



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Estudio de integridad estructural y análisis comparativo de soporte del espejo terciario del telescopio San Pedro Mártir, B. C.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO

ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN
DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS**

PRESENTA

Ing. José Alberto Rodríguez Calderón

Santiago de Querétaro, Qro., México, agosto de 2017

ÍNDICE

RESUMEN...	9
AGRADECIMIENTOS...	10
RECONOCIMIENTOS...	11
I. CAPÍTULO,... .. INTRODUCCIÓN	
I.1 Introducción...	12
I.2 Antecedentes...	13
I.3 Justificación...	13
I.4 Objetivo general...	14
I.5 Objetivos específicos...	14
I.6 Requerimientos del subsistema...	14
I.7 Estado del arte...	15
I.8 Definición del problema...	21
I.9 Hipótesis...	21
1.10 Alcance...	21
I.11 Organización de la tesis...	21
II. CAPÍTULO,... .. ALTERNATIVAS DEL ESPEJO TERCIARIO	
II.1 Espejo terciario TMT...	23
II.2 Espejo terciario LBT...	24
II.3 Espejo terciario GTC...	26
II.4 Espejo terciario TSPM...	28

II.5	Ensamble del espejo terciario...	30
III.	CAPÍTULO, ... MODELOS FEM DE LAS ALTERNATIVAS	
III.1	Alternativa 1...	36
III.1.1	Estudio del soporte con velocidad de viento...	36
III.1.2	Estudio de las deformaciones del soporte en alternativa 1...	38
III.1.3	Gráfica de esfuerzos...	40
III.1.4	Desplazamiento en diferentes ángulos contiguos...	41
III.1.5	Análisis modal...	43
III.1.6	Contracciones y dilataciones térmicas...	49
III.2	Alternativa 2...	51
III.2.1	Estudio del soporte con velocidad de viento...	51
III.2.2	Estudio de las deformaciones del soporte en alternativa 2...	52
III.2.3	Gráfica de esfuerzos...	54
III.2.4	Desplazamiento en diferentes ángulos contiguos...	55
III.2.5	Análisis modal...	56
III.2.6	Contracciones y dilataciones térmicas...	62
III.3	Alternativa 3...	64
III.3.1	Estudio del soporte con velocidad de viento...	64
III.3.2	Estudio de las deformaciones del soporte en alternativa 3...	65
III.3.3	Gráfica de esfuerzos...	67
III.3.4	Desplazamiento en diferentes ángulos contiguos...	68

III.3.5	Análisis modal...	69
III.3.6	Contracciones y dilataciones térmicas...	74
III.3.7	Validación de una parte del perfil ...	76
IV.	CAPÍTULO, COMPARACIONES DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS	
IV.1	Comparación de desplazamientos a diferentes ángulos...	79
IV.2	Comparación de desplazamientos considerando temperatura...	79
IV.3	Comparación de otras características...	80
V.	CAPÍTULO, CONCLUSIONES Y APORTACIONES	
V.1	Conclusiones...	81
V.2	Aportaciones...	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS...	86
	NOMENCLATURA...	88

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla III.1 Condiciones de clima de supervivencia... ..</i>	<i>37</i>
<i>Tabla III.2 Desplazamiento en el soporte... ..</i>	<i>40</i>
<i>Tabla III.3 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos... ..</i>	<i>42</i>
<i>Tabla III.4 Frecuencias naturales... ..</i>	<i>43</i>
<i>Tabla III.5 Desplazamiento en el soporte con temperatura... ..</i>	<i>50</i>
<i>Tabla III.6 Desplazamiento en el soporte... ..</i>	<i>53</i>
<i>Tabla III.7 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos... ..</i>	<i>56</i>
<i>Tabla III.8 Frecuencias naturales... ..</i>	<i>57</i>
<i>Tabla III.9 Desplazamiento en el soporte con temperatura... ..</i>	<i>63</i>
<i>Tabla III.10 Desplazamiento en el soporte... ..</i>	<i>66</i>
<i>Tabla III.11 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos... ..</i>	<i>68</i>
<i>Tabla III.12 Frecuencias naturales... ..</i>	<i>69</i>
<i>Tabla III.13 Desplazamiento en el soporte con temperatura... ..</i>	<i>75</i>
<i>Tabla IV.1 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos... ..</i>	<i>79</i>
<i>Tabla IV.2 Desplazamiento en el soporte considerando temperatura... ..</i>	<i>79</i>
<i>Tabla IV.3 Otras características... ..</i>	<i>80</i>

INDICE DE FIGURAS O GRÁFICAS

<i>Figura 1.1</i>	<i>Telescopio MMT...</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1.2</i>	<i>Iluminar la salida del sistema de alineación laser...</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1.3</i>	<i>Detalle del sistema de alineación láser para un solo telescopio...</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1.4</i>	<i>Telescopio Magellan...</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1.5</i>	<i>Espejo terciario Magellan...</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1.6</i>	<i>Gran Telescopio Canarias...</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1.7</i>	<i>Esquema de la torre...</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.1</i>	<i>Ensamble espejo terciario TMT...</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.2</i>	<i>Ensamble espejo terciario LBT...</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.3</i>	<i>Soporte de carga...</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.4</i>	<i>Torre del espejo...</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.5</i>	<i>Espejos del telescopio TSPM...</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.6</i>	<i>Ensamble del espejo terciario TSPM...</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.7</i>	<i>Base del espejo terciario ...</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.8</i>	<i>Alternativa 1...</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.9</i>	<i>Alternativa 2...</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.10</i>	<i>Alternativa 3...</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.11</i>	<i>Difusor de carga...</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.1</i>	<i>Soporte alternativa 1...</i>	<i>36</i>

<i>Figura 3.2 Cargas principales para la simulación de flujo...</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.3 Afectación del viento sobre la estructura...</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.4 Desplazamiento sobre el soporte...</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.5 Esfuerzos en el soporte...</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.6 Giro del soporte del espejo terciario...</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.7 Primer modo de frecuencia natural...</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.8 Segundo modo de frecuencia natural...</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.9 Tercer modo de frecuencia natural...</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.10 Cuarto modo de frecuencia natural...</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.11 Quinto modo de frecuencia natural...</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.12 Sexto modo de frecuencia natural...</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.13 Séptimo modo de frecuencia natural...</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.14 Octavo modo de frecuencia natural...</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.15 Noveno modo de frecuencia natural...</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.16 Decimo modo de frecuencia natural...</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.17 Contracciones y dilataciones térmicas en el soporte...</i>	<i>50</i>
<i>Figura 3.18 Soporte alternativa 2...</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.19 Afectación del viento sobre la estructura...</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.20 Desplazamiento sobre el soporte...</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.21 Esfuerzos en el soporte...</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.22 Giro del soporte del espejo terciario...</i>	<i>55</i>

<i>Figura 3.23 Primer modo de frecuencia natural...</i>	57
<i>Figura 3.24 Segundo modo de frecuencia natural...</i>	58
<i>Figura 3.25 Tercer modo de frecuencia natural...</i>	58
<i>Figura 3.26 Cuarto modo de frecuencia natural...</i>	59
<i>Figura 3.27 Quinto modo de frecuencia natural...</i>	59
<i>Figura 3.28 Sexto modo de frecuencia natural...</i>	60
<i>Figura 3.29 Séptimo modo de frecuencia natural...</i>	60
<i>Figura 3.30 Octavo modo de frecuencia natural...</i>	61
<i>Figura 3.31 Noveno modo de frecuencia natural...</i>	61
<i>Figura 3.32 Decimo modo de frecuencia natural...</i>	62
<i>Figura 3.33 Contracciones y dilataciones térmicas en el soporte...</i>	63
<i>Figura 3.34 Soporte alternativa 3...</i>	64
<i>Figura 3.35 Afectación del viento sobre la estructura...</i>	65
<i>Figura 3.36 Desplazamiento sobre el soporte...</i>	66
<i>Figura 3.37 Esfuerzos en el soporte...</i>	67
<i>Figura 3.38 Giro del soporte del espejo terciario...</i>	68
<i>Figura 3.39 Primer modo de frecuencia natural...</i>	70
<i>Figura 3.40 Segundo modo de frecuencia natural...</i>	70
<i>Figura 3.41 Tercer modo de frecuencia natural...</i>	71
<i>Figura 3.42 Cuarto modo de frecuencia natural...</i>	71
<i>Figura 3.43 Quinto modo de frecuencia natural...</i>	72

<i>Figura 3.44 Sexto modo de frecuencia natural...</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.45 Séptimo modo de frecuencia natural...</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.46 Octavo modo de frecuencia natural...</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.47 Noveno modo de frecuencia natural...</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.48 Contracciones y dilataciones térmicas en el soporte...</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.49 Tipo de estructura a ser analizada...</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.50 Análisis de software...</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3.51 Análisis de software con carga...</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.1 Gráfica en el punto A...</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.2 Gráfica en el punto B...</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.3 Gráfica en el punto C...</i>	<i>84</i>

RESUMEN

La aportación del presente trabajo es diseñar, evaluar, modelar y simular la estructura del espejo terciario que sea simplificada y de mayor rigidez, para obtener un diseño estable y nos proporcione estabilidad en la imagen del espejo terciario. Los análisis numéricos del presente diseño se realizaron por el Método de Elementos Finitos (MEF).

Se realizaron tres alternativas diferentes de soporte para el espejo terciario, donde se resolvió cada una de ellas y el software que fue utilizado para la obtención de los resultados fue el de solid words. Las herramientas que se utilizaron en solid words fueron:

- Simulación.
- Simulación de flujo.
- Análisis estático.
- Frecuencia.
- Efecto de temperatura.

Después de utilizar estas herramientas para cada una de las alternativas y tener los resultados correspondientes en cada una de ellas, se realizó la comparación de las diferentes alternativas para poder elegir la mejor alternativa que presentara el mejor comportamiento que soportaría el espejo terciario.

AGRADECIMIENTOS

Al concluir este trabajo tan arduo como es el desarrollo de esta tesis de maestría es inevitable invadirse de una gran alegría y humanamente satisfacción, al llegar aquí se requiere de dedicación y un gran apoyo, es por eso, que quisiera utilizar este espacio y expresar mis agradecimientos a las personas e instituciones que contribuyeron en este proyecto.

A mi esposa en especial Minerva Claudia por su amor y paciencia mostradas durante todo este tiempo, sus sacrificios y confianza para culminar con este proyecto.

A mis padres Ma. Isabel y Ramón por ser las personas a quien más quiero respeto y admiro.

A mis hermanos Olivia, Ma. Isabel, Norma Angélica, Ramón y Ana Griselda por creer siempre en mí y contar con ellos en todo momento.

RECONOCIMIENTOS

- Al Dr. Luis de Llano por ser un gran amigo y compañero de trabajo, le doy mil gracias por ser mi asesor y mi formación como investigador y desarrollo de esta tesis, y sobre todo su disponibilidad e invaluable objetividad como guía.
- Al Dr. José Luis Gaytán le Agradezco su confianza, sus aportaciones y conocimientos brindados en el desarrollo de mi tesis.
- Al M. Carlos Alberto le agradezco su confianza, disponibilidad, aportaciones y conocimientos brindados en el desarrollo de mi tesis.
- Le doy mi agradecimiento a la institución que me ha formado no solo como profesionista sino como persona, al Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología PICYT.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Introducción

A continuación se describen algunos de los telescopios más representativos y relacionados al tema de tesis propuesto.

El MMT se encuentra en Arizona en la cima del Monte Hopkins ($110^{\circ} 53' 04,4''$ de longitud, $31^{\circ} 41' 19.6''$ de latitud) a una altura de 2600 metros, un sitio seleccionado debido a su ubicación general en el astronómicamente área activa de Tucson, sus buenas propiedades de visibilidad y fotométricas, su altitud razonablemente alta por lo que es un sitio seco y relativamente oscuro, y su gran número de noches despejadas.

Los dos telescopios de Magallanes, ambos telescopios están separados por 60 metros en la cumbre del Cerro Manqui Chile con una altitud de 2450 m se inauguraron el 9 de diciembre del año 2000. El telescopio Magellan 1 fue nombrado en honor al astrónomo Walter Baade y el telescopio Magellan 2 fue nombrado después de donante Landon Clay. Observaciones científicas en Magellan 1 comenzaron en febrero de 2001 y las observaciones científicas en Magellan 2 comenzaron en septiembre de 2002.

El Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir se encuentra localizado en el parque nacional de San Pedro Mártir, y está ubicado a una altitud de 2830 m. Fue construido el año de 1975, y opera con tecnología de punta, aprovechando las ventajas de la geografía de la zona, como la altura, la claridad del cielo, la baja humedad, la ausencia de contaminación atmosférica y los bajos niveles de interferencia de ondas de radio, donde se va a colocar el telescopio de San Pedro Mártir de 6.5 m.

Estos tres lugares junto con el de las islas Canarias son los mejores sitios para la instalación de la nueva generación de grandes telescopios ópticos e infrarrojos de alta tecnología. El cielo de San Pedro Mártir tiene condiciones

óptimas para la observación astronómica: es transparente, muy estable y suele estar despejado más del 80% de las noches del año, Además, es de los sitios más oscuros del hemisferio norte, y el Estado de Baja California ya cuenta con una ley de protección para prevenir el aumento de contaminación lumínica dominada “Ley del Cielo”.

I.2 Antecedentes

El plan es construir un telescopio de 6.5 metros en México para el Observatorio Astronómico Nacional. México en su historia nunca antes ha construido un telescopio óptico de esa magnitud.

En CIDESI se va desarrollar este telescopio para San Pedro Mártir junto con personas de la UNAM (IAUNAM), estas personas son las responsables de la realización de este proyecto, la parte en la que estaré trabajando es sobre el espejo terciario del cual se desarrollará la investigación para realizar el estudio y presentar el espejo terciario más óptimo para las condiciones requeridas.

El espejo terciario del telescopio de San Pedro Mártir es semejante al de los telescopios de espejos múltiples (MMT) y Magallanes. Pero cada uno de ellos tiene características y construcción diferente. Una de las principales diferencias con respecto al MMT y Magallanes es que se lograra un diseño focalmente congruente, es decir, que permita usar indistintamente los focos Nasmyth y Cassegrain acodados sin necesidad de realizar cambios de configuración con grandes sustituciones de estructuras o ajustes, además se diseñaría el telescopio de acuerdo a las necesidades de los astrónomos Mexicanos y de Estados Unidos.

I.3 Justificación

La justificación del presente trabajo es el diseño del espejo terciario del telescopio de San Pedro Mártir que se encuentra en el estado de Baja California Norte; realizando análisis por el método de elementos finitos que ayuden a dar el respaldo de diseño de tal manera que pueda predecirse el comportamiento del

mismo y minimizar los posibles errores inducidos por componentes mecánicos dentro del telescopio.

El objetivo principal del telescopio es el de responder a expectativas sobre visualización de imágenes o rastreo de astros, dedicado para realizar estudios de frontera complementarios y técnicamente inalcanzables con los telescopios actuales, tales como, campo de visión y enfoque sin pérdida de tiempo sobre cambio de periféricos.

I.4 Objetivo general

Estudiar la integridad estructural del soporte del espejo terciario del Telescopio San Pedro Mártir (TSPM).

I.5 Objetivos específicos

Realizar pruebas MEF (Método de Elemento Finito) para verificación y cumplimiento de condiciones de diseño.

Realizar una tabla comparativa de las alternativas de diseño y una metodología para la selección de la mejor opción.

I.6 Requerimientos del subsistema

Espacio libre de estructura restringido para el espejo terciario (889) mm.

Afectación de clima sobre el soporte por temperatura (condición más crítica de temperatura de -25°C a 25°C).

Afectación de clima sobre estructura por viento (condición más crítica de viento 38 m/s).

Lograr un soporte de menor masa posible.

Contracciones o dilataciones térmicas del soporte.

No estar en las frecuencias naturales que afecten el sistema (menor a 9 Hertz y 60 Hertz).

I.7 Estado del arte

Con el afán de lograr un diseño adecuado del espejo terciario, se analizaron los trabajos de otros grupos que tuvieran algunas similitudes al diseño del espejo terciario como tamaño, temperaturas de trabajo, geometría de los soportes del espejo terciario, entre otros; cabe mencionarse que la información sobre este tipo de componentes es muy escasa debido a que los instrumentos construidos son pocos y la divulgación escasa; a continuación se describen los espejos terciarios analizados:

Fotografía del telescopio de MMT ver la siguiente figura 1.1

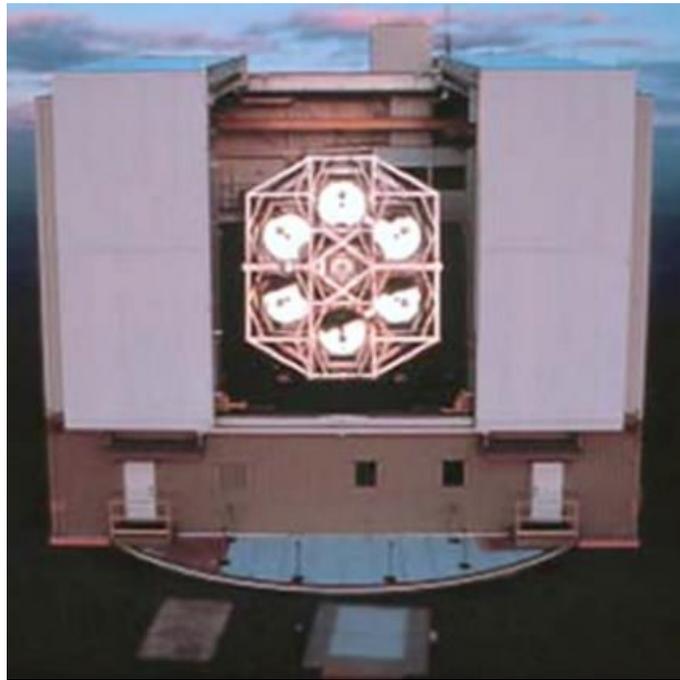


Figura 1.1 Telescopio MMT [1] (Ulich, 1980).

El MMT [1] (Ulich, 1980) fue el primero en aprovechar un diseño innovador que trajo los beneficios de los grandes telescopios a un costo accesible para las primeras instituciones. No solo es hacer seis pequeños espejos mucho más fácil y más barato que uno grande, el diseño de espejo múltiple permitió una estructura de soporte de un telescopio compacto y montaje.

*POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
CIDESI-CONACYT*

Para el TSPM tiene el mismo tipo de espejo del MMT, no es conveniente usar el diseño del sistema de elevación MMT, la razón principal es que el sistema de elevación MMT es demasiado corta y se monta directamente sobre el piso del edificio donde se encuentra el telescopio, esto, porque el edificio MMT gira con el telescopio, y en el caso del TSPM, necesitamos más altura en el telescopio, y es más conveniente para girar la cúpula y no todo el edificio.

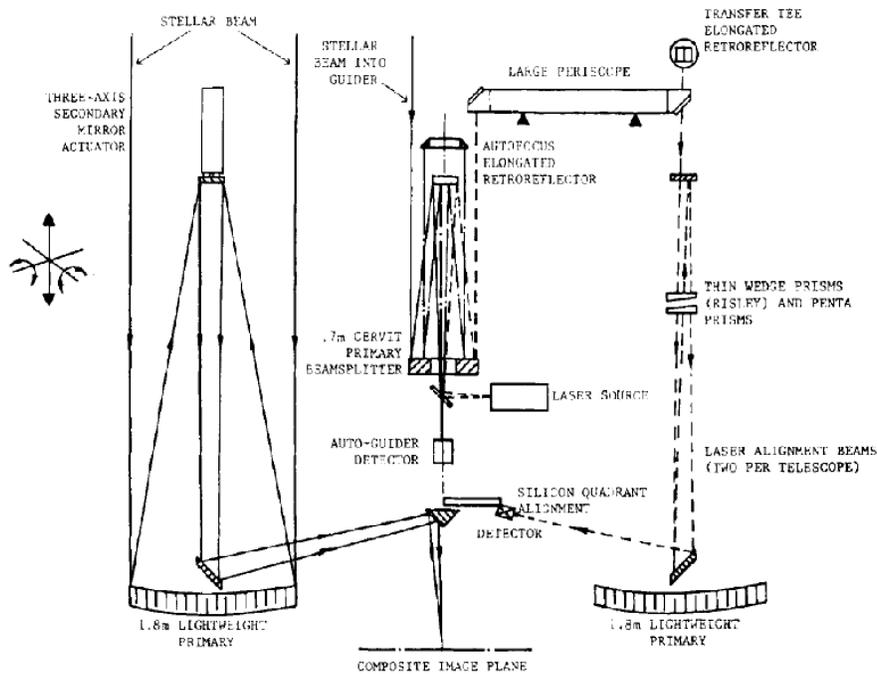


Figura 1.2 Iluminar la salida del sistema de alineación láser. (Ulich, 1980).

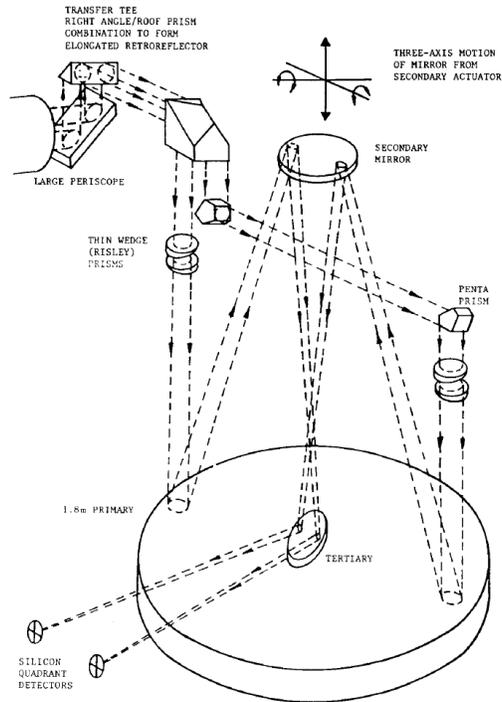


Figura 1.3 Detalle del sistema de alineación de láser para un solo telescopio. (Ulich, 1980).

