

# APLICACION DE LAS TECNICAS DE DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR A LA CONCEPCION DE ESTRUCTURAS PARA SATELITES ESPACIALES

VICENTE GOMEZ MOLINERO  
*CASA Espacio y Sistemas*  
*Getafe, Madrid, España*

## SUMARIO

Se presentan aquí una revisión de las técnicas de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) y su aplicación al diseño de estructuras de satélites espaciales.

La descripción de las diversas fases del proceso de diseño y fabricación de satélites espaciales permite conocer el diagrama de flujo de la información y la posible automatización de cada actividad.

Se discute el estado actual de la aplicación de la CAE en la Industria Espacial Europea — y en el caso particular de una División Espacial Española — y se presenta también una panorámica de la posible evolución futura.

## SUMMARY

A review of the Computer Aided Engineering (CAE) techniques and their application to the spacecraft structure design is shown here.

The description of the different phases of the spacecraft design and manufacturing process allows to know the information flux diagram and the possible automation of each activity.

The present status of CAE application in European Space Industry — and in the particular case of a Spanish Space Division — is discussed and a survey of the possible future evolution is also presented.

## INTRODUCCION

En la década de los sesenta, y en el marco de un programa espacial (el programa APOLLO de la Agencia Espacial NASA), surgió la necesidad de disponer de un instrumento de análisis estructural automatizado, general y potente. Así nació el programa de ordenador para análisis estructural por el método de los elementos finitos llamado NASTRAN<sup>1</sup>.

El NASTRAN, que no fue el primer gran código de análisis por el MEF (método de los elementos finitos), ha llegado a ser con el tiempo, al cabo de casi veinte años, el más utilizado en todo el mundo<sup>2</sup>.

Durante estos años, el análisis estructural ha conocido una verdadera revolución en su metodología. Esa revolución ha llegado de la mano del desarrollo acelerado del MEF, junto con las sucesivas generaciones de computadores digitales, cada vez más potentes y baratos.

Recibido: Marzo 1986

Desde los últimos años setenta y, sobre todo en la década actual, estamos asistiendo a otra revolución que, apoyándose de nuevo en la informática, está cambiando la metodología de casi todas las áreas de actuación de la ingeniería y en casi todas sus especialidades. Aunque no hay una denominación uniforme, aquí adoptaremos una de las más usadas y hablaremos de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE en sus siglas inglesas).

La ingeniería aeroespacial, que fue de las primeras en analizar estructuras por el MEF, ¿cómo está aplicando todas las demás herramientas que sirven para poner en práctica el concepto CAE?

Este artículo trata de responder a esa pregunta desde la limitada experiencia del autor, es decir, centrado en el caso de la Industria Espacial Europea y, particularmente, desde una División Espacial Española, en la que se han desarrollado diversas partes estructurales de satélites artificiales europeos y del vehículo lanzador ARIANE.

## CONCEPCION DE ESTRUCTURAS ESPACIALES

Cuando se va a construir un nuevo vehículo espacial, como en cualquier otro caso similar de la ingeniería, se hace para responder a una "misión": poner en una determinada órbita (trayectoria) una serie de aparatos y experiencias (satélite) o ser capaz de lanzar una determinada carga (satélite con un peso y dimensiones) fuera de la atracción terrestre y situándolo en su trayectoria de inyección en órbita (lanzador).

El desarrollo de satélites y vehículos espaciales, tal y como se hace actualmente, tiene tres fases: la A, la B y la C/D.

