



Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE INGENIERÍA



T E S I S :

**Optimización y Análisis Estructural de la Base Acimutal
del Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano
de Nueva Tecnología.**

**Que para obtener el Título de Ingeniero Civil.
PRESENTA:**

Fredy Martínez Gutierrez

Ensenada, Baja California, México Octubre, 2001.

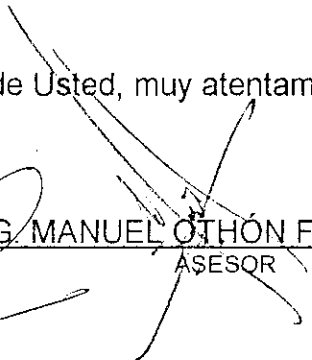
ASUNTO: Emisión de voto aprobatorio
trabajo de Tesis Profesional.

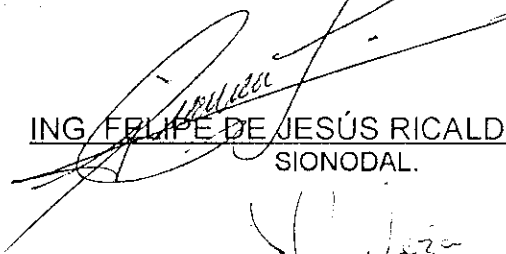
SUBDIRECCIÓN ACADEMICA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
ENSENADA-UABC
P R E S E N T E .

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis
presentado por el C. FREDY MARTÍNEZ GUTIERREZ, para poder
presentar su Examen Profesional y obtener el título de Ingeniero me permito
comunicarle que he dado mi voto APROBATORIO, sobre su trabajo titulado:
OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA BASE ACIMUTAL DEL
TELESCOPIO ÓPTICO INFRARROJO MEXICANO DE NUEVA TECNOLOGÍA.

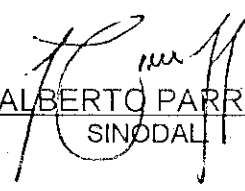
Esperando reciba de conformidad, quedo de Usted, muy atentamente.


MI. ING. GERARDO SIERRA DIAZ.
ASESOR


ING. MANUEL OTHÓN FIGUEROA N.
ASESOR


ING. FELIPE DE JESÚS RICALDE Y LUGO.
SIONODAL.


ING. ALEJANDRO PARRA MEZA.
SIONODAL.


ING. ALBERTO PARRA MEZA.
SIONODAL.

Ensenada, B. C., México, Octubre del 2001.

AGRADECIMIENTOS.

A mi padre Sr. Ausencio Martínez Luna por enseñarme todo lo que no aprendí en la escuela y brindarme su apoyo confianza y en todo momento.

A mi Madre Ma. Juana Gutiérrez González por cuidarme, educarme y brindarme su apoyo y estar conmigo en los momentos difíciles de mi vida.

A Karla y Bianney por su tiempo robado.

A los directores de tesis Gerardo Sierra Díaz y Manuel Othón Figueroa N. por no desesperar.

A los sinodales y maestros por el tiempo dedicado a esta tesis y por haberme hecho entender y querer a la ingeniería en mis tiempos de estudiante.

A las personas que conforman el Proyecto TIM en especial a Dra. Irene Cruz González Directora General, a Luis Salas Cásales, Director Técnico por el apoyo prestado en este trabajo.

A María Pedrayes por haberme apoyado en la conclusión de este proyecto.

A la Universidad Autónoma de Baja California, la Facultad de Ingeniería, el Instituto de Astronomía de la UNAM y Escuela de Idiomas.

Al Maestro Abelardo Heredia por su confianza: “Aunque poco hablamos, creo que nos entendimos; cuestión de honor”.

A mis hermanos por su participación y apoyo prestado y para que vean que si se puede.

A mis primos y familiares por creer en mi y motivarme para seguir adelante, en especial al Rocky por ser mas que mejor amigo.

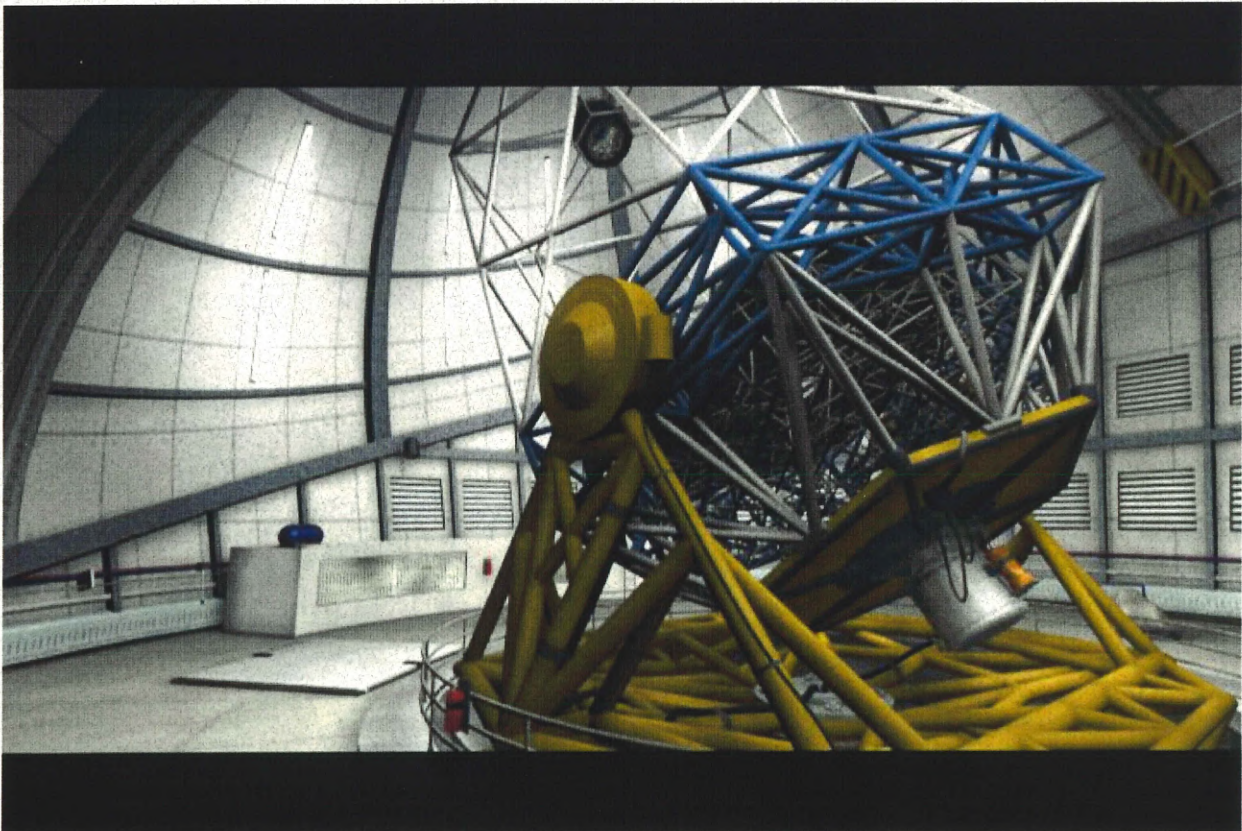
ÍNDICE

1.- Título	01
1.1.-Título de tesis.	
2.- Introducción	02
2.1-Antecedentes	
2.2-Objetivo	
2.3-Hipótesis	
2.4-Justificación.	
3.- Marco teórico	11
3.1-Introducción a la mecánica de materiales	
3.2-Módulo de elasticidad	
3.3-Relación de poisson	
3.4-Deformaciones	
3.5-Introducción a los elementos finitos.	
4.- Telescopio óptico infrarrojo mexicano (TIM)	22
4.1-Descripción del telescopio	
4.1.1-Base acimutal	
4.1.2-Estructura de altitud.	
5.-Base acimutal	25
5.1-Introducción	
5.2-Diseño conceptual y requerimientos para la base acimutal	
5.3-Antecedentes del prediseño de la base acimutal.	
6.- Resultados	33
6.1-Prediseño de la base acimutal	
6.2-Optimización de la base acimutal	
6.2.1.-Proceso de optimización de la base acimutal	
6.3-Descripción de la base acimutal optimizada.	
6.4-Comparación de resultados	
6.5-Pruebas realizadas.	
7.-Conclusiones	49
- Anexo A .-Dimensiones Generales Base Acimutal optimizada.....	51
- Anexo B .-Resultados Obtenidos de la Base Acimutal Optimizada.....	52

1. Título

1.1.- Título de Tesis

**Optimización y Análisis Estructural de la Base Acimutal del
Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano de Nueva Tecnología.**



2.- Introducción

A partir de una necesidad que se ha observado y debido a la demanda que está requiriendo la astronomía mexicana que cuenta con un gran número de estudiantes de postgrado, nacionales y extranjeros que están realizando trabajos de investigación y todos ellos sumarán tiempo de observación en un telescopio. El número de estos instrumentos que se encuentran actualmente en México no serán suficientes para satisfacer esta demanda y difícilmente se concluirá un proyecto de investigación, dado, el tiempo de observación entre el número de investigadores, lo cual afecta particularmente a proyectos y tesis doctorales.

Teniendo en cuenta lo anterior los miembros de la comunidad Mexicana de Astronomía, ópticos, ingenieros e instrumentistas, han tomado un interés en participar activamente en los estudios de factibilidad, diseño y construcción de un Telescopio y se proponen por tanto, diseñar, construir y operar un telescopio de nueva tecnología: “Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano (TIM)”, que será puesto en operación en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (O.A.N. de S.P.M.), B.C., éste proyecto se plantea como un proyecto nacional con colaboración internacional. Además de su valor estrictamente académico y vital para el desarrollo de la Astronomía Mexicana, representa la posibilidad de un genuino desarrollo tecnológico en diversas áreas y disciplinas como son: óptica, electrónica, mecánica, control, física aplicada, computación, ingeniería térmica, neumática, hidráulica, eléctrica, civil y astronomía.

El llevar acabo el proyecto TIM enfrentará un sin número de problemas. Ya que el Telescopio de nueva tecnología requiere un diseño conceptual profundo en el cual se deben emplear las más recientes tecnologías para realizar un proyecto que este a la vanguardia y con un nivel realmente competitivo en el ámbito mundial, se tendrán que superar muchos problemas que implica dicho diseño. Uno de los problemas que enfrenta dicho proyecto es el diseño de “La Base Acimutal” del “Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano (TIM)”, la cual se abordará en este trabajo y que tiene como objetivo optimizar al máximo un prediseño establecido en el Instituto Astronómico Nacional.

Para lograr dicha optimización se empleara un programas de computadora que emplea como método de solución de estructuras el Método de Elementos Finitos (M.E.F.), que es una herramienta útil para dicha optimización. El diseño de la base acimutal es especial por la función que realiza, es la encargada de soportar todo el peso de la estructura del telescopio además de proporcionar el movimiento giratorio que permite localizar y seguir la trayectoria de los astros al momento de la observación. Su óptimo funcionamiento proporcionará un mejor desempeño en las demás partes que conforman al telescopio.

2.1.- Antecedentes

A mediados de la década de los 80 se comenzó a estructurar un proyecto de construcción de un nuevo telescopio que debería renovar las capacidades observacionales de la astronomía mexicana. Instrumento con el que se podría aprovechar íntegramente la excelencia climatológica que para la Astronomía tiene la Sierra de San Pedro Mártir (S.P.M.) B.C. y que ya ha sido plenamente demostrado por los usuarios del "Observatorio Astronómico Nacional" (O.A.N.) en los últimos 25 años.

La astronomía mexicana cuenta con un reconocido prestigio internacional por su calidad y aportaciones al conocimiento. Uno de los aspectos que la distingue es que desde sus inicios se ha planteado ser propietaria y administradora de recursos experimentales propios. Algunos de estos recursos fueron adquiridos, otros fueron desarrollados al menos parcialmente en México. Esto le ha dado una solidez pocas veces observadas en países con circunstancias socioeconómicas semejantes al nuestro. En el mismo México son poco los ejemplos de un experimento científico estructurado de manera tan completa en donde los aspectos teóricos, observacionales y tecnológicos de las diferentes disciplinas están integrados en una sola unidad. Las demandas planteadas por la ciencia básica han redundado en experiencia e innovaciones tecnológicas que a su vez han abierto nuevas líneas de investigación. Este es un aspecto de la astronomía mexicana que debemos no solo preservar, sino enriquecer.

El Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (I.A.U.N.A.M.), la institución principal que apoya este proyecto, cuenta con una larga trayectoria de gran calidad que se remonta a su fundación, como Observatorio Nacional en 1876. Actualmente tiene una planta de 73 investigadores y 57 técnicos académicos. Se cultivan áreas como: Medio Interestelar, Astrónoma Estelar, Astronomía Galáctica, Astronomía Extragaláctica, Cosmología, Instrumentación Astronómica, Sistema Planetario, Arqueoastronomía e Historia de la Astronomía y Efemérides Astronómicas. El número total de artículos tienen más de cien mil citas en la literatura internacional (Peimbert & Costero 1996). El número de artículos arbitrados basados en datos obtenidos en el O.A.N./S.P.M. rebasa los 223 (Tapia 1995). La mayoría de los investigadores del I.A.U.N.A.M. forman parte del Sistema Nacional de Investigación (10 Nivel III, 18 nivel II, 25 nivel I u 5 nivel candidatos). Es importante mencionar que cuenta con dos miembros de su personal que están en el Colegio Nacional y tres que han sido distinguidos con Cátedras Patrimoniales I del CONACYT. Los premios y distinciones nacionales e internacionales que han recibido los miembros de su personal son muchos y diversos.

En referencia al desarrollo tecnológico, la astronomía nacional ha tenido un historial igualmente destacado (p ej. Ver Cruz- González 1996 y Gutiérrez 1995, para una descripción más detallada). El desarrollo de toda la infraestructura operativa del O.A.N /S.P.M. durante la década de los 70 puede ser calificada como un gran logro. Durante esos años se diseñaron y se pulieron las superficies ópticas para los espejos primarios del telescopio de 84 cm del O.A.N y el telescopio de 2.1 metros del I.N.A.O.E. que esta situado en Cananea (la astronomía ha sido históricamente la principal promotora del desarrollo de la óptica en México). De la misma forma, el diseño mecánico y la campana de aluminizado para el telescopio de 2.1m del O.A.N fueron desarrollados en el Instituto de Astronomía de la U.N.A.M. Nativo fue también el diseño y la construcción de la consola de control para este telescopio, experiencia que ha sido aprovechada para desarrollar consolas tecnológicamente cada vez más avanzadas para los otros telescopios nacionales e incluso un telescopio extranjero. La implementación de un secundario oscilante en el foco $f/30$ del telescopio de 2.1 metros, abrió las puertas del O.A.N./S.P.M. a la astronomía infrarroja.

En lo tocante a instrumentación, se ha pasado de comisionar toda nuestra instrumentación (dando especificaciones propias), a desarrollar una buena parte de la que actualmente está en operación en nuestros telescopios, incluso, recibir una comisión para el diseño y construcción parcial de un espectrógrafo óptico para el telescopio HET de 9 metros de la Universidad Texas. También han habido intentos parcialmente exitosos para desarrollar detectores y sistemas de detección propios. La experiencia del MEPSICRON, detector que rindió frutos científicos durante algunos años, ha sido valiosa en la medida en que acercó a las dificultades inherentes a retos tecnológicos de frontera.

Vale la pena detenerse en las experiencias tecnológicas que se han tenido durante el último lustro, en la medida en que ilustran la capacidad del joven grupo que deberá asumir una parte de la responsabilidad en el desarrollo y construcción de un gran telescopio mexicano de nueva tecnología. De los tres telescopios del O.A.N./S.P.M., el de 1.5 metros ha sido el que se ha tenido mayores modificaciones la celda que soporta el espejo primario se ha modificado por las enormes deficiencias que presentaba, y que limitaban su utilización a aplicaciones fotométricas. Se diseñó y construyó un nuevo eje, engrane y baleros de declinación, para lo cual fue necesario modificar la celda que soporta el espejo primario. Se ha instalado un sistema recientemente de posicionamiento fino, motorizado para este telescopio, mediante un mecanismo de 5 grados de libertad para el espejo secundario. Paralelamente se construyó una nueva consola de control, que ha servido como base para la nueva generación en los sistemas de control de los telescopios del O.A.N./S.P.M. Así mismo, se diseñó y construyó un guiador excéntrico. Todo ello, con otras modificaciones y adiciones de menor calibre, han permitido ampliar las capacidades de este telescopio, y en la actualidad ya se emplea para interferometría Fabry-Perot e imagen directa. Al telescopio de 84 cm. se le instaló un engrane de declinación, control de movimiento de la cúpula, una consola y un guiador semejante al del telescopio de 1.5 metros. Uno de los desarrollos más notables se ha dado con la instalación de un sistema de suspensión activa para el espejo primario del telescopio de 2.1 metros, lo cual ha conducido a una gran mejora en cuanto a la calidad de la imagen que entrega el telescopio (Salas et al. 1997). Una nueva consola de control fue instalada en el transcurso de 1997 en este telescopio.

Esta consola viene a reemplazar la original (construida también en México), integrando el control de todas las partes del telescopio (movimientos en los dos ejes, foco, cúpula, balanceo, luces, seguridad, etc.) en una sola unidad.

En lo que toca a instrumentación, se desarrolló un instrumento con los siguientes modos observacionales: imagen directa, espectroscopia (mediana y baja resolución) y polarimetría, proyecto que ha permitido adquirir experiencia en el desarrollo instrumental infrarrojo moderno con el control total del diseño y construcción (i.e. electrónica + óptica + mecánica + software). Este instrumento descrito en Cruz-González et al. (1994), opera actualmente en el telescopio de 2.1m del O.A.N./S.P.M. y ha llegado a ocupar más del 50% correspondientes a las noches de observación en proyectos astronómicos muy diversos que incluye estudios sobre los objetos estelares, nebulares y extragalácticos. También para este telescopio se construyó un interferómetro que abre una nueva área sobre estudios en el O.A.N./S.P.M., ie. Estudios relativos a campo de velocidad (Rosado et al. 1995). Finalmente, un sistema de ruedas para un filtro de interferencia, reductores focales y polarizadores para los telescopios con menor diámetro, que redundará en una calidad en el trabajo sobre las imágenes directas. Paralelamente, durante este mismo período la infraestructura del O.A.N./S.P.M. se enriqueció al adquirir un sistema basado en licuefacción de nitrógeno, cámaras para observatorio. Cabe destacar los sistemas adquiridos para el infrarrojo cercano (2-5 micras) y medio (10 micras), con los que el astrónomo podrá observar el cielo en todo el intervalo espectral alcanzable con un telescopio óptico de la superficie terrestre, situación muy poco usual en el ámbito mundial. En lo que toca a cómputo, se realizó una inversión considerable tanto en el área de control, como en la de adquisición, procesamiento, análisis y seguridad. Destaca el hecho que todo el sistema de cómputo está integrado en una red abierta al mundo. El esfuerzo dedicado a la especificación, ha dado como fruto un conocimiento y familiarización cada vez mayor en el manejo de tecnologías modernas.

Varias conclusiones se desprenden de lo anterior. Destaca la magnitud del esfuerzo realizado, que conlleva una actividad intensa en la generación y discusión de ideas y, sobre todo, una gran capacidad para concluir proyectos. También es significativo el nivel de integración disciplinaria; estos proyectos se han llevado a cabo con la participación de astrónomos, ópticos, ingenieros mecánicos, electrónicos, civiles y programadores. Finalmente, cabe hacer notar la variedad de los proyectos abordados. En grados diversos se han tocado todos los aspectos operativos de un telescopio - especificaciones científicas, diseño y evaluación de la óptica, estructura mecánica, control, instrumentación, etc. utilizando conceptos modernos y, no pocas veces, dando soluciones innovadoras.

2.2.- Objetivo

Optimizar la Base acimutal del Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano (TIM) partiendo del anteproyecto desarrollado en el Instituto de Astronomía.

