

# Diseño conceptual de la estructura del Gran Telescopio de Canarias, de 10 m de diámetro, para el observatorio del Roque de los Muchachos

## [ Conceptual Design of the Structure of the 10 m diameter Telescope (GTC) for the Roque de los Muchachos Observatory ]

Autores del Diseño/Designed by:

Julio Martínez Calzón<sup>1</sup>

José María Goicolea<sup>2</sup>

Carlos Pozo Moya<sup>1</sup>

Juan Carlos García Orden<sup>2</sup>

Ginés Ladrón de Guevara Méndez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> MC-2 Estudio de Ingeniería, S.L.

<sup>2</sup> Grupo de Mecánica Computacional. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Madrid.

Propiedad/Owner: Gran Telescopio de Canarias, S.A. (GRANTECAN)

### RESUMEN

El diseño conceptual del Gran Telescopio Canario, pretende definir una tipología estructural óptima para cumplir la exigente serie de requerimientos necesarios para el eficaz uso de este excepcional sistema de observación. Las altas prestaciones tanto estáticas como dinámicas requeridas por el telescopio, con un espejo primario de más de 10 m de diámetro equivalente, determinan la necesidad de un análisis detallado de los diversos componentes aislados del sistema estructural, con el objeto de desvelar la influencia de cada componente sobre el comportamiento global del conjunto.

La optimización de las variables de diseño, inicialmente de carácter geométrico y cinemático, consigue una solución tipológica y topológica inicial óptima que proporciona una reducción considerable de la masa estructural necesaria, lo cual determina un favorable punto de partida para el posterior control de las magnitudes dinámicas que son las que finalmente llevan a la definición precisa del sistema.

### **1. ALCANCE DEL DISEÑO. OBJETIVO Y REQUISITOS DEL PROBLEMA ESTRUCTURAL**

El trabajo ha sido realizado por el Gabinete MC-2 Estudio de Ingeniería, S.L. y el Grupo de Mecánica Computacional en-