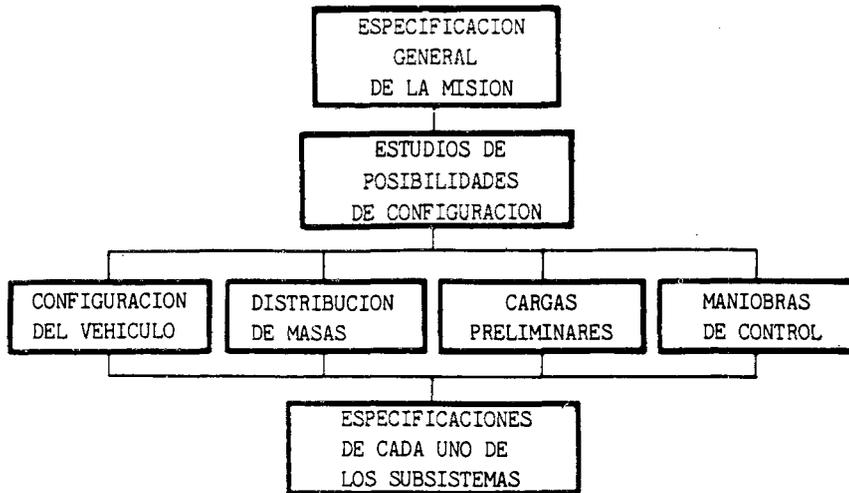
### Fase A

Durante la fase A se hace un análisis general de la misión que llevará a cabo el vehículo espacial. En ella se estudian, a un nivel simple, los diversos subsistemas del satélite.

Lo típico de la fase A son los estudios de posibilidades de configuración ("trade-off studies") en los que, basándose en la experiencia acumulada en sistemas similares anteriores y en cálculos sencillos, se hace un "encaje" general de cada uno de esos subsistemas.

En el subsistema estructural se hace el diseño conceptual, el análisis de interferencias geométricas entre las distintas partes de la estructura y de ésta con los equipos y subsistemas a los que da soporte, un primer cálculo másico y unas primeras estimaciones del comportamiento de la estructura frente al ambiente de cargas previsto:

- El análisis de interferencias, unido al diseño conceptual, nos da unos planos generales del satélite, necesarios para los otros estudios preliminares.
- La distribución de masas, momentos de inercia y centros de gravedad son datos muy importantes para los subsistemas térmicos y de control de actitud del vehículo.
- Una primera estimación del comportamiento dinámico del satélite (modos y frecuencias propias de vibración) es necesaria también para calcular su respuesta a los impulsos de guiado y para fijar el programa de control de actitud.
- Las estimaciones de distribución de temperaturas, disipación y absorción de calor, influirán en el diseño de los subsistemas de potencia y de manejo de datos y telemetría.



Esquema 1: Fase A de un programa espacial

El esquema 1 resume los objetivos de una fase A general de un vehículo espacial: de la especificación general de la misión a la que se va destinar y de la experiencia en vehículos similares, se extraen unas primeras especificaciones de requerimientos para los distintos subsistemas, que permiten entrar en las fases siguientes de diseño detallado.

En la fase A, el trabajo suele concentrarse en una o muy pocas industrias, que serán las encargadas de coordinar al equipo posterior de diseño detallado, actuando como contratistas principales (ésta es una característica típica de la organización espacial en Europa).