2.3.- Hipótesis

La Base acimutal se optimizará respetando los requerimientos establecidos, siendo los más relevantes: disminuir el número de elementos, para tener una estructura liviana que facilite la manufactura, que presente los mínimos desplazamientos, además que pueda soportar el peso de la estructura de altitud y mantenerla en forma estable, que el rango de reacciones sea uniforme y la estructura presente su primer modo natural de vibrar con una frecuencia mayor a 12 hertz.

2.4.- Justificación Del Proyecto

Justificación Técnica

El equipo principal de un observatorio son los telescopios y los instrumentos que se le acoplan. El área colectora (espejo) es un elemento principal para abordar los retos de frontera en astronomía, debido a que los fotones son en gran medida, la única información que tenemos del universo.

El laboratorio más importante de la astronomía en México es el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, B.C (OAN/SPM), cuyas características como sitio astronómico lo colocan entre los 3 mejores observatorios del hemisferio norte.

El OAN/SPM cuenta actualmente con 3 telescopios, dos de ellos construidos a fines de la década de los 60 y el mayor, con un espejo primario de 2.1 m. de diámetro, inaugurado en 1979. Estos telescopios se han modernizado con recursos humanos y económicos de la UNAM con sistemas de control e instrumentación novedosa, incrementando notablemente sus capacidades.

Hasta hace un lustro el liderazgo era desempeñado por telescopios de entre 2 y 4 metros de diámetro. Sin embargo, ya es requerido uno de mayor diámetro. Ello llevó a explorar alternativas tecnológicas de frontera que posibilitarán la construcción de telescopios de diámetros que alcanzan los 10 metros. En la primeras décadas del milenio estarán en operación alrededor de 10 grandes telescopios ópticos de nueva tecnología.

Justificación Socioeconómica

En los Telescopios de Nueva tecnología se realizarán las investigaciones de frontera en astronomía, al menos durante la primera mitad del siglo XXI, y los astrónomos mexicanos no tendrán acceso a estos telescopios. En consecuencia, debemos aspirar a que el nuevo telescopio mexicano sea uno más de los de esta nueva generación, para que la astronomía nacional, por tradición enfocada al intervalo óptico e infrarrojo, pueda continuar desempeñando el papel destacado que hasta ahora ha tenido y tenga abiertas las puertas a fenómenos nuevos e inalcanzables. De no ser así, es previsible que esta rama de investigación se estanque durante las próximas décadas en nuestro país.

Sin embargo, el tiempo de observación disponible en los dos mayores telescopios no satisface la demanda, y es previsible que en el futuro próximo suceda lo mismo con el de menor diámetro, que está por ser habilitado con instrumentos y sistemas de control de frontera. Mas aún, hay alrededor de 40 estudiantes realizando un postgrado de astronomía en diversas instituciones nacionales y extranjeras, que pronto se sumarán a la demanda de tiempo de telescopio. Concretamente, y como ejemplo, en el primer semestre Enero-Julio de 1996, el telescopio de 2.1 m fue asignado a 40 proyectos de investigación con la participación de 50 investigadores, lo cual significa un promedio de 3.5 noches asignadas por proyecto. Con este número de noches, difícilmente se concluye proyectos de investigación en tiempos razonables, lo cual afecta particularmente a proyectos de tesis doctorales. Es importante destacar que el OAN/SPM está disponible a todos los astrónomos mexicanos dado su carácter de Observatorio Nacional (Moreno Corral et al 1994) Por otra parte, con la incorporación de instrumentos con nuevas capacidades, complementarias a las de los ya existentes, y nuevos detectores sensibles hasta 30 micras, el OAN/SPM está en una situación en la que no está aprovechando al máximo su potencial observacional debido a un déficit en lo que se refiere a telescopios, particularmente los de mayor diámetro. De lo anterior se desprende que la astronomía mexicana requiera ya de un nuevo telescopio en el OAN/SPM.

Por otro lado, la experiencia mundial indica que la vida media de uso efectivo de un telescopio no es mucho mayor a los 30 años y que construir un telescopio requiera de alrededor de 10 años de esfuerzo, de su concepción hasta su puesta en operación. El desarrollo del nuevo telescopio mexicano para el OAN/SPM dará como resultado infraestructura científica con una vida media considerablemente grande. Para que el proyecto pueda ser exitoso es necesario que la construcción pueda iniciar en tiempos relativamente cortos, por lo que es necesario conseguir su financiamiento cuanto antes. Se propone, por tanto, diseñar, construir y operar un telescopio de nueva tecnología, el “Telescopio Óptico -Infrarrojo Mexicano (TIM)”, que sería puesto en operación en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, B.C. Este proyecto se plantea como un proyecto nacional con colaboración internacional. Además de su valor estrictamente académico y vital para el desarrollo de la astronomía mexicana, representa la posibilidad de un genuino desarrollo tecnológico en diversas áreas y disciplinas.

Los miembros de la comunidad mexicana de astronomía, ópticos, ingenieros e instrumentistas que han mostrado gran interés en participar activamente en los estudios de factibilidad, diseño y construcción de un telescopio de gran diámetro, están adscritos a las siguientes instituciones: UNAM (Instituto de Astronomía, Instituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Coordinación de Vinculación, Centro de Vinculación, Centro de Instrumentación, Instituto de Investigación en Materiales), Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Centro de Investigación en Óptica (CIO), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Los colaboradores internacionales pertenecen a las instituciones siguientes: Consorcio del Telescopio HET (U. Texas, U. Penn State) Consorcio del Telescopio Keck (Estados Unidos y Alemania). Esta colaboración incluiría también a grupos de la Universidad de Hawaii, los Observatorios de Maesella, Grenoble y Niza en Francia, con quienes hay proyectos de colaboración de hace muchos años: la organización AURA(E.U.) de la cual el IAUNAM es miembro, a través de sus observatorios NOAO, e inclusive, grupos de Moscú, San Petersburgo y Tomsk en Rusia, Ohio State University (E.U.) con quienes recientemente se ha iniciado el contacto para posibles proyectos conjuntos.

Bibliografía.

PROYECTO DEL TELESCOPIO ÓPTICO-INFRAERROJO MEXICANO DE NUEVA TECNOLOGÍA: TIM

Irene Cruz-González, Élego Ruiz, Luis Salas (1), Gloria Koenigsberger (2), Salvador Cuevas, Manuel Peimbert, Mauricio Tapia, Silvia Torres-Peimbert, Maria H. Pedrayes, Esteban Luna, Leonel Gutiérrez, Erika Sohn, Juan Echevarria.

Instituto de Astronomía y Observatorio Astronómico Nacional.

Enero, 1998

(1) Director TIM

(2) Directora IAUNAM.

3.- Marco Teórico.

3.1.-Introducción a La Mecánica de Materiales

La Mecánica se puede definir como la ciencia que describe y predice las condiciones de reposo o movimiento de los cuerpos rígidos bajo la acción de fuerzas. Se divide en tres partes: la mecánica de cuerpos rígidos, la mecánica de cuerpos deformables y la mecánica de fluidos⁽¹⁾.

La mecánica de cuerpos rígidos se subdivide en: Estática y Dinámica; la primera estudia los cuerpos en reposo y la segunda los cuerpos en movimiento. En esta parte del estudio de la mecánica se supone que los cuerpos son perfectamente rígidos. Sin embargo, las estructuras y las máquinas reales nunca lo son y se deforman bajo las cargas a que están sometidas. Estas deformaciones casi siempre son pequeñas y no afectan apreciablemente las condiciones de equilibrio ó movimiento en una estructura considerada. Pero son importantes cuando se tiene en cuenta la resistencia en dicha estructura a las fallas, y se estudia en mecánica de materiales, que está contenida en la mecánica de cuerpos deformables. La tercera parte que compone la mecánica, se llama mecánica de fluidos, se subdivide en dos, una estudia los fluidos incompresibles y la otra los fluidos compresibles. La hidráulica es una subdivisión importante en el estudio de los fluidos incompresibles y trata problemas relativos a los líquidos.

La mecánica es una ciencia física que estudia fenómenos físicos. Sin embargo, algunos la relacionan con las matemáticas, mientras que otros la consideran como un tema de ingeniería. Ambos puntos de vista se justifican parcialmente. La mecánica constituye una gran parte de las ciencias que forman la ingeniería, es decir no se basa únicamente en la experiencia ni en la observación; por su rigor o la importancia que da razonamiento deductivo se parece a las matemáticas. Pero tampoco es una ciencia abstracta, ni siquiera una ciencia pura; es una ciencia aplicada cuyo propósito es aplicar y predecir los fenómenos físicos y poner las bases para las aplicaciones de ingeniería.

3.2.- Modulo De Elasticidad

La mayoría de las estructuras de ingeniería son diseñadas para sufrir pequeñas deformaciones del diagrama esfuerzo deformación correspondiente. Para esta proposición inicial del diagrama (*figura 3.2.1*) el esfuerzo σ es directamente proporcional a la deformación unitaria ϵ , y podemos escribir:

$$\sigma = E \epsilon$$

Se conoce esta relación como la Ley de Hooke⁽²⁾, en honor del matemático inglés Roberto Hooke (1635-1703). El coeficiente E es el módulo de elasticidad del material en cuestión o también módulo de Yong, en honor de científico inglés Thomas Yong (1773-1829). Como ϵ carece de dimensiones por que $\epsilon = \delta / L$, donde δ es la deformación total y L es la longitud del elemento ambas expresadas en las mismas unidades (m., cm., pul., pies, etc) por lo tanto el módulo de elasticidad (E) está expresado en las mismas unidades que σ , o sea, en Pascales o uno de sus múltiplos si se emplea el sistema SI y en lb/pul² o klb/pul² si se utilizan unidades inglesas.

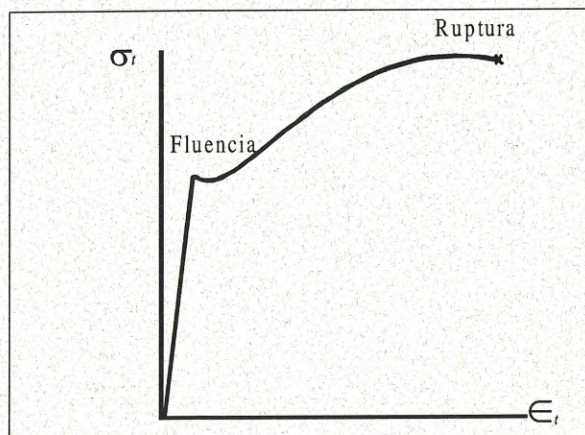


Fig. 3.2.1 Esfuerzo verdadero contra deformación verdadera de un material dúctil típico.

El máximo valor del esfuerzo para el cual puede utilizarse la ley de Hooke es el límite de Proporcionalidad del material correspondiente. En el caso de materiales dúctiles que poseen un punto de fluencia bien definido. Como él la *fig. 3.2.2*, el límite de proporcionalidad casi coincide con el punto de fluencia. Para otros materiales (como los materiales no dúctiles), el límite de proporcionalidad no puede definirse tan fácilmente, puesto que es difícil determinar con precisión el valor del esfuerzo σ y ϵ deja de ser lineal, pero, debido a esta misma dificultad, podemos concluir que, para tales materiales, utilizar la ley de Hooke para valores de los esfuerzos un poco mayores que el límite de proporcionalidad, no conduce a errores significativos.

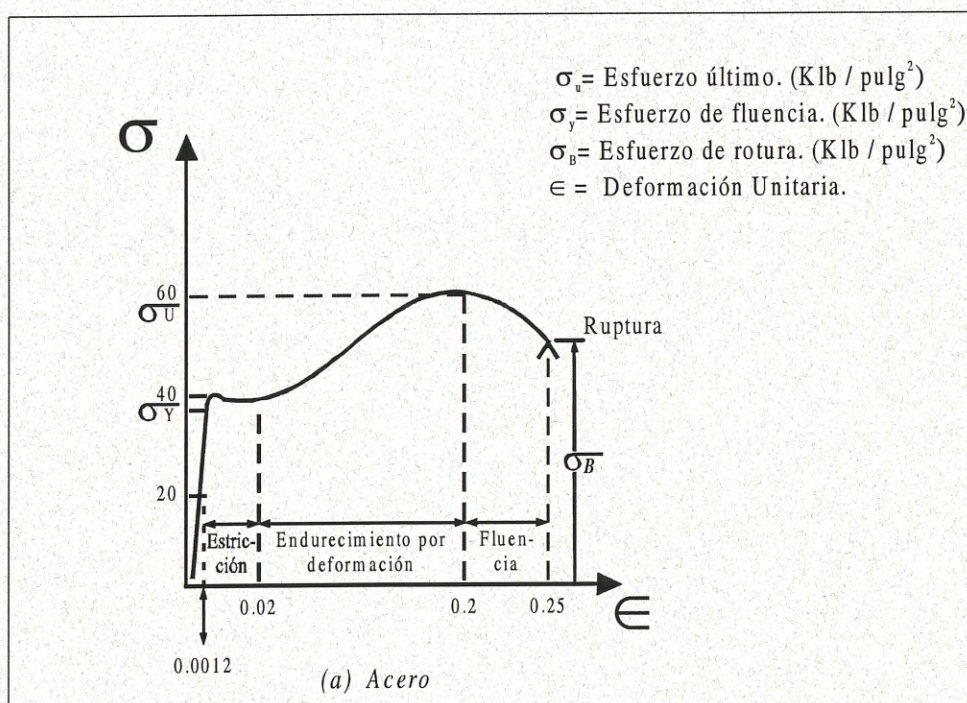
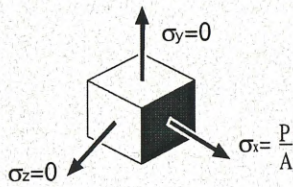


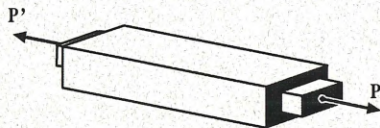
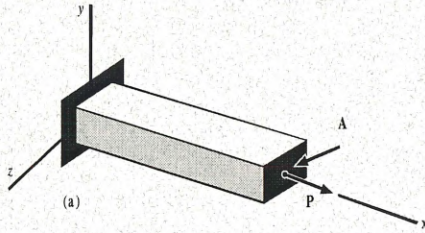
Fig. 3.2.2 Diagrama esfuerzo-deformación en un material dúctil típico.

3.3.- Relación De Poisson.

Cuando una barra delgada y homogénea es cargada axialmente, los esfuerzos y deformaciones resultantes obedecen la Ley de Hooke, siempre que no se sobrepase el límite elástico del material. Suponiendo que P está dirigida a lo largo del eje x (*Fig. 3.3.1a*), tenemos $\sigma = P / A$, en donde A es el área transversal de la barra y de acuerdo con la ley de Hooke:



(b) [Fig. 3.3.1]



[Fig. 3.3.2]

$$\epsilon_x = \sigma_x / E \quad (a)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material.

Observamos también que los esfuerzos normales en las caras respectivamente perpendiculares al eje x (los ejes y, z) son nulas: $\sigma_y = \sigma_z = 0$ (fig. 3.3.1b). Parecería lógico concluir que las deformaciones correspondientes ϵ_y y ϵ_z también fuesen nulas.

Este, sin embargo, no es el caso. En todos los materiales de ingeniería, el alargamiento o compresión producido por una fuerza de tracción ó compresión axial P, en la dirección de la fuerza, va acompañado por una contracción en toda dirección transversal (fig. 3.3.2).

Ya se ha supuesto que el material considerado es homogéneo, es decir, que sus propiedades mecánicas son independientes del punto considerado. Aceptaremos además que el material es isotrópico, o sea, que dichas propiedades son independientes de la dirección considerada. Con esta hipótesis adicional, la deformación debe tener el mismo valor para cualquier dirección transversal: $\epsilon_y = \epsilon_z$ se conoce este valor como deformación lateral y el valor absoluto de la relación entre la deformación lateral y la axial se conoce como la relación de Poisson⁽²⁾, en honor del matemático francés Simeón Denis Poisson (1781-1840) y se la designa por la letra griega ν (nu).

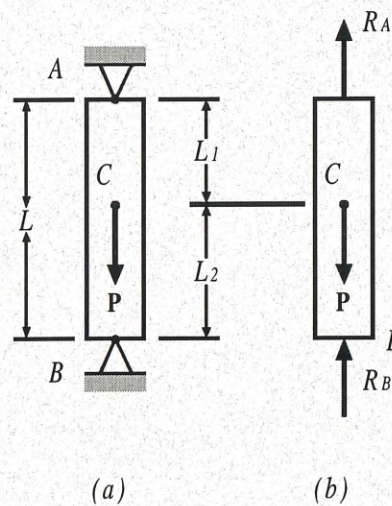
Tenemos:

$$\nu = - \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}} \quad (b)$$

$$\nu = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = - \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$

Para las condiciones de carga de la *fig. 3.3.3*. Resolviendo la ec. (b) para ϵ_y y ϵ_z y utilizando (a), se escriben las siguientes relaciones, que describen completamente el estado de deformación bajo una carga axial paralela al eje x:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \epsilon_y = \epsilon_z = -\frac{\nu \sigma_x}{E} \quad (c)$$

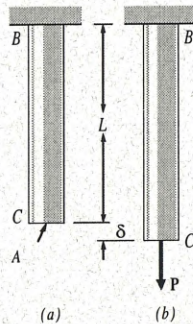


[Fig. 3.3.3]

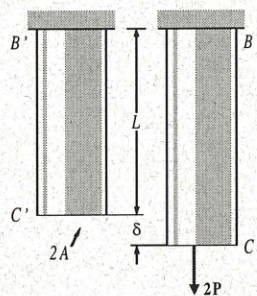
3.4.- Deformaciones

Consideremos una barra BC, de longitud L y de sección transversal uniforme A, que está suspendida en el punto B (*fig. 3.4.1a*). Si aplicamos una carga P al extremo C, la barra se alarga (*fig. 3.4.1b*). Representando gráficamente la magnitud P de la carga contra el alargamiento δ (delta), obtenemos un diagrama carga-alargamiento (*fig. 3.4.2*). Si bien es cierto que este diagrama contiene información útil para el análisis de la varilla considerada, ésta no puede ser utilizada directamente para predecir la deformación de una varilla del mismo material pero de diferentes dimensiones. Observemos que si al aplicar una fuerza P, se produce un alargamiento δ en una varilla BC, se requerirá una carga 2P para producir el mismo alargamiento en una varilla B'C', de igual longitud pero de sección transversal 2 A (*fig. 3.4.3*). Notemos que, en ambos casos, el valor del esfuerzo es el mismo: $\sigma = P/A$.

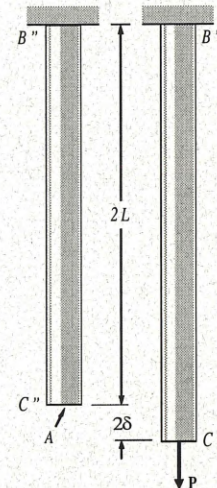
Por otra parte, una carga P aplicada a la varilla $B''C''$, de igual sección transversal con área A pero de longitud $2L$, ocasiona un alargamiento 2δ (fig. 3.4.4), o sea, un alargamiento que es el doble del que se produce en BC . Pero, en ambos casos, el alargamiento es unitario, es decir la razón del alargamiento a la longitud de la varilla es el mismo e igual a δ / L . Llamaremos deformación unitaria a esta razón y se representa como ϵ (épsilon).



[Fig. 3.4.1]

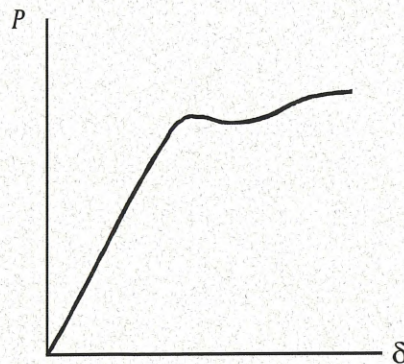


[Fig. 3.4.3]



[Fig. 3.4.4]

Representado gráficamente un esfuerzo $\sigma = P / A$ contra la deformación $\epsilon = \delta / L$, obtendremos una curva que es característica de las propiedades de los materiales y que no depende de las dimensiones de la probeta utilizada. Esta curva es el diagrama esfuerzo-deformación⁽²⁾.