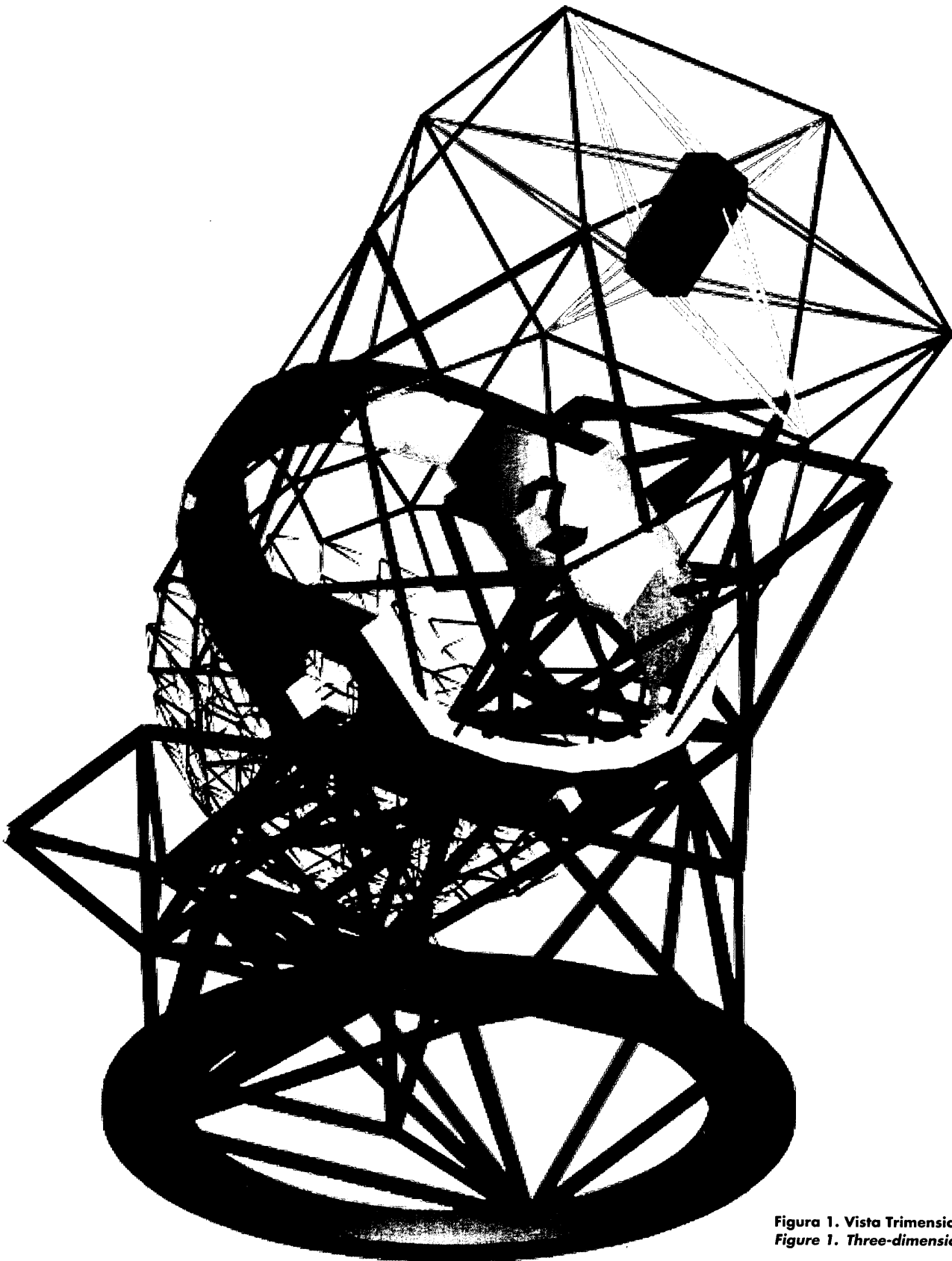
### ABSTRACT

*The conceptual design of the Great Canary Island Telescope, or GTC to use its original initials, attempted to define the optimum structural type needed to comply with the strict series of requirements necessary for the efficient use of this exceptional observation system. The high static and dynamic performance required by the telescope, with a primary mirror of over 10 m equivalent diameter, needed a detailed analysis of the different individual components of the structural system, in order to establish the influence of each component on the overall behaviour of the assembly.*

*The optimization of the design variables, which were initially of a geometric and cinematic nature, gives an optimum initial typological and topological solution which provides a considerable reduction in the structural mass required, and which establishes a favourable starting point for the subsequent control of dynamic parameters which finally lead to the precise definition of the system.*

### **1. DESIGN SCOPE. OBJECTIVES AND REQUIREMENTS REGARDING THE STRUCTURAL PROBLEM**

*The work was carried out by the MC-2 Engineering Consultant Office Gabinete de Ingeniería, S.L and the*



**Figura 1. Vista Tridimensional.**  
*Figure 1. Three-dimensional view.*

cuadrado en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

El diseño, encargado por la compañía Gran Telescopio Canarias, S.A. (GRANTECAN) integrada en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), tiene como objetivo la definición de una tipología estructural y una geometría óptima ajustada a los condicionamientos impuestos finalmente por las estrechas tolerancias dinámicas.

La estructura presentada queda claramente enmarcada dentro de las obras más singulares de la Ingeniería Civil por varios motivos. Es evidente la excepcional singularidad tipológica de este tipo de estructura; pero es más palpable aún esta singularidad cuando se profundiza en el análisis de la misma. En efecto, los órdenes de magnitud de los condicionantes geométricos y movimientos exigidos se desmarcan netamente de los habituales en el campo de la Ingeniería Civil; pero, sobre todo, es en el ámbito de los requerimientos dinámicos impuestos por criterios de integración de la estructura en un conjunto de elementos ópticos y sistemas de control de extrema precisión donde la excepcionalidad de la estructura destaca claramente.

### 1.1. Requisitos geométricos

El Gran Telescopio Canario (GTC), de configuración alto-azimutal, posee dos partes claramente diferenciadas: el tubo y la montura.

El término tubo define un complejo conjunto de elementos ópticos y sistemas de control altamente sofisticados que requieren un posicionamiento de la más alta precisión posible. La estructura que determinan estos condicionantes debe permitir acopladamente el giro alrededor de un eje de elevación sustentado y accionado desde la montura, y la rotación azimutal sobre un anillo inferior de suspensión hidráulica.

