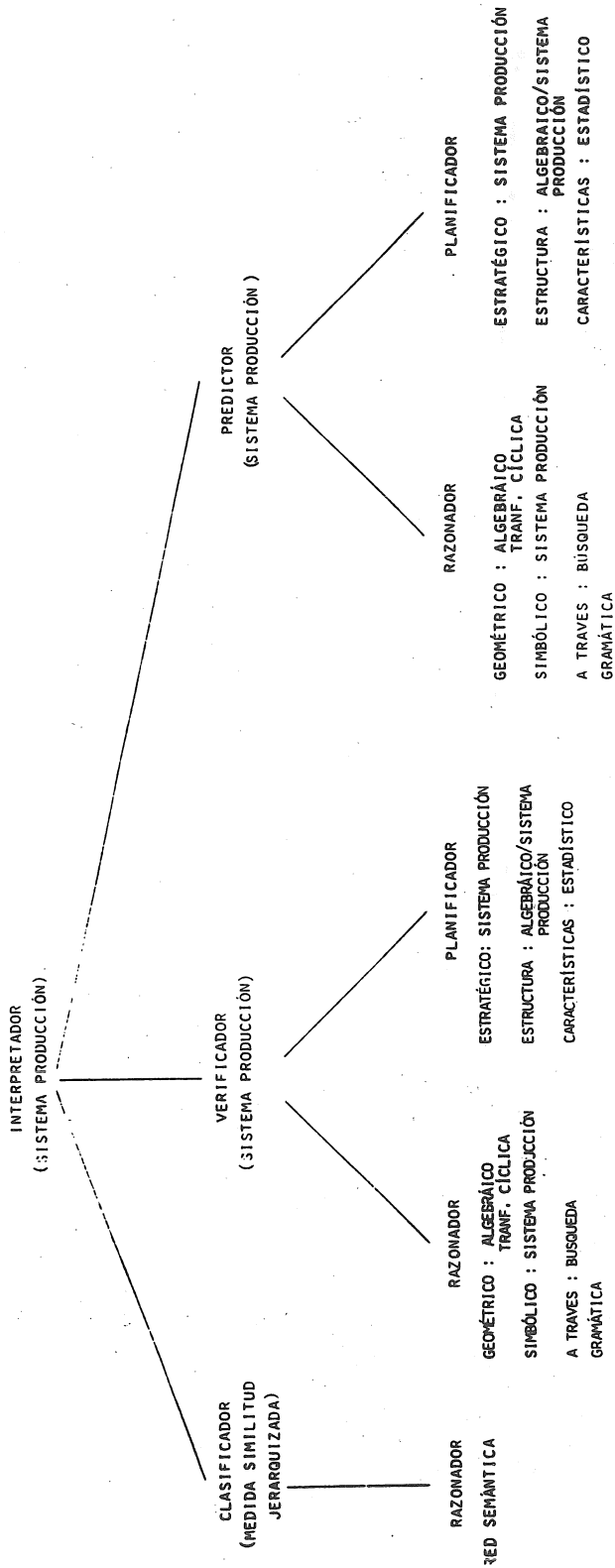


Fig. 2 - TÉCNICAS UTILIZADAS EN CADA MÓDULO

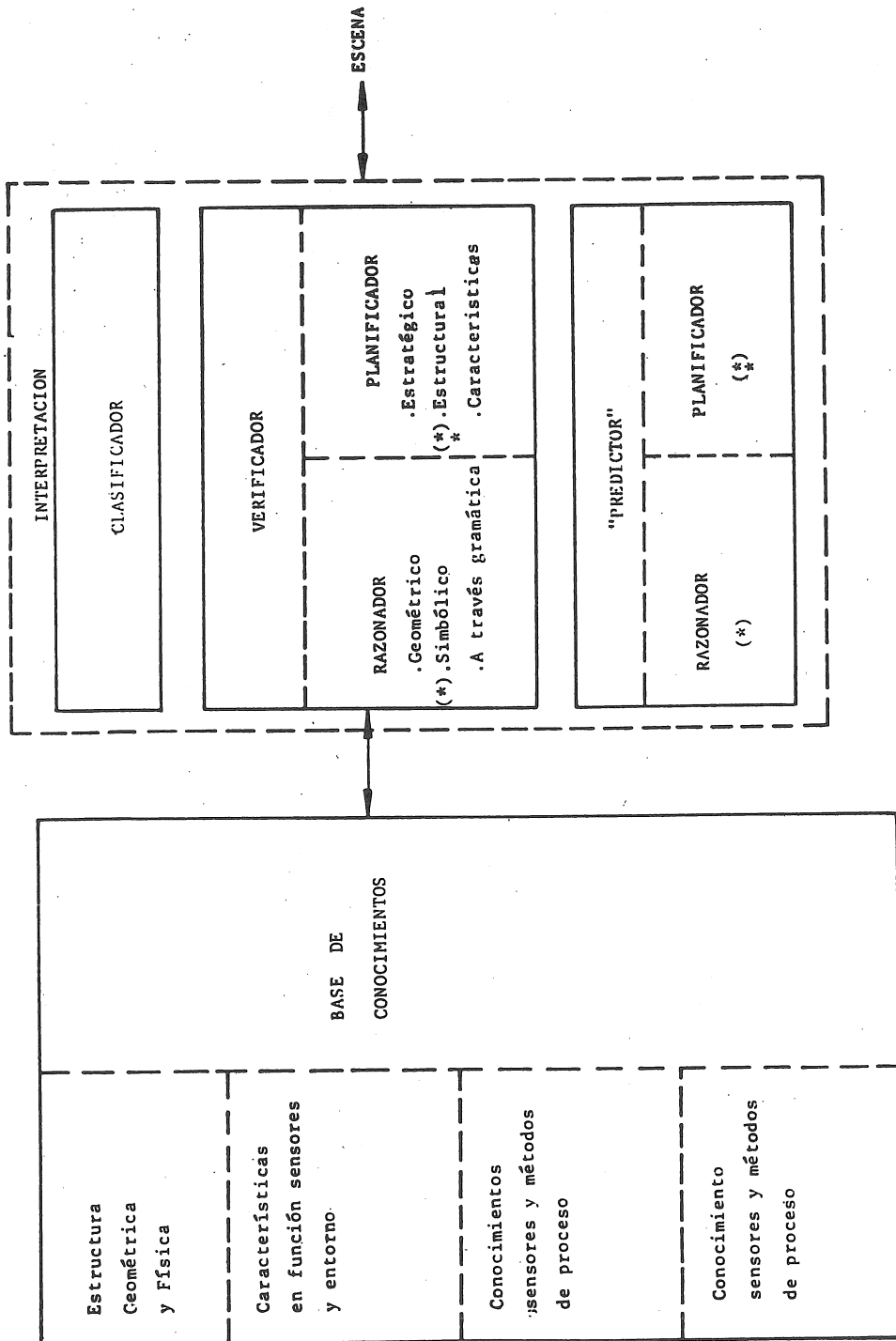


