

Capítulo 6:

SISTEMAS EXPERTOS DE ASISTENCIA EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS

En este capítulo se presentan los conceptos básicos en los que se mueve la inteligencia artificial y, más en concreto, los sistemas expertos. Posteriormente se hace un estudio del arte de sistemas expertos aplicados al diseño estructural y, finalmente, se formula una propuesta de un sistema general de diseño asistido aprovechando la información de la sensibilidad y la inteligencia artificial.

6.1 GENERALIDADES

Es indudable que los ordenadores han revolucionado la concepción del diseño en la ingeniería y términos como CAD (Computer Aided Design) o CAE (Computer Aided Engineering) están hoy en día en boca de todos los proyectistas. La creación de diseños innovadores va ligada a la mejora en las facilidades gráficas de los ordenadores y a una interacción más cómoda y simple con las máquinas. También las técnicas de análisis han mejorado mucho, y hoy en día es posible simular el comportamiento de sistemas estructurales muy complejos, e incluso llegar a optimizarlos. Pero se debería ser crítico con ciertas terminologías, por ejemplo, ¿qué se entiende por asistencia en el diseño?. Nótese que por el momento el concepto de asistencia se reduce a que el ordenador haga el trabajo pesado a mayor velocidad y esto representa una gran ayuda, pero: ¿Es asistencia *real*? Ahora piénsese en un problema optimizado, donde el ordenador suministra *la mejor* estructura. Esto sí parece una asistencia, pero, ¿es realmente la solución óptima, la mejor solución? Parece claro que será óptima respecto a ciertas condiciones y, posiblemente, en detrimento de otras, con lo cual el concepto de optimización será siempre algo relativo. Por tanto, lógicamente, su asistencia también será relativa.

Es del dominio común que la experiencia es la más importante fuente de creatividad productiva, entendiéndose por este concepto la creación realizable en ingeniería. Pero en los ingenieros jóvenes es una cualidad que escasea debido a la falta de formación práctica. Por ello, con las herramientas actuales este grupo de profesionales sufre un doble bloqueo: por un lado el CAD no les es útil porque se limita a obedecer órdenes y, por otro, la inexperiencia les puede conducir a un exceso de confianza en los diseños óptimos que suministre la máquina y, en consecuencia, es posible que se den por buenas algunas soluciones que luego serán irrealizables o presentarán graves patologías con el paso del tiempo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones sobre algunos de los problemas que existen en el diseño estructural actual se definirá el concepto de *asistencia verdadera*. En definitiva, se pretende que después de una sesión de trabajo, el ingeniero esté en condiciones de tomar decisiones con conocimiento de causa. No porque sea la única idea que se le ha ocurrido, o porque sea la única respuesta óptima que le ha dado el ordenador, sino porque tendrá poderosas razones para considerar su elección como la que le satisface.

6.2 EVOLUCIÓN DE LA CONCEPCIÓN DEL DISEÑO POR ORDENADOR

Brevemente y de forma ilustrativa se repasarán las distintas aportaciones sobre el concepto de diseño en ingeniería, la búsqueda de autores no puede calificarse de exhaustiva, pero sí de representativa de las tendencias de cada época.

En la década de los 70 se consideraba que el proceso de diseño en ingeniería contenía las siguientes fases, según Wolberg (1971) [W1]:

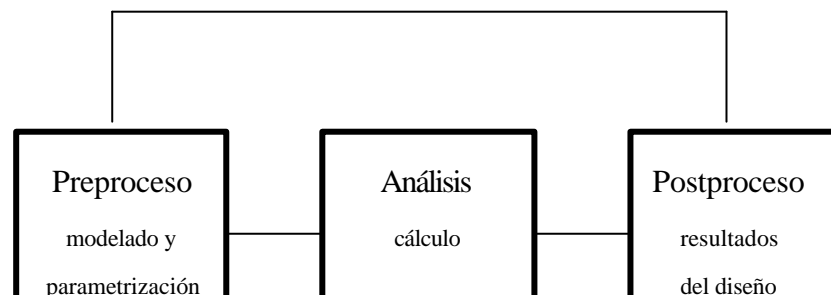
1. **Diseño conceptual:** Definición del problema e intento de dar una solución.
2. **Análisis:** Aplicación de los principios de ingeniería para resolver el problema, definición de un modelo matemático y de cálculo.
3. **Diseño detallado:** Definición de los dibujos y especificaciones.
4. **Construcción de un prototipo:** En muchos proyectos es necesario construir un modelo para confirmar que cumple las especificaciones.
5. **Ensayos:** Probar el prototipo.
6. **Rediseño:** En caso de que las pruebas no confirmen las expectativas del prototipo.

Este proceso no siempre es así, y dependiendo del tipo de problema con que se enfrente el ingeniero alguna de las fases puede que no se ejecute. Por ejemplo, dado el coste elevado que suele tener la confección de prototipos y su posterior ensayo, su utilización sólo estará justificada si no existe confianza en la fase de análisis. De todas maneras, aquello que se pretende resaltar es el hecho que en la fase 2, la de análisis, se van a realizar una gran cantidad de cálculos. *'The classical approach to engineering has been to treat each component as a separate design problem with only a loose connection to the overall system.[...] The modern approach to engineering design is to treat larger groupings of components as a single design project.'* [W1]. Con el objetivo de resolver los diseños como un conjunto, y no a partir de simplificaciones groseras, surge la primera aplicación de los ordenadores y de las nuevas técnicas numéricas. Por lo tanto, se intenta atacar la resolución de problemas que hasta aquel entonces no habían podido ser abordados. Asociadas a las posibilidades de cálculo y recálculo aparece como factible la vieja obsesión del hombre por

optimizar. 'A basic objective of engineering analysis is to provide information which allows the engineer to select the optimum combination of parameters (i.e. dimensions, operating conditions, etc.) for a specific design project' [W1] Sin embargo, aunque el problema matemático de la optimización ya está definido aún le falta un largo camino por recorrer hasta llegar a alguna solución numérica razonable. Además, en esa época, los modelos de análisis como los elementos finitos están en su génesis y las prestaciones de los ordenadores aún son muy limitadas.

Uno de los grandes impulsos en los útiles de diseño se produjo a raíz de la mejora de las capacidades gráficas de los ordenadores y de una mayor amigabilidad en la interacción entre el hombre y la máquina. Rápidamente se generaron todo un conjunto de instrumentos de diseño asistido CAD (Computer Aided Design) y su aplicación práctica en el campo de la ingeniería se implementó conforme a tres bloques, según Brunet [B1](1986).

1. **Módulo de preproceso:** Se define interactivamente y con toda clase de facilidades gráficas la forma completa del objeto en el espacio.
2. **Módulo de proceso:** Se realizan los cálculos y las simulaciones a través de una metodología numérica de computación, por ejemplo, elementos finitos.
3. **Módulo de postproceso:** Se visualizan los resultados del análisis y se confeccionan prototipos CAM (Computer Aided Manufacturing).



De esta manera el proceso de diseño quedaría asistido por un software que realizaría las tareas más ingratas, como son el dibujo de complicados objetos o la visualización de cientos de datos procedentes de los módulos de análisis. Las exigencias de semejantes sistemas de dibujo para diseño serían, siguiendo a Garcés [G1]:

- **Interactividad:** El tiempo de respuesta debe ser el adecuado para que el usuario no tenga que esperar en exceso las modificaciones, permitir el control de la evolución del dibujo y la corrección inmediata. La interactividad va unida a la exigencia de unas condiciones mínimas de hardware y software.

- **Facilidad de manejo:** El tiempo de aprendizaje debe ser lo más corto posible, si se pueden evitar los cursos de formación y los manuales de ayuda, mejor. También se deben adoptar todas las herramientas de apoyo que puedan ayudar a un mejor funcionamiento del sistema (lápiz electrónico, tableta digitalizadora, etc.).
- **Capacidad de almacenamiento:** El sistema debe poder guardar gran diversidad de diseños.