Dentro del conjunto tubo se diferencian los siguientes subsistemas:

- ▼ Araña; o sistema de sustentación de tipo radial cuyo objeto es la fijación del espejo secundario de tipo Ritchey-Chretien, y/o posible configuración gregoriana alternativa.
- ▼ Estructura del tubo superior; o celosía tridimensional que debe transmitir los esfuerzos generados por la configuración del secundario hasta el anillo de elevación en cualquiera de las posibles posiciones cenitales del tubo.
- ▼ Anillo de elevación; el cual recibe y liga el tubo superior y el tubo inferior transmitiendo a su vez los esfuerzos a la montura a través del eje de elevación.
- ▼ Estructura del tubo inferior; celosía con alto comportamiento espacial cuyo objetivo es fijar la posición de la cel-

*Computational Mechanics Group of the Department of Continuous Mechanical Media and Structural Theory at the Civil Engineering Faculty of the Madrid Polytechnic University.*

*The design, entrusted by the company Gran Telescopio Canarias, S.A (GRANTECAN) integrated within the Canary Island Institute of Astrophysics (IAC), had to define the structural type and optimum sizing to suit the conditions imposed by narrow dynamic tolerances.*

*The structure may be clearly established as one of the most unique works of Civil Engineering for various reasons. The special nature of this structural type is evident, but this uniqueness becomes even more noticeable when going deeper into the analysis of the same. While the orders of magnitude of the geometric conditions and movement required are very different from the normal limits established in civil engineering, the exceptionality of the structure becomes far more evident when considering the dynamic requirements imposed by the placing of an assembly of optical elements and control systems of extreme precision within the structure.*

### 1.1. Geometrical requirements

*The GTC is an alt-azimuth telescope which is composed of two clearly different parts: the tube and the mount.*

*The term tube refers to a complex assembly of optical elements and highly sophisticated control systems which require a positioning of the highest possible precision. The structure established in accordance with these conditions must allow the coupled rotation around the elevation axis activated from the mount and the azimuthal rotation on a lower hydraulic suspension ring.*

*The tube assembly is in turn composed of the following sub-systems:*

- ▼ *Spider; or radial support system which holds the secondary mirror of Ritchey-Chretien type and/or a possible alternative Gregorian configuration.*
- ▼ *Upper tube structure, or three-dimensional truss which must transfer loads generated by the secondary configuration to the elevation ring at any of the possible zenithal positions of the tube.*
- ▼ *Elevation ring, which receives and connects the upper and lower tubes and, in turn, transfers loads to the yoke via the elevation bearing and drive sub-systems of the elevation axis.*
- ▼ *Lower tube structure, or space frame structure, which supports the primary-mirror cell in any of the positions of the telescope.*

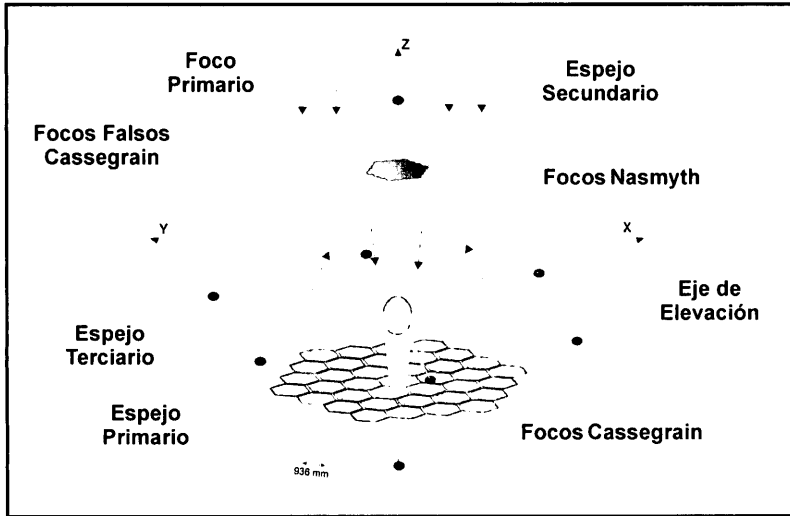


Figura 2.1. Configuración óptica.  
Figure 2.1. Optical configuration.