[Fig. 3.4.2] Diagrama carga-deformación.

3.5.-Introducción Al Método De Elementos Finitos (MEF).

Método de elementos finitos.

El método de elementos finito es una técnica matemática que se utiliza para encontrar soluciones numéricas que representan la respuesta de un sistema físico ante excitaciones externas. El concepto de elementos finitos, en la forma de soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales y de estimaciones de áreas y volúmenes de ciertas figuras geométricas.

Tipos de Problemas.

Cualquier problema matemático ó físico descrito por ecuaciones de cálculo como: diferenciales, integrales, integro-diferenciales o variacionales.

Clasificación de los Problemas Físicos:

- Equilibrio.
- Valores Característicos.
- Propagación.

Campo de aplicación:

- Análisis de estructuras de esqueletos.
- Análisis de esfuerzos en sólidos.
- Dinámica de fluidos.
- Conducción de calor.
- Teoría de campos eléctricos y magnéticos.

Conceptos Básicos:

- Sistema.
- Dominio.
- Ecuaciones Gobernantes.
- Condiciones de carga.

El esquema de solución para un problema por el método de elementos finitos es el siguiente:

- Definición del problema y dominio,
- Discretización del dominio,
- Identificar las variables de estado,
- Formulación del problema,
- Establecimiento del sistema de coordenadas,
- Construcción de las funciones para los elementos,
- Cálculo de las matrices y de las ecuaciones,
- Transformación de coordenadas,
- Suma ordenada o ensamble de la matriz característica,
- Introducción de las condiciones características y
- Solución final del arreglo de ecuaciones simultáneas.

-Definición del Problema y su dominio: En los métodos de elementos finitos existen principalmente dos fuentes de aproximación. La primera es la definición de su dominio, tanto físico como geométrico y las otras dos son la discretización y los algoritmos de solución. La aproximación usada para definir las características físicas de las diferentes regiones es en ocasiones el verdadero problema a resolver. La definición geométrica del dominio, siempre debe estar relacionada con un sistema de coordenadas globales que rige la posición de ciertos puntos, conocidos como Nodos, los cuales definen las ecuaciones de las líneas y superficies que conforman el dominio.

-Discretización del dominio: El problema se define como un dominio continuo, lo que nos permite hacer la idealización de un dominio formado por elementos finitos discretos interconectados de diferentes tamaños y formas, que modelan una geometría aproximada al que se desea estudiar. La sección con mayor interés de estudio debe ser lo mejor discretizadas posible y modelarse con un mallado mas concentrado, teniendo en cuenta que esto producirá un mayor número de ecuaciones y la exactitud de los resultados decrece. Al hacer esto se está haciendo la primera aproximación, los resultados dependen de que tan buena es nuestra idealización con el dominio discreto.

-Identificación de las variables de estado: En este caso se debe hacer una descripción matemática del fenómeno físico para conocer las variables de estado que contiene la formulación, estas variables están relacionadas unas con otras por las ecuaciones constitutivas representando una expresión matemática de una ley física. En esta etapa de ser necesario, se introducen los valores de las condiciones de frontera en los elementos que lo requieran.

-Formulación del problema: La forma de encontrar la solución a un problema con valores de frontera que se rija con un conjunto de ecuaciones diferenciales o integrales, es obteniendo la solución analítica del mismo. Sin embargo existen ocasiones en que estas ecuaciones tienen soluciones difíciles o imposibles de encontrar. En estos casos se procede al uso de los métodos numéricos, como el MEF, para encontrar una solución aproximada, muchos problemas físicos pueden ser formulados por un conjunto de ecuaciones diferenciales. Las matemáticas involucradas para la solución de problemas por estos métodos son de alto nivel, sin embargo los programas actuales de cómputo que lo aplican ya vienen de forma depurada, brindando al usuario la posibilidad de usarlos aun sin conocerlos. Los métodos de soluciones no se describen en este trabajo, para mayor información consultar⁽³⁾.

-Establecimiento del sistema de coordenadas: Existen dos ramas principales para escoger un sistema coordenado para cada elemento en adición. La primera es que facilita la construcción de las ecuaciones del elemento y la segunda es que simplifica la integración de los elementos. Sin embargo, como los elementos debe estar ensamblados con respecto al sistema global de coordenadas, este paso introduce cálculos de cómputo adicionales en la forma de transformación de coordenadas.

-Construcción de las funciones para cada elementos: Una vez que se tienen variables de estado y se ha elegido el sistema local de coordenadas se tiene que recordar que hay dos tipos de funciones que son: las funciones físicas (variables de estado) y las funciones geométricas y deben ser aproximadas. En este paso es donde se modelan las funciones matriciales característica de cada elemento.

-Cálculo de las matrices y de las ecuaciones: En esta etapa la formulación y la discretización que modelan al sistema deben estar completas. De manera interna la computadora realiza estos cálculos con ayuda de los métodos numéricos para resolver de la mejor manera posible las ecuaciones resultantes, y así obtener matrices simplificadas de cada elemento.

-Transformación de coordenadas: Dado que no siempre todos los elementos se encuentran referenciados con el mismo sistema coordenado, es necesario transformar a un solo sistema todo el dominio de estudio. Cabe resaltar que los algoritmos de programación actuales por lo general llevan todos sus elementos al sistema global de coordenadas, haciéndolo depuradamente.

-Suma ordenada o ensamble de la matriz característica: El ensamble de las ecuaciones de la matriz característica es hecho acorde a una configuración topológica de los elementos una vez que se encuentran todos en el sistema global de referencias. El ensamble es hecho a través de los nodos que comparten los elementos, sumándolos gracias al principio de superposición en la matriz característica del sistema. Esta matriz es simétrica dada la naturaleza de su ensamble y debe ser la misma sin importar el método previo utilizado para encontrar las matrices de cada elemento finito.

-Introducción de las condiciones de frontera: Los valores de las condiciones de frontera, en este paso son introducidos a la ecuación matricial del sistema.

-Solución final del arreglo de ecuaciones simultáneas: hasta este paso no se ha mencionado las ecuaciones lineales o no lineales y la solución matemática esta directamente relacionada con la solución que se aplique si es un software, o cualquier método. Los procedimientos para encontrar la solución de ecuaciones simultáneas pueden ser, en general categorizádos en tres: directo, iterativo y estocástico⁽⁴⁾.

Referencias

⁽¹⁾ Ferdinand P. Beer y E. Russell Johnston Jr. “Mecánica Vectorial para Ingenieros (Estática)”, cuarta edición, McGraw-Hill, México, 1986.

⁽²⁾ Ferdinand P. Beer y E. Russell Johnston Jr. “Mecánica de Materiales”, primera edición en Español, McGraw-Hill, México, 1993.

⁽³⁾ Turner, J.J. R.W. Clough, H.C. Martin and L. J. Topp, “Stiffness and Deflection Analysis of Cople Structures” J. Aero, Sci.

⁽⁴⁾ Shigley and Mischke Mechanical Engineering Design, quinta edición, McGraw-Hill, E.U.A., 1989.

4.-Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano (TIM)

4.1.- Descripción del telescopio.

El telescopio será del tipo alt-azimutal con rodamientos hidrostáticos. Constará de: un espejo primario segmentado con razón focal de $f/1.5$, suspendido en una celda activa; un único espejo secundario $f/15$, una platina con 6 instrumentos intercambiables para observación en foco Cassegrain, un rotador de campo, un guiador y un censor de frente de onda integrados en una unidad.

Estructura

Las secciones principales en las que se divide la estructura del telescopio son: Base Acimutal y Estructura de Altitud (*Figura 4.1.*). Esta última está conformada por: Tubo, Marco, Celda, Montura del Secundario, Extensiones y Platina.

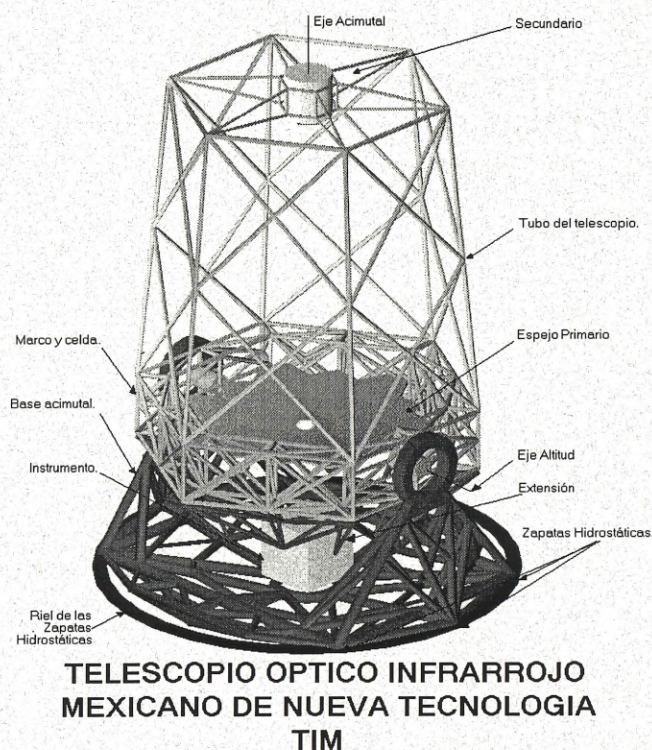


Figura 4.1.- Identificación de las partes del telescopio

4.1.1 Base Acimutal

La Base Acimutal realiza el giro acimutal además de soportar el peso del telescopio y el giro de la Estructura de Altitud. La Base se apoya en zapatas hidrostáticas (baleros de acimut) que a su vez descansan sobre una rieles circular llamada pista acimutal, la cual está anclada a la cimentación del telescopio. Esta base del telescopio le permite girar a la Estructura de Altitud, el movimiento es proporcionado por medio de zapatas hidrostáticas (baleros de altitud) .

4.1.2 Estructura de Altitud

Tubo

El Tubo soporta al espejo secundario y lo mantiene a cierta distancia de la superficie primaria. Sus dimensiones se definen a partir de los requerimientos ópticos del telescopio.

Marco

El Marco soportará el Tubo, la Celda, el Guiador, la Platina, además de un conjunto de instrumentos científicos y un sistema de balanceo. El Marco presenta el eje de giro en altitud y a través de este, por medio de las Zapatas hidrostáticas se transfieren las cargas de la Estructura de Altitud a la Base Acimutal.

Extensiones

Las extensiones son elementos estructurales que se usan para unir la Celda con el Marco y forman una interfaz permanente que permite una interacción estructural entre estas partes. Su longitud está definida por el balanceo que requiere la Estructura en Altitud en su eje de giro.

Celda

La Celda es la estructura que soporta al espejo primario y al sistema de soporte activo que consiste de actuadores axiales, placas de acero, sensores, un sistema pasivo lateral, etcétera. Esta estructura transfiere la carga al Marco causando deformaciones en el espejo primario.

Montura del Secundario

Se le designa con el nombre de Montura del Secundario (*Figura 4.2.*) al conjunto de elementos que se emplean para colocar al espejo secundario en la posición deseada. Consta de un bastidor, una araña que a su vez se divide en patas y cuerpo, un sistema activo y un espejo secundario. El sistema activo del espejo se encuentra dentro del cuerpo de la araña y esta se sujeta al bastidor a través de sus patas.

Platina

La Platina es el elemento donde se fijan los instrumentos de observación. En este proyecto, esta parte del Telescopio se ha definido como una carcasa que contendrá al rotador de campo, al guiador, al sensor de frente de onda y a la platina propiamente dicha. Se ha definido que de esta se fijarán 6 instrumentos.

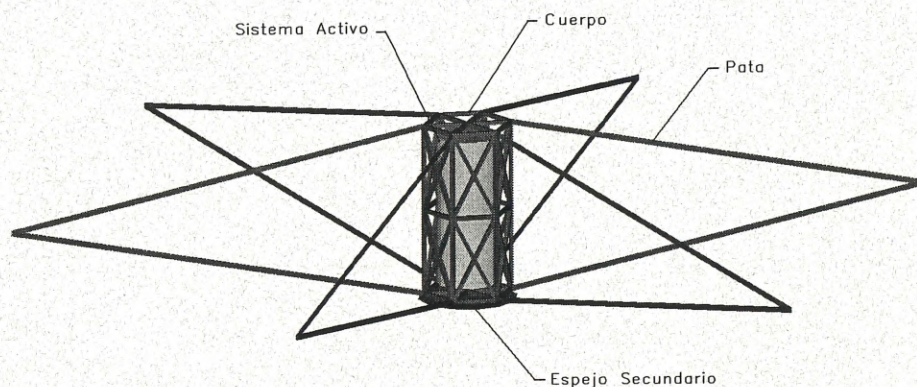


Figura 4.2.- Montura del Secundario

5.- Base Acimutal.

5.1.-Introducción.

Uno de los problemas que se enfrentan en el proyecto del “Telescopio Óptico Infrarrojo Mexicano (TIM)” es el diseño de “La Base Acimutal”, el cual se abordará en este trabajo. Nos ayudará mucho en esta introducción definir el término acimut: medida angular en el plano horizontal del observador, partiendo de un punto arbitrario. En astronomía se refiere a los cuatro puntos cardinales (norte, sur, este y oeste), como sistema de coordenadas, se toma referencia el norte (0°) tomando positivos hacia el este.

La base acimutal se encarga de permitir al telescopio rotar en el eje acimutal y permite el giro de la estructura de altitud alrededor del eje de altitud además de transferir todo el peso del tubo del telescopio y el propio mediante rodamientos a la cimentación (zapatas acimutales). Esta estructura se apoya en unos rodamientos (zapatas hidrostáticas) que a su vez descansan sobre la pista acimutal, la cual esta anclada a la cimentación del telescopio. Este subsistema de la estructura del telescopio provee apoyo a la estructura de altitud del telescopio por medio de las rodamientos (zapatas de altitud). La estructura debe cumplir también con restricciones en sus modos de vibración, para no introducir movimientos aleatorios a la imagen, ser lo más ligera posible y de baja fricción, para un fácil control, así como reducir las turbulencias del flujo del aire.

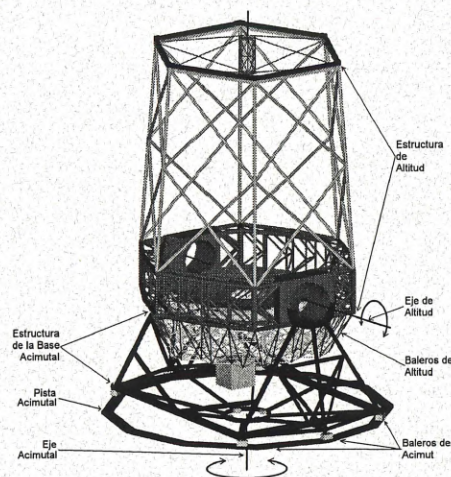


Fig. 5.1.1.- Representación del Telescopio así como de las partes que lo componen.

5.2.-Diseño Conceptual y Requerimientos para La Base Acimutal.

Diseño conceptual:

La base acimutal se construirá con estructuras espaciales, ya que este tipo de estructuras permiten cumplir con los requerimientos de ser suficientemente rígida y presentar por lo tanto altas frecuencias de resonancia sin un incremento considerable de peso. Sin embargo, la frecuencia mínima del telescopio deberá ser lo suficientemente alta para minimizar las perturbaciones provocadas por el viento y no limitar la respuesta de los sistemas de tracción en el apuntado y el guiador. Otra de las ventajas es su baja inercia térmica y baja resistencia al viento. Se usarán elementos de sección transversal tubular circular, ya que a diferencia de otro tipo de secciones como los I, T, C, etc. Estas presentan una rigidez simétrica, presentan una superficie aerodinámica

El diseño conceptual de la Base Acimutal se plantea a partir de los requerimientos del telescopio y se presenta a continuación:

Requerimientos:

- La estructura de la Base Acimutal deberá ser compacta para minimizar las dimensiones del edificio y el domo.
- Su rigidez debe ser tal que no exceda el límite de peso establecido (80 Ton. para todo el telescopio) y en consecuencia tendrá una baja fricción e inercia que facilitará su control, además que su costo de construcción será bajo.
- La estructura deberá permitir mantener en forma estable la posición relativa de los espejos primario y secundario, así como soportar el peso de los espejos, bafles, cables eléctricos, guiador, instrumentos científicos, sistemas de balance y de tracción, etc.
- La estructura será tal que no se obstruya y se mantenga alineado el camino óptico, entre los espejos primario y secundario, y el instrumento empleado para la observación.

- Deberá permitir apuntar y seguir a un objeto astronómico con precisión.
- La estructura deberá permitir el flujo de aire laminar, en la medida de lo posible, alrededor y a través de sus elementos, el flujo del aire también permitirá una reducción de los gradientes de temperatura entre sus diferentes elementos estructurales y entre la estructura y el medio ambiente, y en consecuencia no se provocarán turbulencias que degraden la calidad de la imagen observada.
- Las vibraciones de estructura no deberán ser menores a 12 hertz, esto para que no se amplifiquen con el modo de vibrar del edificio que la contendrá.

5.3.- Antecedentes de prediseño de la Base Acimutal.

Con el objetivo de obtener una Base Acimutal óptima se analizaron varios tipos de estructuras con diversas opciones de rodamientos para el movimiento en acimut. Esto fue motivado por la relación directa que se tiene entre la estructura y estos rodamientos. Se empezó con una estructura simple y tridimensional en la que únicamente se consideraron los elementos principales. Como opción de rodamientos en acimut se utilizaron rieles y bloques embalados tipo LM Guide de THK. Se encontró que era necesario utilizar 28 bloques embalados para poder soportar el peso del telescopio. En la *Figura 5.3.1.* se muestra un detalle del modelo. Tal como se mencionó en el diseño conceptual, los elementos constructivos de la estructura, para disminuir las turbulencias, deben ser perfiles tubulares circulares.

Los datos técnicos de los rodamientos THK y en especial los detalles de los bloques, como carga y momentos máximos que pueden soportar, se presentan en las *Tablas 5.3.a., 5.3.b. y 5.3.c.* Este tipo de rodamiento tiene la ventaja de ser fácil de instalar y de necesitar poco mantenimiento. Gracias a la visita a Ensenada que realizaron los técnicos de THK, fue posible percatarse de que el producto de THK tiene una desventaja: la alta fricción de los balines de los bloques. El coeficiente de fricción dinámico es de 0.002, con lo que es imposible obtener la resolución requerida para el control del Telescopio. No obstante, los mismos técnicos comentaron que este valor se puede reducir considerablemente por medio de separadores de balines que han desarrollado recientemente. Sin embargo, este producto en la geometría y dimensiones requeridas aún no está disponible. Motivo por el cual se desechó el uso de rieles con bloques embalados tipo LM THK, y no se terminó el análisis detallado de esta estructura.

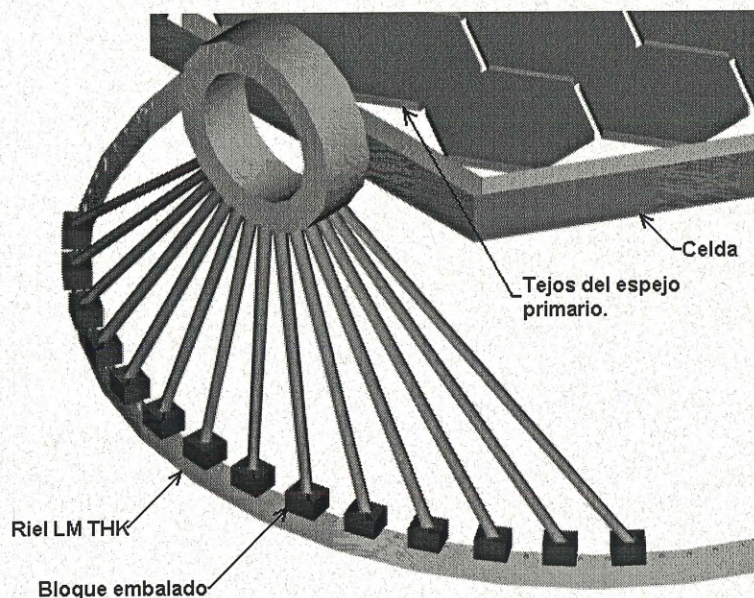


Figura 5.3.1.- Detalle del bosquejo de estructura de la base acimutal simple tridimensional usando rieles con bloques embalados LM de THK

Tabla 5.3.a.- Momentos permisibles en los bloques LM THK

EJE DE GIRO*	N-m	lb-pulg
RADIAL	4,200	37,175
PERPENDICULAR	4,200	37,175
PARALELO	6,600	58,418

*con referencia al riel

Tabla 5.3b Cargas Permisibles en los Bloques LM THK

Tipo de Análisis	N	lb
DINAMICO	141,000	31,700
ESTATICO	215,000	48,336

Posteriormente, para el movimiento en acimut se consideraron los rodamientos de bolas y rodillos, con unas estructuras en forma de bases tridimensionales simples en acimut. Sólo se consideraron los elementos principales, sin tensores ni refuerzos y con la misma sección transversal de las vigas. Como se aprecia en la *Tabla 5.3.c.* los baleros encontrados en el mercado no tenían las dimensiones adecuadas, por lo que la estructura se cerraba en la parte inferior para poder ajustarse a los baleros. Esto deterioraba la estabilidad de la estructura.