Sin embargo, el sistema de CAD presenta un inconveniente, como señala Navarrina (1987)[N1], mejora la información para la toma de decisiones pero el usuario debe seguir basándose primordialmente en su intuición y experiencia a la hora de diseñar o rediseñar. De esa observación nació un nuevo concepto: el *diseño asistido óptimo*. Aprovechando que se siguieron desarrollando algoritmos numéricos para resolver satisfactoriamente el problema de la optimización con y sin restricciones, dicho autor consideró que el diseño asistido óptimo debía contener órganos de decisión automática o semiautomática que permitieran llegar a un diseño tan cercano al óptimo como fuera posible. En este caso la estructura del sistema sería más compleja y debería contener:

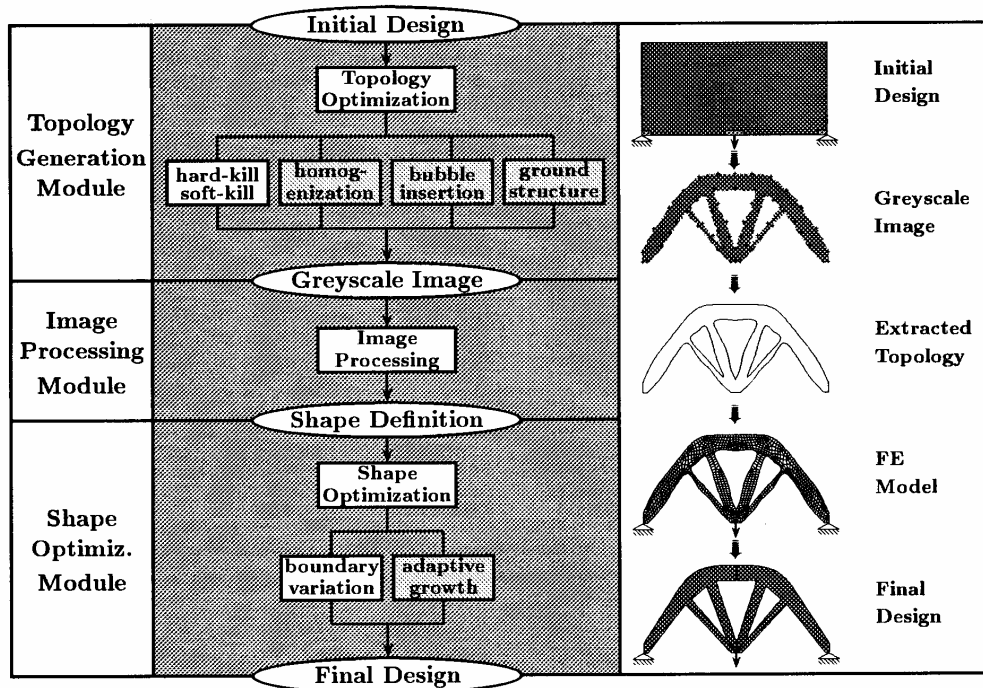
1. **Módulo de definición de objetivos y restricciones:** En esta fase se definiría conceptualmente respecto a qué se desea optimizar y con que restricciones para que los algoritmos de optimización pudieran tomar decisiones durante el proceso de cálculo.
2. **Módulo de parametrización:** Definiría la geometría del problema y las variables de diseño.
3. **Módulo de cálculo:** Realizaría el análisis.
4. **Módulo de decisión:** Contendría los algoritmos de optimización.
5. **Módulo de postproceso:** Visualización de resultados.
6. **Módulo de control:** Verificaría la bondad del diseño y decidiría sobre la posibilidad de un reanálisis.

Con un sistema de este tipo hay un acercamiento al viejo sueño del hombre, la solución óptima.

En el año 1986 Haftka *et al.* [H1] publican un artículo que pretende ser una visión general del diseño con elementos finitos en ingeniería en esa época, cuales son los resultados conseguidos y los retos de futuro. En ningún caso pretenden los autores entrar en detalle y, por ello, ofrecen una abundante bibliografía sobre los distintos temas que mencionan. Básicamente hablan de la optimización de formas y plantean problemas relacionados con la definición geométrica de los contornos y su influencia en las variables de diseño, la necesidad de mallado y remallado adaptable, el cálculo de las sensibilidades y las metodologías de resolución para hallar el óptimo entre las que se incluyen ¡técnicas de fotoelasticidad para placas y láminas!. En 1990 Bugada [B2] resuelve el problema de optimización con remallado adaptable durante el proceso de cálculo con elementos finitos y da una respuesta definitiva a casi todos los interrogantes que se planteaban en dicho artículo.

A partir del artículo de Haftka casi todos los escritos se refieren a planteamientos en la línea del diseño asistido óptimo que había formulado Navarrina. Por ejemplo: Haririan *et al.* (1987) [H2] describen su estrategia de optimización con el software de cálculo estructural ADINA. Kumar *et al.* (1989) [K1] presentan una metodología donde integran diferentes paquetes de software existente en el mercado hasta conseguir 'a methodology and a software system DESIGN-OPT by integrating numerical optimization methods, finite element analysis and CAE computer graphics tools.' En Yang (1990) [Y1] se definen los requerimientos de un sistema integrado de diseño: 'may include disciplines such as design modeling techniques, geometric modeling, automatic mesh generation, finite element analysis, error analysis, adaptive mesh refinement, design sensitivity analysis, non linear programming and optimization techniques, as well as data base management' con lo que parece que ya no queda nada en el tintero. En la misma línea de integrar distintas disciplinas de CAD, CAM, DSA y FEM para conseguir un CAE aparece Santos *et al.* (1990) [S1] y (1990) [S2]. O también del mismo estilo son Kimmich (1992) [K2], Haftka (1992) [H3] y Gu (1993) [G2].

Todo ese conjunto de técnicas de análisis que se han comentado llevan a definir la situación actual del diseño en ingeniería, por métodos numéricos, que aparece en Hinton *et al.* (1994) [H4]



El diseño actual en la ingeniería según Hinton

El camino recorrido hasta aquí es muy largo, pero en general el planteamiento del problema del diseño de estructuras siempre ha sido tender hacia la optimización. Aún a sabiendas de la

importancia y futuro de la optimización, pueden hacerse un conjunto de objeciones al problema de la solución óptima, Ramm *et. al.* 1994 [R1]:

- En primer lugar, el mismo concepto de optimización. Siempre se va a optimizar respecto a algo y a medida que el sistema se vuelve más complejo y existen más objetivos y restricciones, más ineficientes se vuelven los algoritmos de optimización. Por lo tanto el concepto de óptimo se acerca más a un concepto local que global: *El óptimo simplemente es una mejora del diseño inicial.*
- En segundo lugar, la optimización de sistemas estructurales a menudo vuelve el sistema imposible de construir, o la disminución en la variable de diseño es inapreciable para el rango de trabajo de la ingeniería civil.
- En tercer lugar, la optimización respecto a ciertas variables puede aumentar su sensibilidad en el comportamiento resistente de la estructura. A modo de ejemplo, el resultado de la combinación de una pequeña imperfección en la ejecución de una lámina con optimización de formas y la acción de la carga máxima puede ser catastrófico.
- En cuarto lugar, cabe preguntarse por el efecto de acciones aleatorias sobre estructuras optimizadas determinísticamente.

Todas esas objeciones no van en detrimento de la optimización como instrumento de diseño que se considera muy útil y fundamental, pero sí se debe ser crítico con el enfoque actual de la optimización. Personalmente añadiría los siguientes puntos débiles de las metodologías de optimización que se han propuesto hasta ahora :

- En general, y exceptuando técnicas de algoritmos genéticos que permitan colonias simultáneas de soluciones distintas, los métodos de optimización siempre obtienen un diseño único sin permitir el desarrollo creativo de otras posibles soluciones.
- La solución óptima no se suele acompañar de un análisis crítico de resultados que informe de posibles patologías futuras. Por lo tanto, el diseñador, ni puede incrementar sus conocimientos a partir de experiencias de simulación, ni puede estar seguro de que los beneficios de la optimización no le van a provocar perjuicios en el comportamiento estructural. Nótese, que en el subconsciente colectivo de los ingenieros siempre está presente el factor de la seguridad, y es evidente que la reducción de material que suele sugerir la optimización, provoca un sentimiento de inseguridad tanto en el diseñador como en el constructor que normalmente siguen la regla de ‘mejor ir sobrado’. Esa inseguridad se soslayaría con la existencia de criterios razonables y razonados que asegurarán el buen funcionamiento estructural del diseño.
- Normalmente, la participación del diseñador en el proceso de computación se reduce a la parametrización del problema y a la definición de objetivos y restricciones.
- Ante un problema planteado en la vida real, todos los diseñadores buscan soluciones efectivas que ya estén funcionando y que vengan avaladas por la práctica diaria. Toda esa experiencia

heurística, tan importante en ingeniería y que podría estar almacenada como base de datos, no se tiene en consideración a la hora de definir un algoritmo de optimización.

En resumen, se puede decir que los algoritmos de optimización deberían ir acompañados de:

1. Un análisis crítico de resultados que conllevaría notables beneficios como la previsión de posibles comportamientos anómalos, el aprendizaje y el refuerzo de conceptos estructurales por parte del diseñador y la ganancia de creatividad productiva a través de la experiencia simulada.
2. Un aprovechamiento de la experiencia heurística de problemas similares que se resolvieron en el pasado.

En consecuencia, se plantea la necesidad de articular nuevos mecanismos computacionales que eviten en lo posible estas deficiencias de la optimización, y por lo tanto, que el diseño estructural no se reduzca al planteamiento matemático de la optimización del problema sino que se acompañe de mecanismos que la potencien positivamente.

Antes de iniciar la lectura del siguiente apartado, donde se formula una propuesta conceptual, se recomienda al lector no familiarizado con la terminología de la inteligencia artificial y los sistemas expertos que lea el anexo A6.1 sobre dicha disciplina que aparece al final de este capítulo.

6.3 PROPUESTA DE UN DISEÑO ASISTIDO EN INGENIERÍA

En los apartados precedentes se han establecido reflexiones sobre el diseño en ingeniería, su evolución histórica y el papel que juegan hoy en día algunos conceptos novedosos como la optimización y la asistencia. Las nociones básicas sobre los sistemas expertos y las aplicaciones para el diseño en ingeniería civil que se han desarrollado en el contexto de la inteligencia artificial se encuentran en el anexo A6.1.

De toda esa amalgama de conceptos y disciplinas, así como de la incorporación del análisis de sensibilidad, tal y como se ha planteado en la tesis, pretende nacer un nuevo concepto de asistencia en el diseño en ingeniería. En este apartado se realiza una modesta aportación al desarrollo conceptual en esa dirección.