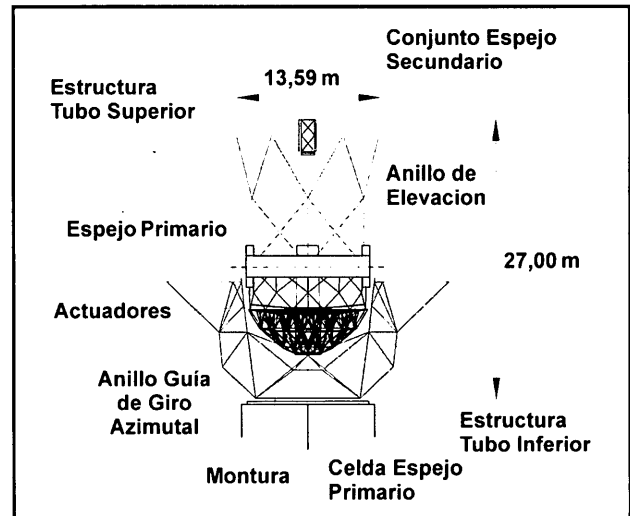


Figura 2.2. Configuración estructural.  
Figure 2.2. Structural configuration.

da de sustentación del espejo primario en cualquiera de las posiciones de uso del telescopio.

▼ Celda del espejo primario; estructura encargada de soportar el peso del espejo primario, y del foco Cassegrain situado en el extremo inferior.

La montura es una estructura reticulada espacial que soporta en los puntos de accionamiento y fijación el anillo de elevación a través del eje de elevación y, por tanto, debe asumir todos los esfuerzos de origen gravitatorio y perturbaciones del tubo. Asimismo, debe albergar dos plataformas Nasmyth laterales, para desdoblamientos o multiplicación simultánea de observaciones.

Todas las cargas asignadas en el conjunto del Telescopio son transmitidas a la cimentación a través de los apoyos y accionamientos del giro acimutal.

Las dimensiones principales y características de todos estos elementos se definen en la figura 2 y básicamente se describen a continuación.

▼ Diámetro del espejo primario segmentado de 11.346 m, formando 36 espejos hexagonales de 0.936 m de lado (peso aproximado 16560 kg).

▼ Configuración óptica con un solo espejo secundario Ritchey-Chretien con una distancia entre vértices de espejos primario y secundario de 14.739 m.

▼ Distancia desde el vértice del espejo primario al eje de elevación de 4.00 m.

▼ Longitud focal total efectiva: 17.000 m.

▼ Altura total aproximada del Telescopio: 29.000 m.

▼ Ancho total aproximado del Telescopio: 27.80 m.

▼ Instrumentación óptica adicional: dos focos Nasmyth y cuatro falsos focos Cassegrain.

▼ Primary-mirror cell, the structure supporting the weight of the primary-mirror and the Cassegrain focal assembly set at the lower end.

The mount is a space framed structure component comprised of a yoke which supports the elevation bearings and subsequently the elevation ring, and which must bear all the gravitational loads and motions of the tube. The mount also houses two Nasmyth lateral platforms for split or simultaneous multiplication of observations.

All the assigned loads of the telescope structure are transferred to the pier by the bearings and the azimuth drive ring.

The main dimensions and characteristics of all of these elements are indicated in fig. 2 and basically consist of the following:

▼ 11.346 m diameter primary-mirror, formed by 36 hexagonal segment mirrors with a side of 0.936 m.

▼ Optical configuration with one secondary Ritchey-Chretien mirror, with a distance between primary and secondary vertices of 14.739 m.

▼ Distance from primary vertex to elevation axis: 4.00 m.

▼ Total effective focal length: 17.00 m.

▼ Approximate total height of the telescope: 29.00 m.

▼ Approximate total width of telescope: 27.80 m.

▼ Additional optical instruments: two Nasmyth foci and four folded- Cassegrain foci.

## 1.2. Requisitos bajo acción gravitatoria

- ▼ Desenfocado ( $\delta_1$ ); desplazamiento en la dirección del eje óptico entre los vértices del primario y del secundario, el cual no debe superar el valor de 1 mm.
- ▼ Descentramiento del secundario ( $\delta_2$ ); distancia transversal desde el vértice del secundario al eje óptico definido por la normal al primario en su vértice. Este valor no debe superar 1 mm.
- ▼ Paralelismo primario-secundario ( $\theta_1$ ); ángulo entre las normales a ambos vértices, de valor menor o igual a 3'.
- ▼ Desalineado de la instrumentación ( $\theta_2$ ); ángulo entre el eje de la instrumentación y el conjunto primario-secundario, cuyo valor no debe superar los 20''.
- ▼ Movimiento de imagen ( $\theta_3$ ); definido como el movimiento de la imagen de una estrella debido a perturbaciones del telescopio, como si fuesen vistos por una cámara situada en el plano focal Cassegrain; el valor de este parámetro no debe superar 10'.
- ▼ Descentramiento del terciario respecto de la posición real del vértice del espejo primario con el tubo en posición horizontal, siempre inferior a 0.5 mm.