Fig. 3 - Conjunto interpretador - base de conocimientos

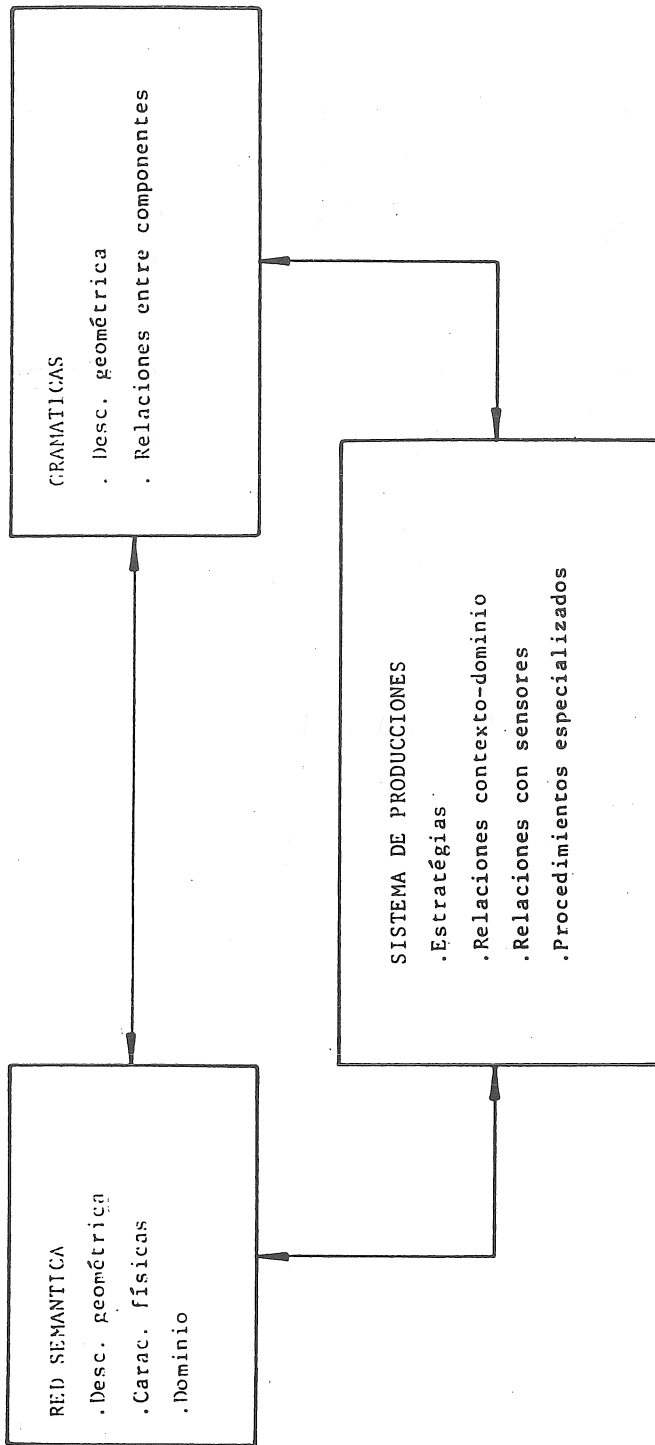