6.3.1 EL CONCEPTO DE DISEÑO ASISTIDO

Como se ha señalado anteriormente en los apartados 1 y 2 el concepto de diseño asistido se ha restringido a una mejora en las prestaciones gráficas y en la interacción entre el usuario y la máquina, de hecho, la asistencia se reduce al período de preproceso y postproceso gráfico del

diseño estructural. Asimismo, la existencia de la optimización matemática mejora las posibilidades de obtener soluciones más satisfactorias en ciertos aspectos, pero con el inconveniente que puede empeorar otros.

Para empezar, la *verdadera asistencia* en el diseño, a nuestro entender, no debe estar limitada a las fases de pre y post proceso. Una asistencia auténtica debería iniciarse en el momento de la creación de soluciones alternativas posibles, debería continuar durante la fase de análisis y optimización, y debería finalizar después de que el ingeniero haya incrementado sus conocimientos con respecto al problema que se enfrenta. Por lo tanto, la verdadera asistencia tendría que movilizar conceptos del tipo: sugerir, diagnosticar y aprender. Efectivamente, debería sugerir un grupo de soluciones alternativas y proponer aspectos críticos del diseño a tener en cuenta durante la fase de análisis. Asimismo, el sistema asistente tendría que ser capaz de evaluar la bondad del diseño y dar criterios de solución a las posibles patologías estructurales que pudieran aparecer. Finalmente, debería poder transmitir sus mecanismos de razonamiento para que el ingeniero pudiera extraer lecciones de los problemas que resuelve.

En vista de todo ello, se debe exigir a la asistencia que incluya el razonamiento de conceptos de ingeniería y que no se limite a dar soporte en los aspectos rutinarios del uso del ordenador. Algunas de esas características entran en la línea de la inteligencia artificial, por ejemplo el razonar evidencias, pero para realizar críticas sobre posibles patologías de futuro hace falta algo más, se necesita la capacidad de intuir el comportamiento de la estructura y evaluar dicha extrapolación de acuerdo con las reglas de diseño prescritas. Por ello, *aparece el cálculo de sensibilidad como un factor de soporte fundamental para extraer el máximo provecho de la asistencia.*

A continuación se describen con más detalle las exigencias de asistencia en las distintas fases de creación del proyecto. Dichos requerimientos son también adecuados en los casos de reparación o rehabilitación de estructuras dañadas, en las cuales puede ser necesario modificar alguna parte de la estructura existente para mantenerla en funcionamiento:

- **Fase de diseño inicial:** el sistema debe ser capaz de sugerir al ingeniero un conjunto de posibles soluciones del problema. Las soluciones contendrán una tipología, una parametrización, una definición de las variables de diseño, un conjunto de variables a las que hay que calcular su sensibilidad y una propuesta del análisis tipo. En definitiva, en esta primera fase, el sistema debería generar un conjunto de soluciones dimensionadas y plantear los análisis necesarios que se deben llevar a término. Dichas exigencias, conllevan tener una base de datos estructurada conforme a unos criterios preestablecidos, y un sistema experto capaz de buscar en esa base y proponer las alternativas de solución.

- **Fase de diseño:** durante la fase de análisis y posterior optimización, el sistema debe realizar los cálculos del conjunto de soluciones propuestas habiendo aceptado las modificaciones que el ingeniero diseñador haya decidido. Una vez optimizada la estructura, en función de las variables de diseño y de los objetivos, el sistema debería realizar un análisis de sensibilidad de las variables relacionadas con las patologías, bien porque en la estructura óptima se comportan peor, o bien porque la experiencia heurística señala que van a existir problemas. El análisis de sensibilidad se acompañará de una crítica sobre la solución óptima, dicho juicio se emitirá combinando el comportamiento de la estructura extrapolada, los criterios de las normativas o de las reglas heurísticas añadidas al sistema y los mecanismos de inferencia que permitirán establecer mecanismos de razonamiento. En conclusión, además de los algoritmos clásicos de optimización, será necesario un análisis de sensibilidad y un sistema experto que realice diagnósticos sobre la estructura diseñada.
- **Fase de postdiseño:** al final el ingeniero se habrá decidido por un diseño en particular, durante el camino habrá descartado opciones, o habrá descubierto futuros comportamientos anómalos debidos a variables defectuosas, o tal vez habrá tenido otro tipo de vivencias. Pero lo verdaderamente cierto, es que durante el proceso de diseño el ingeniero habrá aumentado sus conocimientos a través de una experiencia real simulada, una experiencia heurística que es la de más difícil adquisición. Por lo tanto, el sistema le permitirá aumentar sus conocimientos y aprender al mismo tiempo que resuelve problemas. De hecho el propio sistema deberá deducir reglas a partir de la experiencia nueva y guardarlas en la base de datos junto aquellas otras anotaciones que el diseñador crea de interés para posibles proyectos futuros.

El esquema 6.1 representa gráficamente la posición en la que se debe insertar el sistema experto y las funciones principales que debería cumplir.

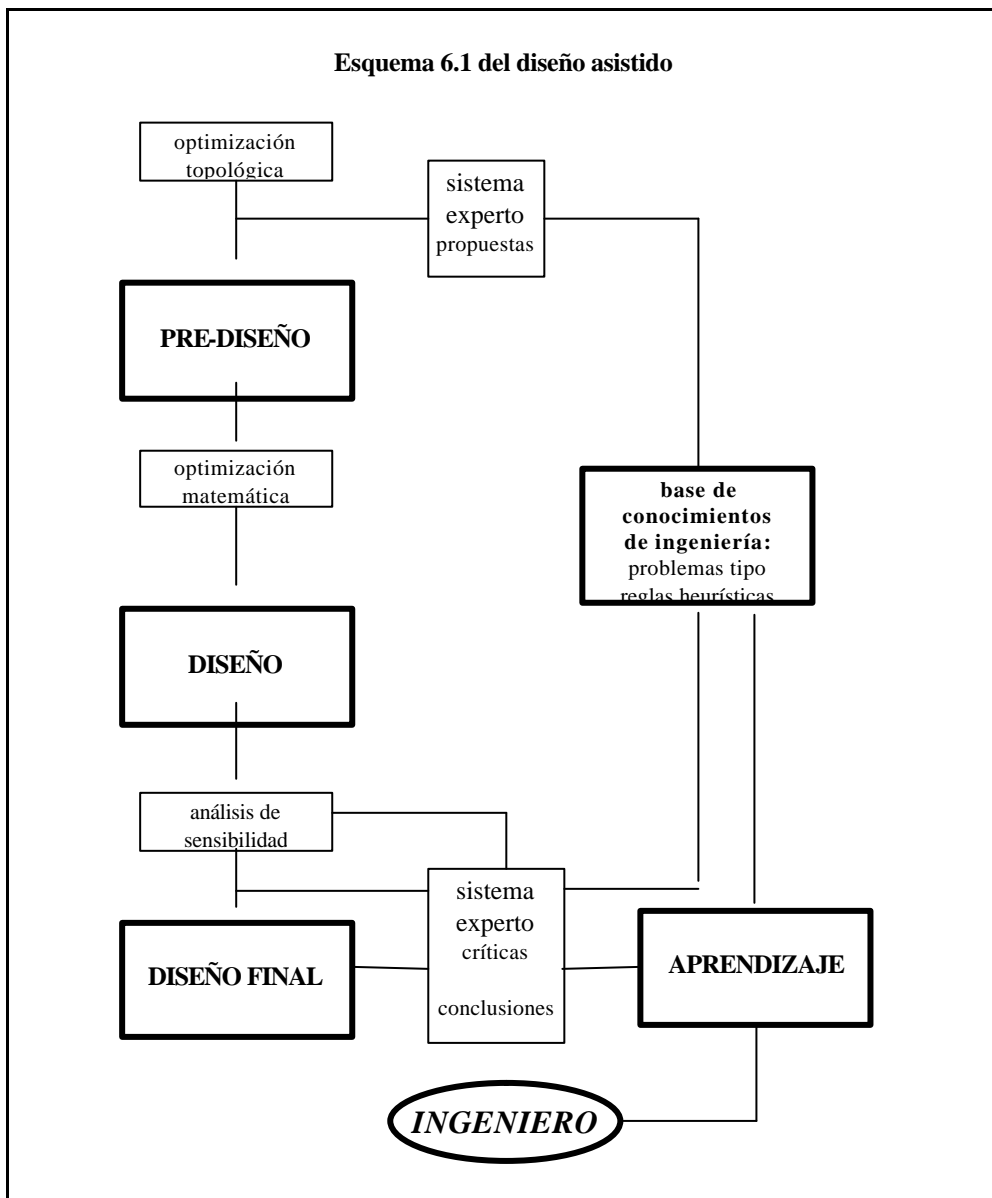
Diferentes elementos son necesarios para describir el funcionamiento de todo el sistema. En primer lugar una simbología asociada al problema de diseño para que el sistema experto pueda trabajar, y también, los mecanismos de inferencia que se van a utilizar para operar con dicha simbología. Asimismo será necesario describir la estructuración del conocimiento en cada una de las etapas donde el sistema experto deba intervenir. Todo esto se realizará en el próximo apartado.