Debe notarse que, en general, los requisitos bajo acción gravitatoria son menos exigentes que los especificados en otros de similares características como el Keck (Ref.1), debido al carácter adaptativo del sistema regulador del espejo primario.

## 1.3. Requisitos bajo perturbaciones dinámicas o estáticas

El efecto de las perturbaciones dinámicas se limita a través de valores mínimos de las frecuencias propias para determinados modos de vibración:

- ▼ Frecuencia de accionamiento bloqueado el eje acimut ( $f_{acim}$ ):  $\geq 8$  Hz;
- ▼ Frecuencia de accionamiento bloqueado el eje de elevación ( $f_{elev}$ ):  $\geq 12$  Hz;
- ▼ Frecuencia de vibración axial de la celda del primario ( $f_{ax1}$ ):  $\geq 15$  Hz;
- ▼ Frecuencia de vibración axial del espejo secundario ( $f_{ax2}$ ):  $\geq 25$  Hz;
- ▼ Frecuencia de vibración rotacional del espejo secundario ( $f_{rot}$ ):  $\geq 25$  Hz;
- ▼ Frecuencia de vibración torsional del espejo secundario ( $f_{tor}$ ):  $\geq 15$  Hz;
- ▼ Rigidez a movimiento de imagen por perturbación del secundario debido a la acción del viento:  $\leq 0.5''$ , definido en el apartado anterior para acciones gravitatorias;

que al contrario de lo dicho para las acciones gravitatorias, son mucho más exigentes que las solicitadas para telescopios previamente construidos.

## 1.2 Optical requirements under gravity loadings

- ▼ Defocus ( $\delta_1$ ) displacement between primary and secondary vertices with respect to the optical axis should not exceed 1mm.
- ▼ Decentering of secondary ( $\delta_2$ ): the transverse distance from the vertex of the secondary to the optical axis defined by the normal of the primary vertex, should not exceed 1 mm.
- ▼ Tilt between primary and secondary mirrors ( $\theta_1$ ): angle between normals to both vertices should be equal or less than 3'.
- ▼ Misalignment of instrumentation ( $\theta_2$ ): the angle between the instrumentation axis and the primary-secondary assembly should not be greater than 20''.
- ▼ Image motion correction ( $\theta_3$ ): defined as the image movement of a star due to the chopping of the telescope, as if seen by a camera placed on the Cassegrain focal plane. This parameter should not exceed 10'.
- ▼ Decentering of the tertiary with respect to the real position of the primary mirror vertex and the tube in horizontal position, should be less than 0.5mm.

It should be noted that, in general, the requirements under gravity loading are less demanding than those specified in other telescopes of similar characteristics such as the Keck telescope (Ref. 1) due to the adapting nature of the regulating system of the primary mirror.

## 1.3 Mechanical requirements under dynamic and static disturbances

- ▼ Eigenfrequency of locked Azimuth bearing ( $f_{azim}$ )  $\geq 8$  Hz
- ▼ Eigenfrequency of locked elevation bearing ( $f_{elev}$ )  $\geq 12$  Hz
- ▼ Axial vibration of primary mirror cell ( $f_{ax1}$ )  $\geq 15$  Hz
- ▼ Axial vibration of secondary mirror cell ( $f_{ax2}$ )  $\geq 25$  Hz
- ▼ Rotational vibration of secondary mirror ( $f_{rot}$ )  $\geq 25$  Hz
- ▼ Torsional vibration of secondary mirror ( $f_{tor}$ )  $\geq 15$  Hz
- ▼ Stiffness to image motion by disturbances of secondary due to wind action  $\leq 0.5''$  arc sec, defined in the previous section for gravity loadings;

These requirements, as opposed to that indicated for the gravity loadings, are much more demanding than those specified for previously built telescopes.

## **2. ASPECTOS CLAVES DEL DISEÑO. EVOLUCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES**

La primera fase del diseño tuvo como objetivo fundamental el establecimiento de una tipología, y un dimensionamiento en órdenes aproximados con el fin de acotar las dimensiones reales del problema. Por ello, el estudio se centró en el análisis y contraste de otras estructuras de similares características aunque siempre de menores dimensiones (por ejemplo: Telescopio Keck, Ref. 1). El establecimiento de la nueva tipología se ciñó exclusivamente a condicionantes estáticos ya que presentaban una mayor claridad intuitiva, necesaria en una fase de carácter aproximativo.