### Fase B

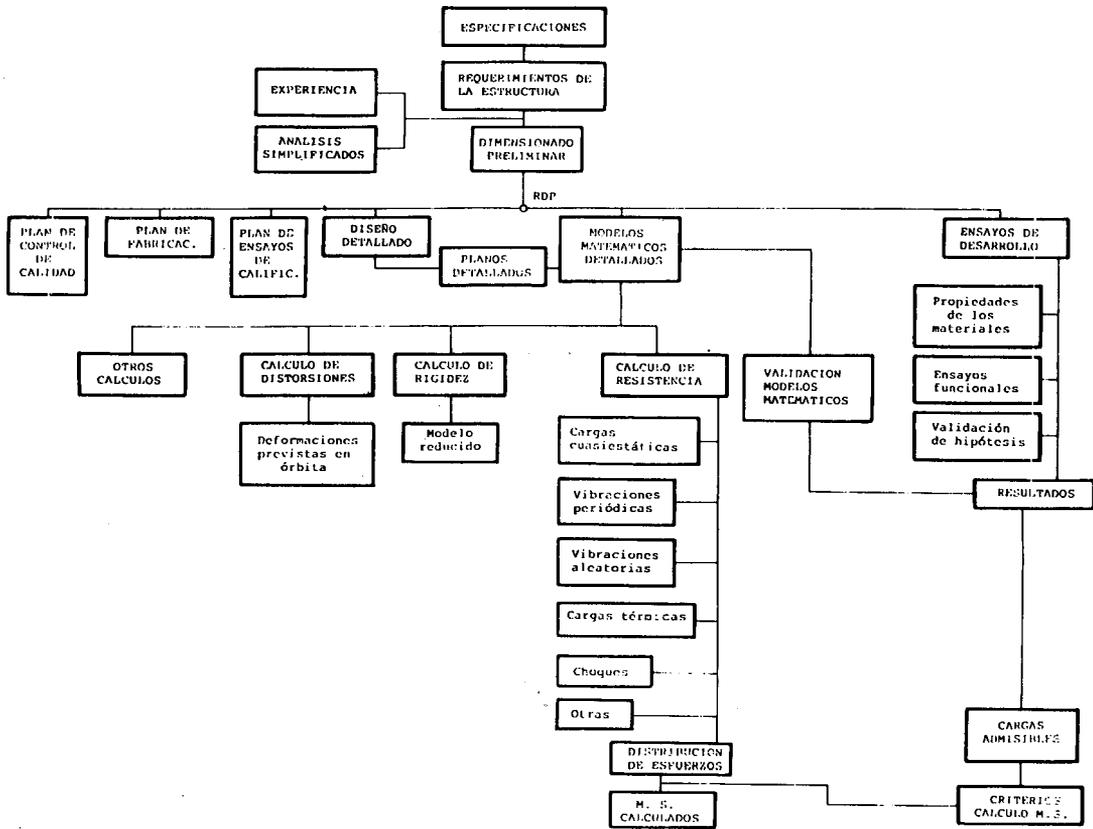
La fase B comienza con unas configuraciones, masas, cargas, etc..., fijadas en la fase A y recogidas en las especificaciones del sistema. En ella se entra a hacer un diseño detallado de cada uno de los subsistemas y componentes del satélite. Aún no se fabricará nada, salvo las probetas y modelos necesarios para realizar ensayos de desarrollo.

En cada subestructura se sigue un proceso similar al mostrado en el esquema 2. Como vemos en él, hay dos subfases diferenciadas:

- Con los requerimientos generales y, basándose en la experiencia en otras estructuras similares, se comienza haciendo una concepción y dimensionado preliminares. Ahí se sitúa un primer control externo: la RDP o revisión del diseño preliminar. En ella se examinan: el concepto general de la subestructura, los análisis que muestran el grado de cumplimiento de los requerimientos y los planes preliminares de fabricación, de ensayos de calificación y de desarrollo.

- Una vez pasada la RDP, se entra en el diseño detallado: mientras se desarrollan los planos preliminares descendiendo a cada detalle, se lleva a cabo el análisis estructural de todo el conjunto para demostrar el cumplimiento de las especificaciones, dimensionar la estructura y construir los modelos matemáticos reducidos de esa parte del vehículo espacial, necesarios para el análisis dinámico a nivel sistema.

Cada vez cobran mayor importancia en la fase B los llamados ensayos de desarrollo. En ellos se prueban ciertas partes de la estructura, para tratar de despejar dudas existen-



Esquema 2: Fase B de un programa espacial

tes sobre su comportamiento a la hora de modelizarla: desde las características básicas de los materiales usados (rigidez, resistencia, coeficiente de dilatación), hasta el funcionamiento mecánico en condiciones espaciales (vacío y temperaturas extremas) de maquetas y prototipos representativos.

Aumentando el número y variedad de ensayos de desarrollo, se obtienen modelos matemáticos (modelos de elementos finitos por lo general) más fiables, que permiten disponer de predicciones de comportamiento estructural muy difíciles (imposibles incluso) de ensayar: sirva como ejemplo el caso de las grandes estructuras espaciales actualmente en desarrollo -- con la vista puesta en las próximas estaciones orbitales tripuladas -- incapaces, por mucho, de soportar sin romperse la carga debida a su propio peso<sup>3</sup>.