Alguno de los requerimientos presentados por el concepto de diseño asistido, en concreto, el análisis que realiza una crítica del funcionamiento del sistema estructural, se puede apoyar en un mecanismo ya existente en el campo de la inteligencia artificial, el razonamiento cualitativo.

Sin embargo, dicha técnica presenta varios inconvenientes:

- Exige la solución completa del espacio del problema, y en el caso general del diseño estructural es muy grande e indefinido. Motivo por el cual tiene una clara aplicación docente, donde el rango de problemas es mucho más acotado.
- No aprovecha las ventajas de los datos de tipo cuantitativo, sino que únicamente trabaja con conceptos abstractos puros.
- No utiliza la información heurística que es tan importante en la ingeniería.

Por lo tanto, para el tipo de objetivos que se plantea este trabajo el razonamiento cualitativo, al nivel de desarrollo actual, no cubre las expectativas requeridas. Por ello, se ha optado por escoger el concepto de sistema experto, entendiendo puede trabajar parejo con definiciones de tipo abstracto.



6.3.2 EL ESPACIO DEL PROBLEMA

En el anexo se explica con más detalle lo que se entiende por espacio del problema, pero brevemente se define como el conjunto de alternativas susceptibles de ser soluciones. En el caso del diseño, tal y como se concibe actualmente, dicho concepto incluye la definición paramétrica del problema, los valores de las variables de diseño y las restricciones o relaciones que se establecen entre parámetros y variables. En general todo diseño estructural suele tener un espacio del problema muy amplio, dada la gran cantidad de factores y relaciones que intervienen. No obstante, en este trabajo se propone dividirlo en dos subespacios:

- Uno formado por los conceptos estructurales particulares de cada tipología. En este caso se incluirán las variables o parámetros referentes a dimensiones, materiales, etc. para un tipo de problema concreto.
- Otro formado por los conceptos estructurales comunes. En este grupo se incluirán variables y restricciones referentes a los estados límites de servicio ELS y estados límites último ELU que deben satisfacerse en toda estructura.

Se ilustran las definiciones anteriores con un ejemplo sencillo: se tiene que calcular una viga entre apoyos para soportar una carga determinada. Para este problema supóngase un par de diseños posibles, una viga con una sección rectangular y otra con una sección en doble T, en este caso se llamará:

- **Espacio particular:**
 tipología rectangular: longitud, canto, ancho y material hormigón.
 tipología en doble T: longitud, alas, alma y material acero.
- **Espacio común:**
 cargas, flecha limitada, tensión limitada, análisis elástico

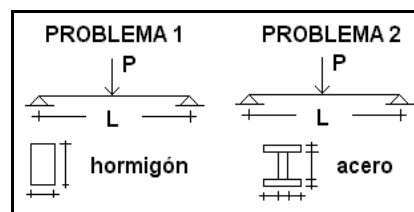


Ilustración 6.1: Similitudes y diferencias entre estructuras

En este ejemplo sencillo, se destaca que algunas variables ya están claramente acotadas y no tiene sentido plantearse un valor distinto, sería el caso de la longitud entre apoyos. Las variables que van a tomar un valor fijo se llamarán parámetros. En cambio hay otras variables como el ancho o el canto que son susceptibles de convertirse en variables de diseño y que son, lógicamente, distintas entre las tipologías alternativas.

Nótese que, en general, los conceptos asociados al espacio común permiten una concepción abstracta de la estructura, son variables y restricciones que no están asociados a ningún aspecto concreto de la tipología solución que se haya escogido. Por el contrario, el espacio particular es dependiente de la tipología y, debido a su naturaleza, contendrá un gran número de conceptos heurísticos asociados a la experiencia que se haya tenido con estructuras semejantes. Además el espacio particular puede contener conceptos no precisos como: un canto demasiado grande, una viga larga. Este tipo de conceptos de carácter subjetivo entronca con la lógica difusa¹, *fuzzy logic*, y los sistemas expertos son capaces de trabajar con este tipo de enunciados [D1] por lo tanto se podrían definir reglas de trabajo relativas a percepciones y no necesariamente mesurables.

En el nuevo concepto de diseño asistido será necesario incluir un grupo de variables en el subespacio particular del problema, las variables respecto a las que se realizará un análisis de sensibilidad. Por lo tanto, en general y salvo excepciones, en el diseño de la estructura, se definirá un subespacio común de parámetros y restricciones de carácter teórico, y un subespacio común de parámetros, variables de diseño y variables de sensibilidad, así como las restricciones asociadas a conceptos heurísticos.

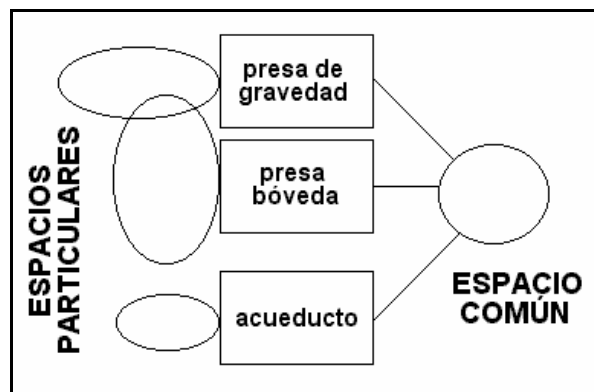


Ilustración 6.2: Relaciones entre diseños estructurales

¹ Una parte de la lógica que decide el resultado de un silogismo en función de una cierta probabilidad, en lugar de evaluar según el clásico verdadero/falso.

Para ilustrar las definiciones hechas hasta ahora, supóngase que se ha escogido la viga rectangular del ejemplo anterior como diseño definitivo. En este caso, los subespacios y los conceptos que van a contener podrían ser los siguientes:

- **Subespacio particular:**

variables paramétricas: longitud y ancho que vendrán fijadas por motivos constructivos.

variable de diseño: canto

variables de sensibilidad: canto y ancho.

restricción estética de esbeltez: la relación entre el canto y el ancho debe pertenecer a un intervalo.

- **Subespacio común:**

tensión máxima en todos los puntos será menor que un cierto valor.

flecha en centro luz será menor que un cierto valor.

Como el espacio del problema en el caso del diseño es tan grande, es evidente que los subespacios definidos arriba, en el ejemplo anterior, podrían contener otro tipo de datos, es fácil imaginar que otra variable de diseño podría ser el ancho. Pero piénsese, que esta eventualidad, aún refuerza más la idea de tener un sistema que ayude a acotar la solución o conjunto de soluciones posibles del problema.

6.3.3 LA SIMBOLOGÍA DEL ESPACIO DEL PROBLEMA

Llegados a este punto, es necesario definir las características simbólicas que contendrán los subespacios definidos en las líneas anteriores. Se debe proceder a estructurar la información y el tratamiento que va a tener por parte del sistema de asistencia.

Simbología del subespacio particular

En este caso es difícil realizar una generalización, dado que cada problema particular va a tener sus variables y restricciones, y que van a ser físicamente diferentes de cualquier otro. Es evidente que las variables que se pueden asociar a una presa son diferentes de las que se asocian a una celosía de barras. Sin embargo, se debería definir una etiqueta que caracterizase al diseño, por ejemplo: presa, puente, etc ... dicha etiqueta está asociada a un problema tipo en la ingeniería. Cada problema tipo contendrá las diferentes soluciones que se hubieran definido antes, distintas tipologías que en su día resolvieron el problema de diseño.

Conceptualmente el problema tipo sería un objeto² que contendrá a otros objetos, las tipologías concretas, y estos a su vez contendrán la parametrización del diseño, las variables de diseño y las variables de sensibilidad, así como un conjunto de reglas heurísticas sobre el problema en particular, conceptos estéticos, consideraciones constructivas, etc. Todos los objetos principales representando el problema tipo estarán en una base ordenada de datos, y de ella colgarán listas con los objetos que representen las tipologías solución del problema. A su vez, los objetos serán responsables de las variables y reglas de su propio subespacio, de manera que la información quedará en compartimentos estancos. Salvo excepción de los conceptos de tipo común que se hubieran definido en los objetos principales, los cuales compartirían dichas variables y reglas con los objetos de las tipologías. Esta organización de la información está claramente orientada a objeto aprovechando la potencia de la herencia.

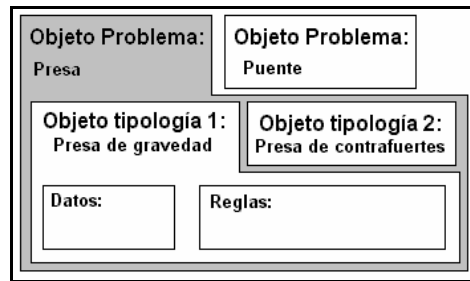


Ilustración 6.3: Organización del espacio particular

Simbología del subespacio común

En este caso el conglomerado de conceptos que se mueven en su interior son de carácter más abstracto. Por lo tanto, es más sencillo crear unas reglas simples para que el mecanismo de inferencia del sistema experto pueda desarrollar razonamientos.

Se definirá el estado de la estructura según las tres condiciones inferiores:

- Cumpliendo el estado límite de servicio, ELS.
- Cumpliendo el estado límite último, ELU.
- Habiendo superado algún estado límite, SEL.

En definitiva, en el caso del diseño, en general, la estructura cumplirá el ELS y el ELU, y en el caso de existencia de daño en la estructura seguramente se estará en un SEL.