Fotografía del telescopio Magellan ver la siguiente figura 1.4.



Figura 1.4 Telescopio Magellan. [2] (Las Campanas Observatory Carnegie Institution of Washington).

Magellan [3] (Stephen, 1994) Con el fin de desviar la luz para la ubicación Nasmyth se requiere de un espejo plano terciario diagonal (ver figura 1.5). El espejo terciario se cruza con el eje óptico a una distancia de 9023 mm desde el espejo secundario o 699 mm por delante del espejo primario. La distancia del espejo primario es de 325 mm, por lo que el eje óptico desviado pasa a 374 mm por delante del borde del espejo primario. El foco Nasmyth no corregida se produce 5,004 mm desde el eje óptico principal.

El área iluminada del espejo diagonal es de forma elíptica. Para un campo de 24 arco milímetro de diámetro, la longitud del eje menor de la elipse es de 745 mm, y el eje mayor 1054 mm. Debido a que el área iluminada se encoge en su camino hacia el foco, el centro de la elipse se desplaza en el plano por 13 mm desde el lugar donde el eje óptico intersecta el terciario. El plano también se pondrá a un tamaño ligeramente mayor con el fin de mejorar la figura cerca del borde de la zona iluminada.

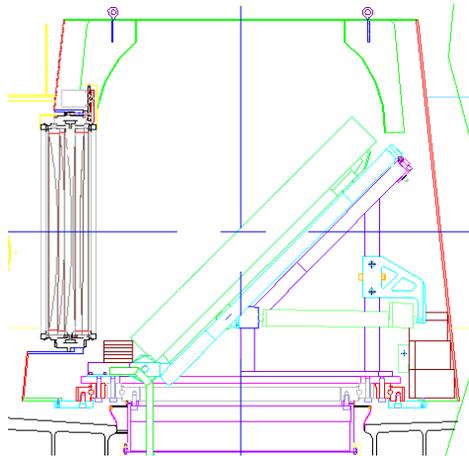


Figura 1.5 Espejo terciario Magellan. (Stephen, 1994).

Fotografía del Gran Telescopio de Canarias, para lo cual se puede ver la siguiente figura 1.6.

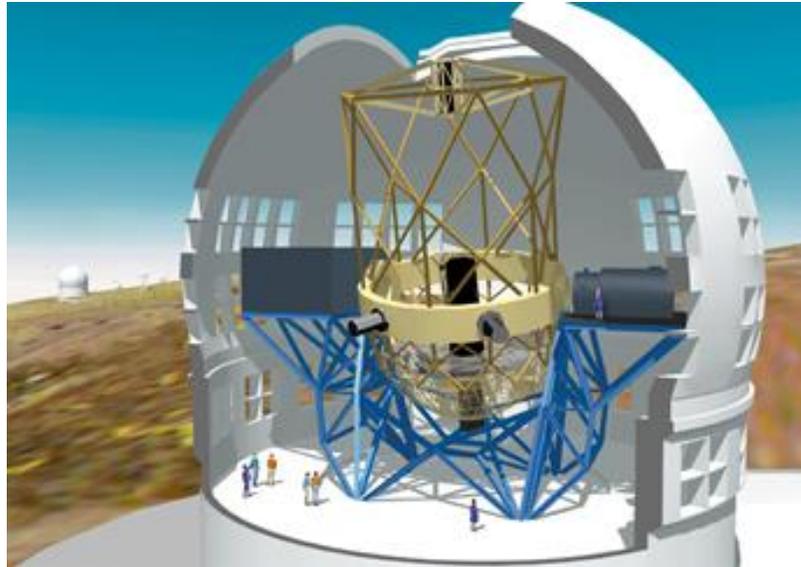


Figura 1.6 Gran telescopio canarias. [4] (Gran Telescopio CANARIAS - Fecyt).

El Giant Magellan Telescope [5] (Castro, 2000) El espejo terciario será un espejo elípticamente reflector de 1515 mm x 1067 mm con una superficie óptica plana apoyada por un montaje mecánico. El espejo terciario junto con su montaje mecánico se conoce como la unidad M3. La unidad de M3 se instalará con el montaje mecánico en el aparcamiento de la torre de soporte del telescopio. Este mecanismo de aparcamiento se puede extraer del espejo del haz óptico para permitir la observación en foco Cassegrain o insertar el espejo para observar a Nasmyth y los focos Cassegrain doblados.

La unidad de M3 se limita a tener un espesor total de 300 mm para evitar un viñeteado de un campo de visión de ≈ 15 arco minuto en Cassegrain al aparcar el espejo. La masa se limita a 250 Kg para evitar la degradación de las actuaciones dinámicas de la torre M3.

La unidad de M3 será completamente pasiva. La interfaz con el mecanismo de aparcamiento tendrá características para ajustar la posición de M3 durante la integración. No es necesario tener alineación activa de la posición del terciario desde la secundaria tiene la capacidad de la punta de inclinación y el centrado.

Las alternativas consideradas para el espejo M3 ha sido un espejo de vidrio monolítico o un espejo de cristal aligerados. En ambos casos se proponen utilizar una montura mecánica basada en un soporte de carga para el apoyo axial y un soporte central para lateral de apoyo, como en el caso de los segmentos del espejo primario. Este concepto es simple y fiable.

En la alternativa el espejo monolítico es de 65 mm de espesor, con una masa de 210 kg. El espejo se apoya en 27 puntos, dando una deformación de la superficie debido a la gravedad axial de r.m.s 6 nm. La alternativa ligera utiliza un sándwich de vidrio espejo, de 120 mm de espesor, con una masa de 120 Kg. En este caso, sólo se utilizan 18 puntos de apoyo, dando una deformación de la superficie de r.m.s 15 nm., la monolítica figura 1.7 Esquema de la torre y el aparcamiento alternativo M3 es similar.

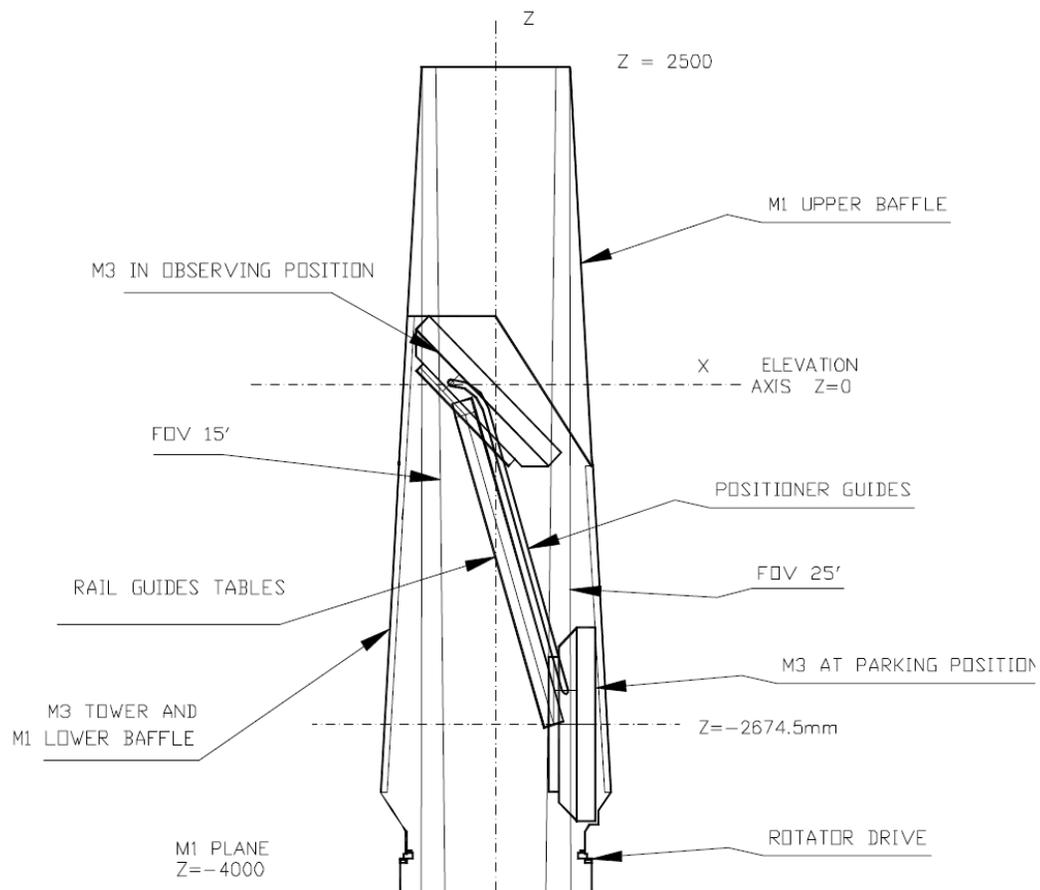


Figura 1.7 Esquema de la torre. (Castro, 2000)

Debido a estudios relacionados anteriormente, el peso de la subcelda no es un factor crítico, pero el coeficiente de dilatación térmica del material es un factor importante, es inconveniente para evitar la carga adicional en el espejo. El uso de difusor de carga nos ayuda a evitar la fricción en los rodamientos al usar este tipo de sistema. Similarmente, una varilla delgada tiene la misma ventaja en comparación con cojinete esférico. Una nueva sub-armadura se puede montar de tres posiciones con su actuador, al mismo tiempo, proporciona tres puntos con diferente posición de la posición del actuador para el montaje de tres puntos de esquina del triángulo equilátero de la capa superior del soporte.

I.8 Definición del problema

Estudio de integridad estructural y análisis comparativo de soporte del espejo terciario del telescopio San Pedro Mártir.

I.9 Hipótesis

Al llevarse a cabo, el análisis previo de factibilidad, ha resultado indispensable contemplar la hipótesis:

Es posible diseñar un sistema de soporte que resista cargas de viento, efectos de variación de temperatura y restricciones de vibración, con el menor peso y deformación posible para obtener rigidez y estabilidad del soporte del espejo terciario del TSPM.

1.10 Alcance

El alcance de este proyecto es el de realizar una modelación y una simulación de las diferentes alternativas para el soporte del sistema con software de diseño CAE cumpliendo el principal requerimiento de rigidez y estabilidad de la estructura del espejo terciario TSPM. Con ello lo retroalimentamos mediante unas comparativas y designar la mejor alternativa que reúna las necesidades de diseño para interactuar con los demás sistemas del telescopio.

I.11 Organización de la tesis

CAPITULOS

I INTRODUCCION: En este capítulo se da una breve descripción del trabajo de investigación realizado, se listan los objetivos que se pretenden lograr y se da un breve resumen de investigaciones realizadas con nuestro tema de investigación.

II ALTERNATIVAS DEL ESPEJO TERCIARIO: En este capítulo se ve las diferentes estructuras que tienen los espejos terciarios y serán la base para diseñar la propia estructura para TSPM.

III MODELOS FEM DE LAS ALTERNATIVAS: En este capítulo se realizara el estudio de las alternativas de la estructura del soporte del espejo terciario con sus respectivas cargas, para los diferentes tipos de modelo FEM.

IV COMPARACIONES DE LAS ALTERNATIVAS: En este capítulo se comparan los soportes del espejo terciario obtenidos de los diferentes tipos de modelo FEM.

V CONCLUSIONES Y APORTACIONES: En este capítulo se darán las conclusiones de las alternativas del soporte del espejo terciario.

CAPÍTULO 2

ALTERNATIVAS DEL ESPEJO TERCIARIO

II.1 Espejo terciario TMT

El conjunto del telescopio de 30 metros [6] (THIRTY METER TELESCOPE) el espejo terciario (M3) ver la siguiente figura 2.1 se muestra montado encima de la torre terciaria. El espejo M3 tiene 3,6 metros (12 pies) de largo y 2,5 metros (8 pies) de ancho. La orientación del espejo M3 se controla con precisión en rotación e inclinación para dirigir el haz de luz en los instrumentos científicos montados en las plataformas Nasmyth.



Figura 2.1 Ensamble espejo terciario TMT. (THIRTY METER TELESCOPE)

El espejo terciario es un espejo plano grande, situado en el centro del espejo primario, que se utiliza para dirigir la imagen del telescopio a los

instrumentos en las plataformas de Nasmyth. El espejo es de forma elíptica, de 3.5 x 2.5 metros (11 ½ x 8 pies) de diámetro.

El espejo terciario debe ser capaz de conmutar entre los instrumentos científicos de forma rápida y precisa, y debe ser capaz de seguir en dos ejes para mantener el haz alineado con el instrumento a medida que el telescopio cambia de ángulo cenital. Uno de estos ejes (el eje de rotación) es coincidente con el eje óptico del espejo primario y el otro (el eje de inclinación) es perpendicular a ese eje.

II.2 Espejo terciario LBT

El Telescopio Binocular Grande (LBT) [7] (Gallieni, 2000) estará equipado por dos unidades terciarias (M3) ver la siguiente figura 2.2 para alimentar el plano focal gregoriano doblado y el tren óptico de enfoque combinado. Cada unidad M3 será mantenida en posición por una araña desplegable o "brazo oscilante", una armadura articulada en la estructura de elevación del telescopio. Dichos brazos permiten colocar los M3 en el eje óptico de cada telescopio y eliminarlos dependiendo de la configuración de observación.

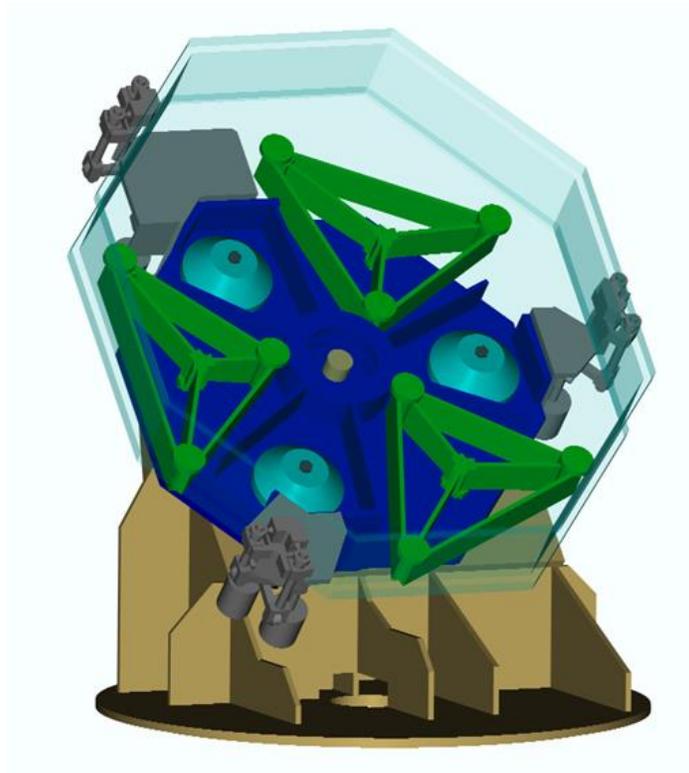


Figura 2.2 Ensamble espejo terciario LBT. (Gallieni, 2000)

El uso del modo de enfoque combinado requiere el ajuste de las dos trayectorias ópticas del telescopio. Esto se logra desplazando cada espejo terciario a lo largo de su eje óptico. Además, el espejo que apunta debe ser ajustable también para compensar activamente las deflexiones estáticas y térmicas del telescopio. Ambos requisitos sugieren el uso de tres actuadores lineales para soportar cada célula del espejo terciario.

Además, cada unidad M3 debe estar orientada remotamente hacia los tres diferentes de rotadores situados en la plataforma de elevación del telescopio, más una cuarta estación para un sensor submilimétrico. Por esta razón, cada unidad M3 incorpora también una etapa rotatoria.

Se dedica un esfuerzo especial al diseño del sistema de apoyo de espejos de panel. De hecho, la combinación de la elevación del telescopio y la orientación M3 hacen que el espejo terciario funcione en casi toda la dirección de la gravedad.

Por lo tanto, se exige un sistema de soporte muy distribuido para minimizar la deformación de la superficie reflectante RMS en todas las condiciones de trabajo.

El bastidor de soporte es la estructura que conecta la célula del espejo al cojinete del rotador. La cuestión principal que diseña dicha estructura proviene del desplazamiento relativo que ocurre entre la brida inferior de la célula del espejo y el cojinete del rotador. Tal desplazamiento exige una estructura muy rígida para hacer frente a la masa de células espejo desequilibrada, es decir, aproximadamente 80 Kg. La masa de la estructura de soporte de aluminio es de 19 Kg.

II.3 Espejo terciario GTC

El Gran Telescopio Canarias (GTC) [8] (Natalia R. Zelman, 2004), especialmente su capacidad para nivelar el peso automáticamente, permitiendo el movimiento del espejo. Su función es "invadir" el camino de la luz, para redirigirlo a los diferentes focos, en nuestro caso los Cassegrain doblados y los 2 Nasmyths.

La escala automática permite que se deslice automáticamente en las guías, obstaculizando la luz y redirigiéndola cuando sea necesario. El resto del tiempo, si su uso no es preciso, permanece "estacionado".

El espejo está dentro de una torre de 1,8 m de diámetro y una altura de 7 m, que se mueve girando alrededor de su estructura y dirige el espejo hacia el foco elegido.

El espejo es elíptico, plano y muy delgado, con una anchura de sólo 70 mm, fabricado en Zerodur™ con medidas de 1521 x 1073 cm. Está soportado por un árbol de palancas con 18 puntos de fijación.

La empresa contratada para suministrar este espejo y los elementos asociados a su montaje fue la empresa belga AMOS que contrató a ZEISS para hacer el espejo. SHOTT fue el proveedor del bloque de Zerodur™ y la empresa rusa LZOS llevó a cabo el proceso de pulido del espejo.

LZOS también prueba el espejo terciario del GTC. Con el fin de realizar mediciones relacionadas con la superficie plana del espejo, se creó un banco de pruebas vertical, que permite mediciones superficiales muy precisas.

Para el proceso de pulido, el espejo ha sido introducido en un "postizo de Sitall CO-115M (Astrositall)", un tipo de "vitrocerámica" fabricado por LZOS desde 1959, con un coeficiente de expansión térmica muy bajo similar al Zerodur™ (Por Schott). Esto facilita el pulido de los bordes, que suele ser la parte más complicada del proceso.

AMOS [9] (AMOS) ha sido designado por GTC para suministrar la Unidad de Espejo Terciario para el Gran Telescopio Canarias.

Esta unidad incluye un espejo plano de forma elíptica pulido y representado por LZOS y una sofisticada célula mecánica diseñada y fabricada por AMOS. Figura 2.3.



Figura 2.3 Soporte de carga. [10] (Gran Telescopio CANARIAS)

Esta celda permite dejar que el espejo apunte en cualquier dirección entre el horizonte y el cenit, minimizando al mismo tiempo la deformación del espejo bajo la gravedad y manteniendo su calidad superficial global.

El telescopio GTC es un telescopio español con un espejo primario segmentado de 10 m instalado en las Islas Canarias (La Palma). La torre M3 se utiliza para mantener la unidad M3 en voladizo a 45° y se fija en el centro de la celda de espejo M1. El espejo M3 debe ser móvil para apuntar en una de las 2 direcciones de Nasmyth o en uno de los 4 focos de Cassegrain doblados. El

*POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
CIDESI-CONACYT*

espejo M3 también debe ser retirado del campo central para permitir que la luz que pasa a través del telescopio enfoque Cassegrain. Todas estas funciones deben incluirse dentro de la torre M3.

La torre M3 figura 2.4 incluye una estructura de acero de unos 4 m de altura y menos de 2 m de diámetro que soporta el cojinete de rotación y su motorización, pero también las 2 mesas guía lineales motorizadas que permiten extraer la unidad M3 del campo central. Esta parte también proporciona la conexión con la celda M1. La parte superior es una estructura ligera de aluminio (<100 kg) de unos 3 m de altura que se utiliza como deflector para el espejo M3. La repetibilidad del posicionamiento en rotación en focos Nasmyth o Cassegrain doblado es mejor que $15 \mu\text{rad}$. La repetibilidad del bloqueo de la unidad M3 a 45° es mejor que $7 \mu\text{rad}$ en inclinación y $10 \mu\text{m}$ en posición axial.



Figura 2.4 Torre del espejo. (AMOS)

II.4 Espejo terciario TSPM

La configuración del recorrido del haz de luz dentro del instrumento se ha modificado de acuerdo a los últimos alcances requeridos durante el transcurso del

proyecto para cumplir con los altos requerimientos que se la han impuesto al telescopio y por consecuencia también se han modificado el diseño mecánico.

A través de todas estas modificaciones que se tuvieron en el diseño y de las retroalimentaciones surgidas por parte de los clientes es que se alcanzó una mejor comprensión sobre el diseño que se debe de tener en este tipo de componentes, ya que con cada una de ellas se fue acercando un diseño cada vez más óptimo.

El telescopio de San Pedro Mártir no cuenta con el diámetro interior del espejo primario demasiado grande para poder colocar el espejo terciario en un lugar y cuando se ocupe colocarlo en su posición para realizar su funcionamiento.