Otra observación importante sobre el comportamiento de los baleros es que por el peso del telescopio y los coeficientes de fricción dinámica y estática, entre metal y metal, que tienen este tipo de rodamientos, éstos no eran los adecuados para poder controlar el telescopio con la precisión y repetibilidad requerida. Además, el desgaste de los balines sería considerable por lo que sería necesario planear compensación o reemplazo de los baleros.

Con base en los estudios preliminares realizados con estructuras sencillas, incluyendo rieles THK y baleros, fue posible encontrar que la estructura más conveniente era aquella que consta de dos trípodes unidos por un bastidor (*Figura 5.3.2.*). También se definió la forma de la base del trípode que distribuye las cargas más uniformemente en los seis puntos de apoyo de la estructura y permite el movimiento de altitud. De la misma forma, se definieron los tipos de perfiles de las vigas a usarse y su material; además se comprobó que la estructura tubular era lo suficientemente rígida y liviana para los requerimientos del telescopio. Estos lineamientos obtenidos se mantuvieron hasta la estructura final.

TIPO	COMPANÍA	DIAMETRO MAYOR	COSTO	TIEMPO DE ENTREGA	MANUFACTURADO EN	BLOQUES
BALEROS	RA	4.826 m.	184,000.00 DLS	13 MESES	U.S.A.	No aplica
RIELES	THK	9.2000 m	230,000.00 DLS	5 MESES	JAPON.	100
RIELES	THK	6.000 m	122,640.00 DLS	5 MESES	JAPON.	36
RIELES	THK	6.000 m	143,148.00 DLS	5 MESES	JAPON.	48
BALEROS	RA	1.27 m	19,080.00 DLS	13 MESES	U.S.A.	No aplica

Tabla 5.3.c.- Características de los baleros y rieles de gran tamaño

También se estudió la respuesta de la Base Acimutal apoyada en baleros hidrostáticos. Se encontró que para la modelación existen diferencias técnicas entre un rodamiento de bolas y uno hidrostático. Las principales son: la fricción, ya que la de los rodamientos de bolas es 10 veces mayor que la de los rodamientos hidrostáticos; y las condiciones de frontera, puesto que los rodamientos de bolas requieren condiciones de frontera que restrinjan la rotación en los tres ejes coordenados y la traslación en sólo dos ejes: el perpendicular a la carga y el radial. Por su parte, los rodamientos hidrostáticos no requieren condiciones de frontera que restrinjan rotación alguna, sólo la traslación en el eje de acción de su apoyo.

A partir de la única condición de frontera que se requiere en una zapata hidrostática se tuvo que definir no solo la transmisión de la carga axial y las condiciones de rotación de la base, sino además la forma de centrar al telescopio para evitar el desplazamiento en el plano perpendicular a la carga del mismo. Se estudiaron varias opciones de centrado, una de ellas consistió en usar el balero de bolas o cuatro zapatas hidrostáticas colocadas ortogonalmente en el centro del bastidor (puntos A de la *Figura 5.3.2.*) Otra opción de centrado del telescopio era con zapatas hidrostáticas colocadas en el diámetro de la pista de acimut, (puntos B de la *Figura 5.3.2.*), pero en sentido radial. Esta última opción fue desechada por la necesidad de maquinar una pista de muy alta precisión, del mismo tamaño que la pista acimutal, pero perpendicular a esta.

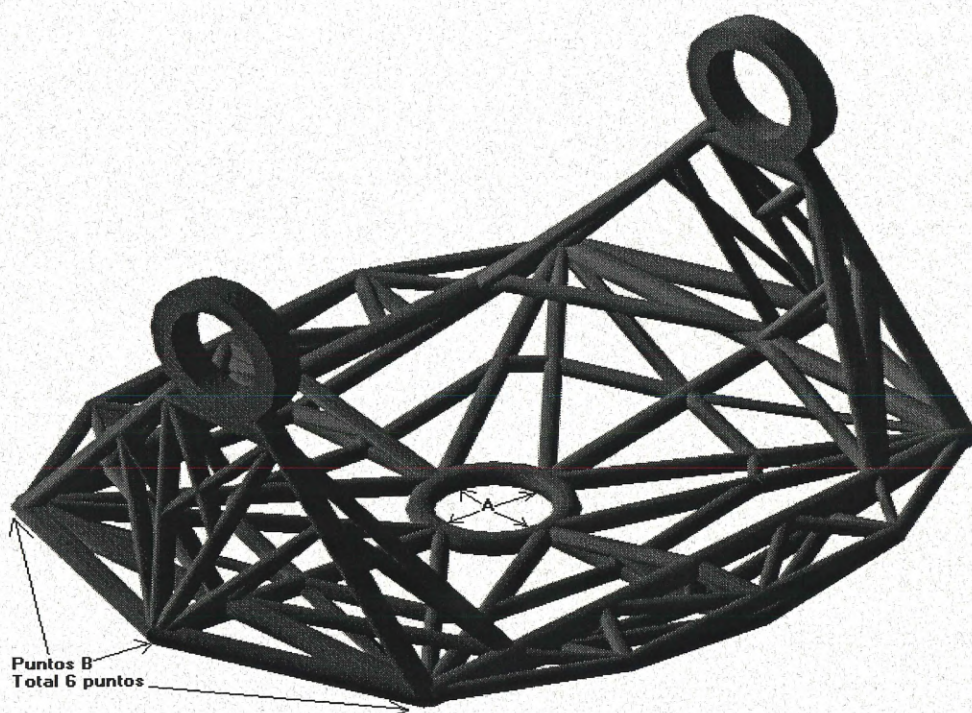


Figura 5.3.2.- Localización de los puntos A (baleros de centrado) y B(baleros de carga) en la estructura tipo “U” de la Base Acimutal

A continuación se evalúa si los baleros de centrado en la posición A (*Fig 5.3.2.*) deben ser de bolas o hidrostáticos. En *la Tabla 5.3.d.* se muestra una comparación de los resultados obtenidos con modelos con los dos tipos de baleros en el centro del bastidor (posición A en *Figura 5.3.2.*). Estas fueron las opciones de centrado más viables. En la tabla se puede apreciar que los esfuerzos a tensión y compresión son 8.5% y 18.5% mayores, respectivamente, cuando se usan baleros de rodamientos que cuando se usan baleros hidrostáticos. El desplazamiento radial máximo que se presenta es 12% mayor en el modelo simulado con baleros de rodamientos de bolas. La diferencia entre las reacciones máximas y mínimas que se presentan en los nodos donde se localizan las zapatas hidrostáticas que cargan al telescopio se incrementan en un 3.2% utilizando para el centrado baleros hidrostáticos. El peso de la estructura se mantiene igual con cualquiera de las dos opciones. El primer modo de vibrar disminuyó 13.8% al usar baleros hidrostáticos en lugar de baleros de rodamientos con bolas.

Tipo de Centrado	Lugar en el Análisis del modelo	Esfuerzo [Pascals]		Desplazamientos Radiales [Metros]		Reacciones [Newton]		Peso kg	Modos de vibrar [Hertz]		
		Tensión	Compresión	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo		1er.	2do.	3er.
Baleros de Desplazamiento Hidrostática	De todo El modelo	1.5029×10^7	-2.853×10^7	2.23×10^{-3}	0	351,151	372.144	25,372	14.78	17.24	20.64
	De los baleros Hidrostáticos			2.03×10^{-4}	9.6×10^{-5}	2.30×10^5	8.08×10^5				
Baleros Rodamientos De bolas	De todo el modelo	1.6418×10^7	-3.503×10^7	2.53×10^{-3}	0	351,151	372.144	25,372	17.15	17.36	22.74
	De los baleros Hidrostáticos			1.50×10^{-4}	5.08×10^{-5}	2.19×10^5	4.08×10^5				

Tabla 5.3.d.- Resultados obtenidos con modelos con baleros hidrostáticos o con baleros de bolas. Centrado de la Base Acimutal del TIM.

También, en el estudio realizado se observó en los modelos con baleros de bolas, que a pesar de que casi todo el peso lo soportaban las seis zapatas hidrostáticas de acimut, en el centro del bastidor se generaban reacciones en dirección de la gravedad, las que causaban fuerzas de fricción dinámica y estática que complicaban el control del telescopio. Por esto se optó por un centrado con 4 zapatas hidrostáticas al centro del bastidor. Así se uniformizó el tipo de rodamientos por ser todos del mismo tipo.

Del estudio anterior se determinó que la forma idónea de la estructura para obtener frecuencias naturales altas es considerando dos trípodes unidos por un bastidor (*fig5.3.3.*) con seis puntos de apoyo para transmitir el peso a la cimentación y proporcionar le movimiento acimutal por medio de zapatas hidrostáticas además con cuatro puntos de apoyo en el centro del bastidor para evitar el movimiento en le plano perpendicular a la carga, en dichos puntos de colocaran cuatro zapatas hidrostáticas colocadas ortogonalmente.

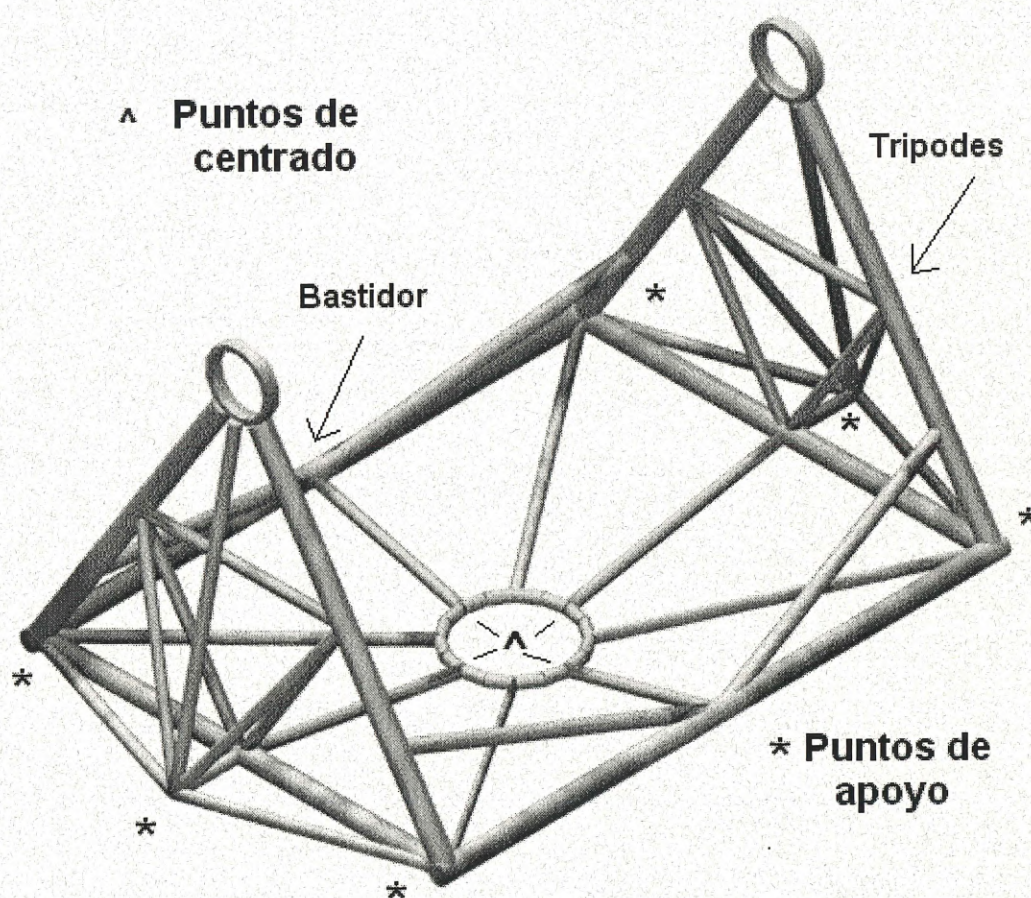


Fig 5.3.3.- Base acimutal con sus diferentes partes que la componen y sus puntos de apoyos.

6.-Resultados

6.1-Prediseño De La Base Acimutal

Una vez que se estableció que el sistema de rodamiento sería por medio de zapatas hidrostáticas, se procedió a la optimización de la Base Acimutal tomando como punto de partida los resultados presentados en la *tabla 6.1.a.*, y que corresponden a la base que se muestra en la *Fig. 6.1.1.*

Tipo de estructura	No. De Elementos	Tipos de tubos, Ø ext. y cédulas	No. de Nodos	Carga aplicada a la estructura kg / N.	Esfuerzo (Pascuales)		Peso Kg	Despla_ Zaminetos Mm	Reacciones en las zapatas hidrostática			Vibraciones 1er Modo Hz
					Tensión Pa	Compresión Pa			Máximas [N]	Minimas [N]	Rango de Reacciones	
Tipo U Reforzado	220	8" Cédula 40	86	70,000			25,372	2.53	2.31X10 ⁵	4.08X10 ³	226,920	14.78
		10" Cédula 40			16.0X10 ⁶	-40.0X10 ⁶						
		14" Cédula 40		6.87X10 ⁶								

Tabla 6.1.a.- Resultados obtenidos del Prediseño de la Base Acimutal.



Figura 6.1.1.- Prediseño de la Base Acimutal establecido en el Instituto de Astronomía

6.2.-Optimización de la Base Acimutal.

El proceso de optimización de la Base Acimutal se realizó con el programa para diseño estructural Algor. Se empleó el módulo de vigas, ya que la Base Acimutal está constituida por este tipo de elementos y la forma de hacerlo fue por medio de iteraciones, donde se analizaron una serie de modelos tridimensionales de la base y se determinó cuales elementos se esforzaban y cuales no estaban trabajando. De esta manera se procedió a descartar elementos considerados innecesarios en la estructura.

Los principales requerimientos para la Base Acimutal son: que cuente con un peso bajo, un modo de vibrar alto de la estructura y que los desplazamientos fueran mínimos. Para lograr un peso bajo se tuvo que eliminar un gran número de elementos que le daban rigidez, lo cual no favoreció al modo de vibrar de la estructura ya que para que la estructura tuviese modos altos de vibrar debía tener gran rigidez y la concentración de elementos en los nodos provoca que los desplazamientos sean mayores. Teniendo en cuenta estas características se colocaron los elementos de tal forma que cada uno cumpliera con los tres principales requerimientos.

El programa Algor requiere para su ejecución una serie de datos que a continuación se describen así como la razón de cada uno de ellos.

- 1.- Como primer paso se diseña el modelo la base en el editor de dibujo de Algor ó utilizando algún programa de diseño en tres dimensiones como AutoCad.
- 2.- Una vez teniendo el dibujo tridimensional *fig. 6.2.1.*, se procede a dar de alta algunas características de la estructura, tales como: *condiciones de frontera, propiedades de sección, propiedades del material, fuerzas aplicadas y Gravedad.*

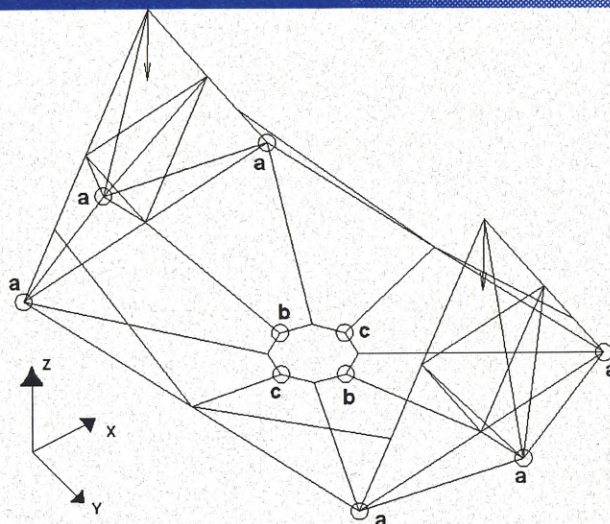


Fig. 6.2.1.-Representación de la Base acimutal con elementos viga, en donde se muestran los diferentes nodos de apoyo así como las fuerzas aplicadas.

Las Condiciones de Frontera están dadas por el tipo de apoyo que tenga la estructura como empotramiento, apoyo de rodillos, etc., y pueden ser en rotación (R_x , R_y , R_z) y traslación (T_x , T_y , T_z) en las diferentes direcciones.

En la Base Acimutal las condiciones de frontera se aplicaron en los nodos en donde se colocarán las zapatas hidrostáticas y las restricciones que obedecen a estas son las siguientes: en los nodos que permiten el movimiento acimutal *Fig. 6.2.1.*(nodos a) se restringió la traslación en Z (T_z), dejando en libertad las demás condiciones, esto es por que las zapatas hidrostáticas no permiten el movimiento en la dirección Z, y en los nodos de centrado *Fig. 6.2.1.*(nodos b) las restricciones son: T_y , en el eje Y y en los nodos *Fig. 6.2.1.*(nodos c) T_x , en el eje X, esta condición es la que proporciona el centrado de la estructura permitiéndole el movimiento acimutal.

Las propiedades de sección son las propiedades geométricas de la sección transversal que corresponden a cada tipos de elementos que conforma el modelo, dichas propiedades para la base acimutal son las siguientes:

- Id:** Número de identificación de la sección. Este es dado automáticamente y habrá tantos como secciones Transversales se tengan en la estructura.

- Área:** Esta corresponde al área de la sección y como en esta estructura se tienen solamente secciones tubular, entonces el área se calcula mediante la siguiente expresión: $A = 2 \pi r t$, donde: A es el área de la sección tubular, r es el radio medio de la sección y t es el espesor de pared del tubo. Esta formula solo se utiliza para $t \ll r$.
- Sa2 y Sa3:** El área de corte se determina mediante la expresión: $Sa_i = A/1.885$, para secciones tubulares, donde A es el área de la sección.
- J1:** Es el módulo de torsión de la sección y se calcula por la siguiente expresión: $J1 = 2 \pi r^3 t$, donde: r es el radio medio de la sección y t es el espesor de pared de la sección.
- I2, I3:** Es el momento de inercia 1 y 2 de la sección y corresponden a los eje 1 y 2 de la misma, para la sección seleccionada se tiene que el I2 e I3 tiene el mismo valor y se calcula con la siguiente expresión: $I = \pi r^3 t$, donde r es el radio medio de la sección y t es el espesor de pared de la sección.
- S2,3:** Este es el modulo de sección y es necesario para el cálculo de M2/S2 y M3/S3. Donde M2 y M3 son los momento en el eje 2 y 3, como la sección es tubular S2 y S3 son iguales. Estos se calcula mediante la expresión siguiente: $S = I / r$, donde I es el momento de inercia y r es el radio de la sección.

Las propiedades del material corresponden a los diferentes tipos de materiales que componen la estructura y para la Base Acimutal solo se consideró un material que es el acero estructural A-36 y tiene las siguientes propiedades:

-EN: Módulo de elasticidad, para este caso en particular se tiene que es 1.9×10^{11} Pa.