Entonces en cada estado se pueden definir unas reglas sencillas:

² Estrictamente el tema de los objetos se ha dejado para el próximo capítulo, por ello no se profundiza en este aspecto, pero sí que es necesario mencionarlo para mantener una coherencia de ideas.

Reglas sobre ELS:

- *Regla de estado:* cumplirá el ELS si sus desplazamientos no superan los de diseño.
- *Regla de evolución 1:* si la sensibilidad y el desplazamiento tienen igual signo la magnitud va a crecer.
- *Regla de evolución 2:* si la sensibilidad y el desplazamiento tienen signos opuestos la magnitud va a disminuir.
- *Regla de comparación:* si en el estado 1 el crecimiento en un desplazamiento es menor que en el estado 2 entonces hay una mejora de diseño, y viceversa.

Reglas sobre ELU

- *Regla de estado:* cumplirá el ELU si sus tensiones no superan las de diseño.
- *Regla de evolución 1:* si la sensibilidad y la tensión tienen igual signo la magnitud va a crecer.
- *Regla de evolución 2:* si la sensibilidad y la tensión tienen signos opuestos la magnitud va a disminuir.
- *Regla de comparación:* si en el estado 1 el crecimiento en una tensión es menor que en el estado 2 entonces hay una mejora de diseño, y viceversa.

Reglas sobre un SEL

- *Regla de estado:* no se cumple alguno de los estados anteriores.
- *Regla de evolución de tensiones 1:* si la tensión crece puede existir se tiende a régimen no lineal.
- *Regla de evolución de tensiones 2:* si la tensión disminuye se entra en régimen elástico
- *Regla de evolución de desplazamientos:* si la norma de desplazamientos disminuye hay mejora, y viceversa.

La superación de un estado límite no inhabilita necesariamente la estructura, simplemente la construcción deja de cumplir las exigencias de diseño, que por razones obvias suelen ser las límites de la normativa. Aunque algún diseñador puede ser más exigente y dimensionar del lado de la seguridad; por ello, si la tensión crece, no necesariamente se ha de llegar a un régimen no lineal de comportamiento.

Las variables del espacio común serán las tensiones y desplazamientos, y tal vez algún parámetro fijo del diseño. Por lo tanto, ante un problema, y a la luz de los resultados del análisis, se obtendrán unos hechos:

- Existe una tensión y un desplazamiento, ambos son los valores máximos de comparación que vienen acotados por los estados límites correspondientes.
- Existe un desplazamiento máximo y su sensibilidad.

- Existe un desplazamiento y su sensibilidad máxima.
- Existe una tensión máxima y su sensibilidad.
- Existe una tensión y su sensibilidad máxima.

Finalmente, se definen unas variables de carácter orientativo y general, que pretenden ser una especie de índice de calidad de la estructura. Dicha definición confiere instrumentos al sistema para utilizar las reglas de comparación definidas anteriormente. Estas variables se calcularán según:

$IQD = \% \text{ de aumento de zonas que están en un SEL.}$

$IQS = \% \text{ respecto al ELS sobre el punto más deformado.}$

$IQU = \% \text{ respecto al ELU sobre el área más dañada.}$

Por consiguiente, todo diseño se va a someter a un análisis y se van a evaluar los hechos anteriores, el sistema combinará las reglas mediante el mecanismo de inferencia y podrá emitir juicios respecto al subespacio común. El conjunto de hechos y reglas se puede introducir en un objeto, en este caso será el mismo para todos los diseños y el sistema experto operará convenientemente con él.

Nótese que se ha optado por organizar la información conforme a una estructura de objetos, en realidad existen otros mecanismos que permiten crear entidades de conocimiento, como podrían ser la tripleta objeto-atributo-valor, véase [D1], pero como en este estudio el lenguaje de programación que se ha utilizado está orientado al objeto, vale la pena aprovechar todas las potencialidades que brinda.

6.3.4 LOS MECANISMOS DE INFERENCIA

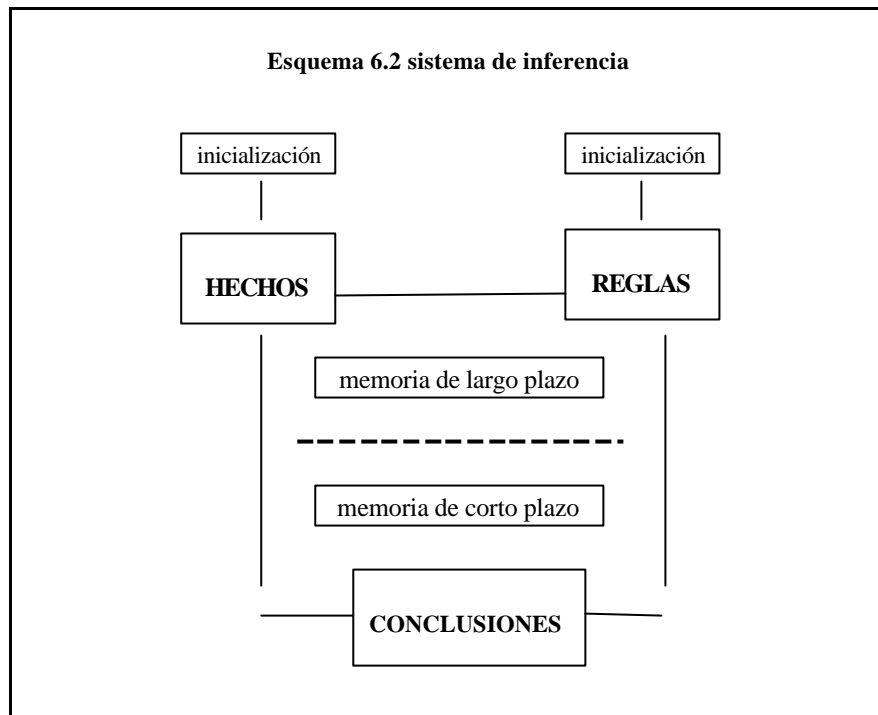
Se ha establecido en el anexo A6.1 que la base del razonamiento está en la existencia de hechos y de reglas sobre los hechos. Asimismo se ha definido el mecanismo del razonamiento como un proceso en el cual se pretende obtener nuevos hechos o reglas a partir de la información existente. A la vista de todo ello, el objetivo de la inferencia es operar con las reglas y los hechos que se tienen a mano para deducir nuevos hechos o reglas.

El siguiente ejemplo simple ilustrará el discurso, supóngase que se tiene una regla de procedimiento y un hecho contrastado:

regla 1 : *si* el desplazamiento es menor o igual a 1 cm *entonces* se está en ELS.

hecho: el desplazamiento en el nudo 3 es de 0.5 cm.

El mecanismo de inferencia coge el hecho, lo compara con la regla y deduce algo, en este caso la siguiente sentencia: *se está en ELS*.



De este pequeño ejemplo, nótese que el razonamiento está ligado con la lógica de predicados y con las proposiciones de tipo *si-entonces*. Naturalmente, en otro tipo de problemas estos mecanismos no tiene porque funcionar correctamente, por ejemplo si los hechos son de valor incierto, o si puede existir más de una regla, o la existencia de proposiciones contradictorias, en estos casos críticos se necesitan otras herramientas más sofisticadas para atacar convenientemente el problema. Sin embargo, para los problemas de análisis estructural actuando bajo cargas deterministas el razonamiento mediante relaciones *si-entonces* funciona perfectamente.

Existen diferentes mecanismos de inferencia: encadenamiento progresivo, regresivo, no monotónico... y métodos de razonamiento: inducción, deducción ... abducción, véase [D1]. Para el tipo de problemas que va a tratar el sistema experto, basados en una serie de hechos y unas reglas definidas, el mejor mecanismo es el *encadenamiento progresivo*. Esta estrategia de razonamiento parte de unos hechos conocidos y aplica unas reglas para deducir nuevos hechos, y así consecutivamente hasta que ya no se pueden encontrar nuevos hechos o se han agotado todas las reglas conocidas.

6.3.4 EL APRENDIZAJE

El sistema experto va a generar aprendizaje a un doble nivel, el más evidente es el aumento de conocimientos que se pueden incorporar a la base de datos del sistema, en base a los razonamientos que se hayan efectuado durante una sesión de trabajo, y el más sutil es el soporte en la formación del ingeniero que utilice el entorno.

Respecto del primero es evidente que si el mecanismo de inferencia deduce alguna regla interesante, ésta se puede incluir en la memoria de largo plazo. Por ejemplo, es fácil imaginar que durante el proceso de diseño se pueda encontrar una regla del tipo: en esta estructura la modificación de la variable x es perjudicial, y dicha sentencia se añadiría al subespacio particular de la tipología solución. Por lo tanto, en próximas sesiones el sistema de inferencia ya trabajaría con ese nuevo conocimiento.

En cambio el segundo mecanismo de aprendizaje está basado en la capacidad inductiva inherente en el hombre. El aprendizaje inductivo es el que se realiza a través de la práctica diaria, a través de los ejemplos. Durante la vida laboral el ingeniero ve una serie de casos, y fundamentándose en el conocimiento teórico que ha adquirido durante la formación universitaria, extrae nuevas reglas de comportamiento. Cuando el ingeniero ha terminado sus estudios, en general, el dominio cognoscitivo que posee le permite realizar correctamente las actividades del nivel de análisis en la taxonomía de Bloom³, posteriormente estos conocimientos van a sedimentar en base a las experiencias reales que tenga, y al cabo de unos años va a ser capaz de sintetizar y evaluar, va a conseguir el nivel máximo en la taxonomía. Para realizar la evaluación, el experto, se apoyará en todo el volumen de conocimientos prácticos y teóricos que habrá adquirido.