Es necesario que cada vez que se ocupe para mandar la luz a los focos Nasmyth y Cassegrain acodados sea colocado para realizar su funcionamiento y quitarlo cuando no se requiera.

Antes de empezar a realizar la estructura para el soporte del espejo terciario, se debe tener en cuenta principalmente el diseño de la óptica del telescopio para saber las distancias de la colocación de los espejos, su forma y dimensiones, estos datos serán proporcionados por el IA-UNAM que es la gente principal para el desarrollo de este tipo de telescopio, de tal manera que nosotros podamos empezar a trabajar con todos los componentes de la estructura del telescopio.

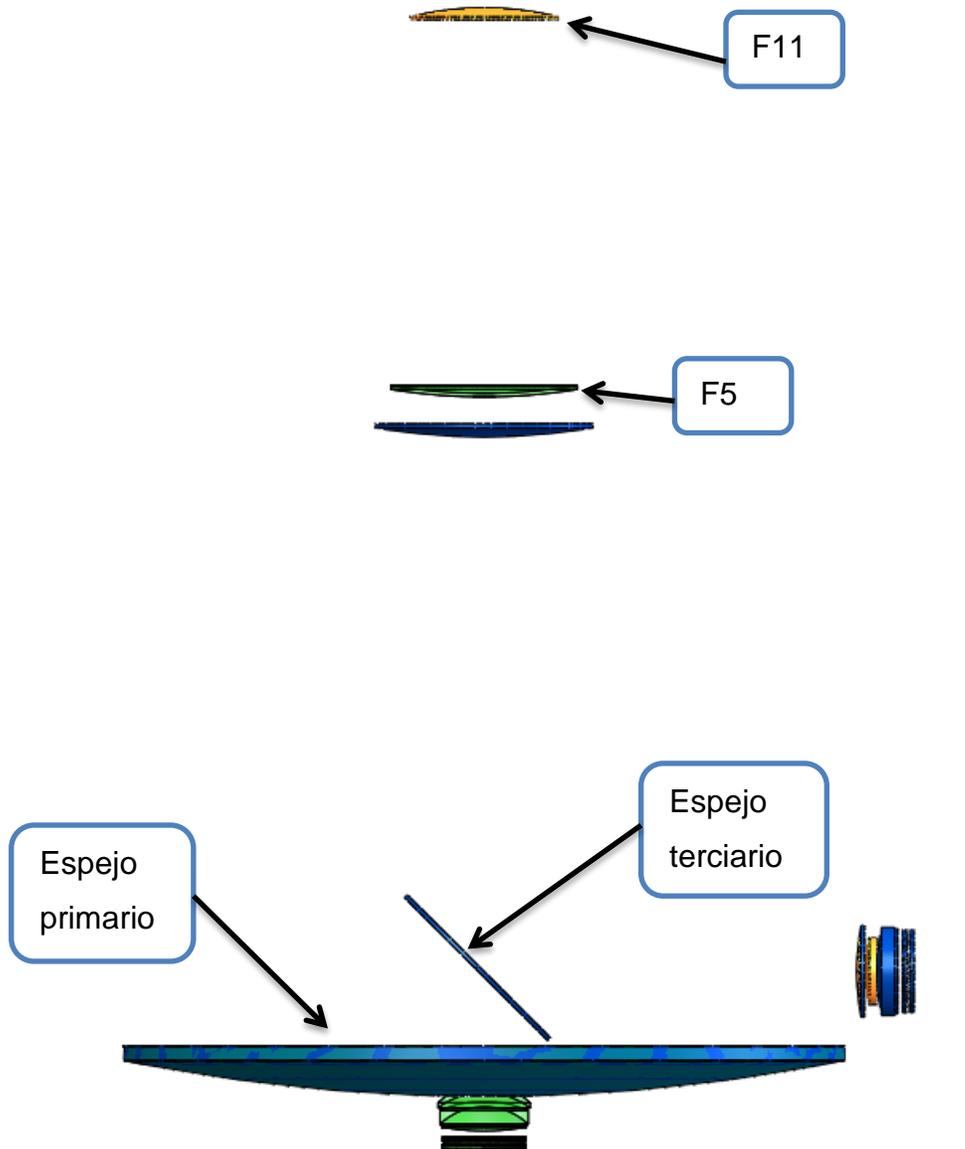


Figura 2.5 Espejos del telescopio TSPM.

II.5 Ensamble del espejo terciario

El espejo terciario es de una forma elíptica cuyo diámetro mayor es de 1830 mm el diámetro menor es de 1300 mm y un espesor de 36.4 mm, el material que se va construir el espejo terciario es de vidrio de borosilicato es un tipo particular de vidrio con óxidos de silicio y boro más conocido con los nombres comerciales de Duran, Pyrex o kimax.

Para poder comenzar hacer el estudio del soporte para el espejo terciario necesitamos primeramente comenzar por realizar un diseño, en el cual se empezó a retomar la información de los otros telescopios para poder empezar a realizar el diseño conceptual del espejo terciario y de la forma de cómo se podía realizar para poderlo colocar en el diámetro interior del espejo primario y su medida es 889 mm aproximadamente y en su diámetro interior estará el soporte del espejo terciario, por lo que revisando diferentes tipos de soporte para el espejo terciario se decidió realizarlo con las siguientes características:

La forma del diseño de la estructura del espejo terciario fue la siguiente:

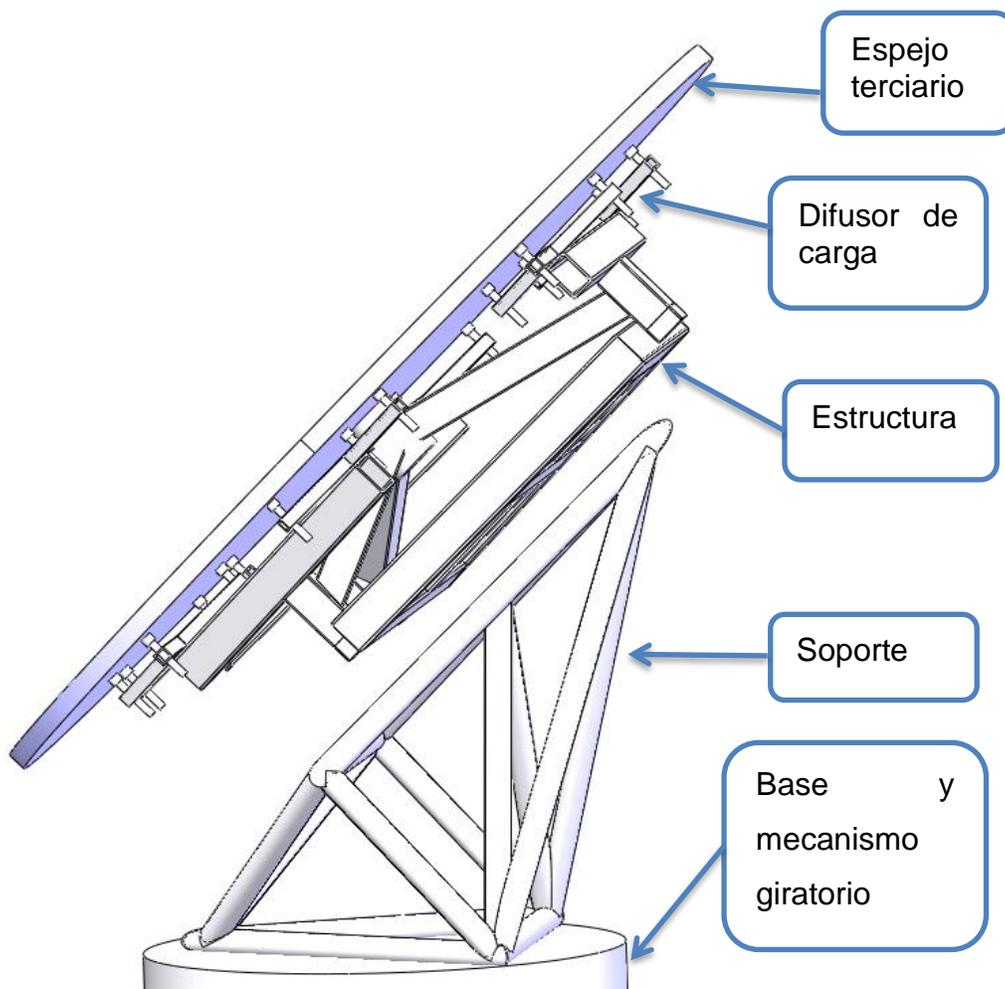


Figura 2.6 Ensamblaje del espejo terciario TSPM.

Una base que se introducirá en el diámetro interior del espejo primario, además contiene el mecanismo giratorio, que servirá para soportar toda la estructura de los demás componentes del espejo terciario y el tipo de material que se construirá es de cedula 40 de ASTM-A570 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.38×10^9 Pa [11] (MatWeb: Online materials Information Resource).

Límite elástico = 0.275×10^9 Pa.

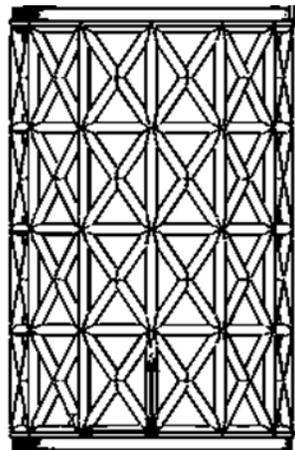


Figura 2.7 Base del espejo terciario.

El soporte de estructura encima de la base que debe tener la rigidez para soportar la estructura del difusor de carga, el difusor de carga y el espejo terciario, este girara respecto a la dirección del haz de luz que nosotros queramos mandar a los focos Nasmyth o Cassegrain acodados, es de material de ASTM-36 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.4×10^9 Pa [11] (MatWeb: Online materials Information Resource).

Límite elástico = 0.25×10^9 Pa.

En el cual se analizaran tres alternativas diferentes de soporte para el espejo terciario.

La alternativa 1 compuesta de un perfil angular de 76 x 76 mm por lado de un espesor de 12.7 mm.

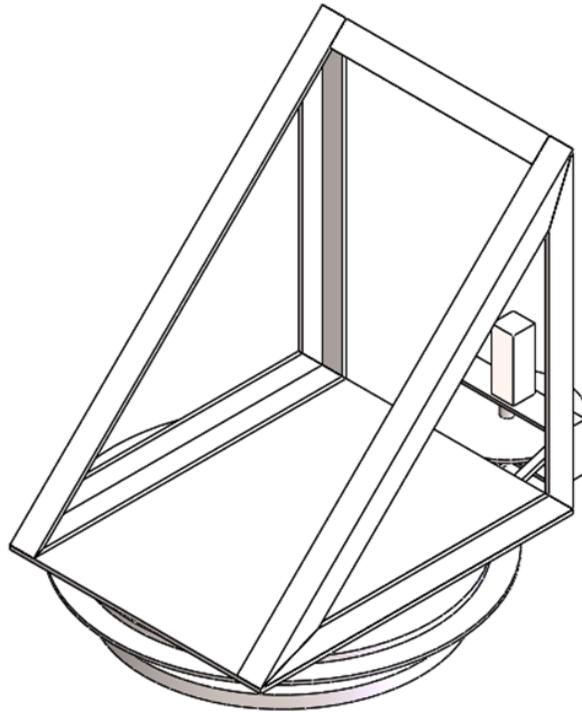


Figura 2.8 Alternativa 1.

La alternativa 2 compuesta de un perfil rectangular de 76 x 76 mm de lado con un espesor de 4.8 mm.

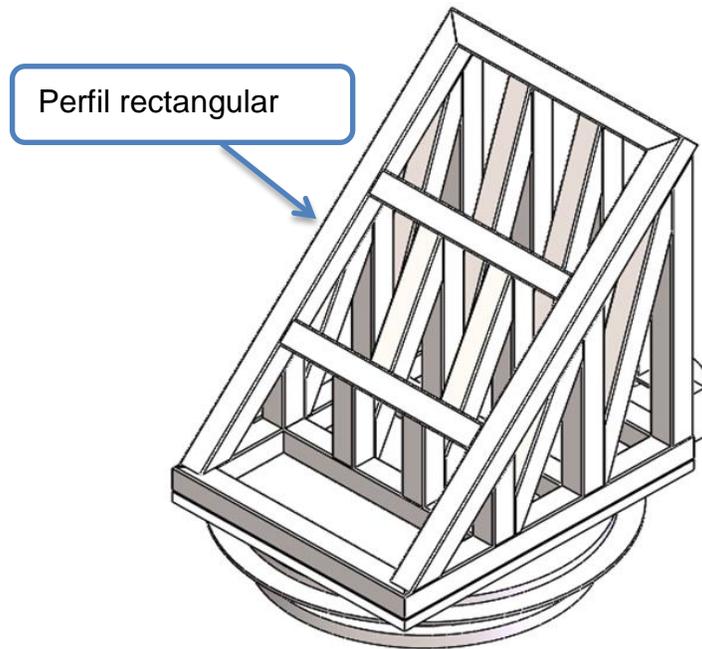


Figura 2.9 Alternativa 2.

La alternativa 3 compuesta de un perfil rectangular de 76 x 76 mm de lado con un espesor de 4.8 mm y un perfil angular de 76 x 76 mm de lado con un espesor de 12.7 mm.

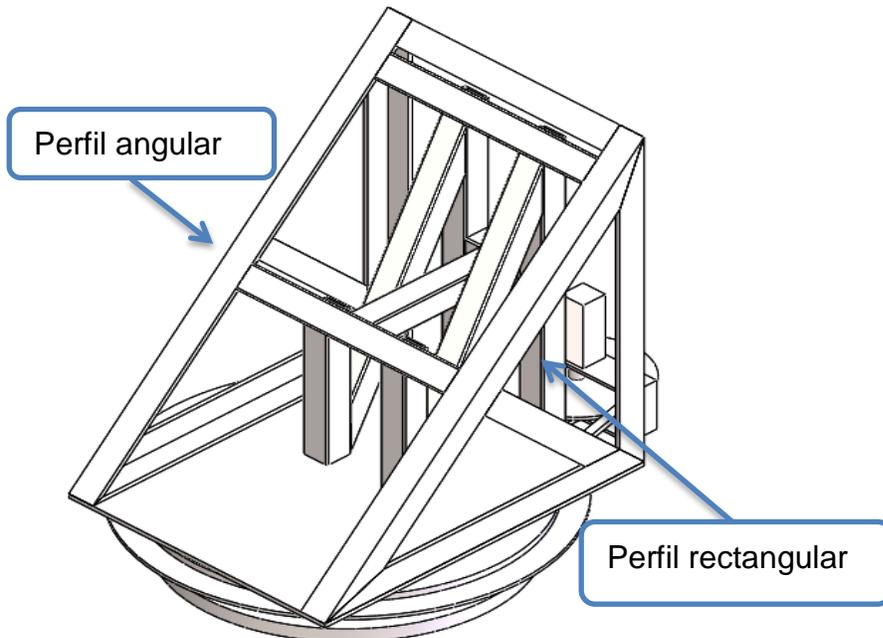


Figura 2.10 Alternativa 3.

Una estructura de unión entre el soporte y el difusor de carga.

El difusor de carga que es la estructura donde se coloca el espejo terciario, es de material ASTM- A36 Whiffletree detalles del espejo terciario es un mecanismo que se utiliza para distribuir la fuerza uniformemente a través de enlaces. Las fuerzas pueden estar en tensión o en compresión. Una estructura de soporte del difusor de carga se ha aplicado a los sistemas de soporte de espejo para varios grandes telescopios ópticos.

El concepto básico de un difusor de carga aplicado a un soporte de espejo permite por tener muchos puntos de soporte unidos al espejo, y la reducción de estas conexiones a 3 conexiones a tierra. El uso de este concepto, es posible crear un montaje cinemático para un gran espejo.

El difusor de carga que está compuesto por diferentes mecanismos para obtener la mejor imagen posible.

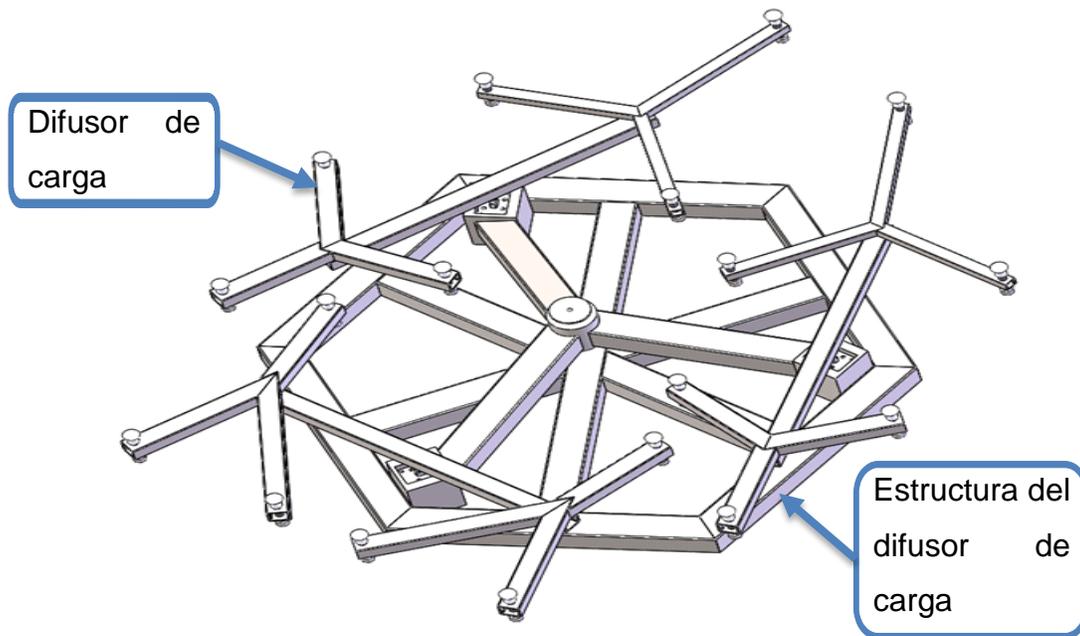


Figura 2.11 Difusor de carga.

Y el espejo terciario soportado por el difusor de carga.

CAPÍTULO 3

MODELOS FEM DE LAS ALTERNATIVAS

III.1 Alternativa 1

Se consideraron tres puntos a analizar que son los puntos importantes de soporte para la estructura del espejo terciario.

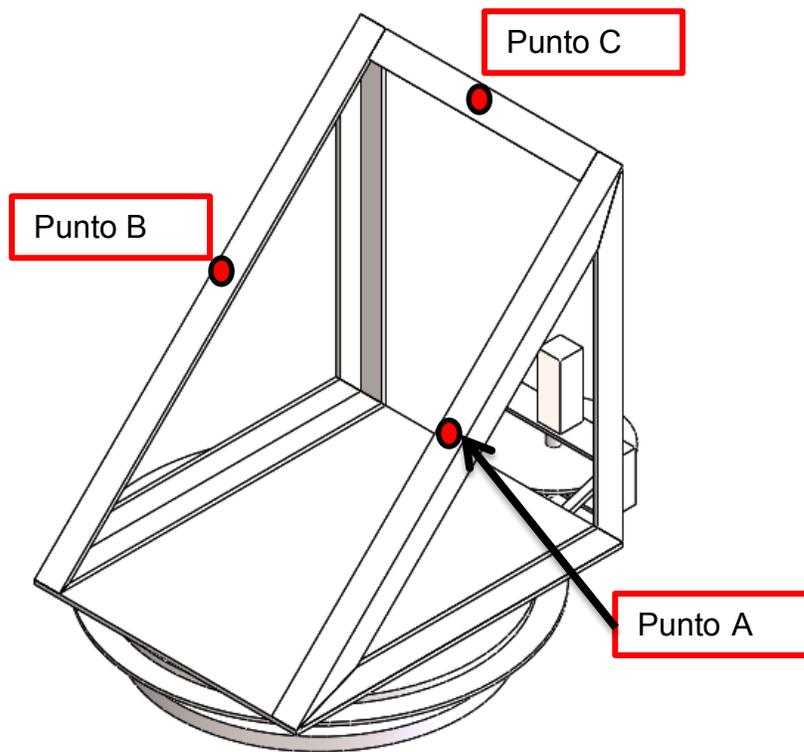


Figura 3.1 Soporte alternativa 1.

III.1.1 Estudio del soporte con velocidad del viento.

Cargas principales consideradas para el estudio de simulación de flujo.