-GN: Éste corresponde al la relación de Poisson y para el acero es 0.29

-MDEN: se pide la densidad de masa del material utilizado (se usa 0.0 y es calculado automáticamente con la densidad de peso). Esto es multiplicando la densidad del peso por la gravedad y esta expresado en Kg/m^3 .

-WDEN: es la densidad de peso y para el acero es 7.7 kN/m^3 .

Las Cargas aplicadas. En el programa Algor se pueden simular las condiciones a que estará sometida la estructura, se utilizan fuerzas, momentos, cargas distribuidas, dirección de la gravedad, etc. Para la estructura solo se tienen fuerzas verticales y las cuales tiene una magnitud de 400,000 N y la dirección es menos Z y se aplica en la parte alta de los trípodes, la gravedad 9.81 m/s^2 . Esta carga simula el peso de la Estructura de altitud incluyendo los espejos e instrumentos de observación que tendrá el telescopio.

6.2.1.-Proceso de Optimización de la Base Acimutal.

Para lograr la Optimización de la base Acimutal se aplico el siguiente método iterativo.

- 1) Se realizo una corrida del modelo.
- 2) Obtenidos los resultados se le revisaron cuales elementos estaban trabajando y cuales se podría prescindir de ellos.
- 3) Se eliminan los elementos que no estaban trabajando estos eran los que presentas esfuerzos bajos (esfuerzos por debajo del 60% del esfuerzo permisible).
- 4) Los elementos que presentaban grandes esfuerzo se les proponía un diámetro mayor y a los elementos que presentabas un esfuerzo pequeño pero que eran fundamentales para proporcionar rigidez a la estructura se le reducía el diámetro.
- 5) Se cambiaban algunos nodos o elementos para cumplir con las condiciones establecidas.
- 6) Se corría el nuevo modelo propuesto.

A continuación se presentarán una serie de modelos de la base acimutal representativos del proceso que se llevo a cabo en la optimización.

En la *figura 6.2.1.* se muestra el prediseño de la Base Acimutal establecido en el Instituto de Astronomía, del cual las fuerzas aplicadas son de 350,000 Newton cada una, cuenta con un nodo totalmente restringido lo cual es por restricciones del programa de cálculo, los diámetros utilizados en las secciones tubulares circulares son 8", 10" y 14" y todos cédula 40. y la altura de los trípodes es de 5.75 metros, y los desplazamientos máximos son de 2.53mm y se presentan en la parte donde se aplican las fuerzas y el peso de la estructura es de 25,372Kgf.

La *figura 6.2.2.* muestra una propuesta realizada en la cual ya se ha reducido algunas partes de la estructura, en esta se sigue conservando la misma forma así como los mismos diámetros de la propuesta preestablecida así como las condiciones de apoyo y cargas aplicadas. Este modelo presenta un desplazamiento máximo de 2.33 mm y este ocurre en la parte media del bastidor en donde no se considera significativo, el peso de esta propuesta es de 15,810 Kgf, el primer modo de vibra es de 13.04 Hertz.

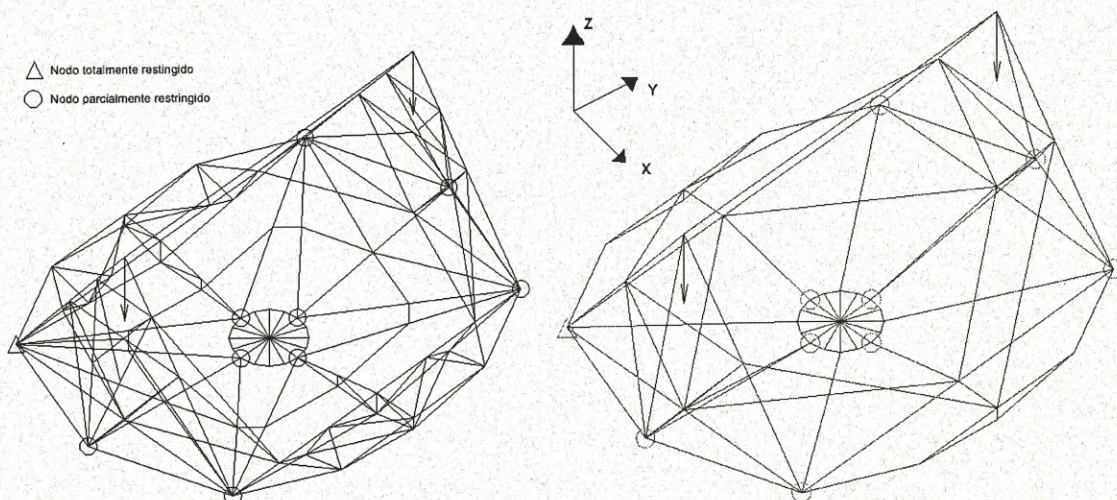


Fig. 6.2.1.- Prediseño establecido en el Instituto de Astronomía

Fig. 6.2.2.- Modelo propuesto 2.

La *Figura 6.2.3.* presenta un modelo del cual se le hicieron unos cambios significativos uno de ellos es que se aumentó la altura de los trípodes a 6.00 m por un requerimiento en la estructura que soportará al espejo primario (celda).

Además se le modificó la condición de frontera en el nodo que anteriormente se tenía totalmente restringido esto por que dicho nodo producía un comportamiento asimétrico en los apoyos acimutales y los esfuerzos presentados en dicho nodo diferían de los otros, teniendo las mismas condiciones para los nodos la respuesta o resultados obtenidos serán lo más apegados al comportamiento que tendrá la base. Se aumentó la fuerza que representa el peso de la estructura de altitud a 400,000 N en cada trípode, esto por modificaciones a dicha estructura. La Base acimutal presentó un desplazamiento máximo de 2.46 mm en la parte media del bastidor y el peso de esta es de 15,129 Kgf. El esfuerzo mayor a Tensión es de 1.1×10^7 Pa. y el mayor a Compresión es de -2×10^7 Pa. Estando estos por debajo de el máximo permisible que es 8.3×10^7 Pa siendo este 1/3 del la resistencia última a la fluencia del acero estructural ASTM-A36 (250 Mpa) . Teniendo esta como primer modo de vibrar 11.70 Hertz lo cual está por debajo del requerido.

En este modelo (*figura 6.24*) se perdió la forma que se tenía originalmente por una mas compacta pero se siguieron conservando los mismos diámetros tubulares ya que el otro modelo solo presentaba altos modos de vibrar a costo de un alto peso de la estructura. La estructura presenta un desplazamiento máximo de 2.32 mm y se sigue presentado en la parte media del bastidor el peso se redujo a 13,189.60 Kgf y los esfuerzos están en el intervalo de 1×10^7 Pa y -2×10^7 Pa a compresión y tensión respectivamente, el primer modo de vibrar fue de 11.780 Hertz.

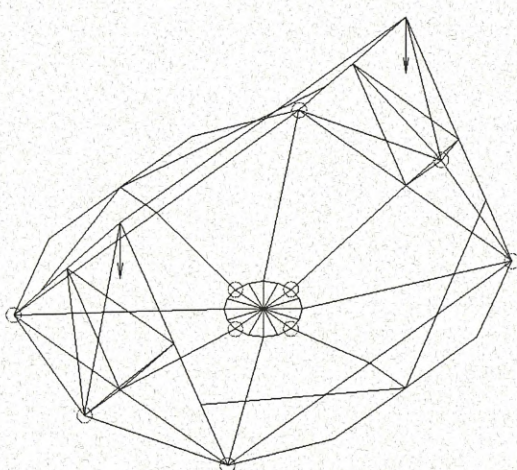


Fig.6.2.3.-Modelo Propuesto 3.

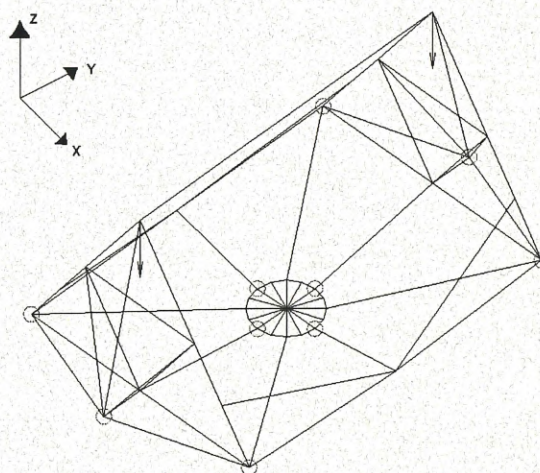


Fig.6.2.4.-Modelo Propuesto 4.

Se presentaron otras propuestas en donde el centrado del la Base fuera en los nodos en donde se colocarán la zapatas del movimiento acimutal, en la *figura 6.2.5.* se presenta alguna de estas propuestas. Esta forma de centrado se desechó por que se tendría que construir una pista de centrado que sería de igual tamaño que la pista acimutal pero perpendicular a esta, lo cual seria costoso ya que las zapatas hidrostáticas requieren un superficie totalmente rectificada, además el comportamiento de la estructura sin centro fue poco favorable ya que presentaba modos bajos de vibrar. Por lo que respecta a los desplazamiento y esfuerzos las estructuras están dentro del intervalo aceptable y el peso que se logró para esta fue de 11,994 Kgf para la Estructura A y de 12,574 para la B.

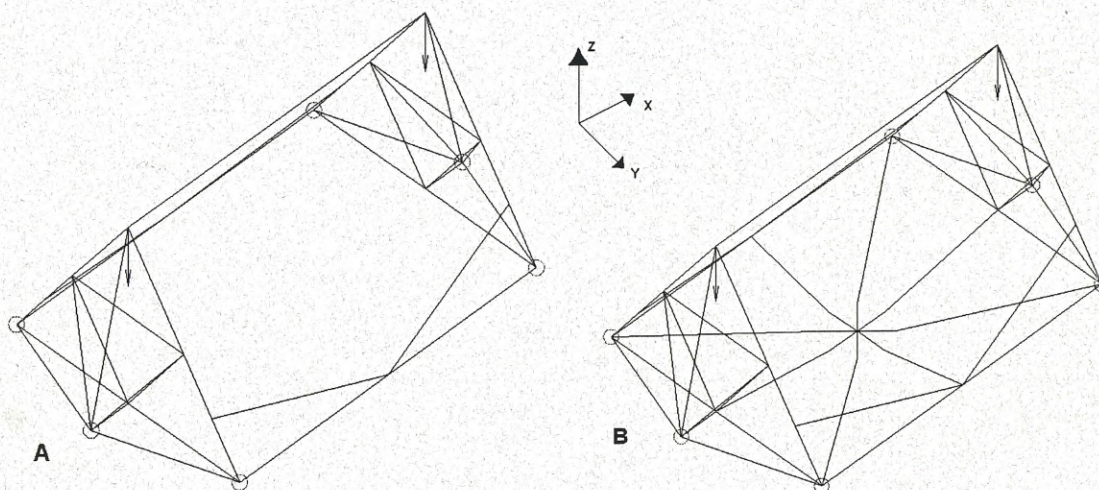


Fig. 6.2.5.-Estructura propuesta con el centrado en los nodos de apoyo acimutal.

Una vez establecido que la forma del centrado del telescopio fuera en la parte media de la base acimutal se retomaron los modelos que presentaban este tipo de centrado y se trabajó sobre ellos variando los diámetros de los tubos determinando el óptimo teniendo así como resultado final la estructura que se presenta en la *figura 6.2.6.* que fue la estructura final optimizada que cumplió con todas las especificaciones de diseño preestablecidas, cuyos resultados se presentan más adelante.

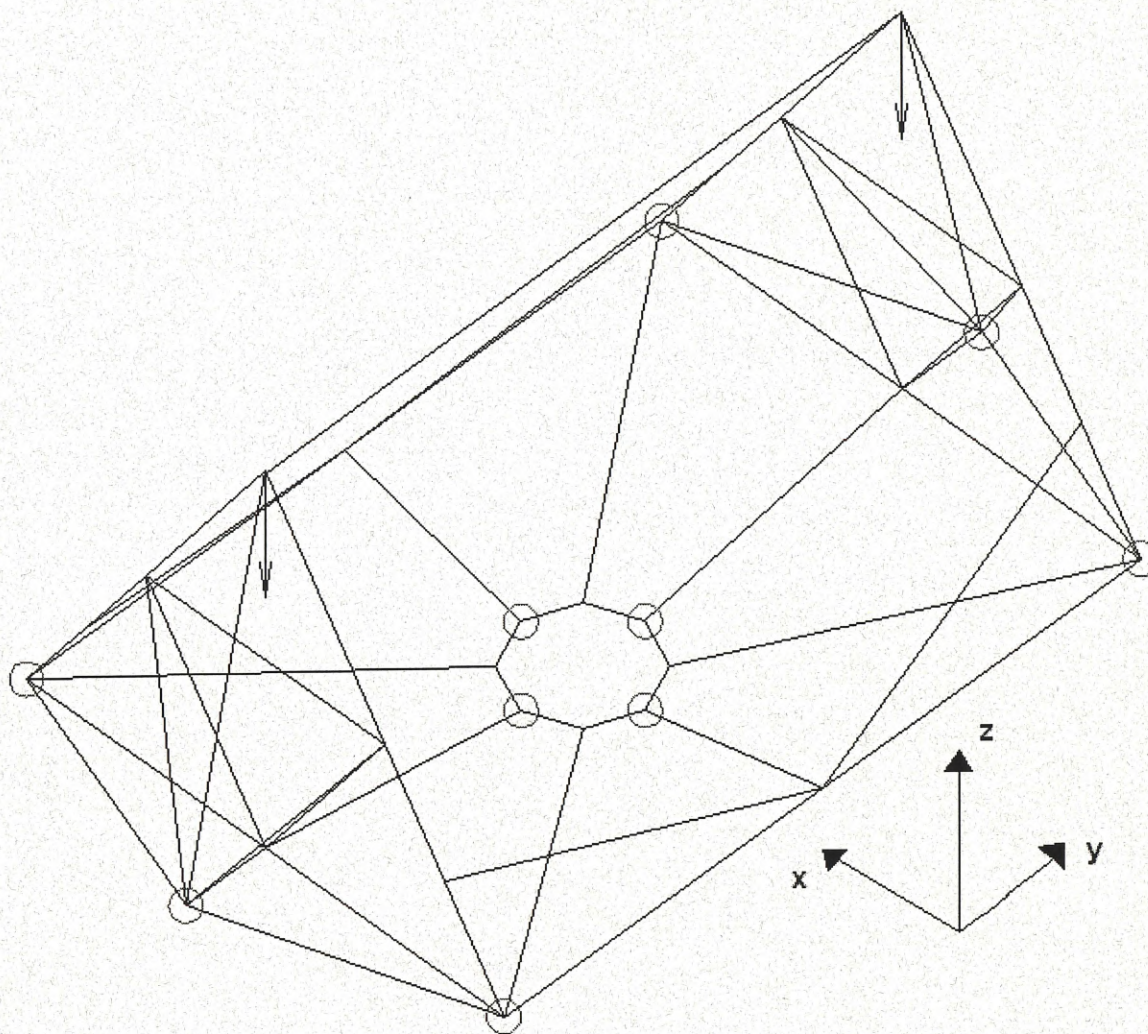


Fig .6.2.6.- Estructura Final Optimizada.

6.3.-Descripción de la Base Acimutal Optimizada

La estructura guarda simetría en los planos XZ, YZ , esto es tomando como origen el punto que forma la intersección del eje de giro acimutal. En la *figura 6.3.1.* se presenta la Base Acimutal modelada tridimensionalmente con sólidos. Cuenta con una longitud a lo largo del bastidor de 1.8 m. que es el diámetro de la pista acimutal, tiene un claro de 9.85 m. entre los dos trípodes, que es donde se colocará la estructura de altitud a una altura de 6 m.de la parte baja de los trípodes. Consultar **Anexo A** para detalles de dimensiones.

La estructura esta realizada por elementos tipos tubos, de tres tipos de diámetros exteriores que son los siguientes $\varnothing 8''$ cédula 40, $\varnothing 10''$ cédula 40 y $\varnothing 14''$ cédula 40.

El desplazamiento máximo de la estructura es de 1.96 mm y se presentan a la mitad de las vigas externas del umbral que unen los dos trípodes. Los desplazamientos en estos nodos no son de mucha relevancia para las especificaciones de la estructura. Los desplazamientos importantes para la estructura se presentan en los nodos en los que se apoya la misma sobre los baleros hidrostáticos de acimut y el resto de los nodos que forman los dos trípodes. El máximo desplazamiento que presentan los nodos donde se localizan las zapatas hidrostáticas de acimut es de 0.255 mm, y se presenta en los nodos externos de la base de los trípodes. Pero el máximo desplazamiento en la estructura de los trípodes es de 0.938 mm, que se presenta en el segundo nivel de la estructura de los trípodes.

Los esfuerzos máximos a compresión con valor de -2.34×10^7 Pa se presentan en los elementos que están en las puntas superiores de los trípodes. Los esfuerzos máximos a tensión con un valor de 1.20×10^7 Pa se localizan en los elementos que se encuentran al centro de la estructura, lugar donde esta localizado el balero de centrado. Pero el máximo esfuerzo a tensión presentado en los trípodes es de 8.65×10^6 Pa y se presentan en sus elementos base.

El peso total de la estructura de la base Acimutal Optimizada es de 12,495.4 Kg.

Las reacciones más relevantes para la estructura son aquellas que se localizan en los nodos donde se colocarán las zapatas hidrostáticas de acimut. Se presenta reacciones de 158,500 N en los cuatro nodos externos de las bases del trípodes y reacciones de 125,700 N en los dos nodos del centro de las bases de los trípodes. Para mayor información acerca de los resultados obtenidos ver **Anexo B**.

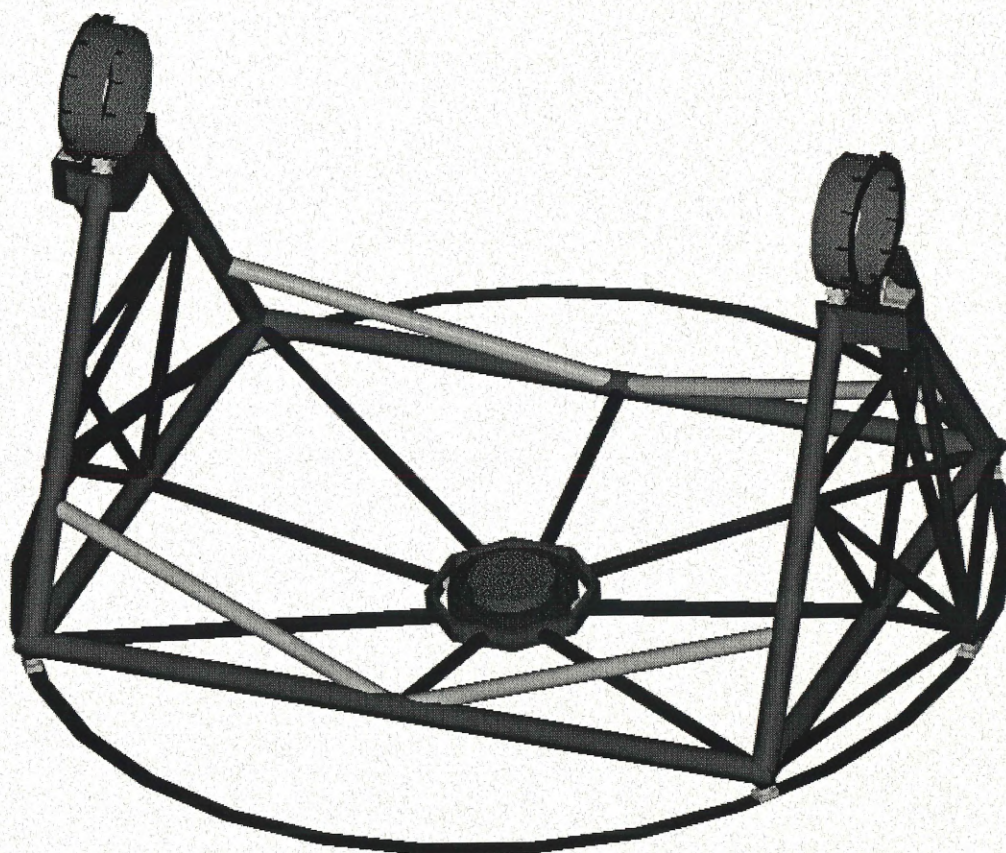
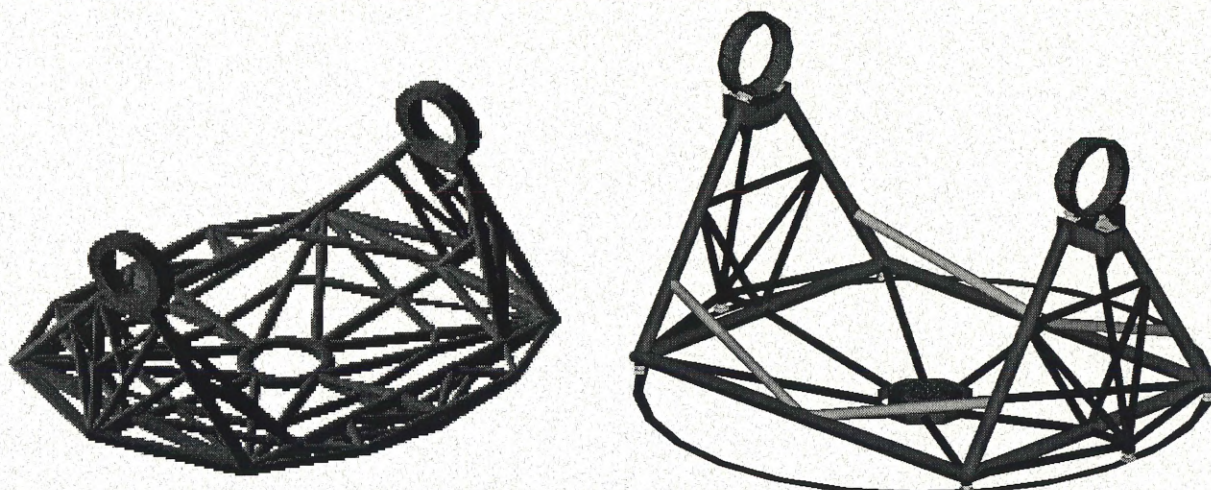


Fig.6.3.1.- Modelo Tridimensional de la Base Acimutal Optimizada con representación en sólidos.