Parece por lo tanto claro que el ingeniero que utilice un entorno asistido como el descrito aumentará su aprendizaje por varias razones:

- Los problemas resueltos irán acompañados de un análisis crítico de la solución, por consiguiente las deducciones se habrán basado en el conjunto de reglas heurísticas acumuladas a lo largo de toda la historia del sistema. Los razonamientos sobre el comportamiento estructural, aumentarán la comprensión del ingeniero sobre el mecanismo de funcionamiento de los sistemas estructurales.
- El conjunto de reglas de la base de datos se habrá formado por la aportación de distintos profesionales, de manera que el ingeniero tendrá a su disposición el mejor grupo de soporte que pueda imaginar.
- La inducción, el aprendizaje más difícil y perdurable, se basa en la simulación con ejemplos, sin duda el sistema podrá analizar todos los diseños imaginables.

³ Según Bloom hay 6 niveles relacionados con el grado de aprendizaje y dominio de un tema: conocimiento, comprensión, aplicación, análisis, síntesis y evaluación.

Uno de los problemas reside en la base de datos que forma la memoria a largo plazo, si crece mucho puede volverse inoperativa, pero también, su crecimiento dependerá de la pericia y posibilidades de la propia empresa. En consecuencia, surge una duda sobre el tamaño ideal del conocimiento a largo plazo y si la organización de la información podría hacerse de una manera mejor a la propuesta. En cualquier caso a lo largo de estas líneas se ha ofrecido una nueva propuesta para el diseño asistido en la ingeniería basada en la unión de instrumentos tan poderosos como el análisis de sensibilidad y los sistemas expertos.

ANEXO 6.1: LOS SISTEMAS EXPERTOS

En las líneas siguientes se introducen los principales conceptos alrededor de los cuales se mueven los sistemas expertos y su aplicación en el diseño de estructuras en ingeniería.

A6.1 GENERALIDADES

En general según Schildt (1987) [S3] hay dos tipos de problemas: en primer lugar los que pueden resolverse mediante algún procedimiento determinístico y se traducen en un algoritmo que se ejecuta en un ordenador. En segundo lugar, los más abundantes en la vida diaria, los que son no computarizables. El primer grupo da lugar a la llamada computación convencional y el segundo a la IA (Inteligencia Artificial). En realidad la IA está siendo construida por las aportaciones de gentes de disciplinas tan dispares como ingenieros de la computación, matemáticos, economistas, filólogos, psicólogos, etc., por consiguiente, según el campo de trabajo del que provengan y la rama de la IA donde trabajen, su definición de inteligencia artificial será posiblemente distinta.

Al final de la segunda guerra mundial, diversos científicos trabajaron en el desarrollo conceptual y práctico de una máquina que realizara complejos cálculos numéricos a través de un programa almacenado de instrucciones. Hasta aquel entonces, las pocas máquinas que realizaban complejas operaciones aritméticas, se programaban desde fuera. Es decir, mediante una complicada estructura física de dispositivos mecánicos o eléctricos de conexión que obligaba a los técnicos a emplear un número elevado de horas en realizar una pequeña reprogramación. Este nuevo concepto revolucionario de construir una máquina que físicamente siempre fuera la misma y que funcionara de forma distinta, según la serie de instrucciones que se le diera, hay quien la atribuye a Von Neumann, otros a Mauchly y Eckert y otros a Turing. Lo cierto es que el único que llevo a cabo la realización de dicho sueño fue Von Neumann con un equipo de especialistas: Herman Goldstein, Arthur Burks y Julian Bigelow⁴. En el verano de 1952 la máquina realizó durante 60 días más de mil millones de operaciones aritméticas y lógicas resolviendo el problema de la reacción termonuclear de una bomba de hidrógeno. La arquitectura interior de la máquina se diseñó para que los operadores numéricos '+', '-' y '>' fueran las instrucciones básicas, esta decisión potenció la parte numérica del ordenador y permitió la rápida simulación de complejos procesos físicos. En oposición a esta idea Alan M. Turing, científico británico que poseía unos excelentes conocimientos de la lógica formal, defendía una máquina que trabajara con operadores lógicos 'AND', 'OR' y 'NOT' y símbolos, y a partir de ellos se debían desarrollar los operadores de tipo numérico. La decisión de Von Neumann conduce a los ordenadores de hoy día, procesadores que calculan de forma muy

⁴ Sobre esta cuestión y otras de interés se recomienda el libro de Ed Regis, *'Quién ocupó el despacho de Einstein?'*. Ed Anagrama 1992.

rápida pero que no trabajan tan bien con la lógica simbólica. Entre otras⁵, esta es una de las razones de la diferencia entre el nivel de desarrollo del software convencional basado en algoritmos numéricos y el basado en el manejo de símbolos y conocimiento.

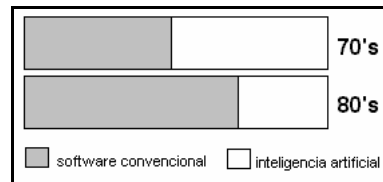


Ilustración 6.4: Desarrollo comparado de software [H5]

En términos generales el campo de la IA se extiende según tres grandes ramas:

1. **Lenguaje natural** cuya pretensión es reproducir en una máquina los mecanismos de codificación y decodificación del lenguaje humano.
2. **Robótica** donde se busca potenciar mediante sensores adecuados la identificación de objetos, la visualización y el control de movimientos, el tacto, etc., es decir reproducir las capacidades físicas del hombre en un ser mecánico.
3. **Sistemas expertos** que pretenden reproducir el comportamiento de un experto humano al resolver un problema.

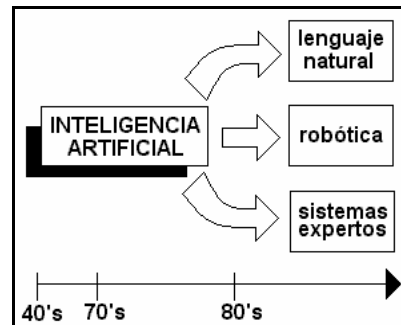


Ilustración 6.5: Los campos de la IA

El campo de la inteligencia artificial se ha desarrollado mucho en la última década y su aplicación está más que extendida en campos como los negocios o la medicina, la ingeniería de control y la robótica, sin embargo, su uso en el mundo del diseño en la ingeniería civil aún está por explotar.

A6.2 CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL CONOCIMIENTO

⁵ Otra de las razones importantes que pueden aducirse para justificar el menor desarrollo de aplicaciones inteligentes, es la mayor dificultad que conlleva organizar un proyecto de software en inteligencia artificial porque es necesaria la colaboración multidisciplinar a todos los niveles.

Se define como *experto*, aquel profesional que tiene un conocimiento superior sobre cierto tipo de problemas, de manera que a través de sus conocimientos es capaz de analizar el problema, encontrar las dificultades y resolverlas satisfactoriamente. Por analogía, se considera un *sistema experto* aquel programa de ordenador que se comporta como un experto humano, ‘*a computer program designed to model the problem-solving ability of a human expert*’ Durkin [D1], véase también Cuenca *et al.* [C1]. En estos casos, el comportamiento inteligente del experto está claramente determinado por sus métodos de razonamiento y la magnitud de conocimientos adquiridos en el aprendizaje durante el ejercicio de su profesión⁶. Por lo tanto, los sistemas expertos se conciben como programas de ordenador que pueden ayudar a las personas en el análisis de problemas y en la toma de decisiones [H5] y también como instrumento que permita hacer un mejor uso de nuestras propias capacidades [D1].

El conocimiento

Se entiende por conocimiento la información temática organizada y recuperable. Los expertos humanos reciben el conocimiento a lo largo de su vida, y lo van almacenando de forma apropiada para poder enfrentarse con éxito a los nuevos retos que encuentran en el desarrollo diario de su profesión. Pero la naturaleza de este conocimiento así como el método de adquisición tiene una doble vertiente.

En los primeros años de formación del profesional en la ingeniería, el conocimiento se adquiere en los centros universitarios. Durante ese período, el estudiante intenta asimilar un conjunto de leyes, axiomas y conceptos teóricos a través de procesos deductivos. La enseñanza suele ir de lo general a lo particular. Tal y como se puede apreciar en los planes de estudio de las universidades, siempre se empieza con unos cursos de formación matemática básica y se termina con asignaturas de especialización. En el caso más común, al terminar los estudios universitarios, el ingeniero posee una gran base teórica pero le faltan los conocimientos prácticos que le permitirán aplicarla con un máximo rendimiento.