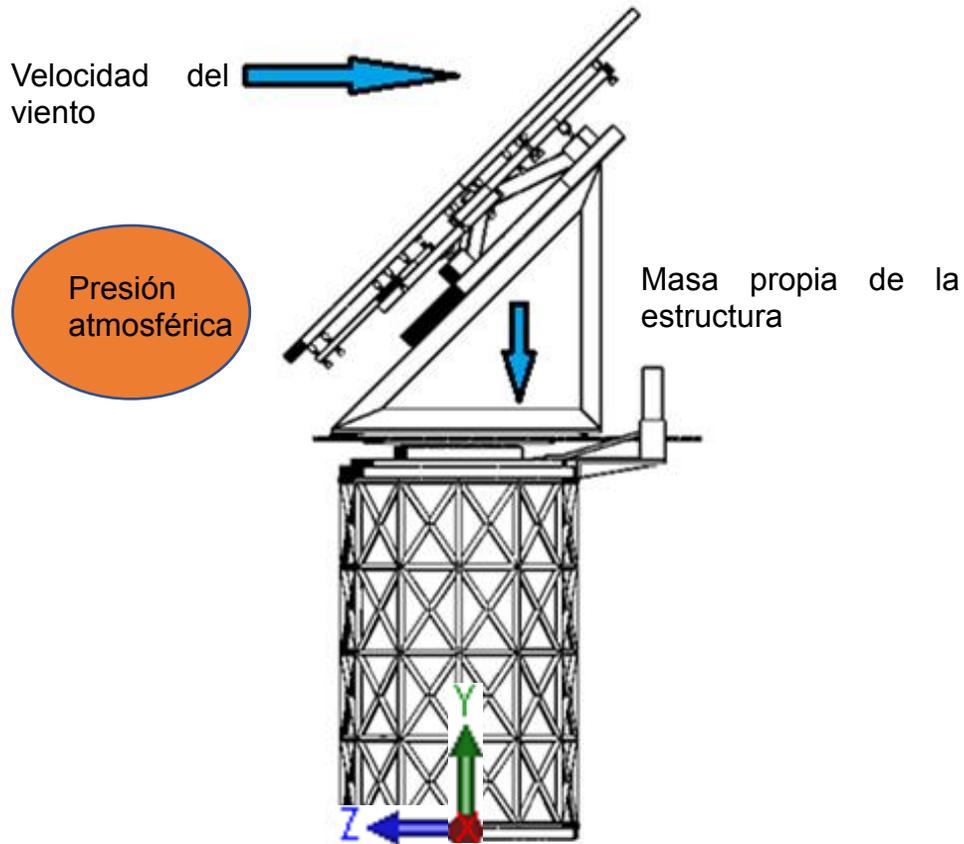


Figura 3.2 Cargas principales para la simulación de flujo.

Para realizar este tipo de estudio se consideraron las condiciones más extremas del lugar donde se instalará el telescopio y son:

Tabla III.1 Condiciones de clima de supervivencia.

Clima	Normales	Supervivencia
Temperatura	> -15°C, -1.5°C promedio	-25°C (invierno), 25°C (verano)
Presión barométrica	720 mbar	
Velocidad del viento	< 20 m/s (72 Km/h)	38 m/s

La velocidad del viento proporcionara en el ensamble una presión de fluido que a su vez nos proporciona una flexión en nuestro ensamble, entonces al realizar el estudio es observar cómo afectara la velocidad del viento en la estructura, entonces se realizó el estudio estático y las condiciones fronteras para su análisis donde en este estudio se incluía:

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1400 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa. [12] (Ilse Plauchu Frayn).

Obteniendo los siguientes resultados:

Presión =72854.84 Pa

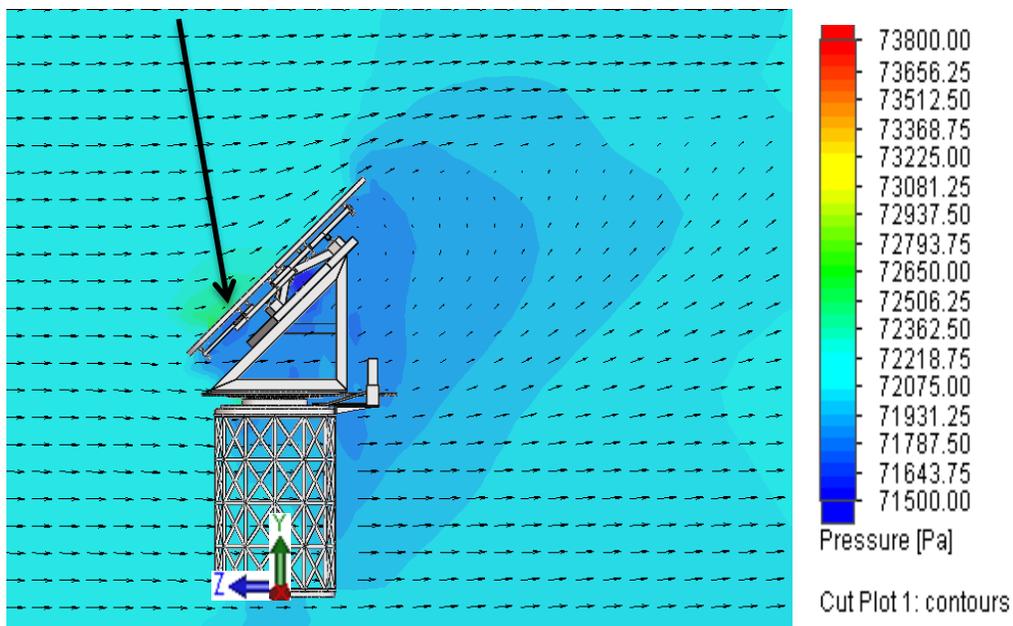


Figura 3.3 Afectación del viento sobre la estructura.

III.1.2 Estudio de las deformaciones del soporte en alternativa 1.

Después se realizó el estudio para conocer cuánto era el desplazamiento del soporte considerando los puntos A, B y C considerando los datos anteriores.

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1400 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa.

La gravedad de 9.81 m/s².

Se obtuvieron los siguientes resultados:

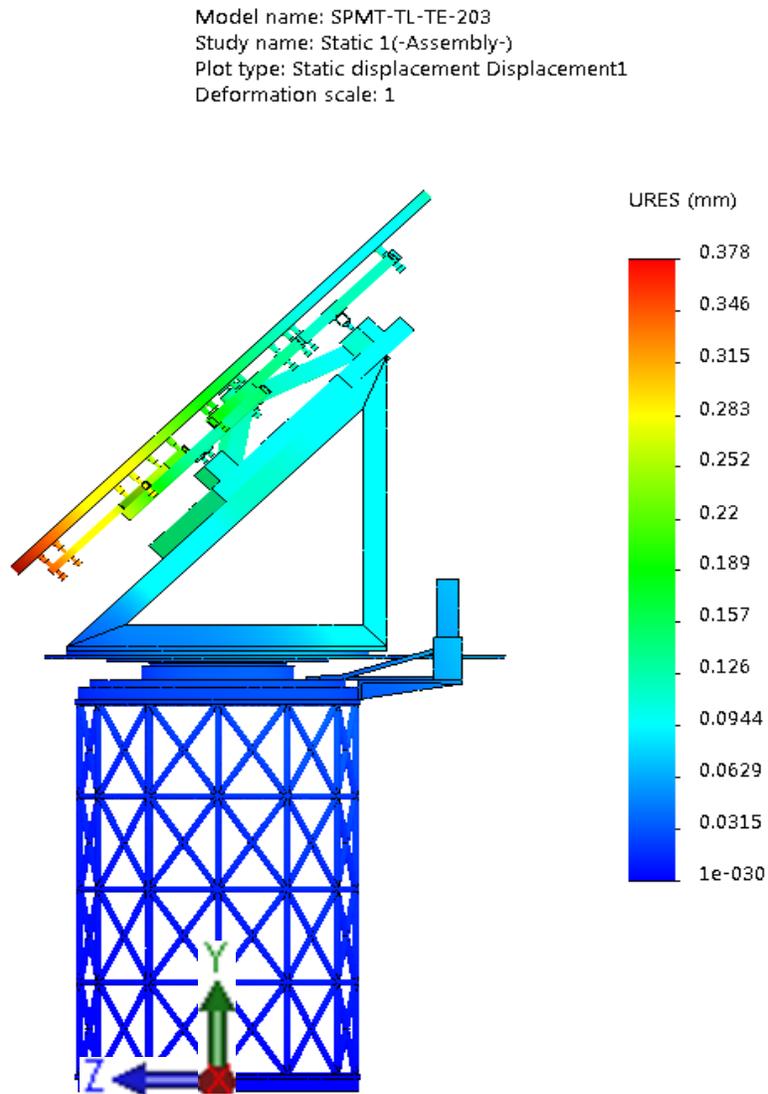


Figura 3.4 Desplazamientos sobre el soporte.

Estos datos nos representan el desplazamiento que se tiene en el diseño del soporte del espejo terciario y tiene los siguientes valores en los puntos de referencia A, B y C.

Tabla III.2 Desplazamiento en el soporte.

Puntos	Desplazamiento en mm			
	X	Y	Z	Total
A	0.00225	-0.09128	-0.10136	0.13643
B	-0.00548	-0.09853	-0.10573	0.14463
C	-0.00081	-0.08667	-0.09586	0.12923

III.1.3 Gráfica de esfuerzos.

También se realizó el estudio de esfuerzos que se tiene en todo el soporte del espejo terciario.

El material de la base del espejo terciario es de cedula 40 ASTM-570 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.38×10^9 Pa. (MatWeb: Online materials Information Resource).

Límite elástico = 0.275×10^9 Pa.

El material de soporte es de ASTM-36 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.4×10^9 Pa.

Límite elástico = 0.25×10^9 Pa.

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Static 1(-Assembly-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1

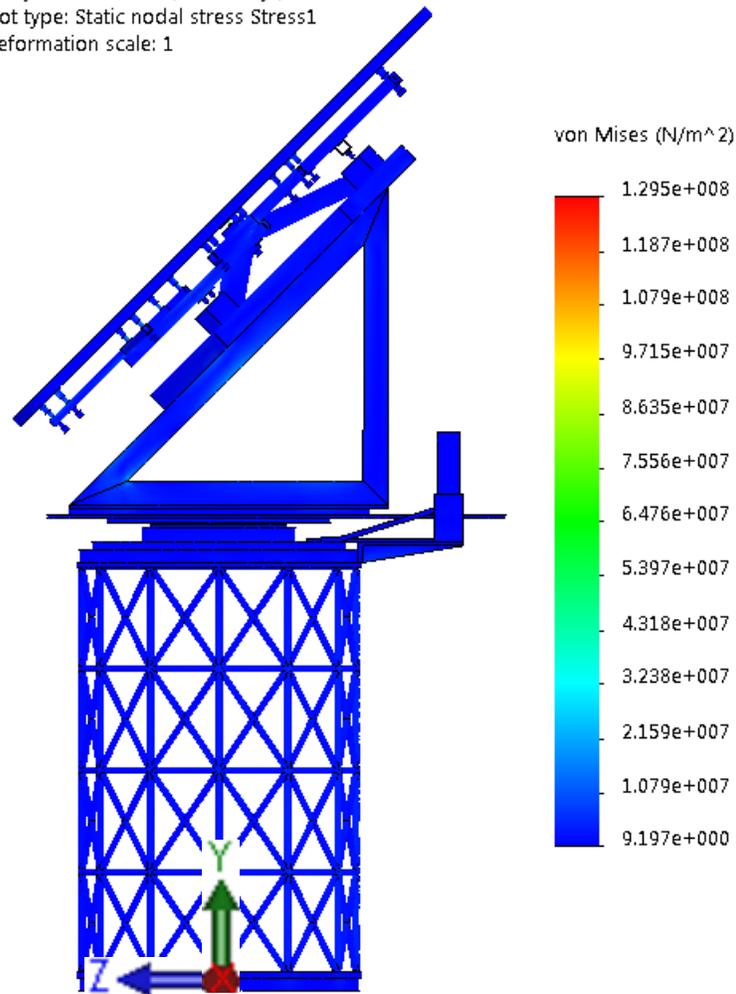


Figura 3.5 Esfuerzos en el soporte.

Observamos en la figura que el valor que presenta es de $0.021 \times 10^9 \text{ Pa}$ y este valor es mucho menor del que soportan el material por lo cual no tenemos problemas con el valor de esfuerzo de los materiales.

III.1.4 Desplazamiento en diferentes ángulos contiguos.

También se obtuvieron los valores de desplazamiento en diferentes ángulos contiguos cada 15° sobre el plano XZ girando el espejo sobre el eje Y de la alternativa 1 para observar cómo es su comportamiento y se obtuvieron los siguientes valores:

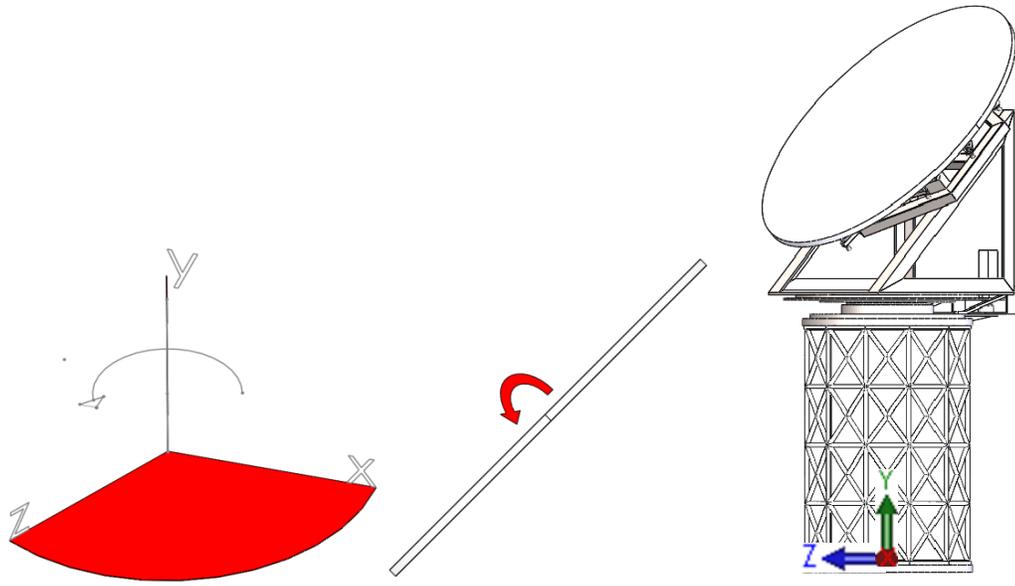


Figura 3.6 Giro del soporte del espejo terciario.

Tabla III.3 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos.

Ángulo	Desplazamiento en el soporte en los puntos (mm)		
	A	B	C
0°	0.1364	0.1446	0.1292
15°	0.1359	0.1513	0.1356
30°	0.1359	0.1513	0.1356
45°	0.0895	0.0945	0.0747
60°	0.1111	0.1344	0.1154
75°	0.0982	0.1046	0.0889
90°	0.0868	0.0742	0.0582

En la tabla III.3 podemos ver que el desplazamiento mayor en el punto A es en el ángulo de 0°, en el punto B es en los ángulos 15° y 30° y en el punto C también se encuentran en los ángulos 15° y 30°, también se observa que en los puntos A y B es mayor la deformación que en el punto C.

III.1.5 Análisis modal.

Se realizó el estudio para conocer el tipo de frecuencias naturales para evitarlas en nuestro sistema, la más principal es por el uso de la corriente eléctrica y debemos conocer los siguientes datos:

Frecuencias de excitación.

Menor a 9 Hz por ser el primer modo del telescopio.

60 Hz frecuencia por suministro eléctrico en México.

Se realizó el estudio considerando las 10 primeras modos de frecuencias que existen en la alternativa 1 obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla III.4 Frecuencias naturales.

No. De modo	Frecuencia (rad/seg)	Frecuencia (Hertz)	Período (segundos)
1	132.35	21.064	0.047475
2	157.81	25.116	0.039815
3	207.31	32.994	0.030309
4	231.55	36.853	0.027135
5	283.01	45.042	0.022202
6	350.79	55.831	0.017911
7	368.35	58.624	0.017058
8	470.14	74.825	0.013365
9	475.98	75.754	0.013201
10	548.40	87.280	0.011457

Se observa que el modo 7 su frecuencia es de 58.624 Hz es una frecuencia que nos trae problemas por lo cercana que está a 60 Hz que es por el suministro eléctrico en México.

Se muestran a continuación los modos de frecuencia de la alternativa 1:

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Frequency 1(-Assembly-)
Plot type: Frequency Amplitude1
Mode Shape : 1 Value = 21.064 Hz
Deformation scale: 4.21056

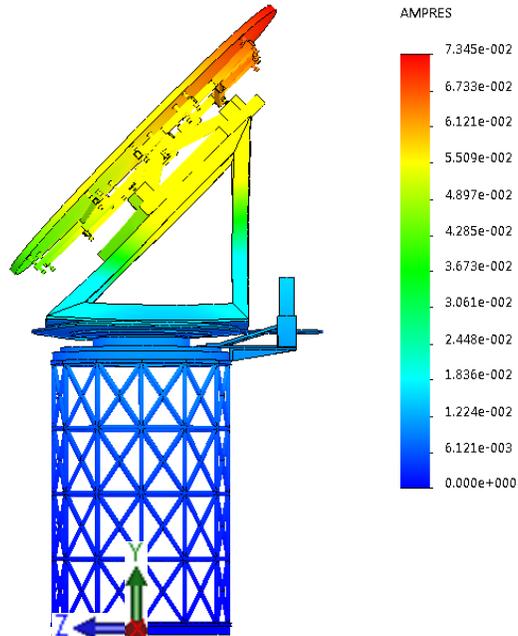


Figura 3.7 Primer modo de frecuencia natural.

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Frequency 1(-Assembly-)
Plot type: Frequency Amplitude2
Mode Shape : 2 Value = 25.116 Hz
Deformation scale: 2.70721

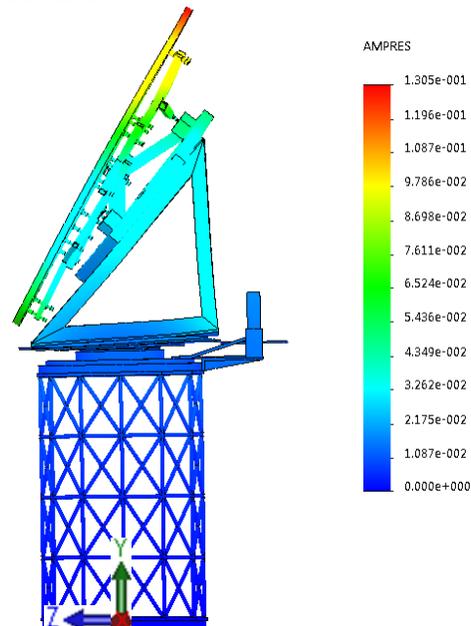


Figura 3.8 Segundo modo de frecuencia natural.

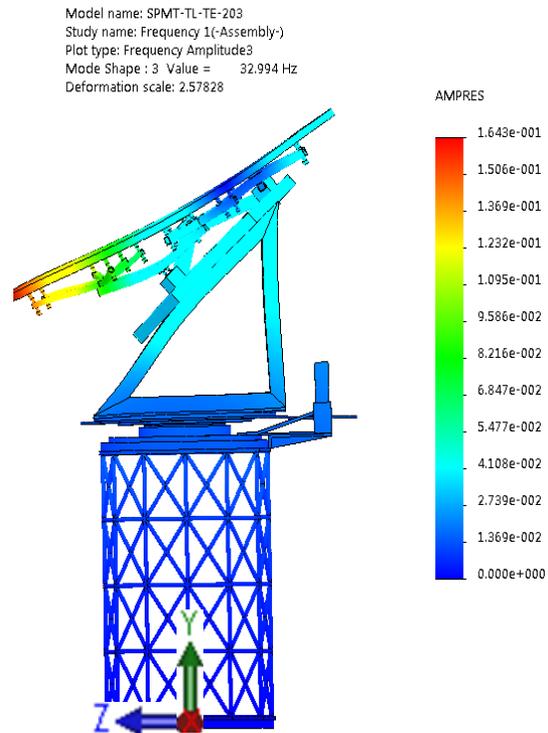


Figura 3.9 Tercer modo de frecuencia natural.

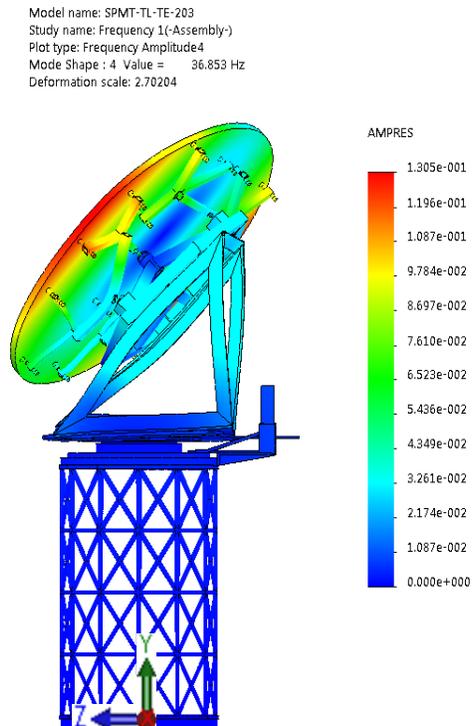


Figura 3.10 Cuarto modo de frecuencia natural.

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Frequency 1(-Assembly-)
Plot type: Frequency Amplitude5
Mode Shape : 5 Value = 45.042 Hz
Deformation scale: 2.63631

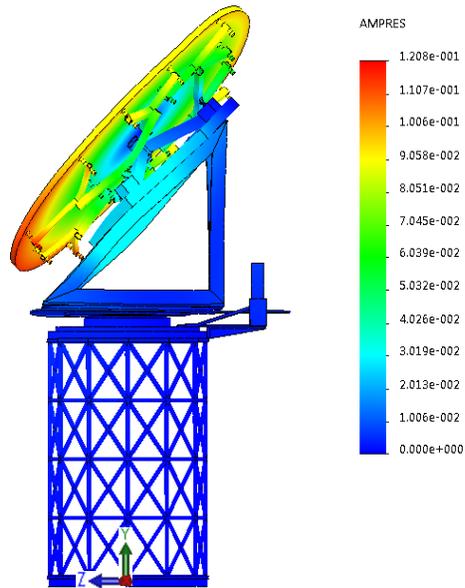


Figura 3.11 Quinto modo de frecuencia natural.