6.4. Comparación De Resultados.

A continuación se presentan en la Fig. 6.4.1. los modelos tridimensionales en sólidos tanto del prediseño establecido en el Instituto de Astronomía así como el modelo de la estructura final optimizada en la cual se puede observar que se aumentó la altura de la nueva propuesta por requerimientos de la estructura de altitud además se puede notar la disminución tanto de nodos como de elementos en relación con el modelo propuesto por el Instituto de Astronomía, ya que teniendo un menor número de elementos se tendrá un menor peso y por consecuencia un menor costo, además por la simplicidad del modelo se tendrá menor dificultad al momento que se lleve a cabo la construcción y ensamble de la base.



6.4.1. Izquierda modelos del diseño establecido en el Instituto de Astronomía.
Derecha modelo de la Base acimutal final.

Basándose en los resultados obtenidos a continuación en la *Tabla 6.4.a*, se presenta una comparación gráfica de los resultados obtenidos en el prediseño establecido en el Instituto de Astronomía contra los resultados de la Estructura Final Optimizada, se observa un incremento en la carga de la estructura final esto fue por una modificación de los requerimientos de la estructura, a pesar del incremento de carga se puede observar que los esfuerzos disminuyeron y la distribución del peso se homogenizó notablemente esto se muestra en la columna del Intervalo de Reacciones esto quiere decir que el peso de la estructura se distribuyó más uniformemente en las zapatas de apoyo.

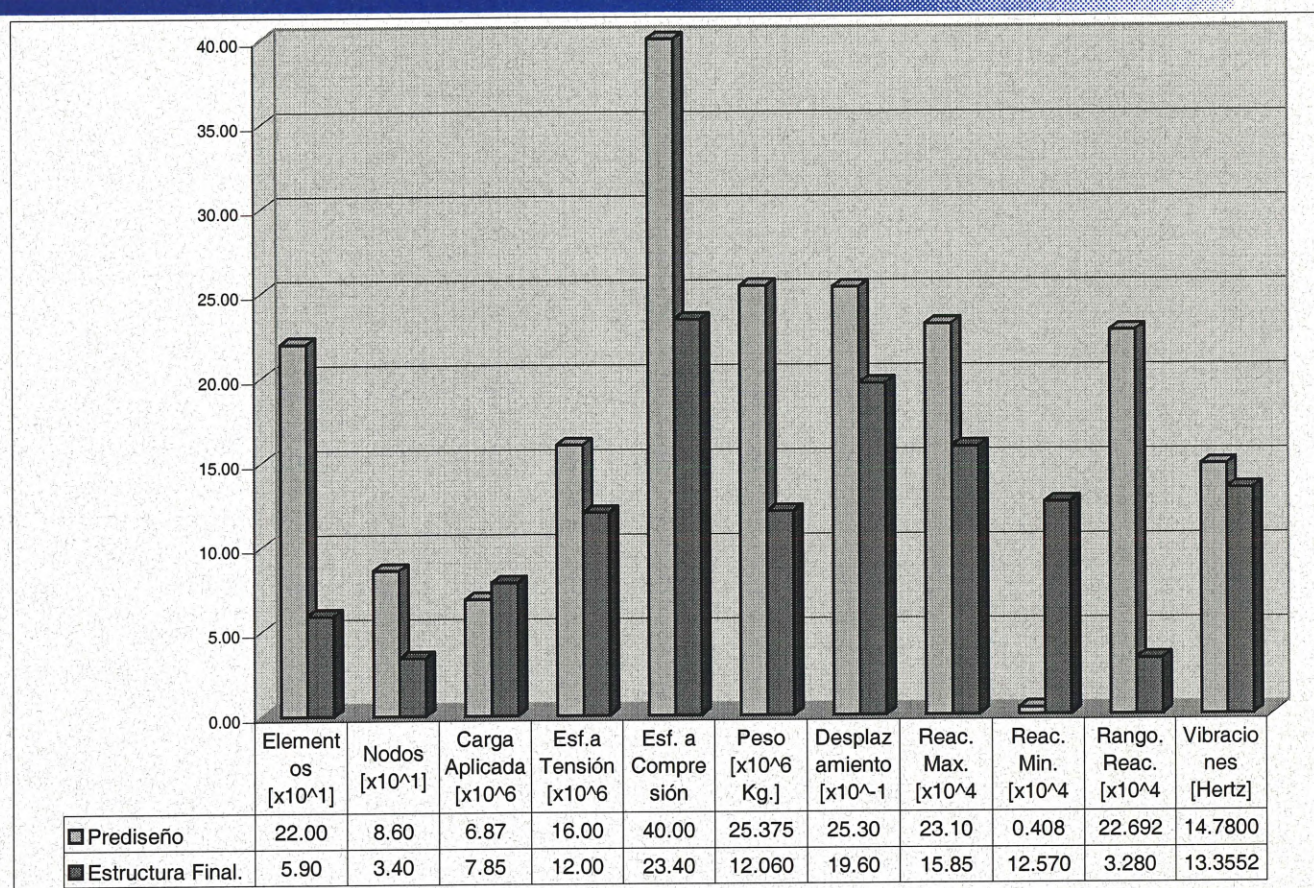


Tabla 6.4.a.- Comparación de los resultados del Prediseño y la estructura Final

La siguiente lista presenta los porcentajes de los cambios comparativos de los resultados obtenidos del prediseño de la Base Acimutal desarrollada en el Instituto de Astronomía con la Optimización realizada en este trabajo de Tesis:

Tipo de Resultados	Unidades	Resultados Obtenidos		Comparación Porcentual
		Prediseño	Est. Final	
Elementos	No.	220.00	59.00	-73% se redujo
Nodos	No.	86.00	34.00	-60% se redujo
Carga Aplicada	N.	687,000.00	800,000.00	17% se incremento
Esf. a Tensión	Pa.	16,000,000.00	12,000,000.00	-25% se redujo
Esf. a Compresión	Pa.	40,000,000.00	23,400,000.00	-42% se redujo
Peso	Kg.	25,375,000.00	12,060,000.00	-52% se redujo
Desplazamiento	mm.	2.53	1.96	-23% se redujo
Rango. Reacciones	N.	226,920.00	32,800.00	-86% se redujo
Primer modo de Vibrar	Hertz	14.78	13.36	-10% se redujo

Tabla 6.4.b.- Comparación Porcentual de los resultados del Prediseño y la estructura Final

6.5.-Pruebas Realizadas.

Una vez definida la base se le sometió a varias pruebas para revisar su respuesta ante condiciones extremas, a las que puede estar sujeto el telescopio. Las pruebas y los resultados de las mismas se presentan a continuación.

Pruebas a la Estructura Seleccionada.

-Primera prueba.- Se sometió a fuerzas de compresión de 1,000 Kg. aplicadas en la parte baja del soporte del tripié. Con esto se simuló la falla de la montura de los motores de fricción, los cuales son los que permiten el giro acimutal de la Base (*Figura 6.5.1.Primera Prueba*).

-Segunda prueba.- Otra de las pruebas realizadas a la Base Acimutal fue la de aplicarle momentos flexionantes en la parte superior del tripié. Con ellos se simula el efecto que se presentaría al retirar la Araña y la Montura del Secundario, y aún así la Estructura en Altitud se moviera. Esta situación provocaría un desbalanceo; la magnitud esperada del momento flector al que estaría sometida la estructura es de 19.62×10^5 N-m (*Figura 6.5.1.Segunda Prueba*).

-Tercer prueba.- La siguiente prueba consistió en simular que uno de los motores, que proporcionan el movimiento a la Base Acimutal, se amarrara y el otro siguiera funcionando. Esto se logró simular aplicando una fuerza tangencial en el lugar donde se supone se colocará el motor y colocando un apoyo fijo en la parte donde se encuentra el segundo motor. La fuerza tangencial, que representa la fuerza aplicada a la estructura por el motor en movimiento, es de 7.082×10^3 N (*Figura 6.5.1.Tercera Prueba*).

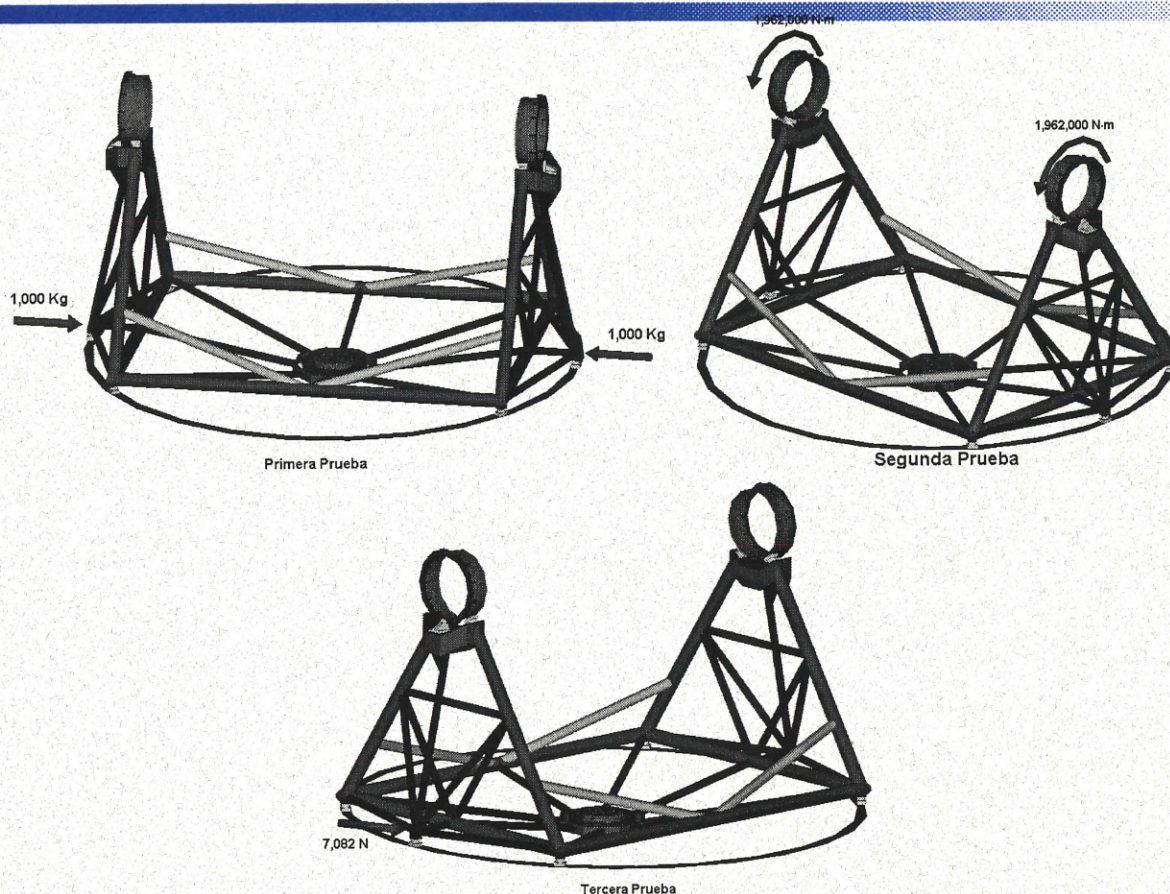


Figura 6.5.1.- Representación de las pruebas realizadas. Primera prueba la estructura es sometida a compresión. Segunda prueba representación de la estructura sujeta a un rebalanceo. Tercera prueba Representación de la prueba con fuerza tangencial.

En la *Figura 6.5.2*, en forma gráfica se muestra una comparación de los resultados de las pruebas efectuadas al diseño seleccionado de la base acimutal. La condición de carga o momento depende del caso evaluado. Se presentan valores de esfuerzos máximos y mínimos, desplazamientos y reacciones, así como los valores en Hz del primer modo de vibrar. Para mayor detalle de los resultados consultar **Anexo B**. En esta figura se aprecia que el caso más crítico es el asociado al desbalanceo del telescopio.

En todas las pruebas del modelo bajo condiciones extremas, los desplazamientos y los esfuerzos están dentro de rangos aceptables. Con esto se asegura que ningún miembro de la estructura cederá ni se saldría del riel de acimut causando que la estructura se caiga

En todas las pruebas del modelo bajo condiciones extremas, los desplazamientos y los esfuerzos están dentro de rangos aceptables. Con esto se asegura que ningún miembro de la estructura cederá ni se saldría del riel de acimut causando que la estructura se caiga bruscamente. Sin embargo, en los resultados obtenidos se observó que donde existe un posible problema mayor es en la diferencia de las reacciones de los puntos de apoyos. Por ello es necesario de la inmediata acción correctiva de interrumpir el flujo de aceite a presión a las seis zapatas hidrostáticas que cargan el peso de la estructura. De esta manera se estaciona el telescopio para evitar descomponer alguna zapata hidrostática.

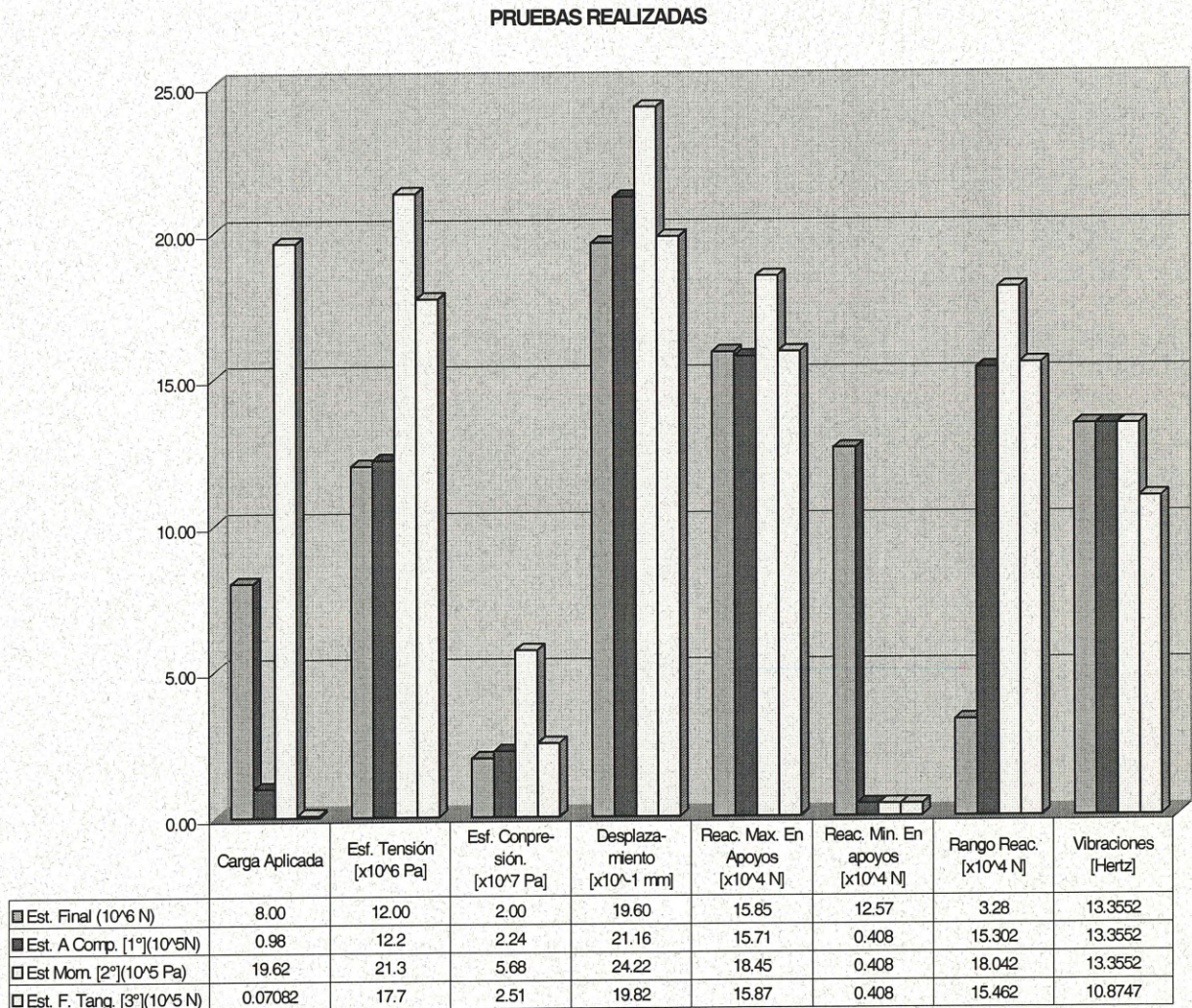


Figura 6.5.2.- Comparación de los resultados de la Estructura Final y las pruebas realizadas.

7.-Conclusiones

Esta Tesis inició con un anteproyecto establecido en el Instituto de Astronomía, teniendo como objetivo optimizar la base acimutal del proyecto TIM, dicha propuesta se llevo a cabo mediante la aplicación del programa estructural Algor que tiene como método de solución los elementos finitos, realizando iteraciones se perfeccionó el modelo de una forma tal que cada elemento que conforma la base acimutal estuviera realizando un trabajo determinado y eliminando así los elementos que no realizaran alguna función, así se obtuvo una base acimutal que cumple con los requerimientos, siendo alguno los siguientes:

- Tener una estructura compacta, se redujo el número de elementos en un 73% y el peso en 53%, esto es significativo ya que el costo está en función del peso.
- Soportar la carga provocada por la estructura de altitud y mantenerla en forma estable, a pesar que se aumentaron las cargas en un 14%, se redujeron los desplazamientos máximos en un 23%, estos se presentan en la parte media del bastidor donde no se consideran significativos, por contrario, el anteproyecto presenta sus máximos desplazamientos en la parte superior de los trípodes que es donde se trasmite el peso de la estructura de altitud a la base acimutal.
- El rango de Reacciones se redujo en un 86%, esto quiere decir que el peso del telescopio estará distribuido homogéneamente en la zapatas hidrostáticas, lo cual permitirá que estos elementos sean de un solo tipo, ya que el área que tendrá la zapata esta en función de la reacción que presente el nodo donde se colocará.
- La Vibraciones se redujeron en un 10%, aún con esto el primer modo de vibrar que presenta la Base es 13.3552 hertz y aún este resultado se encuentra por encima del mínimo requerido que es 12 hertz.