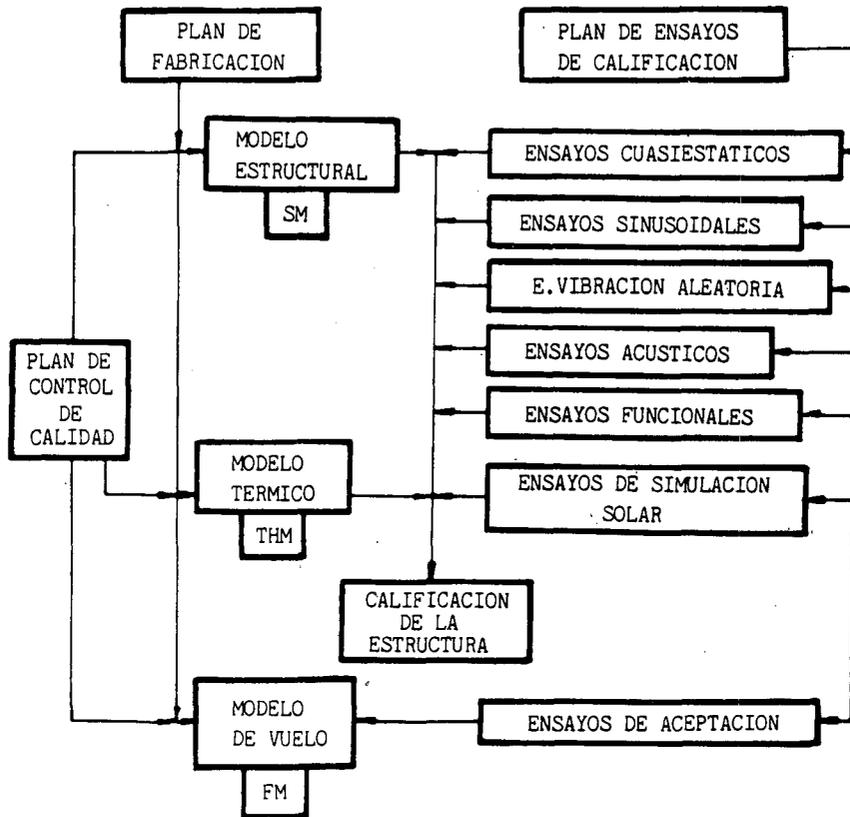
Durante la fase B se elaboran planes para la fabricación, control de calidad y calificación de la estructura, tareas todas propias de la fase C/D.

Si la fase B tenía al comienzo la RDP, finaliza con la RCD (revisión crítica de diseño), que pasa revista a todos los elementos producidos en ella (planos detallados, documentos de dimensionado, planes de fabricación, control de calidad y ensayos) y autoriza, a la luz de ellos, el comienzo de la fabricación.

### Fase C/D

La fabricación de varios modelos de la estructura y los ensayos de calificación (mecánicos, térmicos y funcionales) son las actividades típicas de la fase C/D, que

acaba con la entrega de un modelo calificado para el vuelo (el FM, flight model, en la terminología al uso).



Esquema 3: Fase C/D de un programa espacial

El esquema 3 resume la lógica de una fase C/D típica.