El análisis pormenorizado de cada uno de los subconjuntos aislados integrantes del sistema permitió desacoplar los diferentes modos de comportamiento de éstos. Posteriormente se fueron incorporando aspectos dinámicos en dichos subconjuntos y así estimar la respuesta aislada de los mismos, e intuir su posterior comportamiento en el sistema acoplado.

Como se verá más adelante, el condicionamiento impuesto por el aspecto dinámico adquiere total protagonismo conforme avanzan las fases de diseño. Las estrictas tolerancias ópticas definidas exigen un diseño de máxima rigidez, fácilmente alcanzable mediante un incremento de masa estructural. Pero un incremento de masa poco meditado, no selectivo, conduce a una pérdida dramática de calidad en la respuesta dinámica.

La segunda fase del proceso de diseño consistió en el análisis de la respuesta global del sistema acoplado. Este control desveló respuestas que no se amoldaban en su totalidad a los condicionantes inicialmente impuestos, de carácter genérico determinado para prestaciones ideales, y que (como se precisará en apartados posteriores) no se pudieron llegar a conseguir de forma completa, trasladándose a los técnicos astrónomos el entorno de los valores límites obtenibles sin perjudicar a los restantes requisitos, con el fin de determinar las consideraciones de la interacción estructura-sistema.

Todos los modelos de cálculo fueron analizados con los programas ABAQUS y ANSYS. El proceso de optimización se llevó a cabo con el programa ANSYS.

## **3. RESULTADOS DEFINITIVOS**

Los resultados definitivos mostrados en el desarrollo de este capítulo fueron calculados mediante un modelo de elementos finitos de barras con el programa ABAQUS.

A efectos del cálculo de las magnitudes de carácter óptico, debidas a cargas gravitatorias y perturbaciones estáticas, se consideraron dos posibles posiciones del tubo: posición vertical del tubo apuntando al zenit (desfavorable para el desenfoque,  $\delta_v$ ) y posición horizontal (desfavorable para el resto de los

## **8. KEY ASPECTS OF THE DESIGN. EVOLUTION OF STRUCTURAL ALTERNATIVES**

*The first stage of the design was centred around establishing the type and approximate dimensions to mark the real dimensions of the problem. As such, the study was based on the analysis and comparison of other structures of similar characteristics though always of smaller size (such as the Keck Telescope, see Ref1). The establishing of a new type was purely based on the static specifications, as these provided greater insight with regards to the approximation.*

*The detailed analysis of each of the sub-systems forming the assembly allowed the disconnection of the different forms of behaviour of the same. The dynamic aspects of the said sub-systems were then incorporated in order to allow an estimation of the independent response of the same, and to then evaluate their subsequent behaviour in the assembly.*

*As shall be seen further on, the conditioning imposed by the dynamic aspect took an ever increasing role with the advance of the design stages. The strict optical tolerances specified required a design of maximum stiffness, which could easily be obtained by an increase in structural mass. However, any increase in mass which was not duly considered or which was poorly selected would lead to a dramatic loss of quality in terms of dynamic response.*

*The second stage of the design process consisted of analysing the overall response of the assembly system. This control revealed responses which did not totally suit the initially imposed general conditions for ideal performance, and these (as shall be seen further on) could not be obtained in their entirety and, therefore, the astronomer technicians were then entrusted with the limit values obtained, though without detriment to the remaining requirements, in order to establish the specifications regarding the structure-system interaction.*

*All the calculation models were analyzed with ABAQUS and ANSYS programmes. The optimization process was carried out using the ANSYS programme.*

## **9. FINAL RESULTS**

*The final results indicated in this chapter were calculated by a finite element bar model using the ABAQUS programme.*

*In order to calculate the magnitudes of an optical nature, due to gravity loadings and static disturbances, two possible tube positions were taken into consideration: the vertical tube position pointing to the zenith (unfavourable for defocus (1) and the horizontal position of the tube (unfavourable for all other conditions). The results obtained are indicated in Table 1 below.*

**TABLA 1. RESULTADOS PARA ESPECIFICACIONES ÓPTICAS BAJO CARGAS GRAVITATORIAS.  
TABLE 1. RESULTS FOR OPTICAL SPECIFICATIONS UNDER GRAVITY LOADS**