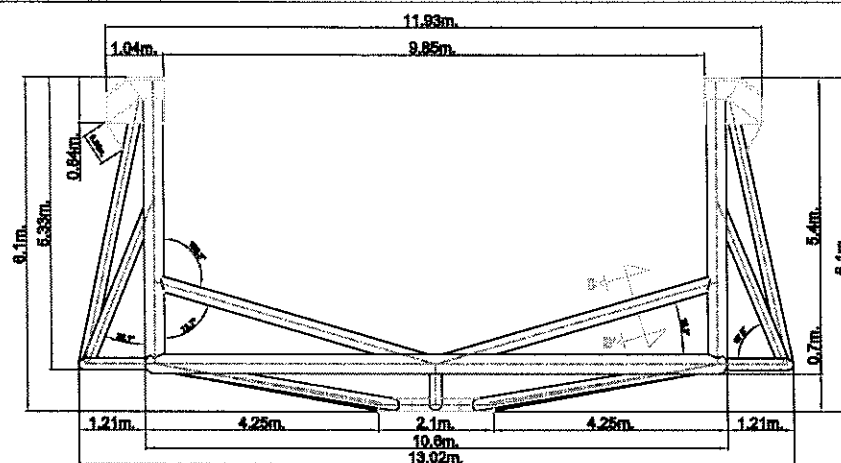
Como resultado final se obtuvo una base acimutal con una mayor capacidad de carga que presenta menores desplazamientos y cuenta con un menor peso, además de cumplir con los requerimientos establecidos para la base acimutal.

Una vez realizado el diseño de la base acimutal queda por realizar el diseño de las uniones de los nodos que conforman la base, además de los análisis sísmicos, viento y térmicos ya que en San Pedro Mártir (S.P.M.) lugar donde se colocará el telescopio llega haber una variación de temperatura hasta de 20°C, debiendo observar la expansión del material debido a los cambios de temperatura.

Anexo A.

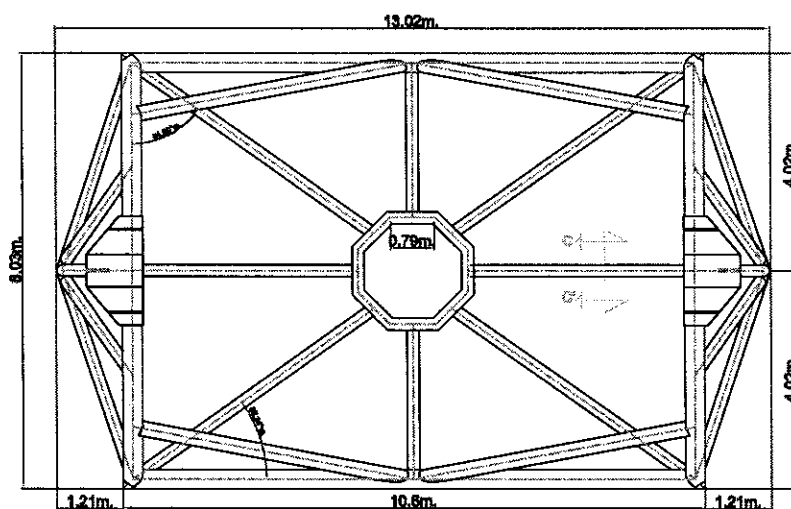
Dimensiones Generales Base Acimutal Optimizada.

Anexo A



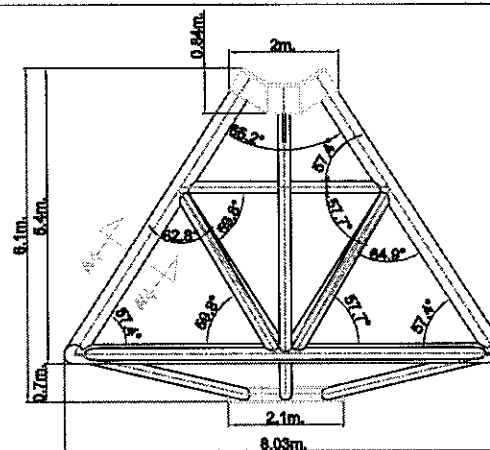
VISTA LATERAL

ESCALA: 1:2



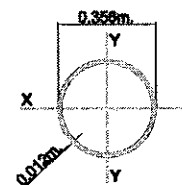
PLANTA

ESCALA: 1:2

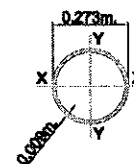


VISTA FRONTAL

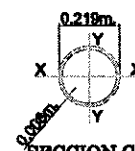
ESCALA: 1:2



SECCION A-A'



SECCION B-B'



SECCION C-C'

ESCALA: 1:2

DIMENSIONES SECCIÓN TUBULAR CIRCULAR

SECCIÓN	DIÁMETRO NOMINAL	a Ext.	a Int.	Espeor
	Pulg.	mm.	mm.	mm.
A-A'	14	366	366	333
B-B'	10	254	273	265
C-C'	8	203	219	203

NOTAS:

- Las dimensiones indicadas son a parte anteriores.
- Los diámetros en las secciones circulares de las diferentes vistas corresponden a los diámetros anteriores de cada sección.
- Las dimensiones de la sección tubular rectangular (largo, ancho) corresponden al lado plano de la parte de alfiler.

DIMENSIONES GENERALES REFERENCIANDO DIMENSIONES POR DE NORMA TECNOLÓGICA				
Nombre: Fecha: Autor: Revisión:	Fecha: Dibujo:	Fecha: Dibujo:	Fecha: Dibujo:	
Descripción: Dimensionamiento General de Base Admisal				Fecha: Dibujo:

Anexo B.- Resultados obtenidos de la Base Acimutal Optimizada.

A continuación se presentan los resultados tanto del funcionamiento Normal de la base acimutal así como los de las diferentes pruebas realizadas que fueron obtenidos mediante el programa de cálculo estructural Algor. En la *figura AB.1* se representa el modelo de la Base Acimutal Optimizada mostrando la nomenclatura de sus nodos la cual es proporcionada por Algor automáticamente. En la *figura AB2.* se muestran los elementos que componen a la base acimutal.

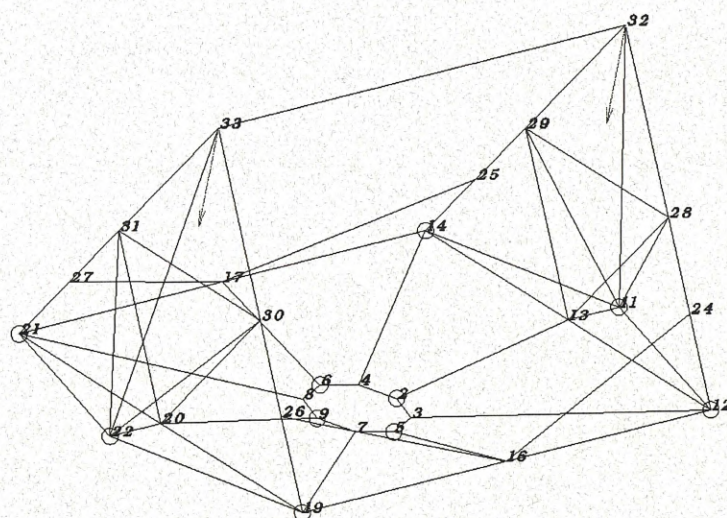


Fig. AB1.- Modelo de la Base Acimutal Optimizada.
Contiene la numeración de nodos

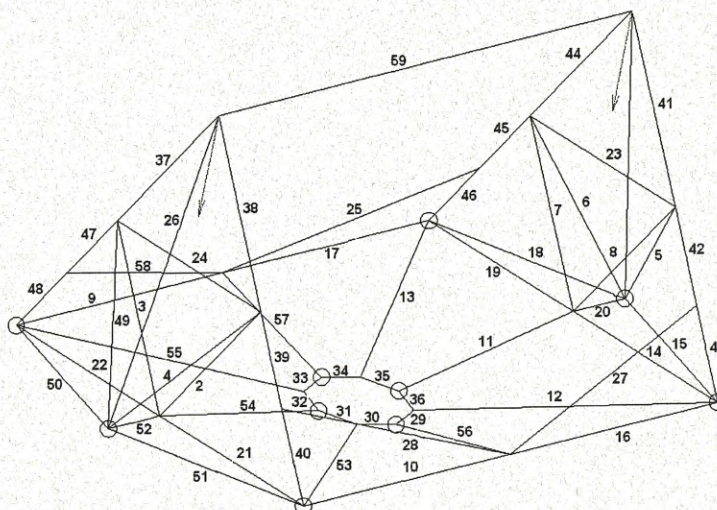


Fig. AB2.- Modelo de la Base Acimutal Optimizada.
Contiene la numeración de los elementos.

Resultados Base Acimutal Optimizada.

ALGOR Roadmaps Sistem ver 3.18 (feb-89)

DESPLAZAMIENTOS

Nodo	Desp (m)	Dx	Dy	Dz
	mts.	mts.	mts.	mts.
1	0.000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.000639	2.52E-05	0.00E+00	-6.39E-04
3	0.000713	-5.91E-06	-4.36E-05	-7.11E-04
4	0.000712	4.15E-05	-7.96E-06	-7.11E-04
5	0.000819	0.00E+00	-2.52E-05	-8.18E-04
6	0.000819	0.00E+00	2.52E-05	-8.18E-04
7	0.000712	-4.15E-05	7.96E-06	-7.11E-04
8	0.000713	5.91E-06	4.36E-05	-7.11E-04
9	0.000639	-2.52E-05	0.00E+00	-6.39E-04
10	0.000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	0.000162	1.61E-04	-1.97E-05	0.00E+00
12	0.000085	2.94E-05	-7.98E-05	0.00E+00
13	0.000424	1.29E-04	-4.45E-06	-4.04E-04
14	0.000255	2.29E-04	1.13E-04	0.00E+00
15	0.000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	0.001960	-2.90E-04	-9.66E-05	-1.94E-03
17	0.001960	2.90E-04	9.66E-05	-1.94E-03
18	0.000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	0.000255	-2.29E-04	-1.13E-04	0.00E+00
20	0.000424	-1.29E-04	4.45E-06	-4.04E-04
21	0.000085	-2.94E-05	7.98E-05	0.00E+00
22	0.000162	-1.61E-04	1.97E-05	0.00E+00
23	0.000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	0.000546	1.21E-04	4.82E-04	-2.25E-04
25	0.000680	1.37E-04	6.27E-04	-2.25E-04
26	0.000680	-1.37E-04	-6.27E-04	-2.25E-04
27	0.000546	-1.21E-04	-4.82E-04	-2.25E-04
28	0.000852	1.27E-04	7.45E-04	-3.92E-04
29	0.000938	1.31E-04	8.42E-04	-3.92E-04
30	0.000938	-1.31E-04	-8.42E-04	-3.92E-04
31	0.000852	-1.27E-04	-7.45E-04	-3.92E-04
32	0.000744	1.29E-04	1.39E-04	-7.20E-04
33	0.000744	-1.29E-04	-1.39E-04	-7.20E-04

REACCIONES

Nodo	Reac. (N)	Dx	Dy	Dz
	N	N	N	N
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	4.94E+03	-5.46E-12	-4.80E+03	1.20E+03
3	1.46E+03	-1.82E-12	-2.41E-11	1.46E+03
4	1.46E+03	-7.28E-12	2.27E-12	1.46E+03
5	1.09E+04	1.08E+04	3.53E-11	9.34E+02
6	1.09E+04	-1.08E+04	-7.77E-12	9.34E+02
7	1.46E+03	-9.09E-12	-1.09E-11	1.46E+03
8	1.46E+03	-1.09E-11	1.82E-12	1.46E+03
9	4.94E+03	-8.45E-12	4.80E+03	1.20E+03
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	1.26E+05	4.38E-12	-1.27E-11	-1.26E+05
12	1.59E+05	-4.37E-11	-1.81E-11	-1.58E+05
13	6.17E+03	-6.62E-11	7.28E-12	6.17E+03
14	1.59E+05	8.73E-11	6.59E-12	-1.58E+05
15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	8.55E+03	4.71E-11	5.30E-12	8.55E+03
17	8.55E+03	3.84E-11	3.81E-11	8.55E+03
18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	1.59E+05	9.09E-12	-7.28E-12	-1.58E+05
20	6.17E+03	7.43E-12	1.82E-12	6.17E+03
21	1.59E+05	-7.09E-11	9.09E-12	-1.58E+05
22	1.26E+05	-5.00E-11	-1.46E-11	-1.26E+05
23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	3.25E+03	-4.37E-11	1.59E-11	3.25E+03
25	3.25E+03	2.91E-11	-7.48E-11	3.25E+03
26	3.25E+03	5.82E-11	3.14E-11	3.25E+03
27	3.25E+03	0.00E+00	9.32E-12	3.25E+03
28	4.80E+03	-5.82E-11	-1.46E-11	4.80E+03
29	4.80E+03	4.37E-11	4.55E-13	4.80E+03
30	4.80E+03	-7.28E-11	5.46E-12	4.80E+03
31	4.80E+03	4.55E-11	-1.96E-11	4.80E+03
32	4.07E+05	-1.45E-11	0.00E+00	4.07E+05
33	4.07E+05	-3.11E-14	7.28E-12	4.07E+05

ESFUERZOS

Elem	Nodo	Esfuerzo	Nodo	Esfuerzo
		N/m ² .		N/m ² .
1	11	-2.21E+07	32	-2.34E+07
2	20	1.53E+06	30	4.07E+06
3	20	1.53E+06	31	4.07E+06
4	22	-3.80E+06	30	-6.81E+06
5	11	-3.80E+06	28	-6.81E+06
6	11	-3.80E+06	29	-6.81E+06
7	13	1.53E+06	29	4.07E+06
8	13	1.53E+06	28	4.07E+06
9	17	-1.12E+07	21	-5.53E+06
10	16	-1.12E+07	19	-5.53E+06
11	2	4.22E+06	13	7.03E+06
12	3	4.22E+06	12	7.17E+06
13	4	4.22E+06	14	7.17E+06
14	12	6.67E+06	13	8.65E+06
15	11	7.23E+06	12	6.50E+06
16	12	-5.53E+06	16	-1.12E+07
17	14	-5.53E+06	17	-1.12E+07
18	11	7.23E+06	14	6.50E+06
19	13	8.65E+06	14	6.67E+06
20	11	2.74E+06	13	2.44E+06
21	19	6.67E+06	20	8.65E+06
22	20	8.65E+06	21	6.67E+06
23	28	1.54E+06	29	1.54E+06
24	30	1.54E+06	31	1.54E+06
25	17	-8.21E+06	25	-4.91E+06
26	17	-8.21E+06	27	-4.91E+06
27	16	-8.21E+06	24	-4.91E+06
28	16	-8.21E+06	26	-4.91E+06
29	3	1.02E+07	5	9.71E+06
30	5	9.71E+06	7	1.02E+07
31	7	1.14E+07	9	1.20E+07
32	8	1.14E+07	9	1.20E+07
33	6	9.71E+06	8	1.02E+07
34	4	1.02E+07	6	9.71E+06
35	2	1.20E+07	4	1.14E+07
35	2	1.20E+07	4	1.14E+07
36	2	1.20E+07	3	1.14E+07
37	31	-2.20E+07	33	-1.83E+07
38	30	-2.20E+07	33	-1.83E+07
39	26	-2.01E+07	30	-1.97E+07
40	19	-1.73E+07	26	-1.89E+07
41	28	-2.20E+07	32	-1.83E+07
42	24	-2.01E+07	28	-1.97E+07
43	12	-1.73E+07	24	-1.89E+07
44	29	-2.20E+07	32	-1.83E+07
45	25	-2.01E+07	29	-1.97E+07
46	14	-1.73E+07	25	-1.89E+07
47	27	-2.01E+07	31	-1.97E+07
48	21	-1.73E+07	27	-1.89E+07
49	22	-3.80E+06	31	-6.81E+06
50	21	6.50E+06	22	7.23E+06
51	19	6.50E+06	22	7.23E+06
52	20	2.44E+06	22	2.74E+06
53	7	4.22E+06	19	7.17E+06
54	9	4.22E+06	20	7.03E+06
55	8	4.22E+06	21	7.17E+06
56	5	-6.04E+06	16	-9.29E+06
57	6	-6.04E+06	17	-9.29E+06
58	22	-2.21E+07	33	-2.34E+07
59	32	-6.25E+06	33	-6.25E+06

PRIMER MODO DE VIBRAR

MODO	Hertz.
1°	13.3552

Resultados Primera Prueba.- Estructura sometida a Compresión

ALGOR Roadmaps Sistem ver 3.18 (feb-89)

DESPLAZAMIENTOS

Nodo	Desp mts.	Dx mts.	Dy mts.	Dz mts.
1	0.0000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.0008275	1.37E-04	0.00E+00	-8.16E-04
3	0.0008885	7.04E-05	-1.26E-04	-8.77E-04
4	0.0008880	1.24E-04	6.81E-05	-8.77E-04
5	0.0009863	0.00E+00	-1.37E-04	-9.77E-04
6	0.0009863	0.00E+00	1.37E-04	-9.77E-04
7	0.0008880	-1.24E-04	-6.81E-05	-8.77E-04
8	0.0008885	-7.04E-05	1.26E-04	-8.77E-04
9	0.0008275	-1.37E-04	0.00E+00	-8.16E-04
10	0.0000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	0.0008803	8.79E-04	4.56E-05	0.00E+00
12	0.0007843	6.02E-04	-5.03E-04	0.00E+00
13	0.0008096	7.04E-04	5.31E-05	-3.97E-04
14	0.0009759	8.05E-04	5.52E-04	0.00E+00
15	0.0000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	0.0021160	-2.74E-04	-5.27E-04	-2.03E-03
17	0.0021160	2.74E-04	5.27E-04	-2.03E-03
18	0.0000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	0.0009759	-8.05E-04	-5.52E-04	0.00E+00
20	0.0008096	-7.04E-04	-5.31E-05	-3.97E-04
21	0.0007843	-6.02E-04	5.03E-04	0.00E+00
22	0.0008803	-8.79E-04	-4.56E-05	0.00E+00
23	0.0000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	0.0007526	6.94E-04	1.87E-04	-2.24E-04
25	0.0012300	7.13E-04	9.77E-04	-2.24E-04
26	0.0012300	-7.13E-04	-9.77E-04	-2.24E-04
27	0.0007526	-6.94E-04	-1.87E-04	-2.24E-04
28	0.0009832	6.99E-04	5.72E-04	-3.88E-04
29	0.0013640	7.08E-04	1.10E-03	-3.88E-04
30	0.0013640	-7.08E-04	-1.10E-03	-3.88E-04
31	0.0009832	-6.99E-04	-5.72E-04	-3.88E-04
32	0.0010130	7.04E-04	1.42E-04	-7.15E-04
33	0.0010130	-7.04E-04	-1.42E-04	-7.15E-04