Fig. 4 - Diversas interpretaciones usadas en la base de conocimientos

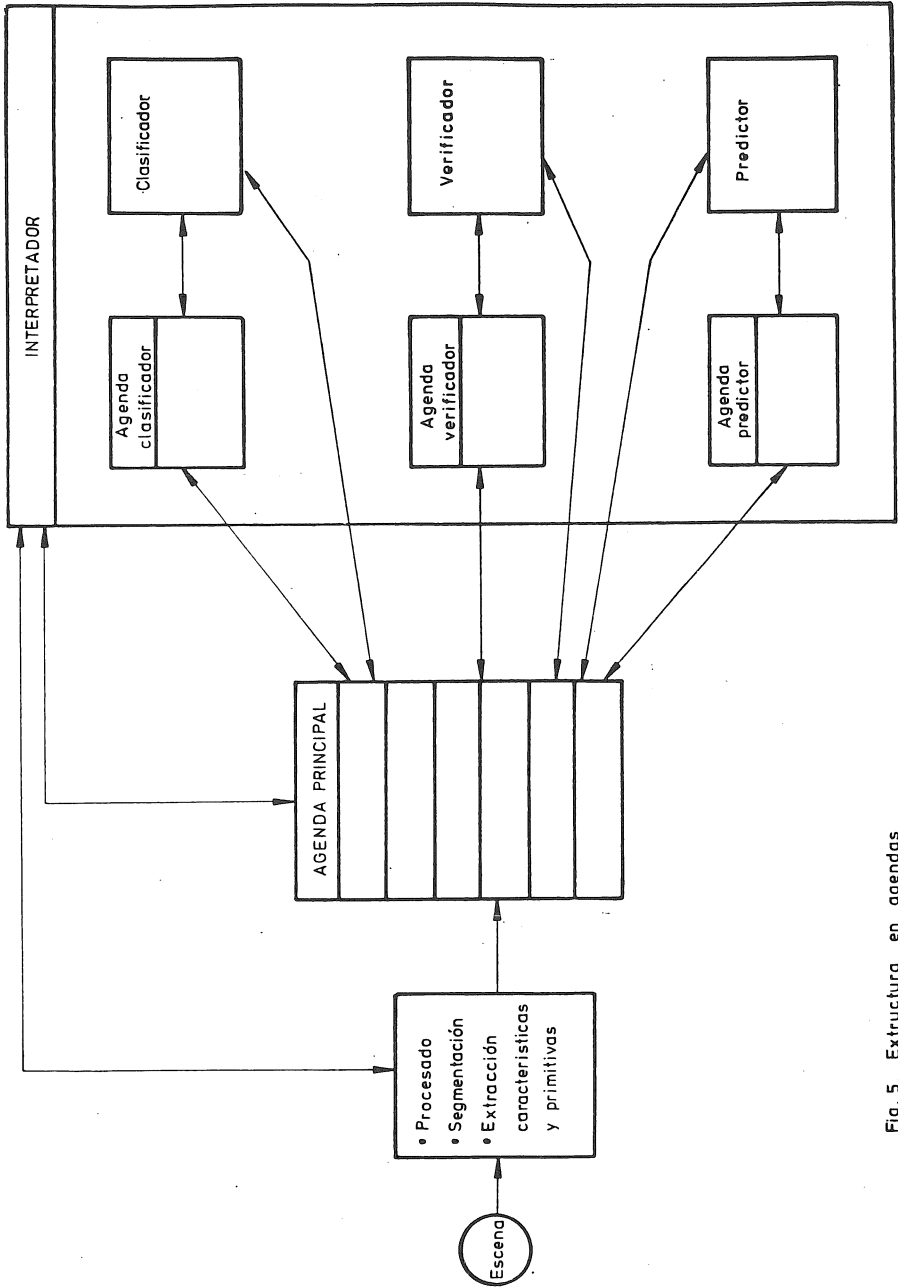