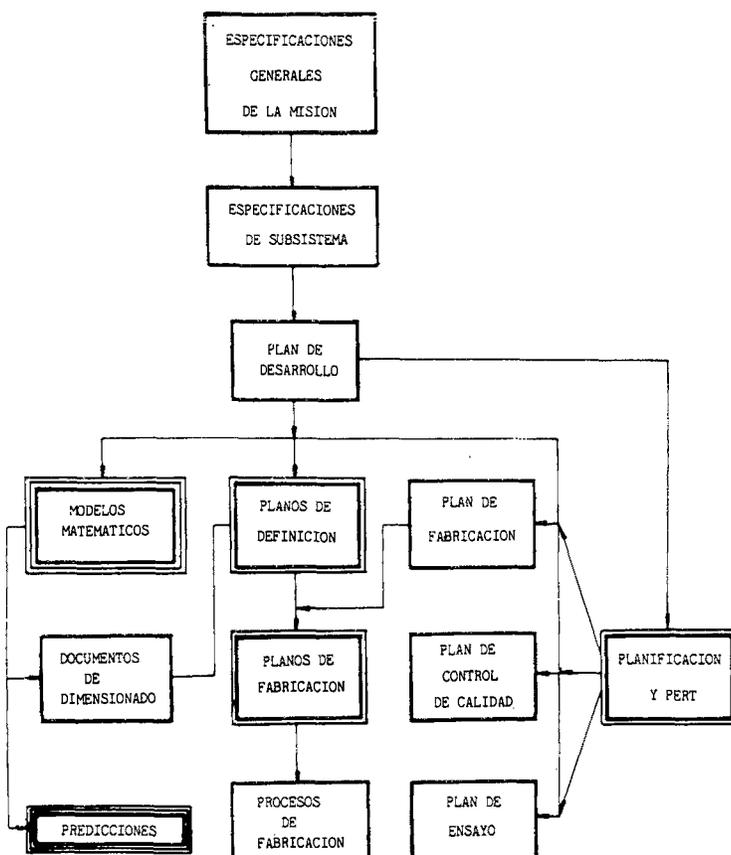
El modelo estructural (SM) sufrirá una cadena de ensayos todos ellos mecánicos: por eso es un modelo representativo sólo estructuralmente (en una estructura soporte de un panel solar, por ejemplo, sólo se representan la masa y rigidez de las células solares y no hacen falta células reales).

Tanto los ensayos de carga, (constante o vibratoria) como los funcionales, someten al SM a un ambiente extremo, que trata de simular las condiciones más críticas previstas durante su lanzamiento y vida orbital.

El modelo térmico (THM) se utiliza sobre todo para los ensayos que someten a la estructura a las situaciones extremas de su órbita. El más importante es el ensayo de simulación solar, en el que se introduce el THM en una cámara, en la que se hace el vacío y por medio de unas potentes lámparas, se simula el calentamiento del satélite por el sol. Mientras el modelo estructural puede usar maquetas de ciertas unidades (células solares), el térmico será muy parecido al de vuelo.

El conjunto de todas las predicciones de los modelos matemáticos comparadas con los resultados medidos en los ensayos de calificación, permiten decidir si el diseño estructural es apto para el vuelo o no: es la calificación de la estructura.

Una vez calificada una estructura, se procede a la fabricación del FM, que sufrirá, además de un conjunto de controles de calidad, unos ensayos de aceptación con niveles algo menores que los de calificación.



Esquema 4: Diagrama de flujo de la información

Así es, en general, el proceso de concepción y fabricación de estructuras espaciales actualmente. También de una forma general, el flujo de "información" en él es algo parecido a lo que refleja el esquema 4. En él vemos que, desde las especificaciones generales describiendo la misión se generan unos documentos a lo largo del Programa que adoptan la forma alfanumérica, gráfica o mixta y cuyas relaciones se esquematizan también allí.

### INGENIERIA ASISTIDA POR ORDENADOR

Cuando surgieron los computadores digitales, con ellos se desarrollaron los grandes programas de cálculo: las posibilidades de un ingeniero de análisis se multiplicaron mucho en muy poco tiempo.

La potencia de los ordenadores ha ido creciendo y con ella la complejidad de esos grandes programas también: cada vez cuesta menos calcular con mucho detalles. Pero no sólo ha crecido la potencia...

Durante la última década se han producido dos avances informáticos esenciales:

-- La aparición de sistemas operativos fuertemente interactivos, basados primero en los superminiordenadores y luego en auténticos "micros", base de las actuales estaciones de trabajo ingenieriles ("engineering workstations").

Prototipo de los primeros son los ordenadores VAX llamados superminis y de los segundos los APOLLO-DOMAIN o los micro VAX.

– El desarrollo espectacular de la informática gráfica interactiva, que ha llegado a formar una parte esencial del sistema operativo en las estaciones de trabajo.