REACCIONES

Nodo	Reac. N	Dx N	Dy N	Dz N
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	2.11E+03	-2.18E-11	1.73E+03	1.20E+03
3	1.46E+03	4.73E-11	-6.46E-11	1.46E+03
4	1.46E+03	3.64E-12	-5.46E-11	1.46E+03
5	1.16E+04	1.16E+04	1.34E-10	9.34E+02
6	1.16E+04	-1.16E+04	1.30E-10	9.34E+02
7	1.46E+03	-1.82E-11	-5.09E-11	1.46E+03
8	1.46E+03	3.09E-11	-7.64E-11	1.46E+03
9	2.11E+03	-1.18E-10	-1.73E+03	1.20E+03
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	1.29E+05	8.00E-11	-1.00E+04	-1.28E+05
12	1.57E+05	-1.02E-10	-7.64E-11	-1.57E+05
13	6.17E+03	-1.46E-10	2.73E-12	6.17E+03
14	1.57E+05	-7.28E-11	-9.75E-11	-1.57E+05
15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	8.55E+03	2.27E-13	1.14E-11	8.55E+03
17	8.55E+03	-5.32E-11	-1.72E-10	8.55E+03
18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	1.57E+05	-4.00E-11	6.91E-11	-1.57E+05
20	6.17E+03	2.57E-10	-2.00E-11	6.17E+03
21	1.57E+05	-1.69E-10	5.82E-11	-1.57E+05
22	1.29E+05	-1.69E-10	1.00E+04	-1.28E+05
23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	3.25E+03	-5.82E-11	-5.23E-12	3.25E+03
25	3.25E+03	1.46E-10	9.91E-11	3.25E+03
26	3.25E+03	-1.46E-10	-2.84E-11	3.25E+03
27	3.25E+03	2.91E-11	-2.30E-11	3.25E+03
28	4.80E+03	5.82E-11	-1.11E-11	4.80E+03
29	4.80E+03	-1.16E-10	-1.18E-11	4.80E+03
30	4.80E+03	5.82E-11	4.00E-11	4.80E+03
31	4.80E+03	-1.05E-10	1.36E-12	4.80E+03
32	4.07E+05	2.93E-11	7.28E-12	4.07E+05
33	4.07E+05	1.46E-10	-7.28E-12	4.07E+05

ESFUERZOS

Elem	Nodo	Esfuerzo N/m²	Nodo	Esfuerzo N/m²
1	11	-2.24E+07	32	-2.37E+07
2	20	1.18E+06	30	3.84E+06
3	20	1.18E+06	31	3.84E+06
4	22	-3.97E+06	30	-6.89E+06
5	11	-3.97E+06	28	-6.89E+06
6	11	-3.97E+06	29	-6.89E+06
7	13	1.18E+06	29	3.84E+06
8	13	1.18E+06	28	3.84E+06
9	17	-1.18E+07	21	-5.83E+06
10	16	-1.18E+07	19	-5.83E+06
11	2	2.19E+06	13	4.95E+06
12	3	5.06E+06	12	7.16E+06
13	4	5.06E+06	14	7.16E+06
14	12	6.24E+06	13	8.34E+06
15	11	6.57E+06	12	5.65E+06
16	12	-5.83E+06	16	-1.18E+07
17	14	-5.83E+06	17	-1.18E+07
18	11	6.57E+06	14	5.65E+06
19	13	8.34E+06	14	6.24E+06
20	11	1.37E+06	13	1.73E+06
21	19	6.24E+06	20	8.34E+06
22	20	8.34E+06	21	6.24E+06
23	28	1.74E+06	29	1.74E+06
24	30	1.74E+06	31	1.74E+06
25	17	-8.90E+06	25	-5.44E+06
26	17	-8.90E+06	27	-5.44E+06
27	16	-8.90E+06	24	-5.44E+06
28	16	-8.90E+06	26	-5.44E+06
29	3	1.09E+07	5	1.08E+07
30	5	1.08E+07	7	1.09E+07
31	7	1.22E+07	9	1.15E+07
32	8	1.22E+07	9	1.15E+07
33	6	1.08E+07	8	1.09E+07
34	4	1.09E+07	6	1.08E+07
35	2	1.15E+07	4	1.22E+07
36	2	1.15E+07	3	1.22E+07
37	31	-2.23E+07	33	-1.83E+07
38	30	-2.23E+07	33	-1.83E+07
39	26	-1.99E+07	30	-2.00E+07
40	19	-1.74E+07	26	-1.86E+07
41	28	-2.23E+07	32	-1.83E+07
42	24	-1.99E+07	28	-2.00E+07
43	12	-1.74E+07	24	-1.86E+07
44	29	-2.23E+07	32	-1.83E+07
45	25	-1.99E+07	29	-2.00E+07
46	14	-1.74E+07	25	-1.86E+07
47	27	-1.99E+07	31	-2.00E+07
48	21	-1.74E+07	27	-1.86E+07
49	22	-3.97E+06	31	-6.89E+06
50	21	5.65E+06	22	6.57E+06
51	19	5.65E+06	22	6.57E+06
52	20	1.73E+06	22	1.37E+06
53	7	5.06E+06	19	7.16E+06
54	9	2.19E+06	20	4.95E+06
55	8	5.06E+06	21	7.16E+06
56	5	-5.92E+06	16	-8.76E+06
57	6	-5.92E+06	17	-8.76E+06
58	22	-2.24E+07	33	-2.37E+07
59	32	-6.42E+06	33	-6.42E+06

PRIMER MODO DE VIBRAR

MODOS	Hertz
1°	13.3552

Resultados Segunda Prueba.- Estructura sometida a Momentos Flexionantes

ALGOR Roadmaps Sistem ver 3.18 (feb-89)

DESPLAZAMIENTOS

Nodo	Desp (m)	Dx	Dy	Dz
	mts.	mts.	mts.	mts.
1	0.00000000	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00065820	0.00015840	0.00E+00	-6.39E-04
3	0.00068220	0.00008788	-1.39E-04	-6.62E-04
4	0.00077700	0.00013530	8.75E-05	-7.60E-04
5	0.00075880	0.00000000	-1.60E-04	-7.42E-04
6	0.00090910	0.00000000	1.60E-04	-8.95E-04
7	0.00068180	-0.00013787	-8.67E-05	-6.62E-04
8	0.00077790	-0.00009045	1.38E-04	-7.60E-04
9	0.00065880	-0.00016085	0.00E+00	-6.39E-04
10	0.00000000	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00
11	0.00098110	0.00098092	-1.97E-05	0.00E+00
12	0.00091440	0.00069735	-5.91E-04	0.00E+00
13	0.00086670	0.00076665	-4.45E-06	-4.04E-04
14	0.00109300	0.00089648	6.25E-04	0.00E+00
15	0.00000000	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00
16	0.00168700	-0.00020955	-6.13E-04	-1.56E-03
17	0.00242200	0.00037001	6.13E-04	-2.31E-03
18	0.00000000	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00
19	0.00113200	-0.00093781	-6.34E-04	0.00E+00
20	0.00095800	-0.00086851	4.45E-06	-4.04E-04
21	0.00095180	-0.00073868	6.00E-04	0.00E+00
22	0.00106200	-0.00106230	1.97E-05	0.00E+00
23	0.00000000	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00
24	0.00103400	0.00098244	-3.44E-05	-3.19E-04
25	0.00152400	0.0009836	1.14E-03	-1.32E-04
26	0.00114500	-0.00065271	-8.84E-04	-3.19E-04
27	0.00068800	-0.00063680	-2.25E-04	-1.32E-04
28	0.00079840	0.00071335	2.24E-04	-2.80E-04
29	0.00162200	0.00071766	1.36E-03	-5.05E-04
30	0.00127600	-0.00092180	-8.37E-04	-2.80E-04
31	0.00128900	-0.00091749	-7.51E-04	-5.05E-04
32	0.00128400	0.00105390	1.39E-04	-7.20E-04
33	0.00093530	-0.00058126	-1.39E-04	-7.20E-04

REACCIONES

Nodo	Reac.	Dx	Dy	Dz
	N	N	N	N
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	4.94E+03	2.91E-11	-4.80E+03	1.20E+03
3	1.46E+03	-4.00E-11	-6.37E-11	1.46E+03
4	1.46E+03	5.09E-11	5.82E-11	1.46E+03
5	1.09E+04	1.08E+04	4.83E-11	9.34E+02
6	1.09E+04	-1.08E+04	-6.61E-11	9.34E+02
7	1.46E+03	-2.73E-11	5.28E-11	1.46E+03
8	1.46E+03	-1.64E-11	-3.82E-11	1.46E+03
9	4.94E+03	-1.37E-10	4.80E+03	1.20E+03
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	1.26E+05	1.11E-10	2.36E-11	-1.26E+05
12	1.32E+05	2.91E-11	5.46E-12	-1.32E+05
13	6.17E+03	-6.53E-10	2.00E-11	6.17E+03
14	1.85E+05	2.47E-10	9.09E-13	-1.85E+05
15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	8.55E+03	-1.91E-11	-2.06E-10	8.55E+03
17	8.55E+03	-1.36E-12	-2.56E-10	8.55E+03
18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	1.32E+05	-9.46E-11	1.91E-10	-1.32E+05
20	6.17E+03	8.77E-11	-1.82E-11	6.17E+03
21	1.85E+05	2.00E-11	6.18E-11	-1.85E+05
22	1.26E+05	-1.21E-10	2.18E-11	-1.26E+05
23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	3.25E+03	-8.73E-11	7.05E-12	3.25E+03
25	3.25E+03	2.18E-10	7.59E-11	3.25E+03
26	3.25E+03	1.46E-10	-2.77E-11	3.25E+03
27	3.25E+03	-1.16E-10	-1.18E-11	3.25E+03
28	4.80E+03	3.06E-10	-1.73E-11	4.80E+03
29	4.80E+03	-3.20E-10	-3.18E-11	4.80E+03
30	4.80E+03	-1.31E-10	1.46E-11	4.80E+03
31	4.80E+03	1.37E-10	2.73E-12	4.80E+03
32	4.07E+05	1.47E-11	3.64E-12	4.07E+05
33	4.07E+05	-4.43E-11	1.09E-11	4.07E+05

ESFUERZOS

Elem	Nodo	Esfuerzo	Nodo	esfuerzo
		N/m².		N/m².
1	11	-3.92E+07	32	-6.07E+07
2	20	1.35E+07	30	2.10E+07
3	20	-1.42E+07	31	-2.16E+07
4	22	-6.73E+06	30	-1.26E+07
5	11	-6.73E+06	28	-1.26E+07
6	11	-1.39E+07	29	-2.03E+07
7	13	-1.42E+07	29	-2.16E+07
8	13	1.35E+07	28	2.10E+07
9	17	-1.34E+07	21	-6.58E+06
10	16	-8.91E+06	19	-4.49E+06
11	2	4.80E+06	13	7.56E+06
12	3	4.05E+06	12	7.23E+06
13	4	4.84E+06	14	7.10E+06
14	12	5.99E+06	13	5.71E+06
15	11	7.54E+06	12	4.67E+06
16	12	-4.49E+06	16	-8.91E+06
17	14	-6.58E+06	17	-1.34E+07
18	11	7.56E+06	14	8.64E+06
19	13	1.16E+07	14	1.15E+07
20	11	3.43E+06	13	2.59E+06
21	19	5.99E+06	20	5.71E+06
22	20	1.16E+07	21	1.15E+07
23	28	2.13E+07	29	2.05E+07
24	30	2.13E+07	31	2.05E+07
25	17	-1.00E+07	25	-5.44E+06
26	17	-1.00E+07	27	-5.44E+06
27	16	6.93E+06	24	4.90E+06
28	16	6.93E+06	26	4.90E+06
29	3	1.03E+07	5	9.63E+06
30	5	9.63E+06	7	1.03E+07
31	7	1.14E+07	9	1.20E+07
32	8	1.14E+07	9	1.20E+07
33	6	9.79E+06	8	1.02E+07
34	4	1.02E+07	6	9.79E+06
35	2	1.20E+07	4	1.14E+07
36	2	1.20E+07	3	1.14E+07
37	31	-5.68E+07	33	-1.17E+08
38	30	-3.96E+07	33	-1.04E+08
39	26	-2.38E+07	30	-2.99E+07
40	19	-1.80E+07	26	-2.27E+07
41	28	-3.96E+07	32	-1.04E+08
42	24	-2.38E+07	28	-2.99E+07
43	12	-1.80E+07	24	-2.27E+07
44	29	-5.68E+07	32	-1.17E+08
45	25	-2.56E+07	29	-4.06E+07
46	14	-2.35E+07	25	-2.31E+07
47	27	-2.56E+07	31	-4.06E+07
48	21	-2.35E+07	27	-2.31E+07
49	22	-1.39E+07	31	-2.03E+07
50	21	8.64E+06	22	7.56E+06
51	19	4.67E+06	22	7.54E+06
52	20	2.59E+06	22	3.43E+06
53	7	4.05E+06	19	7.23E+06
54	9	4.80E+06	20	7.56E+06
55	8	4.84E+06	21	7.10E+06
56	5	-5.41E+06	16	-8.79E+06
57	6	-6.67E+06	17	-9.79E+06
58	22	-3.92E+07	33	-6.07E+07
59	32	-7.21E+06	33	-7.21E+06

PRIMER MODO DE VIBRAR

MODO	Hertz
1°	13.3552

**Resultados Tercera Prueba.- Estructura sometida a
Fuerza Tangencial.**

ALGOR Roadmaps Sistem ver 3.18 (feb-89)

DESPLAZAMIENTOS

Nodo	Desp (m)	Dx	Dy	Dz
	mts.	mts.	mts.	mts.
1	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00065210	6.51E-05	0.00E+00	-6.49E-04
3	0.00077960	4.09E-05	-2.50E-05	-7.78E-04
4	0.00067480	8.95E-05	-2.89E-05	-6.68E-04
5	0.00090670	0.00E+00	-2.65E-05	-9.06E-04
6	0.00076850	0.00E+00	2.50E-05	-7.68E-04
7	0.00079570	3.49E-06	-1.25E-05	-7.96E-04
8	0.00069070	5.08E-05	6.29E-05	-6.86E-04
9	0.00067570	1.22E-05	0.00E+00	-6.76E-04
10	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	0.00034250	3.42E-04	-1.89E-05	0.00E+00
12	0.00021530	1.92E-04	-9.83E-05	0.00E+00
13	0.00049870	2.92E-04	-3.48E-06	-4.04E-04
14	0.00041130	3.91E-04	1.28E-04	0.00E+00
15	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	0.00189000	-2.47E-04	-1.04E-04	-1.87E-03
17	0.00201600	3.19E-04	9.92E-05	-1.99E-03
18	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	0.00013790	-8.24E-05	-1.11E-04	0.00E+00
20	0.00038010	1.69E-05	-1.28E-05	-3.79E-04
21	0.00013410	1.15E-04	6.89E-05	0.00E+00
22	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
23	0.00000000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	0.00059950	2.85E-04	4.76E-04	-2.27E-04
25	0.00072800	3.02E-04	6.24E-04	-2.24E-04
26	0.00066850	4.95E-06	-6.31E-04	-2.20E-04
27	0.00052400	3.20E-05	-4.76E-04	-2.17E-04
28	0.00088570	2.92E-04	7.37E-04	-3.95E-04
29	0.00098020	2.97E-04	8.49E-04	-3.90E-04
30	0.00090540	1.11E-05	-8.20E-04	-3.84E-04
31	0.00082400	2.75E-05	-7.31E-04	-3.80E-04
32	0.00079160	2.91E-04	1.53E-04	-7.20E-04
33	0.00072340	1.60E-05	-1.23E-04	-7.13E-04

REACCIONES

Nodo	Reac. (N)	Dx	Dy	Dz
	N	N	N	N
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	5.23E+03	3.64E-11	-5.09E+03	1.20E+03
3	1.46E+03	-3.27E-11	1.91E-11	1.46E+03
4	1.46E+03	-2.36E-11	-1.75E-11	1.46E+03
5	1.81E+04	1.81E+04	-1.85E-11	9.34E+02
6	3.88E+03	-3.76E+03	2.71E-12	9.34E+02
7	1.46E+03	3.64E-12	1.09E-11	1.46E+03
8	1.46E+03	1.82E-12	-3.64E-12	1.46E+03
9	3.33E+03	-1.45E-11	3.11E+03	1.20E+03
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	1.26E+05	-7.22E+03	-1.09E-11	-1.26E+05
12	1.58E+05	-1.46E-11	-2.13E-11	-1.58E+05
13	6.17E+03	-4.13E-11	-1.46E-11	6.17E+03
14	1.59E+05	4.37E-11	4.21E-12	-1.59E+05
15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	8.55E+03	4.37E-11	-1.35E-11	8.55E+03
17	8.55E+03	-2.46E-11	2.14E-11	8.55E+03
18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
19	1.55E+05	-6.73E-11	-1.82E-12	-1.55E+05
20	6.17E+03	-3.69E-12	0.00E+00	6.17E+03
21	1.56E+05	7.28E-11	7.28E-12	-1.56E+05
22	1.32E+05	-7.12E+03	1.98E+03	-1.31E+05
23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24	3.25E+03	-1.02E-10	-2.74E-11	3.25E+03
25	3.25E+03	1.46E-11	-6.84E-11	3.25E+03
26	3.25E+03	7.28E-11	5.29E-11	3.25E+03
27	3.25E+03	-1.16E-10	1.14E-13	3.25E+03
28	4.80E+03	7.28E-11	6.59E-12	4.80E+03
29	4.80E+03	-2.91E-11	1.14E-11	4.80E+03
30	4.80E+03	2.91E-11	-9.09E-13	4.80E+03
31	4.80E+03	9.91E-11	1.82E-12	4.80E+03
32	4.07E+05	-4.16E-11	-3.64E-12	4.07E+05
33	4.07E+05	-5.66E-11	1.09E-11	4.07E+05

ESFUERZOS

Elem	Nodo	Esfuerzo	Nodo	Esfuerzo
		N/m ²		N/m ²
1	11	-2.20E+07	32	-2.33E+07
2	20	-1.19E+06	30	-2.71E+06
3	20	1.65E+06	31	2.72E+06
4	22	-1.03E+07	30	-9.76E+06
5	11	-3.75E+06	28	-6.82E+06
6	11	-3.84E+06	29	-6.72E+06
7	13	1.63E+06	29	4.05E+06
8	13	1.40E+06	28	4.00E+06
9	17	-1.13E+07	21	-5.85E+06
10	16	-1.10E+07	19	-5.16E+06
11	2	6.11E+06	13	8.30E+06
12	3	3.87E+06	12	5.74E+06
13	4	5.05E+06	14	8.71E+06
14	12	7.08E+06	13	8.89E+06
15	11	7.95E+06	12	7.25E+06
16	12	-5.18E+06	16	-1.10E+07
17	14	-5.87E+06	17	-1.13E+07
18	11	6.57E+06	14	5.80E+06
19	13	8.32E+06	14	6.17E+06
20	11	3.33E+06	13	3.18E+06
21	19	6.87E+06	20	8.49E+06
22	20	8.05E+06	21	6.08E+06
23	28	1.50E+06	29	1.60E+06
24	30	2.32E+06	31	2.36E+06
25	17	-8.59E+06	25	-5.25E+06
26	17	-8.58E+06	27	-5.22E+06
27	16	7.91E+06	24	4.63E+06
28	16	8.03E+06	26	4.73E+06
29	3	4.96E+06	5	7.67E+06
30	5	7.59E+06	7	4.71E+06
31	7	5.82E+06	9	1.14E+07
32	8	1.68E+07	9	1.17E+07
33	6	1.53E+07	8	1.54E+07
34	4	1.59E+07	6	1.55E+07
35	2	1.24E+07	4	1.71E+07
36	2	1.20E+07	3	5.86E+06
37	31	-2.22E+07	33	-1.87E+07
38	30	-2.19E+07	33	-1.87E+07
39	26	-2.05E+07	30	-1.90E+07
40	19	-1.70E+07	26	-1.91E+07
41	28	-2.18E+07	32	-1.83E+07
42	24	-2.05E+07	28	-1.95E+07
43	12	-1.70E+07	24	-1.92E+07
44	29	-2.21E+07	32	-1.83E+07
45	25	-1.95E+07	29	-2.00E+07
46	14	-1.76E+07	25	-1.84E+07
47	27	-1.95E+07	31	-1.94E+07
48	21	-1.76E+07	27	-1.84E+07
49	22	-1.01E+07	31	-9.53E+06
50	21	5.04E+06	22	4.95E+06
51	19	6.34E+06	22	6.12E+06
52	20	6.34E+06	22	1.80E+07
53	7	4.20E+06	19	5.46E+06
54	9	5.40E+06	20	8.12E+06
55	8	4.87E+06	21	8.41E+06
56	5	-4.38E+06	16	-8.14E+06
57	6	-7.71E+06	17	-1.01E+07
58	22	-2.34E+07	33	-2.51E+07
59	32	-6.27E+06	33	-6.17E+06

PRIMER MODO DE VIBRAR

MODO	Hertz.
1°	10.8747