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Frequency 1(-Assembly-)
Plot type: Frequency Amplitude6
Mode Shape : 6 Value = 55.831 Hz
Deformation scale: 3.28183

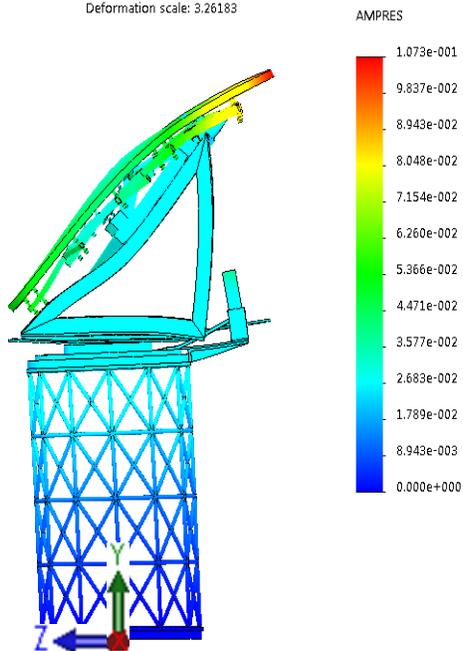


Figura 3.12 Sexto modo de frecuencia natural.

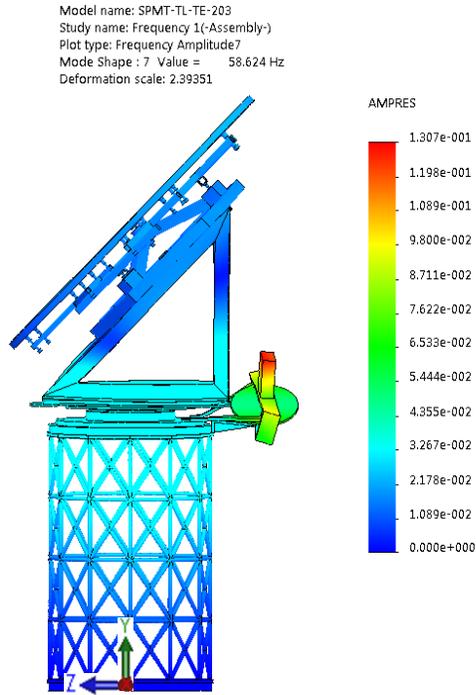


Figura 3.13 Séptimo modo de frecuencia natural.

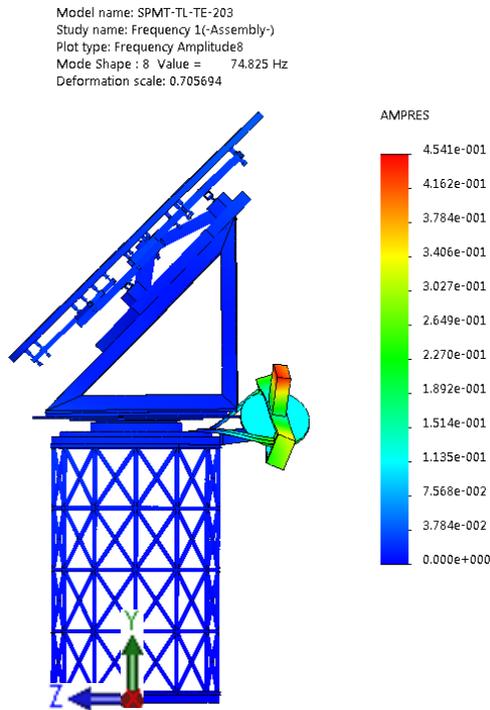


Figura 3.14 Octavo modo de frecuencia natural.

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Frequency 1(-Assembly-)
Plot type: Frequency Amplitude9
Mode Shape : 9 Value = 75.754 Hz
Deformation scale: 1.91659

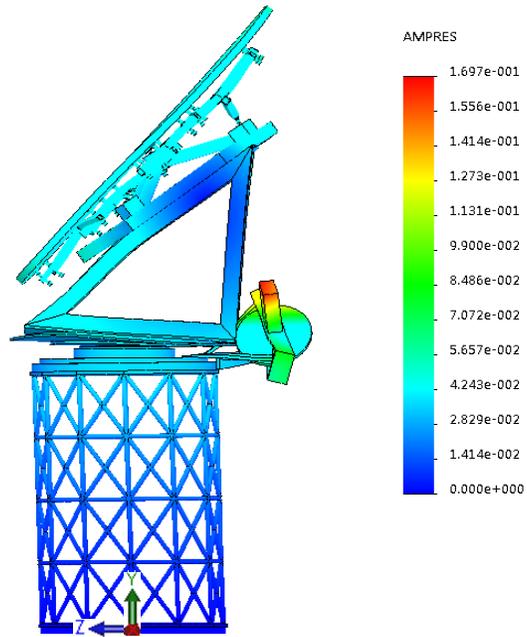


Figura 3.15 Noveno modo de frecuencia natural.

Model name: SPMT-TL-TE-203
Study name: Frequency 1(-Assembly-)
Plot type: Frequency Amplitude10
Mode Shape : 10 Value = 87.28 Hz
Deformation scale: 2.0199

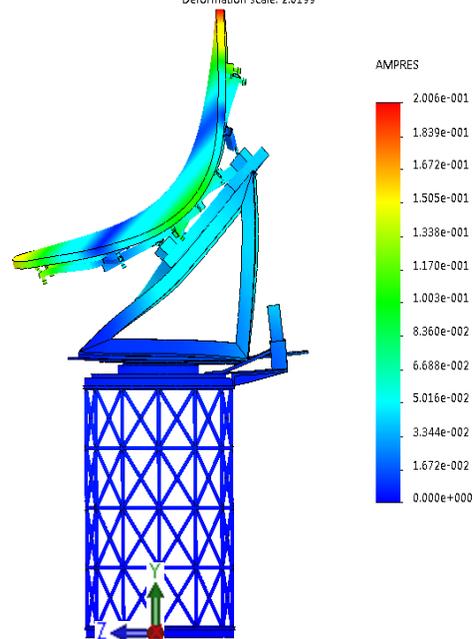


Figura 3.16 Decimo modo de frecuencia natural.

III.1.6 Contracciones y dilataciones térmicas.

También se realizó el estudio de acuerdo al valor de la temperatura que es de -25°C a 25°C y considerando todas las condiciones anteriores, además por situaciones del software se sustituyó la parte de la estructura del espejo terciario por las cargas en los tres puntos principales del soporte representadas en la figura 3.17.

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1400 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa.

La gravedad de 9.81 m/s^2 .

La temperatura de -25°C a 25°C .

Se obtuvo los siguientes resultados:

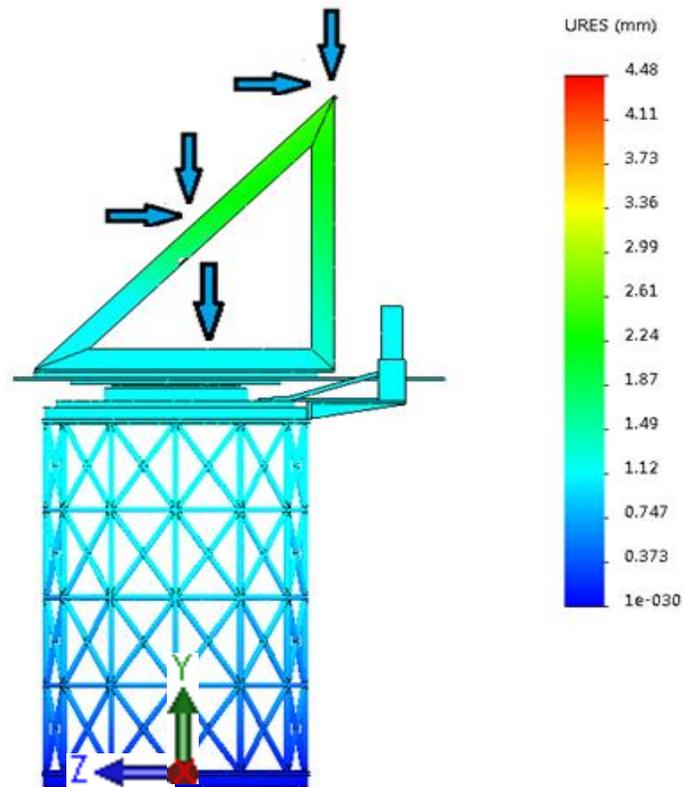


Figura 3.17 Contracciones y dilataciones térmicas en el soporte.

Estos datos nos representan el desplazamiento que se tiene en el diseño del soporte del espejo terciario considerando el incremento de temperatura y tiene los siguientes valores en los puntos de referencia A, B y C.

Tabla III.5 Desplazamiento en el soporte con temperatura.

Puntos	Desplazamiento en mm			
	X	Y	Z	Total
A	-0.58043	-1.81400	-0.80577	2.06810
B	0.622620	-2.00630	-0.83231	2.25950
C	-0.03178	-3.81060	-2.21030	4.40530

En la tabla III.5 podemos ver que el desplazamiento mayor es en el eje Y en el punto C, también de igual manera en el eje Z el desplazamiento mayor es en el punto C y en el eje X el desplazamiento mayor es en el punto B, también se observa que la mayor deformación está en el punto C.

III.2 Alternativa 2.

Se consideraron tres puntos a analizar que son los puntos importantes de soporte para la estructura del espejo terciario.

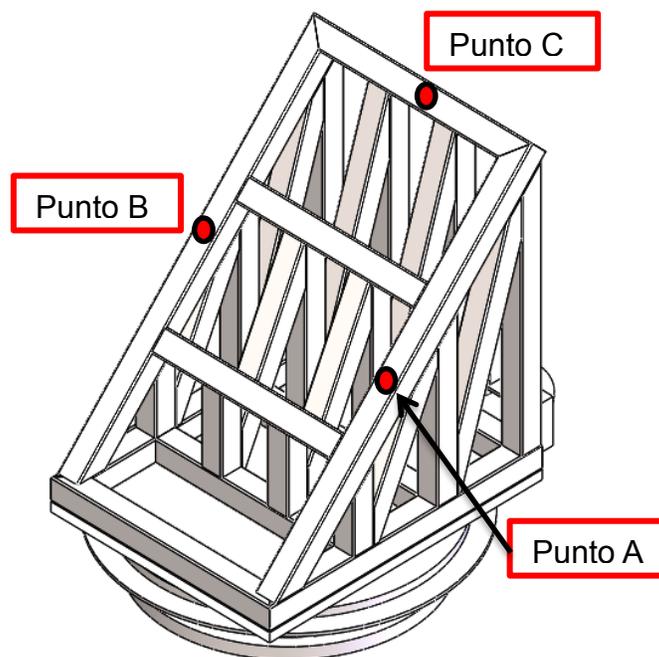


Figura 3.18 Soporte alternativa 2.

III.2.1 Estudio del soporte con velocidad del viento.

Para realizar este tipo de estudio se consideraron las condiciones más extremas del lugar donde se instalará el telescopio y están representadas en la tabla III.1.

La velocidad del viento proporcionara en el ensamble una presión de fluido que a su vez nos proporciona una flexión en nuestro ensamble, entonces al realizar el estudio es observar cómo afectara la velocidad del viento en la

estructura, entonces se realizó el estudio estático y las condiciones fronteras para su análisis donde en este estudio se incluía:

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1955.85 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa. (Ilse Plauchu Frayn).

Obteniendo los siguientes resultados:

Presión = 72854.84 Pa

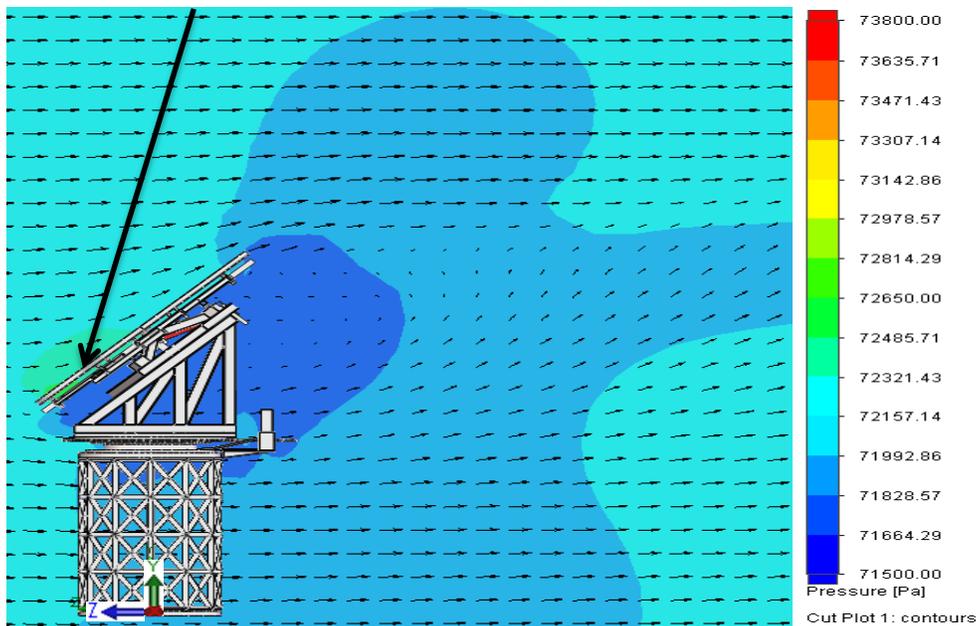


Figura 3.19 Afectación del viento sobre la estructura.

III.2.2 Estudio de las deformaciones del soporte en alternativa 2.

Después se realizó el estudio para conocer cuánto era el desplazamiento del soporte considerando los puntos A, B y C considerando los datos anteriores.

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1955.85 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa.

La gravedad de 9.81 m/s².

Se obtuvieron los siguientes resultados:

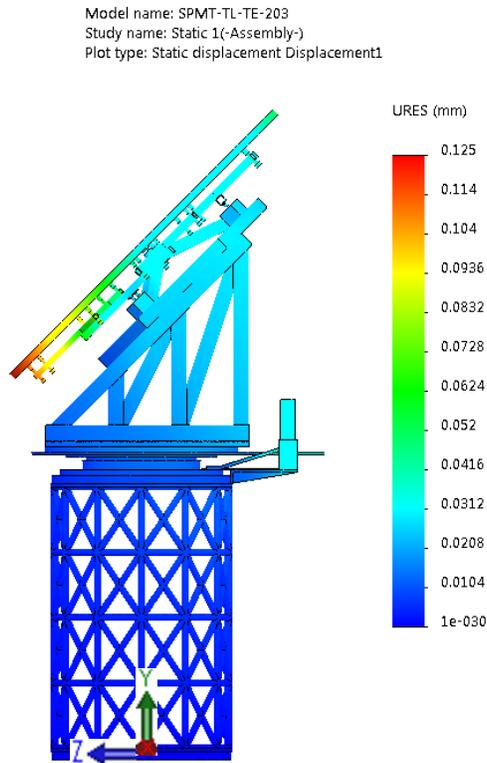


Figura 3.20 Desplazamientos sobre el soporte.

Estos datos nos representan el desplazamiento que se tiene en el diseño del soporte del espejo terciario y tiene los siguientes valores en los puntos de referencia A, B y C.

Tabla III.6 Desplazamiento en el soporte.

Puntos	Desplazamiento en mm			
	X	Y	Z	Total
A	0.00375	-0.01379	-0.01694	0.02217
B	-0.00267	-0.01379	-0.01729	0.02236
C	0.00032	-0.01506	-0.01939	0.02456

III.2.3 Gráfica de esfuerzos.

También se realizó el estudio de esfuerzos que se tiene en todo el soporte del espejo terciario.

El material de la base del espejo terciario es de cedula 40 ASTM-570 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.038×10^9 Pa. (MatWeb: Online materials Information Resource).

Límite elástico = 0.0275×10^9 Pa.

El material de soporte es de ASTM-36 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.4×10^9 Pa.

Límite elástico = 0.25×10^9 Pa.

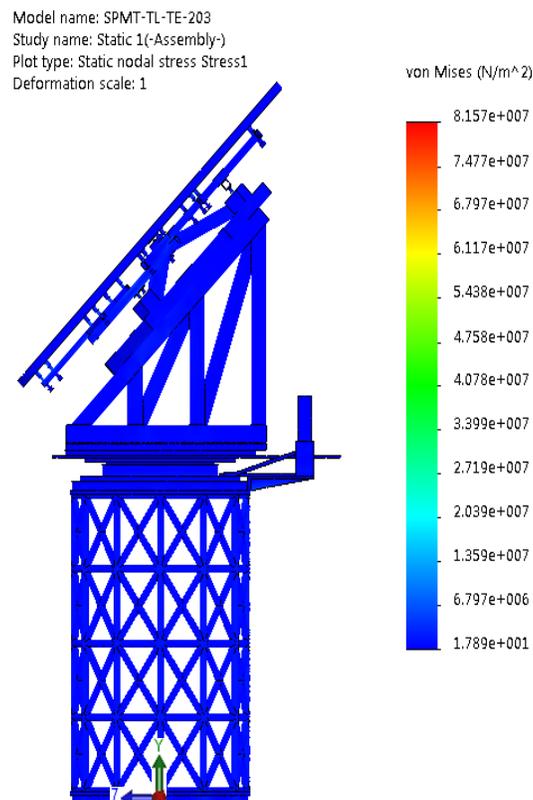


Figura 3.21 Esfuerzos en el soporte.

Observamos en la figura que el valor que presenta es de 0.013×10^9 Pa y este valor es mucho menor del que soportan el material por lo cual no tenemos problemas con el valor de esfuerzo de los materiales.

III.2.4 Desplazamiento en diferentes ángulos contiguos.

También se obtuvieron los valores de desplazamiento en diferentes ángulos contiguos cada 15° sobre el plano XZ girando el espejo sobre el eje Y de la alternativa 2 para observar cómo es su comportamiento y se obtuvieron los siguientes valores:

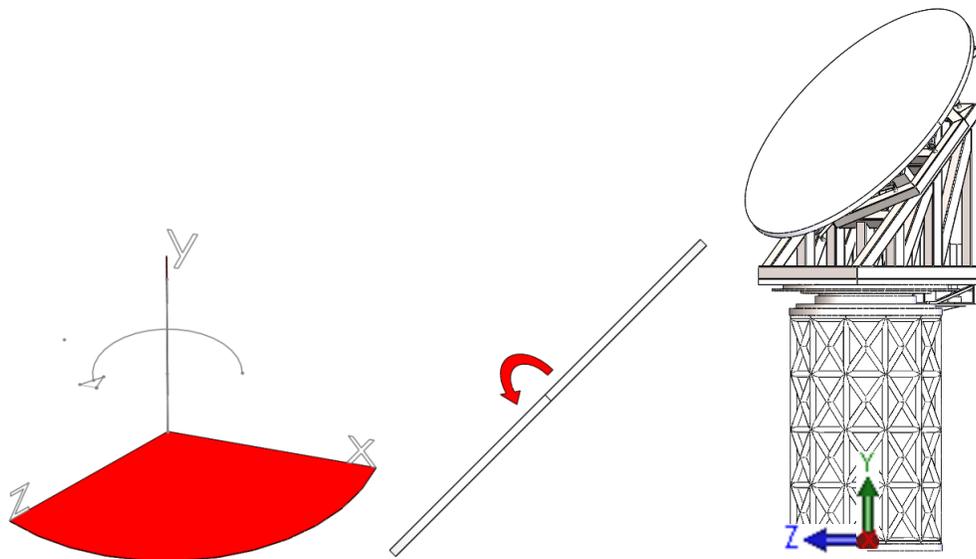


Figura 3.22 Giro del soporte del espejo terciario.

Tabla III.7 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos.

Ángulo	Desplazamiento en el soporte en los puntos (mm)		
	A	B	C
0°	0.0221	0.0223	0.0245
15°	0.0220	0.0233	0.0254
30°	0.0215	0.0237	0.0259
45°	0.0208	0.0229	0.0259
60°	0.0195	0.0203	0.0240
75°	0.0169	0.0155	0.0185
90°	0.0143	0.0109	0.0122

En la tabla III.7 podemos ver que el desplazamiento mayor en el punto A es en el ángulo de 0°, en el punto B es en el ángulo 30° y en el punto C en los ángulos 30° y 45°, también se observa que en los puntos A y B es menor la deformación que en el punto C.

III.2.5 Análisis modal.

Se realizó el estudio para conocer el tipo de frecuencias naturales para evitarlas en nuestro sistema, la más principal es por el uso de la corriente eléctrica y debemos conocer los siguientes datos:

Frecuencias de excitación.

Menor a 9 Hz por ser el primer modo del telescopio.

60 Hz frecuencia por suministro eléctrico en México.

Se realizó el estudio considerando las 10 primeras modos de frecuencias que existen en la alternativa 2 obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla III.8 Frecuencias naturales.

No. De modo	Frecuencia (rad/seg)	Frecuencia (Hertz)	Período (segundos)
1	212.03	33.745	0.029634
2	262.52	41.781	0.023934
3	280.14	44.586	0.022428
4	286.47	45.593	0.021933
5	332.81	52.968	0.018879
6	445.36	70.882	0.014108
7	483.25	76.911	0.013002
8	626.73	99.748	0.010025
9	632.05	100.59	0.009941
10	657.40	104.63	0.009557

Se observa que las frecuencias no están cercanas a los valores de 9 Hz y 60 Hz así que no tenemos problema con el ensamble del soporte terciario.