Fig. 5. Estructura en agendas

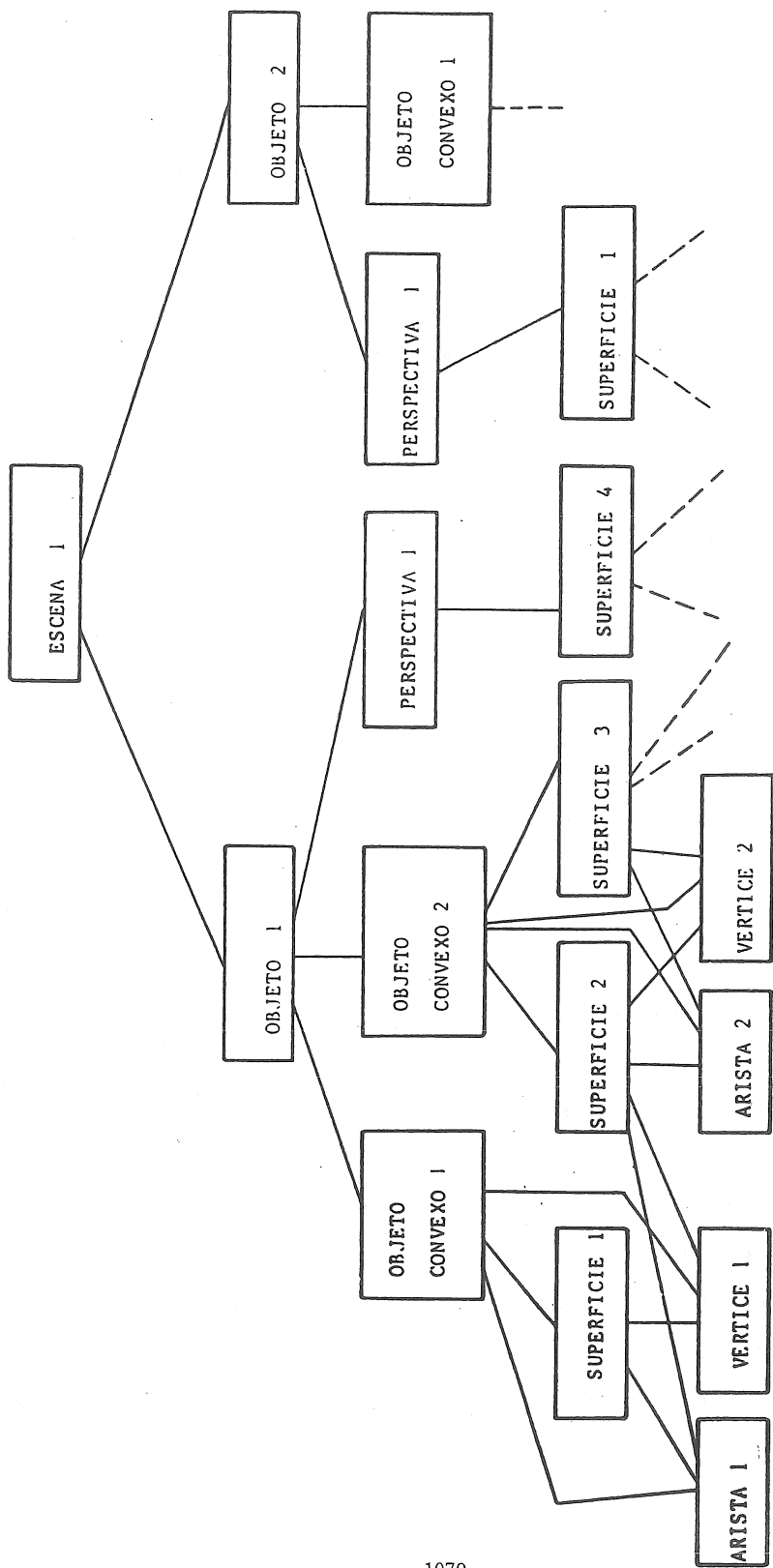


Fig. 6 - Vista parcial de la red semántica