**Ambiente CAE**

Ahora no sólo se puede calcular rápidamente mucho y con mucho detalle, sino que todo el proceso de la concepción, fabricación y ensayo de estructuras se puede automatizar en gran medida.

Los ordenadores permiten una comunicación inmediata entre las distintas áreas de trabajo ingenieril, que acceden a una BASE DE DATOS CENTRALIZADA Y UNICA y manipulan esos datos de forma interactiva, utilizando cada uno sus programas específicos.



Esquema 5: Concepción ingenieril clásica

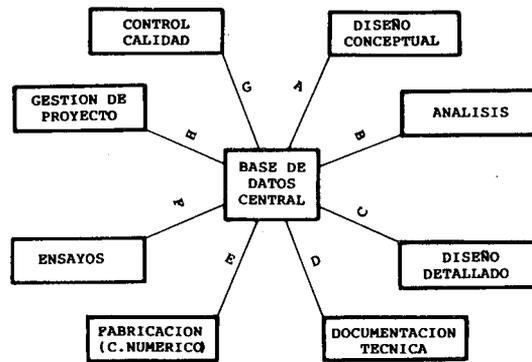
Si el proceso ingenieril clásico se puede esquematizar en forma lineal (ver el esquema 5): primero concepción general, luego análisis, luego fabricación y ensayo de prototipos y, por último, fabricación en serie (o del modelo de vuelo en el caso de los satélites), el nuevo ambiente de trabajo CAE, en cambio, tiene un esquema circular (esquema 6), donde todos viven el desarrollo del proyecto a la vez: el analista utiliza la geometría definida por los diseñadores y la actualiza como consecuencia de sus análisis; el ingeniero de ensayos conoce las previsiones y las combina con sus resultados que, a su vez, sirven para modificar los modelos matemáticos; el ingeniero de fabricación toma sus datos directamente del diseño y genera directamente programas para máquinas de control numérico o procesos de fabricación y todos ellos ven su trabajo controlado día a día por el gestor del proyecto.

Los componentes de este nuevo concepto de Ingeniería Asistida por Ordenador son:

-- En el centro de todo, la Base de Datos única, centralizada, con su sistema gestor incorporado (DBMS en inglés) en donde toda la información relativa a cada proyecto está almacenada y es continuamente actualizada.

La tecnología informática de Bases de Datos, desarrollada para aplicaciones de gestión está siendo adaptada y aplicada a las diversas facetas de la información ingenieril.

-- Accediendo a esa Base de Datos Central, toda una serie de programas especializados realizan cada una de las funciones (ver esquema 6):



Esquema 6 Concepto CAE

En la rama A tenemos los modelizadores sólidos.

En la B todos los programas de análisis por elementos finitos, diferencias finitas y otros métodos numéricos.

En la C están los sistemas CAD (diseño asistido por ordenador).

En la D conviven los sistemas CAD junto con procesadores de textos.

En la E están los sistema CAM (fabricación asistida por ordenador).

En la ramas F, G y H hay otros programas específicos.

– El tercer componente (que es un punto crítico hoy día) lo constituyen los usuarios: técnicos cuya formación continuada y flexible es fundamental.

### Posición de los técnicos

Cuando el ordenador va dando respuestas cada vez más rápidas y sofisticadas a las preguntas que el usuario le hace, éste puede llegar a perder el sentido de sus preguntas y caer en errores desgraciadamente frecuentes:

- El llamado “síndrome de la caja negra”, por el que el ingeniero “se cree” todo lo que dice el ordenador sin someterlo a una necesaria crítica desde el “sentido físico”.
- La tendencia a creer que algo está mejor hecho por utilizar la informática para hacerlo.
- La tendencia a hacer prevalecer el modelo numérico o gráfico sobre la “terca” realidad, olvidando quién representa a quién.

Y es que no hay que olvidar que la formación informática de los actuales técnicos ha sido, en el mejor de los casos, anticuada cuando no simplemente inexistente (se aprende, aún hoy día, a usar el ordenador interactivo como herramienta habitual en todas las Escuelas de Ingeniería?).