Se muestran a continuación los modos de frecuencia de la alternativa 2:

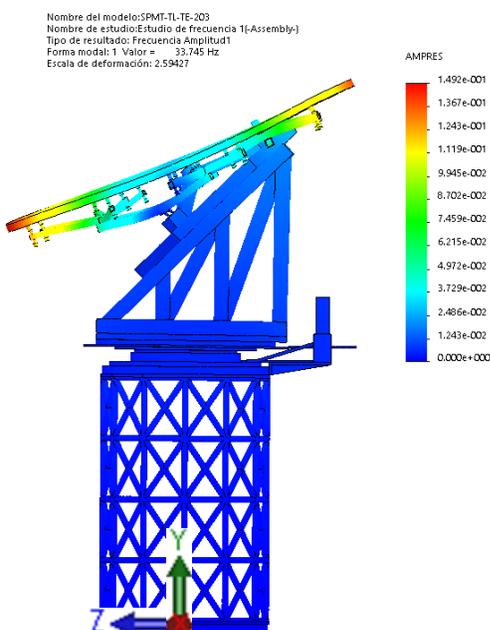


Figura 3.23 Primer modo de frecuencia natural.

Nombre del modelo: SPMT-TL-TE-203
Nombre de estudio: Estudio de frecuencia 1(Assembly)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud2
Forma modal: 2 Valor = 41.781 Hz
Escala de deformación: 3.62406

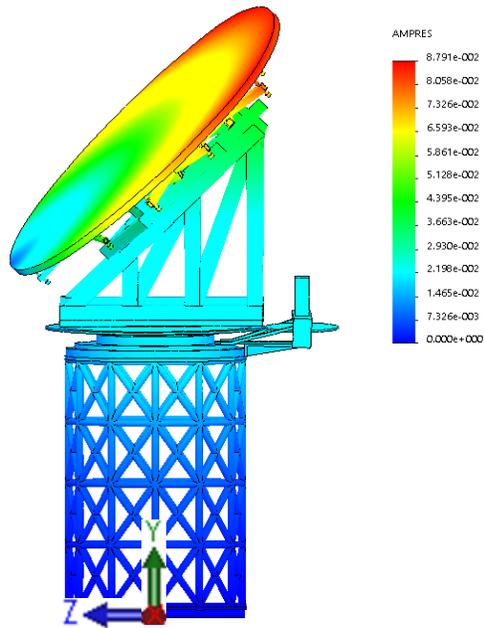


Figura 3.24 Segundo modo de frecuencia natural.

Nombre del modelo: SPMT-TL-TE-203
Nombre de estudio: Estudio de frecuencia 1(Assembly)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud3
Forma modal: 3 Valor = 44.386 Hz
Escala de deformación: 3.25933

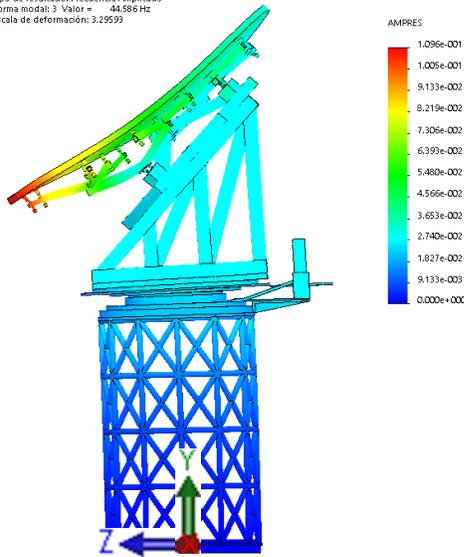


Figura 3.25 Tercer modo de frecuencia natural.

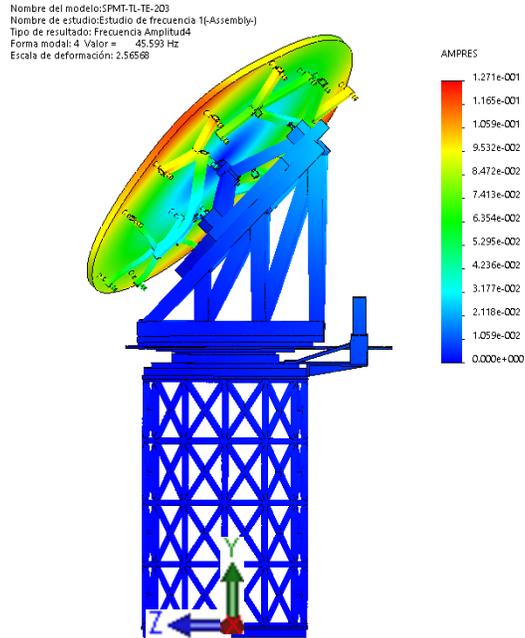


Figura 3.26 Cuarto modo de frecuencia natural.

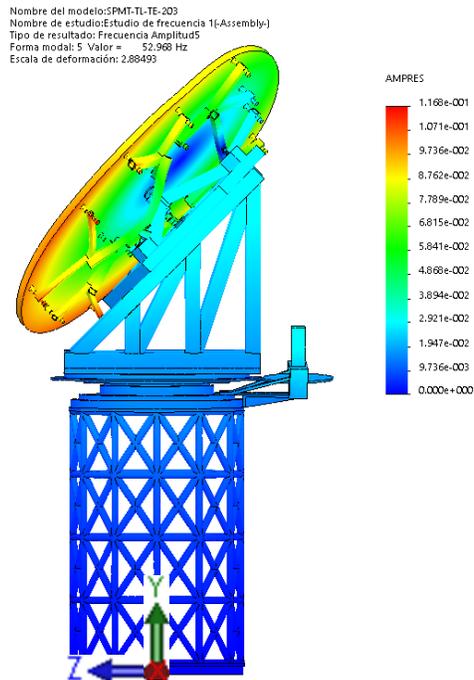


Figura 3.27 Quinto modo de frecuencia natural.

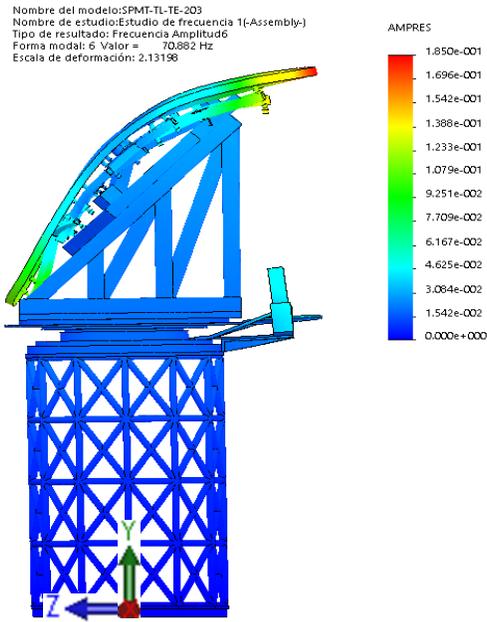


Figura 3.28 Sexto modo de frecuencia natural.

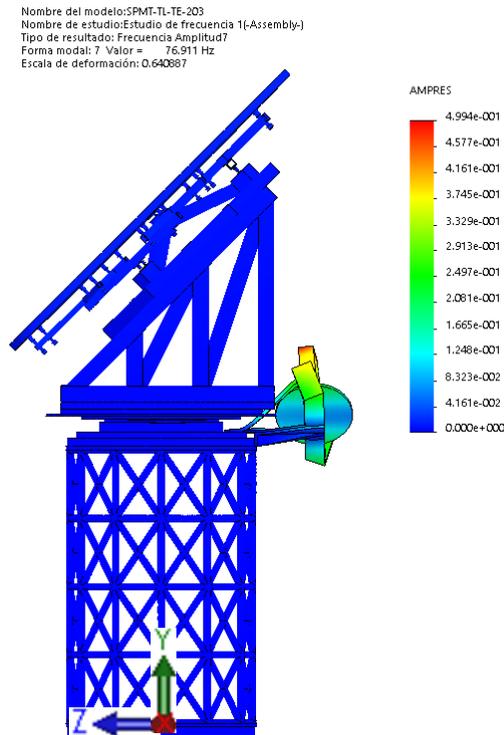


Figura 3.29 Séptimo modo de frecuencia natural.

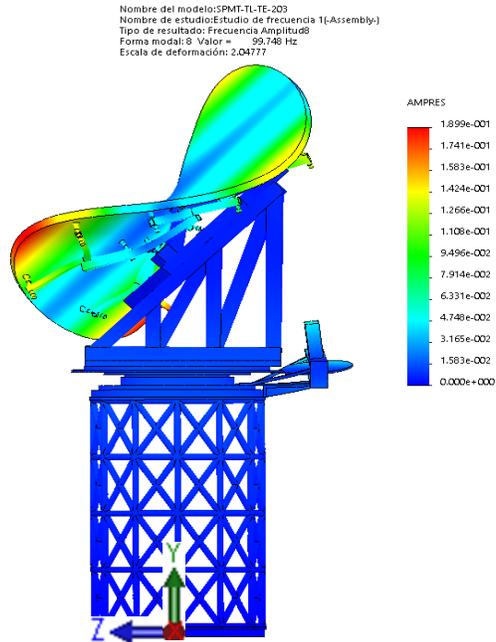


Figura 3.30 Octavo modo de frecuencia natural.

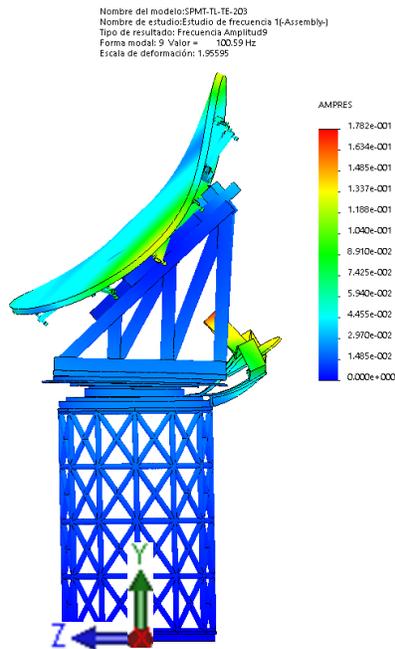


Figura 3.31 Noveno modo de frecuencia natural.

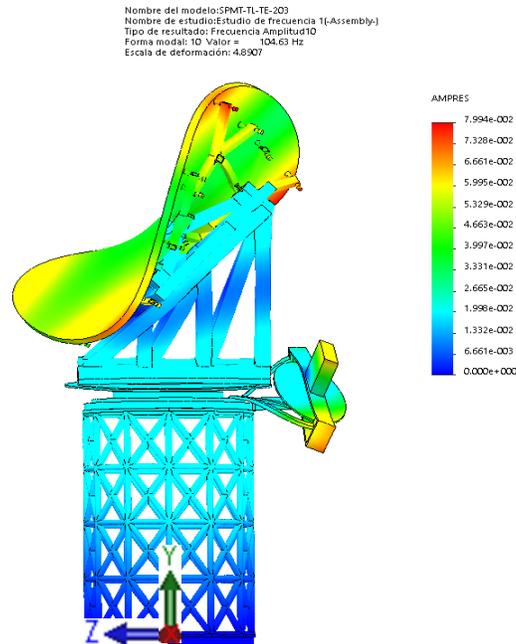


Figura 3.32 Decimo modo de frecuencia natural.

III.2.6 Contracciones y dilataciones térmicas.

También se realizó el estudio de acuerdo al valor de la temperatura que es de -25°C a 25°C y considerando todas las condiciones anteriores, además por situaciones del software se sustituyó la parte de la estructura del espejo terciario por las fuerzas en los tres puntos principales del soporte representadas en la figura 3.33.

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1955.85 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa.

La gravedad de 9.81 m/s^2 .

La temperatura de -25°C a 25°C .

Se obtuvo los siguientes resultados:

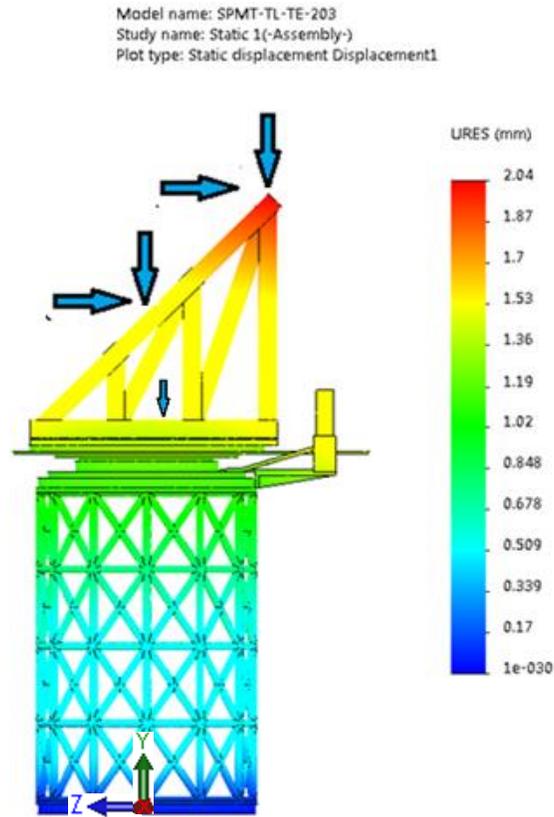


Figura 3.33 Contracciones y dilataciones térmicas en el soporte.

Estos datos nos representan el desplazamiento que se tiene en el diseño del soporte del espejo terciario considerando el incremento de temperatura y tiene los siguientes valores en los puntos de referencia A, B y C.

Tabla III.9 Desplazamiento en el soporte con temperatura.

Puntos	Desplazamiento en mm			
	X	Y	Z	Total
A	-0.2686	-1.6081	-0.0180	1.6304
B	0.2782	-1.6255	-0.0023	1.6491
C	-0.0115	-1.9615	-0.3110	1.9860

En la tabla III.9 podemos ver que el desplazamiento mayor es en el eje Y en el punto C, también de igual manera en el eje Z el desplazamiento mayor es en el punto C y en el eje X el desplazamiento mayor es en el punto B, también se observa que la mayor deformación está en el punto C.

III.3 Alternativa 3.

Se consideraron tres puntos a analizar que son los puntos importantes de soporte para la estructura del espejo terciario.

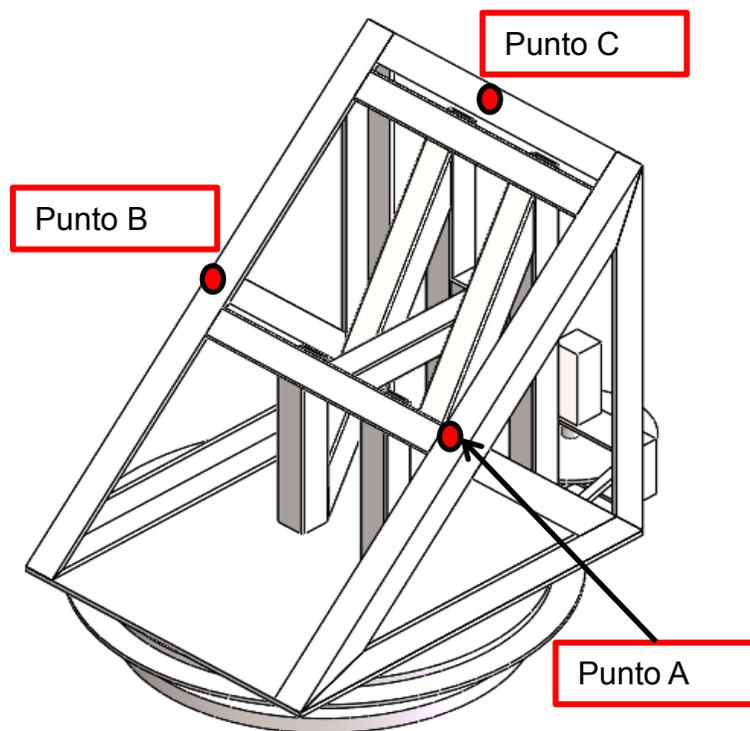


Figura 3.34 Soporte alternativa 3.

III.3.1 Estudio del soporte con velocidad del viento.

Para realizar este tipo de estudio se consideraron las condiciones más extremas del lugar donde se instalará el telescopio y están representadas en la tabla III.1.

La velocidad del viento proporcionara en el ensamble una presión de fluido que a su vez nos proporciona una flexión en nuestro ensamble, entonces al

realizar el estudio es observar cómo afectara la velocidad del viento en la estructura, entonces se realizó el estudio estático y las condiciones fronteras para su análisis donde en este estudio se incluía:

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1697.68 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa. (Ilse Plauchu Frayn).

Obteniendo los siguientes resultados:

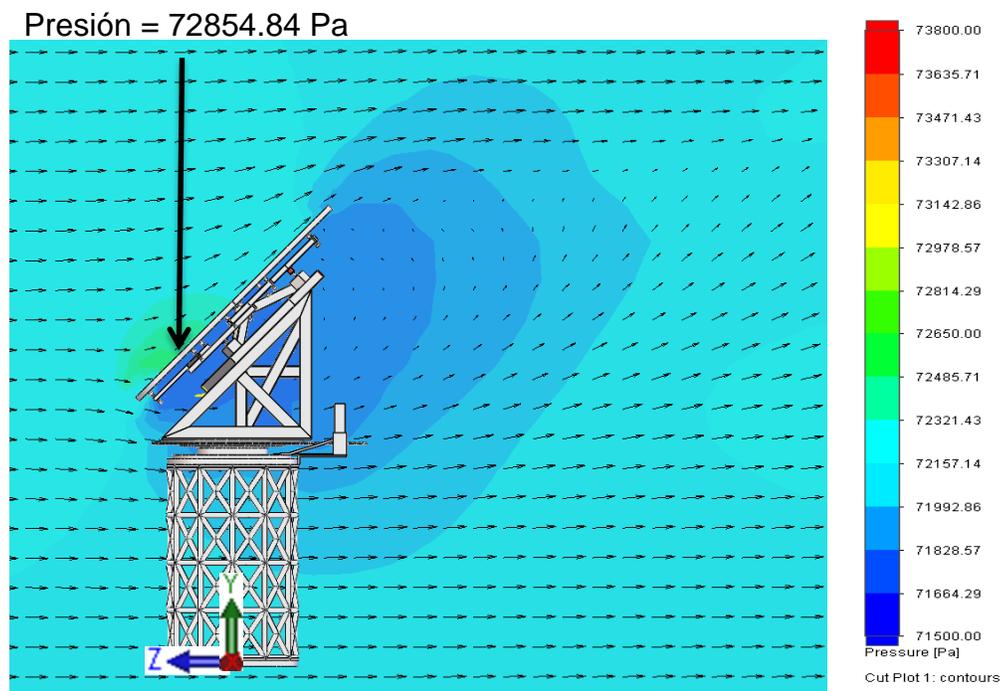


Figura 3.35 Afectación del viento sobre la estructura.

III.3.2 Estudio de las deformaciones del soporte en alternativa 3.

Después se realizó el estudio para conocer cuánto era el desplazamiento del soporte considerando los puntos A, B y C considerando los datos anteriores.

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1697.68 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa.

La gravedad de 9.81 m/s².

Se obtuvieron los siguientes resultados:

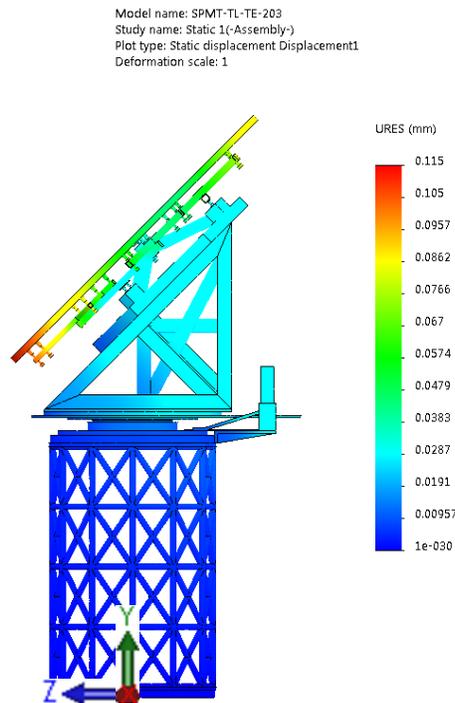


Figura 3.36 Desplazamientos sobre el soporte.

Estos datos nos representan el desplazamiento que se tiene en el diseño del soporte del espejo terciario y tiene los siguientes valores en los puntos de referencia A, B y C.

Tabla III.10 Desplazamiento en el soporte.

Puntos	Desplazamiento en mm			
	X	Y	Z	Total
A	-0.00031	-0.01941	-0.02667	0.03299
B	-0.00331	-0.02571	-0.03370	0.04252
C	-0.00047	-0.04033	-0.04942	0.06379

III.3.3 Gráfica de esfuerzos.

También se realizó el estudio de esfuerzos que se tiene en todo el soporte del espejo terciario.

El material de la base del espejo terciario es de cedula 40 ASTM-570 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.38×10^9 Pa. (MatWeb: Online materials Information Resource).

Límite elástico = 0.275×10^9 Pa.

El material de soporte es de ASTM-36 y sus principales propiedades son:

Esfuerzo a tracción = 0.4×10^9 Pa.

Límite elástico = 0.25×10^9 Pa.