	$\delta_1$ (mm) <sup>a</sup>	$\delta_2$ (mm) <sup>b</sup>	$\delta_1$ <sup>c</sup>	$\delta_2$ <sup>d</sup>	$\delta_3$ <sup>e</sup>
Resultado/Result	0.938	0.412	-0.365'	-13.442''	-0.424'
Especificación/Specification	1	1	3'	20''	10'

desenfoque/defocus; <sup>b</sup> descentramiento/decentering; <sup>c</sup> paralelismo/tilt; <sup>d</sup> desalineado de la instrumentación/misalignment of instrumentation; <sup>e</sup> movimiento de imagen/ image motion.

condicionantes). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

El cálculo de las especificaciones mecánicas debidas a las acciones dinámicas consiste en un análisis de los modos y frecuencias propias de la estructura. Este análisis se ha realizado complementando dos vías de actuación: un cálculo convencional de modos y frecuencias propios y la posterior identificación visual de éstos; y un estudio en el dominio de la frecuencia mediante la aplicación de una perturbación actuando en el sentido del modo buscado (barrido de frecuencias).

Los resultados obtenidos para las frecuencias quedan resumidos en la Tabla 2.

Los gráficos resultado de los análisis de barrido en frecuencias se muestran en la Figura 3.

Adicionalmente, el valor del condicionante estático relativo al movimiento de imagen por perturbación del secundario debido a la acción del viento, incluido como una fuerza estática de 1 KN en la dirección transversal, es de 0.04", inferior al valor 0.5" exigido.

Conviene señalar, como se indicó someramente en el apartado anterior, la incompleta resolución del problema según los condicionantes ideales impuestos por el promotor. Si bien es cierto que el análisis de los subsistemas tubo y montura aislados desvelan un comportamiento sobrado de la solución óptima alcanzada, el acoplamiento de ambos subsistemas provoca un descenso importante de la rigidez del sistema global, debido a que dichos subsistemas se encuentran acoplados en serie. En un sistema de un grado de libertad el acoplamiento en serie de dos muelles de rigidez  $K$  se comporta como un único muelle de rigidez  $K/2$ .

Analizando el caso de la frecuencia de accionamiento, bloqueado el eje de elevación, de valor 8.63 Hz, se necesitaría un incremento del 30% aproximadamente para conseguir la especificación de 12 Hz, para lo cual sería necesario incrementar las frecuencias de elevación de ambos subsistemas al menos en un

The calculation of the mechanical specifications due to dynamic action consisted in the analysis of the modes and eigenfrequencies of the structure. This analysis was carried out by two complementary means: a conventional calculation of modes and eigenfrequencies and a subsequent visual identification of the same; and a study in the frequency domain by the application of a disturbance acting in the direction of the mode sought (frequency sweep)

The results obtained for the frequencies are indicated in Table 2 below

The diagrams of the frequency sweep analysis are shown in Fig. 3.

Furthermore, the value of static conditions for image motion as a result of disturbances of the secondary mirror due to wind action, included as a static force of 1 KN in transverse direction, is 0.04", which is far less than the specified figure of 0.5".

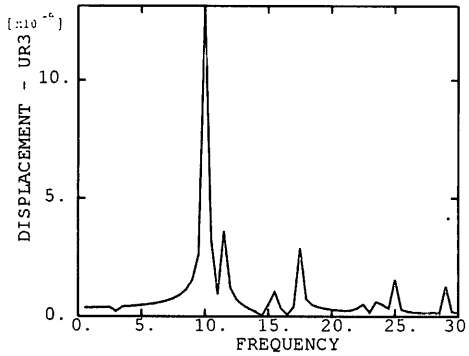
As we mentioned in passing in the previous section, the ideal conditions established by the promoter were not completely met. While the independent analysis of the tube and mount sub-systems gave results that were over and above the specified optimum, the connection of both sub-systems caused a serious decrease in the stiffness of the overall system as the said sub-systems were connected in series. In a system with a degree of freedom the coupling in series of two springs of stiffness  $K$ , behaves in the manner of one sole spring of stiffness  $K/2$ .