Contra lo que pudiera pensarse a primera vista, la dificultad principal que surge - y a la vez se convierte en todo un reto personal- al automatizar las labores de ingeniería, relevando a los técnicos de las tareas rutinarias, es la de que éstos deben concentrarse entonces en labores eminentemente creativas...

Una última dificultad para la implantación del ambiente CAE, frecuentemente despreciada por los responsables de esa implantación, es la obligada reconversión y reorganización del trabajo que acarrea. En él se diluyen las fronteras entre los distintos especialistas y la información está más uniformemente repartida y en él la organización del trabajo no puede seguir siendo lineal, jerárquica y rígida, “necesita” cambiar y hacerse, sobre todo flexible.

## ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En este momento, en Europa y en la industria espacial, el concepto CAE no ha hecho más que empezar a aplicarse y de una forma parcial.

Los estudios necesarios para efectuar su implantación están comenzando a hacerse al mismo tiempo que se recogen las primeras experiencias de su práctica parcial.

Actualmente hay varios estudios patrocinados por la Agencia Espacial Europea (ESA) que están en marcha o recogiendo sus primeros resultados:

- Una revisión de sistemas gestores de bases de datos de tipo relacional, aplicados a la ingeniería espacial, con objeto de elegir uno que pueda ser norma en Europa.
- El desarrollo de un Sistema Automático de Análisis de Datos de Ensayos (TDAS), que trata de introducir las técnicas de diseño asistido por ordenador en una de las áreas menos automatizadas y que generan mayor cantidad de datos: los ensayos.
- Una revisión de los sistemas CAE usados por las industrias espaciales europeas en todas las actividades: diseño, análisis, fabricación, gestión, etc...
- Diversos estudios acerca de la unión automática de los programas de análisis especializados de cada disciplina (estructural lineal, no lineal, térmico, radioeléctrico, control de actitud, etc...).
- Algún estudio inicial sobre posibles futuras aplicaciones de los sistemas expertos como desarrollo de las técnicas CAE.

Por otro lado, también la ESA, ha desarrollado un sistema de almacenamiento y puesta al día de la información llamado ESABASE, que permite la comunicación automática entre distintos especialistas y puede ser el germen de una futura Base de Datos Centralizada.

Las industrias espaciales europeas, por su parte, están llevando a cabo diversas experiencias en el campo de la automatización de la ingeniería, que sirven como complemento a los estudios de la ESA.

En el caso concreto de CASA Espacio y Sistemas, el estado actual y la previsión para el futuro inmediato son:

a) Areas ya automatizadas (recogiendo experiencias como usuarios):

- Cálculo estructural y térmico, con programas de análisis por el MEF y por diferencias finitas y diversos pre y postprocesadores.
- Diseño conceptual, con un modelizador sólido comunicado automáticamente con el sistema CAD y el preprocesador de EF.

- Diseño detallado, con un sistema CAD comunicado directamente con el preprocesador de EF y con los sistemas de fabricación por control numérico.
- Ensayos, con programas propios y adquiridos de tratamiento de datos de ensayos estáticos, dinámicos y de análisis modal y conexión con los programas de análisis estructural.
- Diseño radioeléctrico de antenas, con conexión automática prevista al diseño termomecánico.

b) Areas cuya automatización está iniciándose:

- Gestión de proyectos, con diversos programas internos y externos de control y planificación.
- Documentación técnica, con programas de archivo y búsqueda junto a procesadores de textos.
- Análisis cinemático y dinámico de mecanismos, con programas que permitan la modelización de miembros flexibles (por EF o por sus modos de vibración medidos).

La conexión entre los distintos procesadores y programas está hecha o prevista y la posible utilidad de un sistema gestor de base de datos relacional único está siendo estudiada.