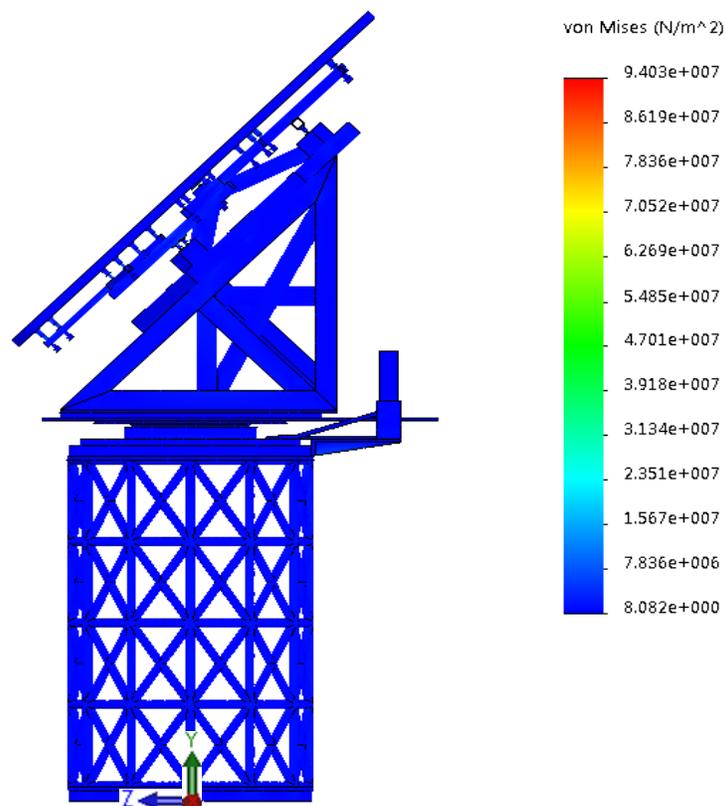


Figura 3.37 Esfuerzos en el soporte.

III.3.4 Desplazamiento en diferentes ángulos contiguos.

También se obtuvieron los valores de desplazamiento en diferentes ángulos contiguos cada 15° sobre el plano XZ girando el espejo sobre el eje Y de la alternativa 2 para observar cómo es su comportamiento y se obtuvieron los siguientes valores:

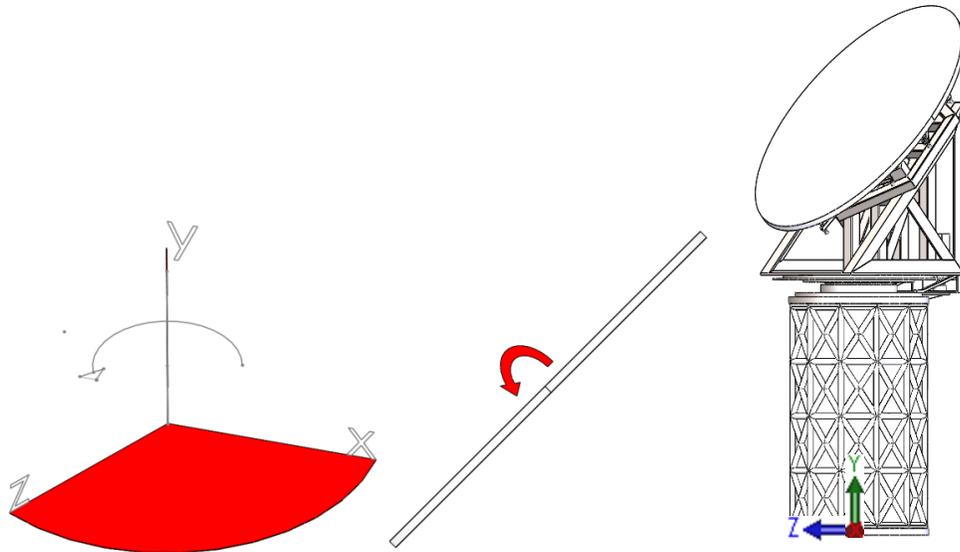


Figura 3.38 Giro del soporte del espejo terciario.

Tabla III.11 Desplazamiento en el soporte en diferentes ángulos.

Ángulo	Desplazamiento en el soporte en los puntos (mm)		
	A	B	C
0°	0.0329	0.0425	0.0637
15°	0.0324	0.0429	0.0634
30°	0.0309	0.0421	0.0610
45°	0.0293	0.0403	0.0585
60°	0.0270	0.0348	0.0511
75°	0.0243	0.0273	0.0397
90°	0.0225	0.0203	0.0267

En la tabla III.11 podemos ver que el desplazamiento mayor en el punto A es en el ángulo de 0°, en el punto B es en el ángulo 15° y en el punto C en el ángulo 0°, también se observa que en los puntos A y B es menor la deformación que en el punto C.

III.3.5 Análisis modal.

Se realizó el estudio para conocer el tipo de frecuencias naturales para evitarlas en nuestro sistema, la más principal es por el uso de la corriente eléctrica y debemos conocer los siguientes datos:

Frecuencias de excitación.

Menor a 9 Hz por ser el primer modo del telescopio.

60 Hz frecuencia por suministro eléctrico en México.

Se realizó el estudio considerando las 10 primeras modos de frecuencias que existen en la alternativa 3 obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla III.12 Frecuencias naturales.

No. De modo	Frecuencia (rad/seg)	Frecuencia (Hertz)	Período (segundos)
1	188.74	30.039	0.03329
2	218.44	34.766	0.02876
3	258.51	41.144	0.02430
4	277.30	44.134	0.02265
5	325.84	51.860	0.01928
6	448.00	71.301	0.01402
7	464.28	73.892	0.01353
8	576.47	91.748	0.01089
9	589.46	93.816	0.01065
10	628.40	100.010	0.00999

Se observa que las frecuencias no están cercanas a los valores de 9 Hz y 60 Hz así que no tenemos problema con el ensamble del soporte terciario.

Se muestran a continuación los modos de frecuencia de la alternativa 3:

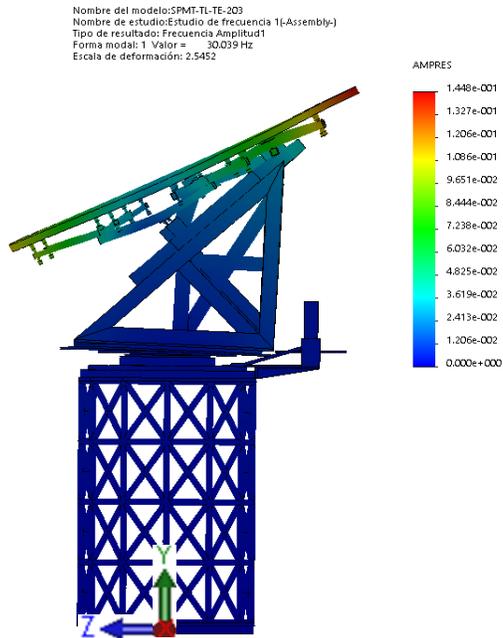


Figura 3.39 Primer modo de frecuencia natural.

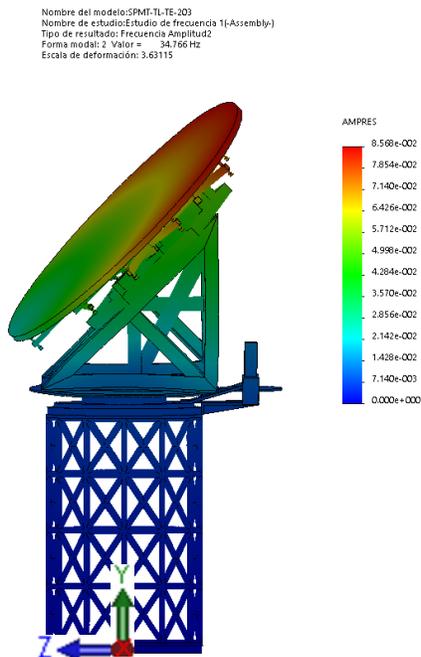


Figura 3.40 Segundo modo de frecuencia natural.

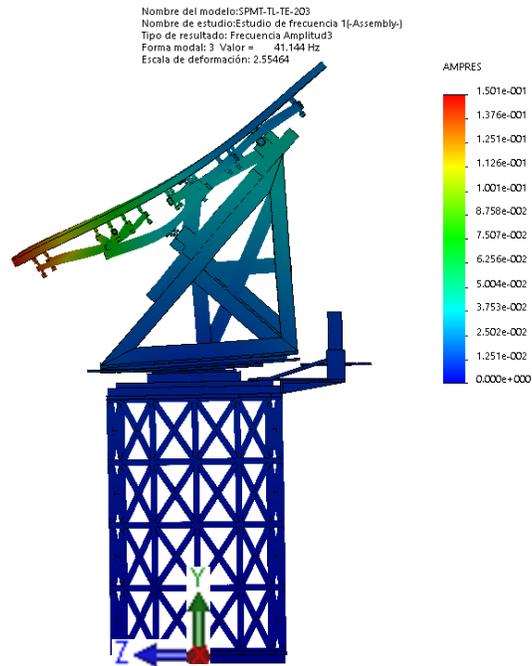


Figura 3.41 Tercer modo de frecuencia natural.

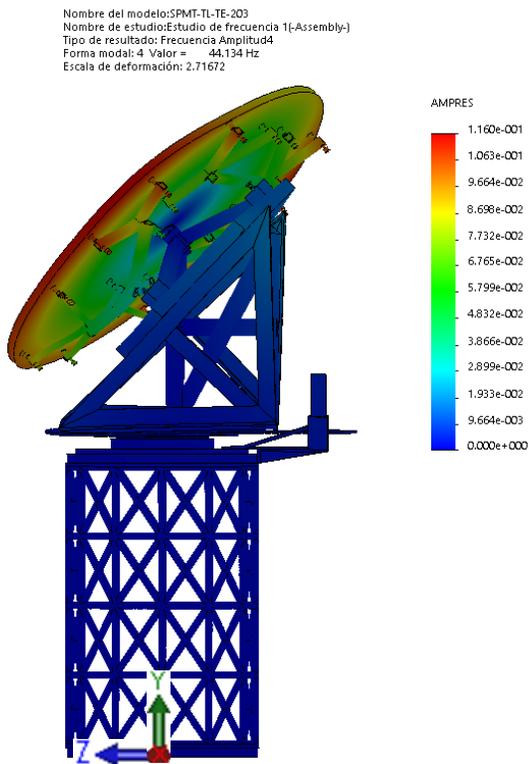


Figura 3.42 Cuarto modo de frecuencia natural.

Nombre del modelo:SPMT-TL-TE-203
Nombre de estudio:Estudio de frecuencia 1(-Assembly-)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud5
Forma modal: 5 Valor = 51.86 Hz
Escala de deformación: 2.89612

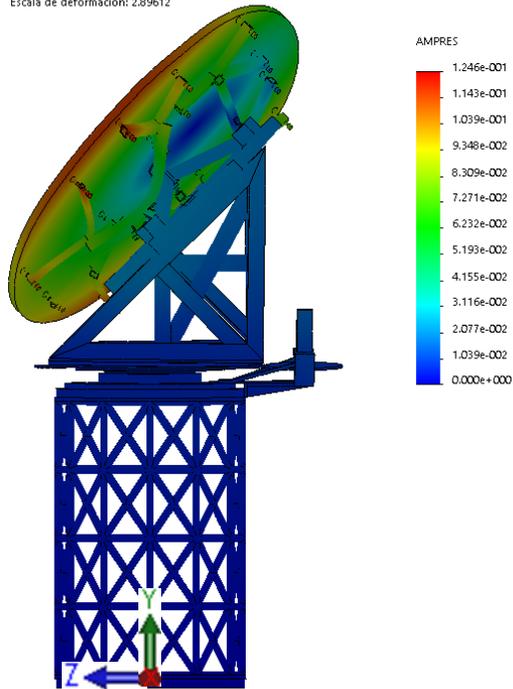


Figura 3.43 Quinto modo de frecuencia natural.

Nombre del modelo:SPMT-TL-TE-203
Nombre de estudio:Estudio de frecuencia 2(-Assembly-)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud6
Forma modal: 6 Valor = 71.301 Hz
Escala de deformación: 2.09201

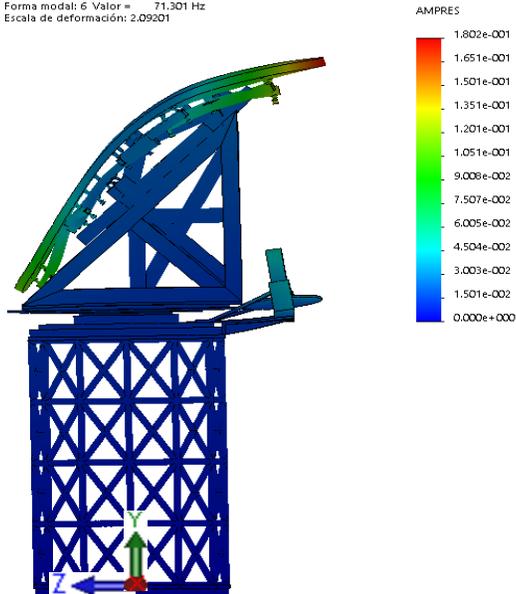


Figura 3.44 Sexto modo de frecuencia natural.

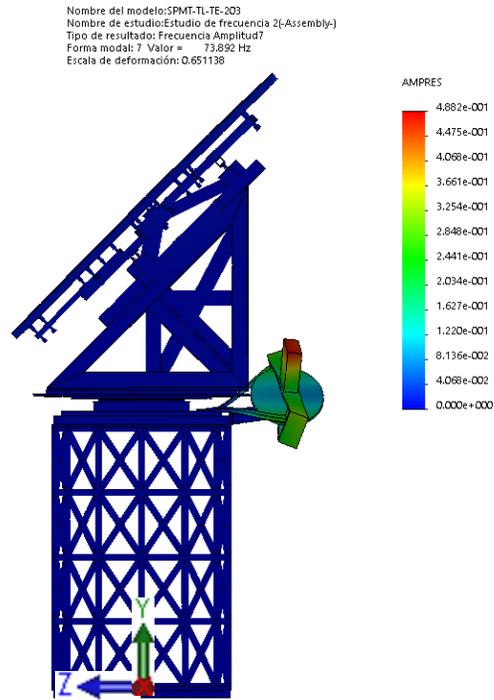


Figura 3.45 Séptimo modo de frecuencia natural.

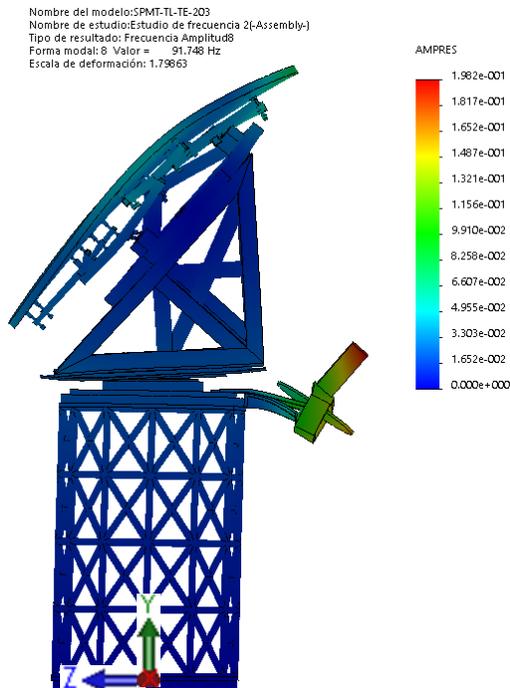


Figura 3.46 Octavo modo de frecuencia natural.

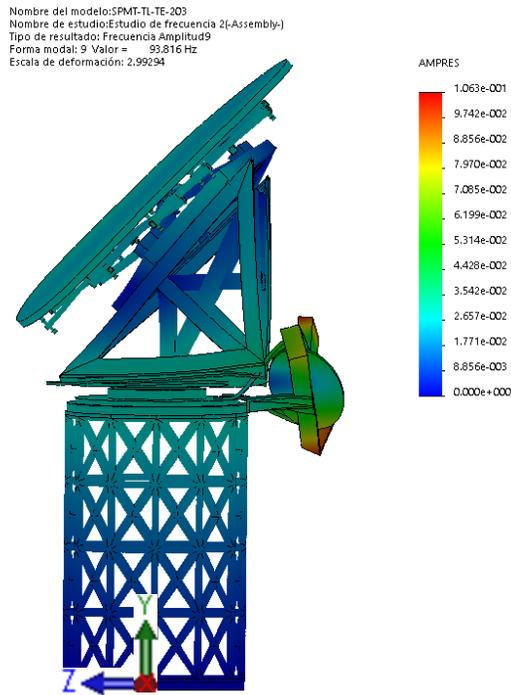


Figura 3.47 Noveno modo de frecuencia natural.

III.3.6 Contracciones y dilataciones térmicas.

También se realizó el estudio de acuerdo al valor de la temperatura que es de -25°C a 25°C y considerando todas las condiciones anteriores, además por situaciones del software se sustituyó la parte de la estructura del espejo terciario por las fuerzas en los tres puntos principales del soporte representadas en la figura 3.48.

La velocidad del viento de 38 m/s.

La propia masa de la estructura de 1955.85 kg.

La presión atmosférica de 72000 Pa.

La gravedad de 9.81 m/s^2 .

La temperatura de -25°C a 25°C .

Se obtuvo los siguientes resultados:

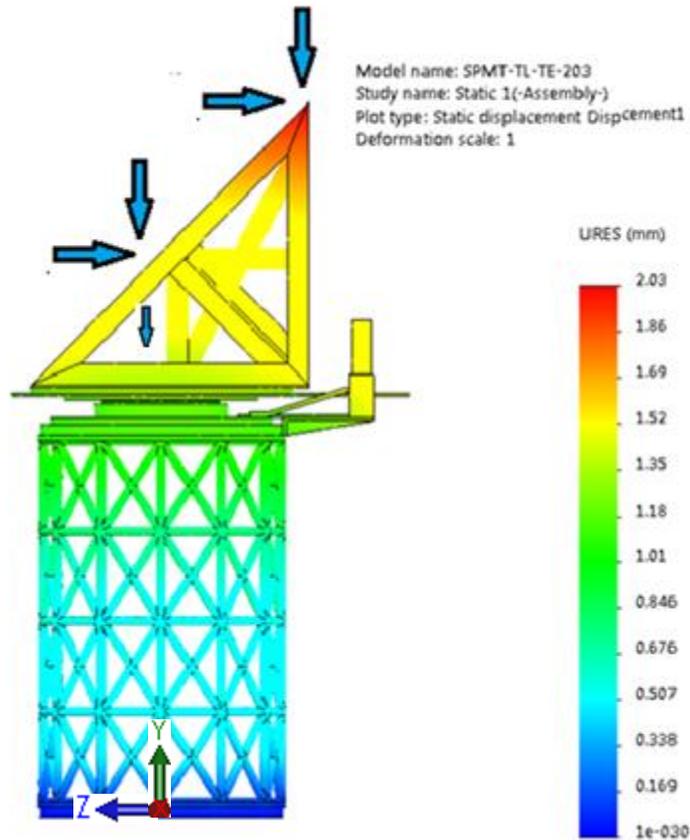


Figura 3.48 Contracciones y dilataciones térmicas en el soporte.

Estos datos nos representan el desplazamiento que se tiene en el diseño del soporte del espejo terciario considerando el incremento de temperatura y tiene los siguientes valores en los puntos de referencia A, B y C.

Tabla III.13 Desplazamiento en el soporte con temperatura.

Puntos	Desplazamiento en mm			
	X	Y	Z	Total
A	-0.2821	-1.5372	-0.0457	1.5636
B	0.2743	-1.6264	0.0270	1.6496
C	-0.0154	-1.9771	0.3397	2.0057

En la tabla III.13 podemos ver que el desplazamiento mayor es en el eje Y en el punto C, también de igual manera en el eje Z el desplazamiento mayor es en el punto C y en el eje X el desplazamiento mayor es en el punto A, también se observa que la mayor deformación está en el punto C.

III.3.7 Validación de una parte del perfil.

También se validó una parte del perfil del soporte para comprobar los datos del software con los cálculos teóricos en temperatura, obteniendo los siguientes resultados.

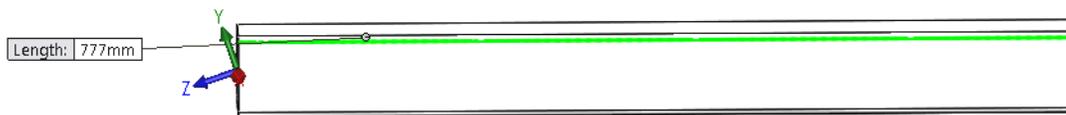


Figura 3.49 Tipo de estructura a ser analizada.

Ecuación de dilatación Lineal

$$L = l_0 * (1 + (\gamma * \Delta t)) \quad (3.1)$$

L = longitud.

l_0 = Longitud inicial.

γ = coeficiente de expansión térmica.