Afortunadamente, en la práctica laboral diaria dicho ingeniero se encontrará con otros ingenieros veteranos que le ayudarán a formarse, o bien, su empresa dispondrá de los adecuados cursos de formación para reciclar al estudiante y convertirlo en un profesional. En consecuencia, existe otro tipo de conocimiento, el formado por las reglas prácticas de funcionamiento de la vida cotidiana, el conocimiento heurístico. En este caso, el conocimiento se aprende a través de la experiencia, por lo

⁶ De ahí que algunos autores pongan en duda el comportamiento de los sistemas expertos como un comportamiento verdaderamente inteligente, ya que la respuesta del sistema está exclusivamente basada en el conocimiento adquirido, en este caso se prefiere hablar de sistemas de conocimiento.

tanto es un método inductivo, a partir de lo que experimenta el sujeto y su relación con los conocimientos que tiene almacenados extrae nuevas reglas de comportamiento. Dicen los psicólogos que este tipo de aprendizaje es mucho más fuerte y perdurable que el anterior pero cuenta con la desventaja de que es más difícil de transmitir y necesita mucho más tiempo para adquirirse. En definitiva la naturaleza del conocimiento de un experto es doble: teórico y heurístico.

Sería interesante disponer de algún medio que permitiera traspasar esta experiencia heurística, de las viejas a las nuevas generaciones, en el menor tiempo posible. La idea más sencilla es a través de cursos o seminarios de formación de postgrado, pero en este trabajo también se considera la posibilidad de utilizar un sistema experto que forme al mismo tiempo que resuelve problemas de ingeniería real.

La resolución de problemas

Diversos estudios se han hecho para deducir las metodologías de resolución de problemas que utilizan los expertos en los análisis que realizan. Se ha observado que sus estrategias de funcionamiento son iguales a las que utilizan el resto de personas cuando deben solventar alguna situación de la vida cotidiana. Ante un problema nuevo, siempre intentan en primer lugar, una aproximación razonable pero al azar, es decir, ensayan una posible solución sin realizar un análisis profundo de la problemática. Es evidente que la intención que les mueve es comprobar la trivialidad del problema para no gastar energías inútilmente. Después de ensayos infructuosos en ese sentido, proceden a plantear una resolución sistemática del problema, esto conlleva desarrollar un conjunto de símbolos y establecer unas relaciones entre ellos, de manera que se construya el llamado espacio del problema. En ese espacio están todas o la mayor parte de las soluciones, y lo que se debe hacer es buscar el camino que lleva a la respuesta.

Como ejemplo plantéese el lector la resolución del conocido problema del granjero que debe traspasar el grano, la gallina y el perro al otro lado del río en un número mínimo de viajes y sólo dispone de una barca con dos plazas. Después de unos intentos al azar se definirán unos símbolos que son el granjero (a), el grano (b), la gallina (c), el perro (d), la barca (x), las orillas de río (y) y (z). Unas relaciones entre ellos, (c) no debe comer a (b) , ir de (y) a (z) con (x), etc. Se formarán las combinaciones posibles (a), (b) y (c) en (x) con (d) en (y), etc. al final se escogerán las posiciones alternativas en un cierto orden y se resolverá el problema⁷. Por lo tanto, la resolución de un problema se reducirá a empezar en un estado inicial y buscar a lo largo del espacio del problema, identificando que acciones o secuencias conducen al objetivo. Como señala Schildt [S3] *'it was*

and still is believed that searching is central to problem solving, which is a crucial ingredient of intelligence'. Uno de los problemas de los sistemas expertos será la estrategia adecuada de búsqueda de soluciones.

El mecanismo de razonar

Durante el proceso de la construcción del espacio del problema el experto realiza un procesamiento de la información: Por un lado están los datos del problema, por otro sus conocimientos y finalmente las relaciones adecuadas entre ellos, las llamadas técnicas de inferencia. Afirman los psicólogos que el pensamiento es el procesamiento de la información y durante años se han preocupado de descubrir cómo se realiza dicho fenómeno en el cerebro humano. Los estudios realizados se han basado en los modelos de codificación, almacenaje y recuperación de la información en la memoria.

En general, se considera que la memoria tiene dos partes: En la primera se procesa la información a corto plazo, el cerebro recibe un estímulo y se almacena temporalmente hasta que es procesado. Se estima que los ciclos de reconocimiento-acción duran unos 70 milisegundos, nótese que ésta es la misma forma de trabajar que tiene la CPU de los ordenadores o de los sistemas operativos basados en *events* como Windows. En cambio, la segunda memoria se llama de largo plazo, y contiene toda la información que se ha ido guardando a lo largo del tiempo. La memoria a largo plazo está formada por dos entidades: Una gran cantidad de símbolos que representan la codificación de la información y una indexación compleja que representa la organización del conocimiento y las relaciones que tienen los datos entre ellos para poder ser extraídos en un momento dado.

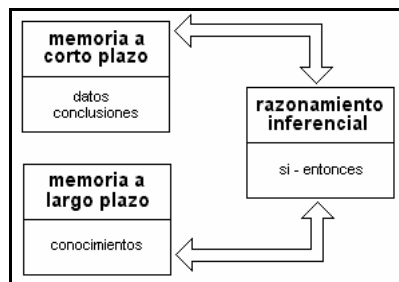


Ilustración 6.6: El mecanismo de
razonar

Por consiguiente, ante un problema, el experto introduce los datos iniciales en la memoria de corto plazo, el cerebro activa su inferencia y busca en la memoria de largo plazo, cuando encuentra una respuesta entra en la memoria de corto plazo y así sucesivamente hasta que el problema queda

⁷ Posiblemente un *buen* algoritmo de optimización decidiría que el granjero se comiera el grano, la gallina y el perro y pasara al otro lado del río en *un sólo viaje*...seguramente no habría ninguna restricción sobre esta

resuelto. Se puede afirmar que las operaciones de inferencia normalmente están basadas en las relaciones *if-then*. Por ejemplo: alguien se despierta y ve que es 26 de mayo, la fecha entra en la memoria a corto plazo. El sujeto piensa: 'Si es 26 de mayo, pasa algo?'. El cerebro empieza a buscar símbolos en la memoria a largo plazo y encuentra la siguiente regla: 'El 26 de mayo es el cumpleaños de Cristina' y también: 'Cristina es mi mujer'. Esa información se almacena en la memoria a corto plazo y se realiza la inferencia: 'Si hoy es 26 de mayo es el cumpleaños de mi mujer'. Entonces en la memoria a corto plazo la información pasa a ser 'es el cumpleaños de mi mujer' y el sujeto obra en consecuencia. Todos los sistemas expertos necesitan un mecanismo inferencial para poder relacionar los conocimientos y extraer nuevas reglas.

El almacenamiento de la información

Uno de los problemas es el almacenamiento e indexación de la compleja información que atesora el cerebro en la memoria a largo plazo. Hay varias hipótesis sobre su posible forma de trabajar, desde modelos sencillos que consideran que los símbolos se asocian en grupos, hasta la hipótesis de patrones de comportamiento aprendidos a través de la experiencia. Sin embargo, una de las teorías más plausibles afirma que el conocimiento se asocia en racimos, *chunks*. Cada uno de ellos es un símbolo que contiene información asociada con ciertos estímulos y los racimos se interconectan entre ellos formando una vasta red de conocimiento.

En los años 70 Newell y Simon estudiaron como funcionaba el cerebro de los jugadores de ajedrez, en concreto les hacían observar un tablero durante un tiempo muy breve y posteriormente casi todos eran capaces de reproducir la posición *exacta* de las piezas. La razón de dicha capacidad se debía a que los jugadores no observaban las piezas individualmente sino en su conjunto, entonces establecían un patrón de posición y deducían las posiciones *a posteriori*, simplemente creaban racimos de grupos de piezas. Otros estudios confirman que todo conocimiento de experto utiliza un enfoque similar para manipular y almacenar la información y se estima que la adición de racimos en la memoria a largo plazo requiere un mínimo aproximado de 10 años de experiencia en el tema.

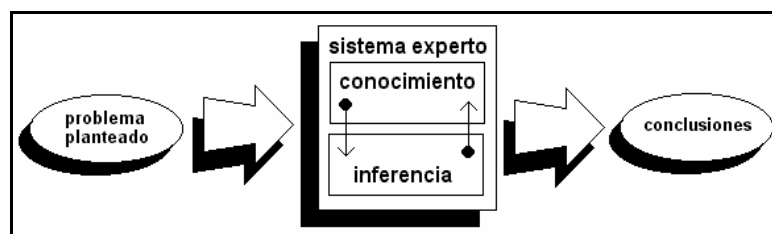


Ilustración 6.7: La base del sistema experto

Nótese que hay una asimetría temporal entre la memoria a corto plazo que opera con mucha rapidez y la memoria a largo plazo que requiere mucho tiempo de formación. Además se ha de destacar el volumen de los conocimientos que posee un premio Nobel sobre su tema se supone cercano a 50.000 o 100.000 racimos de información clasificada. Por lo tanto, es evidente que la clasificación y la organización de la información⁸ será muy importante para que el sistema experto sea efectivo durante el proceso de búsqueda y posterior tratamiento de la misma.

A modo de conclusión, se afirma que en la resolución de problemas intervienen dos grandes bloques conceptuales:

- **El conocimiento base:** El conocimiento de un experto viene determinado por un conjunto de hechos, reglas, conceptos y relaciones específicas sobre la materia en cuestión que tiene almacenadas en alguna parte. La forma de organizar dicha información da lugar a diferentes modelos de representación del conocimiento.
- **Métodos de razonamiento:** Es necesario combinar adecuadamente la información disponible sobre el problema y la búsqueda de datos en el conocimiento almacenado para poder deducir conclusiones. Las distintas metodologías existentes de establecer relaciones se conocen como técnicas de inferencia.