Un plan para implantar el concepto CAE en la ingeniería espacial (extrapolable a cualquier otra, en principio), debe partir de las siguientes consideraciones:

1. Se debe saber desde el principio cómo evaluar el supuesto aumento de productividad asociado a toda automatización.  
En este sentido, se debería disponer en Europa de un instrumento similar al proyecto ICAM de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, que sirve para evaluar, diseñar y poner en marcha sistemas CAE<sup>4</sup>.
2. Antes de empezar a automatizar sectorialmente, hay que trazar un plan general que contemple todo el proceso y evalúe la viabilidad y coste de las conexiones que permitan unir los "islotos automatizados" en un proceso global.
3. Hoy día el mercado ofrece muy buenos programas sectoriales, algunos de los cuales llevan décadas implantados en la industria espacial (NASTRAN, ASKA o SINDA), de los que no se puede prescindir a corto plazo.

El esfuerzo mayor debe desarrollarse para establecer programas de conexión de éstos con la Base de Datos Central.

4. Los puntos de partida del plan deben ser, por un lado el diagrama de flujo de la información (esquema 4) detallado para el caso particular de cada industria y por otro un análisis realista de la situación de partida, aclarando por lo menos:
  - El grado de automatización ya existente en cada rama de la actividad ingenieril.
  - La disposición y capacidad de adaptación a lo nuevo de los futuros usuarios y sus organizaciones.
  - Los medios de software y hardware que harán falta para completar el proceso.

El futuro de la ingeniería espacial pasará por una aplicación cada vez mayor de las técnicas CAE.

Los hitos que ahora se vislumbran, más o menos cercanos en el tiempo, no son más que una débil perspectiva de ese futuro.

Dos caminos continuarán en paralelo:

— Por un lado se automatizarán aún más ciertas parcelas como el diseño termomecánico en el que:

- Se creará una Base de Datos Central normalizada con conexión a sistemas CAD, programas de análisis estructura, térmico y mecánico.
- Se establecerá una conexión automática entre los programas de análisis y los sistemas de recogida de datos de ensayos u orbitales, guiando al ingeniero en la interpretación de éstos.
- Aparecerán distintos tipos de sistemas expertos de ayuda al diseño<sup>5</sup>.

— Por otro lado se avanzará paulatinamente hacia el ambiente CAE aplicado a todas las facetas de la actividad ingenieril:

- Introduciendo el ordenador en las que no lo esté.
- Unificando las “estaciones de trabajo” y sus capacidades básicas gráficas, de programación y proceso de textos.
- Ampliando el ámbito de la Base de Datos Central desde el diseño a la fabricación, el control de la calidad y la gestión.

## CONCLUSIONES

Probablemente las actividades espaciales van a seguir siendo fieles a una de sus características históricas: servir de motor al desarrollo tecnológico en todas sus facetas.

Si el desarrollo de los grandes programas de elementos finitos le deben mucho a aquel proyecto lanzado en plan de objetivo por un Presidente norteamericano de “poner a un hombre en la Luna”, la automatización de los procesos de diseño y fabricación, la aplicación real de las técnicas CAE surgidas durante la última década, pueden deber también mucho a otro gran proyecto espacial lanzado de nuevo en plan de objetivo por otro Presidente: “crear, construir y dejar en órbita permanente en torno a la Tierra una Estación Espacial Tripulada antes de una década”. (“Mandato” del Presidente Reagan a la NASA en Febrero de 1985).

Europa (la ESA), Japón y Cánada participan en ese proyecto junto a los Estados Unidos. Esta vez la difusión internacional de los avances y conclusiones es de esperar que sea aún mayor y más rápida.

## REFERENCIAS

1. MSC/NASTRAN Users Manual.
2. Finite Element News, número 3, (1983).
3. JPL. Pasadena y B.K. Wada, "Spacecraft Load, Design and Test Philosophies", USA, presentado a la "*International Conference on Spacecraft Structures*" en Toulouse del 3 al 6 de Diciembre (1985).
4. "The ICAM Approach to Managing CAD/CAM" de Robert Campbell, presentado en el "*Second Chautaugua on Productivity in Engineering and Design*", Noviembre, (1982).
5. J. Steven, "Computer-Integrated Design Technologies. Status and Prospects". Fenves, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, USA, presentado en la "*26th Conference on structures, Materials and Dynamics*" celebrada en Orlando (USA) en Abril, (1985).