Δt = incremento de temperatura.

$$L = 777 * (1 + (0.000015 * 50)) = 777.58275\text{mm}$$

Y de acuerdo con el análisis del software tenemos:

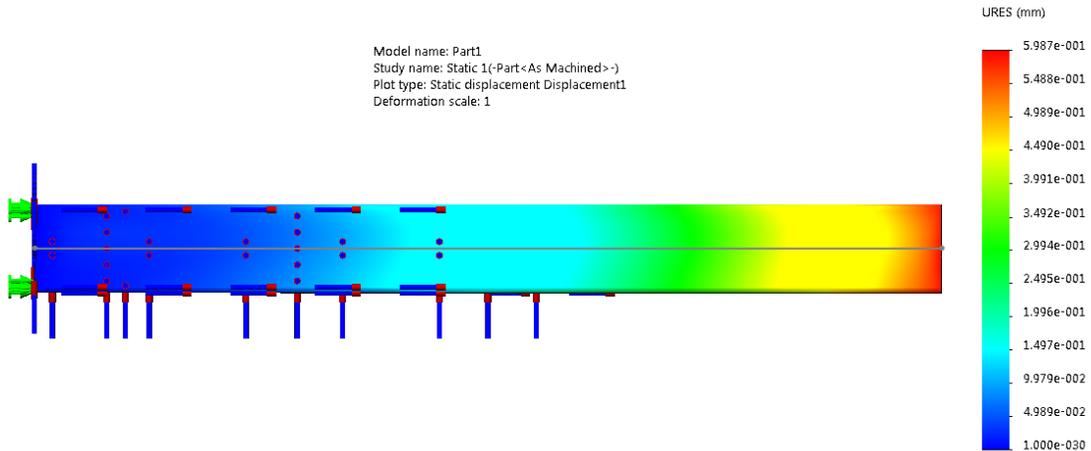


Figura 3.50 Análisis de software.

Por lo tanto el desplazamiento por medio del software sería:

$$L = 777 + 0.5897 = 777.5897 \text{ mm.}$$

La fórmula para calcular la deformación es:

$$\delta = \varepsilon L = \frac{\sigma}{E} L = \frac{P L}{A E} \quad (3.2)$$

P = carga.

L = longitud.

A = área.

E = módulo de Young.

Por lo tanto la deformación en la barra teniendo los siguientes valores:

$$P = 981 \text{ N}$$

$$A = 0.00136427 \text{ m}^2$$

$$L = 0.777 \text{ m}$$

$$E = 0.2 \times 10^{12} \text{ PA}$$

Por lo tanto la deformación es:

$$\delta = \frac{P L}{A E} = \frac{981 (0.777)}{0.00136427 (0.2 \times 10^{12})} = 2.79357 \times 10^{-6} \text{ m} = 2.79357 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Realizando el cálculo por medio del software tenemos:

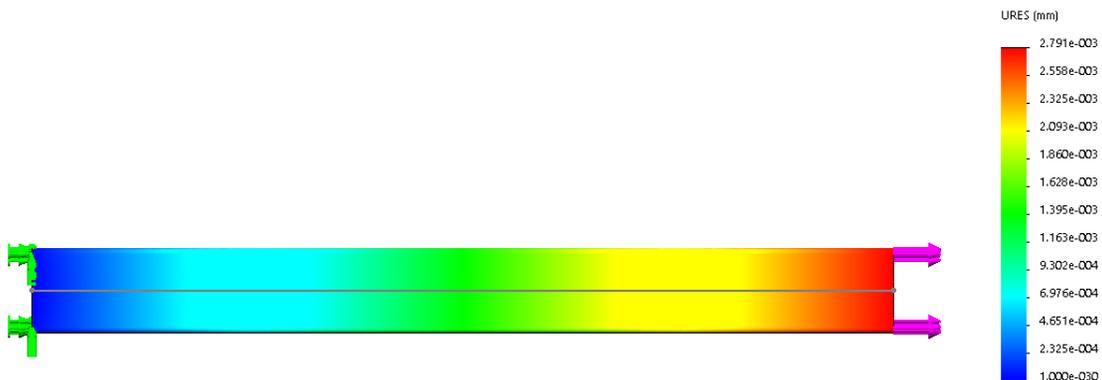


Figura 3.51 Análisis de software con carga.

Tenemos que la deformación total de la barra es la deformación por la carga de la fuerza en la barra más la deformación por temperatura es:

$$\delta = 0.58275 + 0.002793 = 0.585543 \text{ mm por calculo teórico.}$$

$$\delta = 0.5897 + 0.002791 = 0.595452 \text{ mm por software.}$$

CAPÍTULO 4

COMPARACIONES DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

IV.1 Comparación de desplazamientos a diferentes ángulos

Los resultados de desplazamiento de las alternativas en diferentes ángulos contiguos cada 15° sobre el plano XZ.

Tabla IV.1 Desplazamiento en el soporte a diferentes ángulos.

Ángulo	Desplazamiento en los puntos mm								
	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0°	0.1364	0.1446	0.1292	0.0221	0.0223	0.0245	0.0329	0.0425	0.0637
15°	0.1359	0.1513	0.1356	0.0220	0.0233	0.0254	0.0324	0.0429	0.0634
30°	0.1359	0.1513	0.1356	0.0215	0.0237	0.0259	0.0309	0.0421	0.0610
45°	0.0895	0.0945	0.0747	0.0208	0.0229	0.0259	0.0293	0.0403	0.0585
60°	0.1111	0.1344	0.1154	0.0195	0.0203	0.0240	0.0270	0.0348	0.0511
75°	0.0982	0.1046	0.0889	0.0169	0.0155	0.0185	0.0243	0.0273	0.0397
90°	0.0868	0.0742	0.0582	0.0143	0.0109	0.0122	0.0225	0.0203	0.0267

Se observa que la alternativa 1 tuvo los mayores desplazamientos, también se observa que la alternativa 2 tuvo los menores desplazamientos.

IV.2 Comparación de desplazamientos considerando temperatura

Tabla IV.2 Desplazamiento en el soporte considerando temperatura.

Desplazamiento en los puntos considerando temperatura mm								
Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
A	B	C	A	B	C	A	B	C
2.0681	2.2595	4.4053	1.6304	1.6491	1.9860	1.5636	1.6491	2.0057

Se observa que la alternativa 1 con respecto a temperatura tuvo los mayores desplazamientos, también se observa que la alternativa 2 con respecto a la alternativa 3 sus valores son muy parecidos, en el punto A con un valor menor

0.0668mm en la alternativa 3, en el punto B son iguales y en el punto C con un valor menor 0.0197mm en la alternativa 2.

IV.3 Comparación de otras características

Tabla IV.3 Otras características.

Resumen de resultados mm			
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Factor de seguridad	3.5	3.09	4.1
Masa	1400 kg	1956 Kg	1698 Kg
Frecuencia	No cumple	Cumple	Cumple

Se observa que en análisis modal la alternativa 1 no cumple por un modo de frecuencia muy cercano a la frecuencia de suministro eléctrico en México, y se tiene un factor de seguridad mejor en la alternativa 3 que en la alternativa 2, y además un menor peso en la alternativa 3 que en la alternativa 2.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y APORTACIONES

V.1 Conclusiones

La masa de 1698 kg de la alternativa 3 tiene una reducción de 13.19% con respecto a la alternativa 2.

La deformación en los puntos de la alternativa 3 por centésimas es un poco mejor con respecto a la alternativa 2 sin considerar el valor de temperatura.

La deformación en los puntos con el valor de temperatura de la alternativa 3 son casi idénticas con respecto a la alternativa 2, en el punto A con un valor menor 0.0668 mm en la alternativa 3, en el punto B son iguales y en el punto C con un valor menor 0.0197 mm en la alternativa 2.

El factor de seguridad 4.1 de la alternativa 3 tiene un incremento de 32.68% con respecto a la alternativa 2.

Por lo tanto la alternativa 3 es la mejor opción respecto a diseño.

Se cuantifica el error de posición por desplazamiento respecto a carga de viento vs orientación. Como resultado se obtiene no ser un parámetro significativo, considerándose estable en +/- 0.001 mm.

Se cuantifica el error de posición por desplazamiento respecto a temperatura en cada eje con respecto a cada punto.

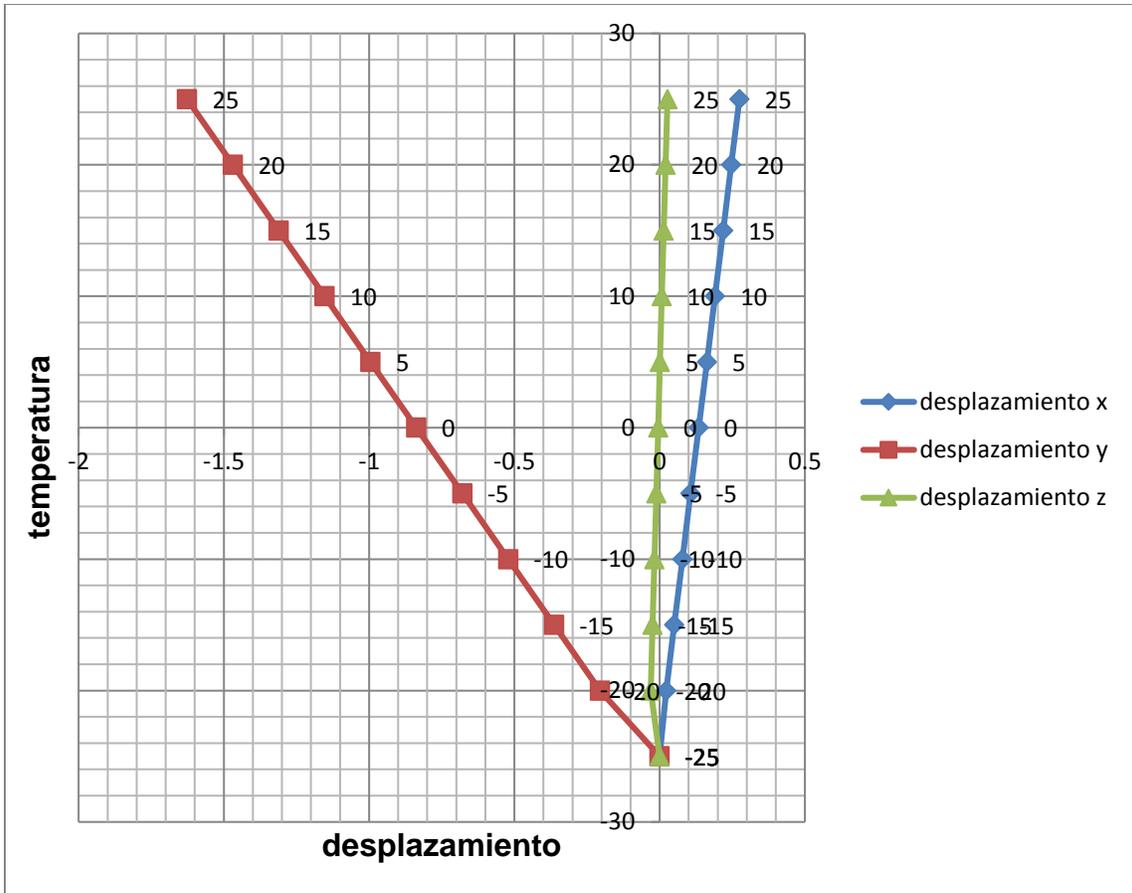


Figura 5.1 Gráfica en el punto A.

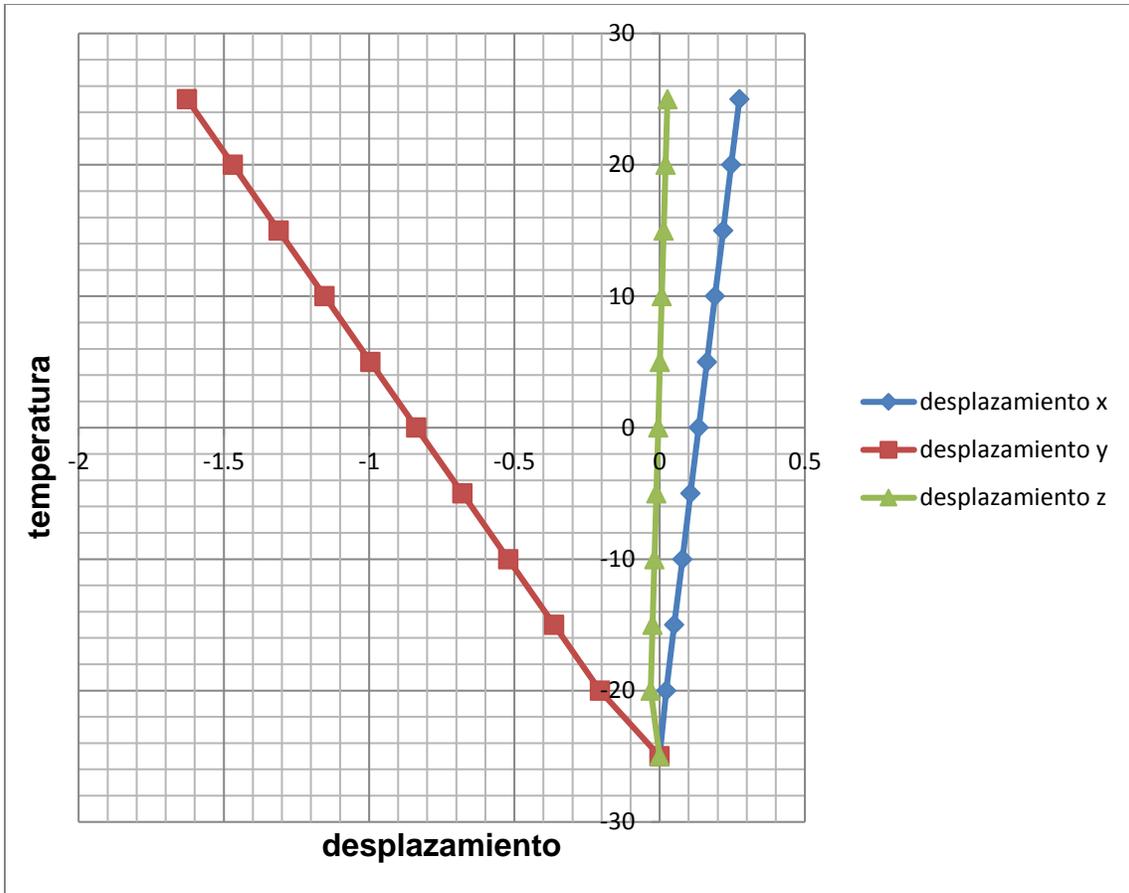


Figura 5.2 Gráfica en el punto B.

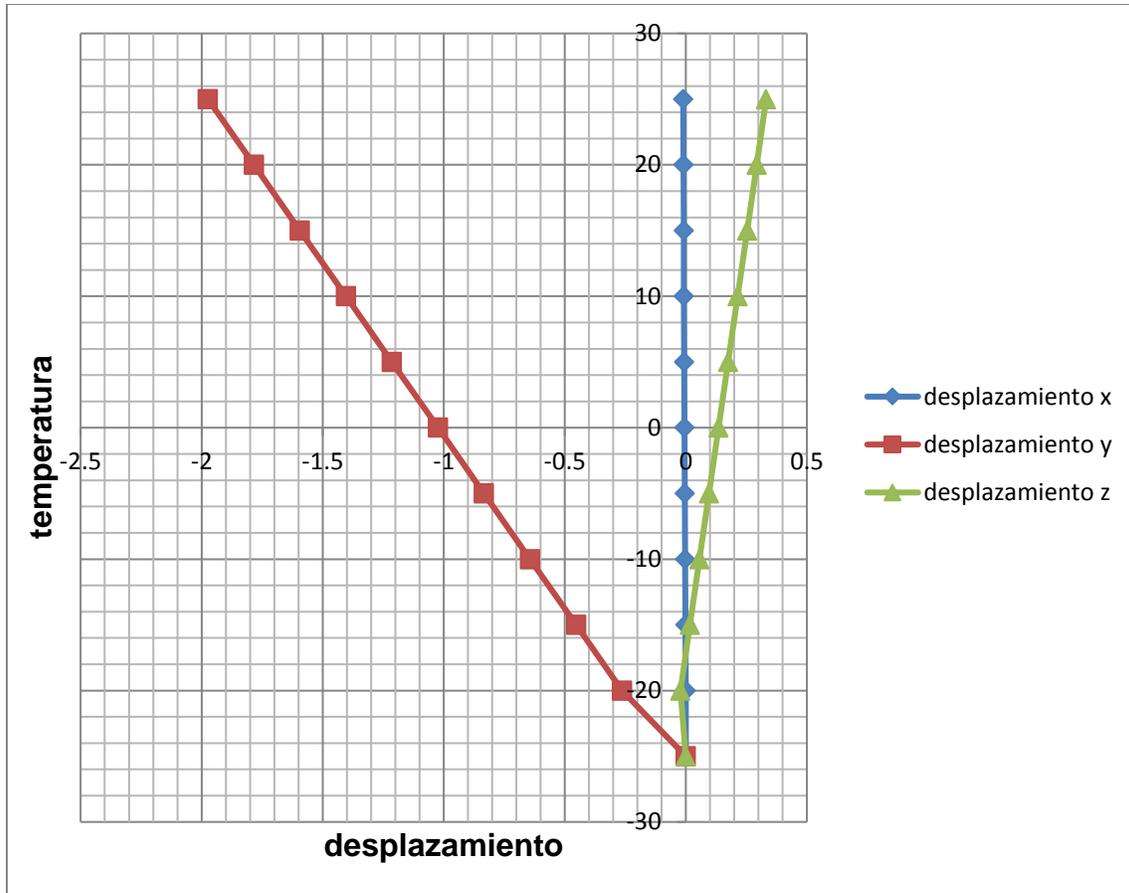


Figura 5.3 Gráfica en el punto C.

V.2 Aportaciones

Fue posible evaluar cargas de viento y su efecto en deformación sobre la estructura del espejo terciario.

Diseño y optimización de masa, esfuerzo y deformación.

Conocimiento del efecto de la temperatura sobre la estructura.

Información de la variación de deformación y desplazamiento al tener fenómenos acoplados de viento, temperatura y masa propios.

Conocimiento del factor de seguridad de estructura por simulación.

De la caracterización de desplazamiento contra temperatura se deriva el ajuste en posicionamiento u orientación del espejo terciario por medio de software para seguimiento de ruta objetivo.

Se comprueba la hipótesis de: es posible diseñar un sistema de soporte que resista cargas de viento, efectos de variación de temperatura y restricciones de vibración obteniéndose rigidez y estabilidad del soporte del espejo terciario del TSPM.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Ulich, J. M. (1980). *the multiple mirror telescope*. Recuperado el 15 de noviembre de 2016, de <https://www.mmt.org/node/442>
2. Las Campanas Observatory Carnegie Institution of Washington. (s.f.). *Magellan Telescope*. **Recuperado el 20 de octubre de 2016, de** <http://www.lco.cl/telescopes-information/magellan/telescopes-information/magellan/>
3. Optical design of the Magellan Project 6.5-meter telescope, Proc. SPIE 2199, Advanced Technology Optical Telescopes V, 558 (June 1, 1994); doi:10.1117/12.176223; <http://dx.doi.org/10.1117/12.176223>
4. *Gran Telescopio CANARIAS - Fecyt*. (s.f.). Recuperado el 15 de diciembre de 2016, de [file:///C:/Users/Alberto/Downloads/grantelescopiodecanarias%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Alberto/Downloads/grantelescopiodecanarias%20(1).pdf)
5. Status of the design and fabrication of the GTC mirrors, Proc. SPIE 4003, Optical Design, Materials, Fabrication, and maintenance, 24 (July 20,2000); doi:10.1117/12.391519; <http://dx.doi.org/10.1117/12.391519>
6. THIRTY METER TELESCOPE. (s.f.). *El telescopio: Óptica | Telescopio de Treinta Metros*. Recuperado el Noviembre de 15 de 2016, de www.tmt.org/observatory/telescope/optics
7. Large Binocular Telescope M3 units design proc. SPIE 4004, Telescope Structures, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning, (2 August 2000); doi: 10.1117/12.393902
8. Natalia R. Zelman. (29 de septiembre de 2004). *the tertiary mirror*. Recuperado el 13 de diciembre de 2016, de <http://www.gtcdigital.net/noticias.php?id=54&lang=en>

9. AMOS. (s.f.). *Gran Telescopio Canarias*. Recuperado el 20 de 10 de 2016, de http://www.amos.be/mobile/en/detail_12.html
10. *Gran Telescopio CANARIAS*. (s.f.). Recuperado el 12 de Septiembre de 2016, de <http://www.gtcdigital.net/noticias.php?id=54&lang=en>
11. *MatWeb: Online materials Information Resource*. (s.f.). Recuperado el 10 de octubre de 2016, de www.matweb.com/
12. Ilse Plauchu Frayn. (s.f.). *Observatorio Astronómico Nacional de San pedro Mártir - UNAM*. Recuperado el 13 de Octubre de 2016, de <http://www.astrossp.unam.mx/~resast/clima/climaweb/barom.html>
13. *Mechanical conceptual design of 6.5 meter telescope TSPM Proc. SPIE 9906; Ground-based and Airborne Telescope VI, 99062E (July 27, 2016); doi10.111712.2232666*
14. *El telescopio: Óptica | Telescopio de Treinta Metros. (s.f.)*. Obtenido de www.tmt.org/observatory/telescope/optics
15. *Nivel sistema de revisión de diseño preliminar | Telescopio Gigante de M.. (18 de diciembre de 2013)*. Obtenido de SYSTEM LEVEL PRELIMINARY DESIGN REVIEW: <https://www.gmto.org/resources/slpdr/>
16. *European Southern Observatory 1998. (1998). The VLT White Book. Paranal, Chile: ESO.*

NOMENCLATURA

MMT Telescopio de espejos múltiples

TSPM Telescopio San Pedro Mártir

GTC Gran telescopio Canarias

r.m.s. Valor cuadrático medio

Nm Nanómetros

FEM Método de los elementos finitos

TMT Telescopio de treinta metros

LBT Telescopio binocular grande