When considering the figure of 8.63 Hz for the eigenfrequency with locked elevation bearing, this would require an approximate 30% increase in order to reach the specified value of 12 Hz and, therefore, it would be necessary to increase the elevation frequencies of both sub-

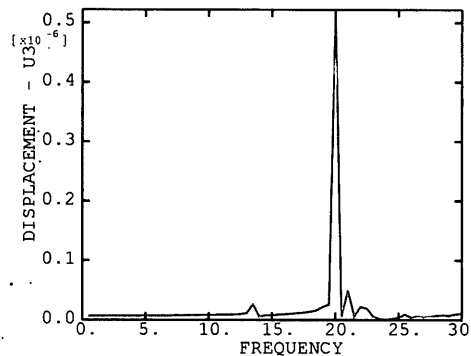
**TABLA 2. FRECUENCIAS PROPIAS (en Hz)/TABLE 2. EIGENFREQUENCIES (en Hz)**

	$f_{acim}$	$f_{elev}$	$f_{ax1}$	$F_{ax2}$	$f_{rot}$	$f_{tor}$
Resultado/Result	10.50	8.63	13.50	21.50	101.0	27.9
Especificación/Specification	8	12	15	25	25	15
Modo N°/Mode No.	6	5	13	26	3	1

**Modo Azimutal  
10,5 Hz**



**Modo Axial  
21,5 Hz**



**Modo de Elevación  
8,6 Hz**

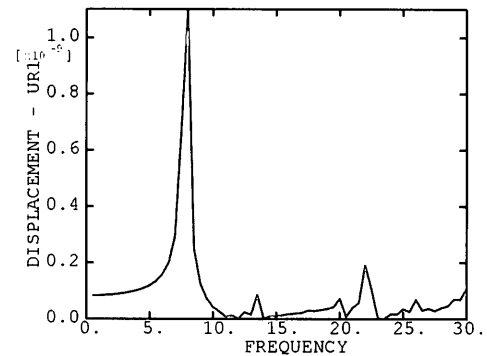


Figura 3. Gráficos de barrido en frecuencias. Figure 3. Frequency sweep diagrams.

30%, suponiendo un mismo rango de rigideces para ambos subsistemas.

En estas condiciones los objetivos dinámicos previstos por los promotores en cuanto a frecuencia de accionamiento bloqueado el eje de elevación y de vibración axial resultan excesivos en los valores citados, indicándose los límites adecuados para evaluar su incidencia en los sistemas astronómicos.

La tabla mostrada a continuación desglosa el reparto de masas: estructural y pasiva del diseño definitivo, indicando la masa pasiva correspondiente a cada subsistema estructural. ■

(1) *The Design of the Keck Observatory and Telescope*. Nelson, J. et al. Keck Observatory Report. No. 90 (1985)

systems by at least 30%, when taking the same range of stiffnesses for both sub-systems.

Under these conditions the dynamic specifications stipulated by the promoters with regards to the frequency of the locked elevation bearing and the axial vibration were excessive, this indicating that the results were within suitable limits in order to evaluate their effect in the astronomic systems.

The following table shows a summary of the final design structural and passive mass distribution, indicating the passive mass corresponding to each structural sub-system. ■

(1) *The Design of the Keck Observatory and Telescope*. Nelson, J et al. Keck Observatory Report No. 90 (1985)

TABLA 3. MASAS DEL SISTEMA/TABLE 3. SYSTEM MASSES

Subsistema Estructural Structural subsystems	Masa estructural (Kg) Structural mass (kg)	Masa total (Kg) Total mass (Kg)	Masa pasiva (Kg) Partial passive mass (kg)	Elementos pasivos asociados Subsystem of equipment
Araña del secundario/Spider of the secondary	4356.2	6356.2	2000	Espejo secundario/ Secondary mirror
Tubo superior/Upper tube	22389.2	22389.2	--	--
Anillo de elevación/Elevation ring	36972.3	52972.3 4000	12000	Accionamientos del anillo de elevación Falsos Cassegrain Elevation drive ring Folded Cassegrain
Tubo inferior/Lower tube	6122.3	6122.3	--	--
Celda del espejo primario/Primary mirror cell	8907.6	36567.6	16560 5100 6000	Espejo primario Sistemas de soporte del foco Cassegrain Primary mirror support system Cassegrain
Tubo completo/Complete tube	78747.6	124407.6	45660	Masa pasiva total del tubo Total passive mass of tube
Montura/Yoke	91535.0	113535.0	2000 20000	Plataformas Nasmyth/Nasmyth platforms Instrumentación de plataformas Nasmyth/Instrumentation on Nasmyth
Telescopio completo/Complete telescope	17082.6	237942.6	67660	Masa pasiva total/Total passive mass