Por lo tanto, un sistema experto deberá utilizar una estrategia basada en una adecuada combinación de conocimiento+inferencia para resolver problemas y lo que va a caracterizar su eficacia será la organización de la información y sus relaciones.

A6.3 EL RAZONAMIENTO CUALITATIVO

El tipo de razonamientos que se incluyen en un sistema experto son de carácter general, principalmente de tipo heurístico, aunque también puede incluir reglas que contengan datos de tipo abstracto. Sin embargo, existe un tipo de razonamiento conceptual basado puramente en las nociones abstractas, el razonamiento cualitativo. Este tipo de razonamiento requiere una visualización abstracta de la realidad del problema y trabaja en espacios teóricos del problema donde las operaciones se realizan entre conceptos y no entre magnitudes. En este caso particular, los mecanismos de inferencia y las reglas se basan en nociones abstractas, y la información que proporciona el sistema siempre es de tipo cualitativa, como se espera que se comporte el sistema, más que información de tipo cuantitativa, el sistema va a desplazarse tal magnitud. El razonamiento cualitativo no se apoya en reglas heurísticas porque no utiliza información de tipo numérico y

⁸ Pérmítame el lector que abuse de su complicitad y paciencia, y le solicite que almacene en su memoria de largo plazo este punto para relacionarlo adecuadamente con el apartado 2 del capítulo 7, ver allí la nota al pie núm 5.

trabaja con lenguaje claramente simbólico. Presenta la dificultad de tener que dar una descripción completa de todos los estados posibles del sistema para realizar una búsqueda de la respuesta ante una situación concreta planteada.

A6.4 SISTEMAS EXPERTOS EN INGENIERÍA CIVIL

El panorama de experiencias de inteligencia artificial y de sistemas expertos en ingeniería civil es bastante desolador, mientras que en otros campos la aplicación de técnicas de IA está extendida, en ingeniería civil existen muy pocas experiencias. En un artículo de reflexión sobre las posibilidades de la IA en ingeniería Garret *et al.* (1996) [G1] abogan por la creación de aplicaciones de este tipo y consideran que la falta de iniciativa es debida a varias razones, entre las que destacan: el carácter conservador que en cuestiones de seguridad tiene la disciplina, la falta de representaciones del conocimiento sobre la concepción y diseño de estructuras reales, la necesidad de equipos multidisciplinares para solventar la complejidad que subyace en toda estructura. Por ello, ha sido más fácil desarrollar software que se limite al análisis del problema que elaborar sistemas expertos de apoyo.

El resto de artículos están siempre orientados en una doble vertiente:

1. Sistemas de ayuda en la **definición del modelo de análisis estructural**: Una de las primeras experiencias fue el sistema SACON⁹ (1987) que pretendía aconsejar sobre la estrategia de análisis para estructuras de barras. En la misma línea pero para elementos finitos se encuentran dos experiencias, FEAA¹⁰ y Turkiyyah *et al.* (1996) [T1]. También se incluiría Hartmann *et al.* (1992) [H6] describiendo un sistema para ayudar en la selección de la estrategia numérica a seguir en problemas de optimización.
2. Sistemas de ayuda en el **diseño basados en experiencia heurística**: Por ejemplo Mukherjee *et al.* (1995) [M1] definen una red neuronal en lugar de un sistema experto para ayudar en el diseño. El artículo cita en contra de los sistemas expertos: la falta de aprendizaje, las reglas deben ser claras y el necesario conocimiento profundo de ingeniería. Por ello aboga por una red neuronal con reglas de conocimiento. Presentan un ejemplo de funcionamiento para una viga apoyada. En otro artículo Yoshimura *et al.* (1995) [Y2] definen un sistema experto para el diseño de componentes nucleares y comparan el diseño obtenido con conocimientos heurísticos y el obtenido con una metodología clásica de optimización.

⁹ La referencia exacta se encuentra en [D5] y es: Bennet, J.L. Creary, R. Engelmores and R. Melosh, *A Knowledge-based consultant for structural analysis*. Computer Science Dept. Stanford University. Calif. 1987.

¹⁰ La referencia exacta se encuentra en [D5] y es: Dolsak, Bojan and Anton Jezernik. *Mesh generation expert system for engineering analyses with FEM*. Computers in Industry, Vol 17, No 2,3 pp 309-315. Nov 1991.

En cuanto al razonamiento cualitativo puede citarse Bozzo [B3] (1993) con trabajos en el diseño sísmoresistente de edificios.

BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA DEL CAPÍTULO

- [B1] Brunet, P., “Diseño gráfico y modelado geométrico”, pp. 55-66. *Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y fabricación por computador*. Serie Mundo electrónico. Marcombo Boixareu editores, 1986
- [B2] Bugada, G., ‘*Utilización de técnicas de estimación de error y generación automática de mallas en procesos de optimización estructural*’ Tesis doctoral . Escola Tècnica Superior d’Enginyers de Camins, Canals i Ports. Barcelona, 1990.
- [B3] Bozzo, L.M. “*Qualitative Reasoning for earthquake resistant buildings*”. Monografía IS-1. CIMNE. 1993.
- [C1] Cuenca, J. y otros. *Inteligencia artificial: sistemas expertos*. Alianza editorial. 1986.
- [D1] Durkin, J. *Expert systems. Design and development*. Prentice-Hall. 1994.
- [G1] Garcés, X. “Sistemas CAD en microcomputadores. Problemática y posibilidades”, pp. 99-103. *Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y fabricación por computador*. Serie Mundo electrónico. Marcombo Boixareu editores, 1986.
- [G2] Gu,Y y Cheng,G. “Structural modelling and sensitivity analysis of shape optimization”, *Structural Optimization*. 6, 29-37, 1993.
- [G3] Garret, J. H. y Smith, I. F. C. “AI Applications in Structural/Construction Engineering”. *IEEE Expert*, pp 20-22. June 96.
- [H1] Haftka, R.T. y Grandhi, R. V. “ Structural Shape Optimization - A survey”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 57, 91-106, 1986.
- [H2] Haririan, M., Cardoso, J.B. y Arora, J.S. “Use of ADINA for design optimization of nonlinear structures”, *Computers and Structures*. 26, 123-133, 1987.
- [H3] Haftka, R. T., Sobieszczanski-Sobieski, J. y Padula, S.L. “On options for interdisciplinary analysis and design optimization”. *Structural Optimization*. 4, 65-74, 1992.
- [H4] Hinton, E. y Sienz, J. “Aspects of adaptive finite element analysis and structural optimization”, pp 1-25. *Advances in structural optimization*. Civil-Comp press. Edited by B.H.V. Topping and M. Papadrakakis. 1994.
- [H5] Harmon, P. y King, D. *Sistemas expertos. Aplicaciones de la inteligencia artificial en la actividad empresarial*. Ediciones Díaz de Santos. 1985.
- [H6] Hartmann, D y Lehner, K. “Non-numerical modeling techniques in structural optimization”. *Structural Optimization*, 4, 172-178, 1992.
- [K1] Kumar, V., Lee, S.J. y German, M.D. “Finite Element Design Sensitivity Analysis and its integration with numerical Optimization techniques for Structural Design”. *Computers and Structures*. 32, 883-897, 1989.
- [K2] Kimmich, S., Reitinger, R. y Ramm, E. “Integration of different numerical techniques in shape optimization”. *Structural Optimization*. 4, 149-155, 1992.

- [M1] Mukherjee, A. y Deshpande, J.M. "Application of artificial neural networks in structural design expert systems". *Computers and Structures*. 54, 367-375, 1995.
- [N1] Navarrina, F. "*Una metodología general para optimización estructural en diseño asistido por ordenador*". Tesis doctoral. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports. Barcelona 1987.
- [R1] Ramm, E., Bletzinger, K.U., Reitinger R. y Maute, K. "The challenge of structural optimization", pp. 27-52. *Advances in structural optimization*. Civil-Comp press. Edited by B.H.V. Topping and M. 1994.
- [R2] Rauch-Hindin, W. B. *Artificial Intelligence in business, science and industry. Vol I: Fundamentals*. Ed. Prentice-Hall. 1986.
- [S1] Stone, T. A., Santos, J. L. T. y Haug, E. J. "An interactive pre-processor for structural design sensitivity analysis and optimization". *Computers and Structures*. 34, 375-385, 1990.
- [S2] Santos, J.L.T., Godse, M.M. y Chang K.H. "An interactive post-processor for structural design sensitivity analysis and optimization sensitivity display and what-if study". *Computers and Structures*. 35, 1-13, 1990.
- [S3] Schildt, H. *Artificial Intelligence Using C*. Ed. MacGraw-Hill. 1987.
- [T1] Turkiyyah, G. M. y Fenves, S. J. "Knowledge-Based Assistance for Finite-Element Modeling". *IEEE Expert*, pp 23-32. June 96.
- [W1] Wolberg, J. R. *Applications of computers to engineering analysis*. Mc Graw-Hill. 1971.
- [Y1] Yang, R.J. "Design modeling considerations in shape optimization of solids". *Computers and Structures*. 34. 727-734, 1990.
- [Y2] Yoshimura, S., Mochizuki, Y. y Yagawa, G. "Automated structural design based on knowledge engineering and fuzzy control". *Engineering computations*, 12, 593-608, 1995.