



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Análisis estructural del Leighton Chajnantor Telescope durante eventos sísmicos en su nueva ubicación en el cerro Toco

Sergio Ignacio Rodríguez Villarroel

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dr.-Ing. Cristian Canales C.

Julio 2025
Concepción, Chile

©2025 Sergio Ignacio Rodríguez Villarroel

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento,
incluyendo la cita bibliográfica del documento

Resumen

El presente trabajo aborda el análisis estructural del radiotelescopio Leighton Chajnantor Telescope (LCT) ante eventos sísmicos, con motivo de su reubicación desde el observatorio Caltech Submillimeter Observatory (CSO) en Mauna Kea, Hawái, hacia el cerro Toco, en la Región de Antofagasta, Chile. A diferencia de su emplazamiento original, el nuevo sitio se encuentra en una zona de alta sismicidad, lo que plantea la necesidad de evaluar si la estructura del LCT puede resistir las sollicitaciones sísmicas del lugar, cumpliendo con la normativa chilena vigente.

Para abordar este problema, se implementó un modelo de elementos finitos de la estructura que considera un número reducido de elementos en comparación a ejemplares de años anteriores y se realizó un análisis transiente (tiempo-historia) para determinar los componentes del telescopio más propensos a superar el límite de fluencia durante eventos telúricos representativos de la demanda sísmica en el nuevo sitio de instalación. Para realizar esto primero se calcularon los espectros de diseño del lugar, según la NCh2369:2025, usando los resultados de estudios de mecánica del suelo. Luego, se seleccionaron registros sísmicos reales compatibles con la respuesta espectral del emplazamiento y se aplicaron al modelo tridimensional mediante condiciones de frontera de movimiento de la base. Se consideraron tres configuraciones de elevación del telescopio (30° , 60° y 90°).

Los resultados del análisis transiente revelaron que, en general, la estructura del LCT exhibe un desempeño satisfactorio ante la demanda sísmica del cerro Toco, con esfuerzos equivalentes que no superan el límite de fluencia en la mayoría de sus componentes, garantizando un factor de seguridad conservador superior a 3. Sin embargo, se identificó una zona crítica en la plataforma de elevación, específicamente en la placa de conexión con el tornillo sin fin, donde los esfuerzos se aproximaron al límite de fluencia debido a desplazamientos excesivos durante los eventos analizados. Este hallazgo sugiere la necesidad de reforzar dicha área mediante la incorporación de placas laterales soldadas para mejorar la distribución de cargas. Adicionalmente, se recomienda mantener el LCT con una elevación de 90° en los momentos no destinados a realizar observaciones astronómicas.

Abstract

This study addresses the structural analysis of the Leighton Chajnantor Telescope (LCT) under seismic events, prompted by its relocation from the Caltech Submillimeter Observatory (CSO) on Mauna Kea, Hawaii, to Cerro Toco in the Antofagasta Region of Chile. Unlike its original site, the new location lies in a high-seismicity zone, necessitating an evaluation of whether the LCT's structure can withstand the seismic demands of the area while complying with current Chilean regulations.

To address this issue, a finite element model of the structure was implemented, using a reduced number of elements compared to previous models, and a transient (time-history) analysis was performed to identify the telescope components most likely to exceed the yield limit during representative seismic events for the new installation site. First, site-specific design spectra were calculated according to the NCh2369:2025 standard, based on soil mechanics studies. Then, real seismic records compatible with the site's spectral response were selected and applied to the 3D model using base motion boundary conditions. Three telescope elevation configurations were considered (30° , 60° , and 90°).

The transient analysis results revealed that, overall, the LCT structure performs satisfactorily under the seismic demands of Cerro Toco, with equivalent stresses not exceeding the yield limit in most components, ensuring a conservative safety factor greater than 3. However, a critical zone was identified in the elevation platform, specifically at the connection plate with the worm gear, where stresses approached the yield limit due to excessive displacements during the analyzed events. This finding suggests the need to reinforce this area by incorporating welded lateral plates to improve load distribution. Additionally, it is recommended to keep the LCT at a 90° elevation during periods not designated for astronomical observations.

Contenidos

Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	4
Glosario	5
Nomenclatura	6
1 Introducción	7
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Objetivos generales y específicos	8
1.2.1 Objetivo general	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
1.3 Hipótesis	8
1.4 Metodología de trabajo	8
2 Estado del arte	10
2.1 Evolución de los radiotelescopios	10
2.1.1 Radiotelescopios tipo Leighton	11
2.2 Trabajos previos realizados del proyecto LCT	12
3 Marco teórico	15
3.1 Normas chilenas aplicadas al diseño de estructuras	15
3.2 Método de elementos finitos (FEM)	16
3.2.1 Tipos de conexiones disponibles en Ansys	17
4 Caracterización del sitio y preparación de registros para análisis tiempo-historia	19
4.1 Caracterización del emplazamiento	19
4.2 Espectro de diseño según NCh2369:2025	20
4.3 Selección de registros sísmicos	22
4.4 Ajuste espectral de los registros	24
5 Modelo numérico del LCT	26
5.1 Antecedentes del modelo	26
5.2 Geometría	27
5.2.1 Componentes del LCT	27
5.2.2 Geometría simplificada y clasificación según posición	27
5.3 Materiales	32
5.4 Discretización del modelo y calidad del mallado	32
5.5 Condiciones de borde	38
5.5.1 Conexiones	38
5.5.2 Aplicación del movimiento de la base y gravedad	38
6 Análisis de resultados	39
6.1 Validación del modelo numérico	39
6.2 Resultados estáticos considerando solamente el peso propio	42
6.2.1 Desplazamientos y distribución de esfuerzos	42
6.2.2 Singularidades de esfuerzos en el modelo para el caso estático	43

6.3	Simulaciones transientes	45
6.3.1	Configuración de los casos de estudio	45
6.3.2	Parámetros de salida considerados para el análisis de resultados . . .	46
6.3.3	Elevación de 30°	46
6.3.4	Elevación de 60°	47
6.3.5	Elevación de 90°	48
6.3.6	Observaciones generales	50
6.3.7	Zonas de esfuerzo máximo y sensibilidad de la malla en la base	50
7	Conclusiones	53
8	Prospecciones y recomendaciones para trabajo futuro	53
Anexo A	Tablas y gráficos usados de la NCh2369:2025	56
Anexo B	Espectro escalado de los registros verticales	57
Anexo C	Discretización del modelo numérico	58
Anexo D	Factores de seguridad de los casos de estudio considerados	60

Lista de Figuras

Figura 1.1	Telescopio Caltech Submillimeter Observatory montado en el volcán Mauna Kea.	7
Figura 2.1	Fotografías de los radiotelescopios de Jodrell Bank, Dwingeloo y Parkes (de izquierda a derecha).	10
Figura 2.2	Estructura de soporte del reflector primario.	11
Figura 2.3	Dibujos del montaje que soporta los reflectores del telescopio Leighton.	12
Figura 3.1	Tipos de elementos comúnmente usados para discretizar modelos numéricos.	16
Figura 3.2	Esquema explicativo del contacto entre dos superficies	18
Figura 4.1	Ubicación del nuevo emplazamiento del radiotelescopio LCT.	19
Figura 4.2	Espectros de diseño horizontal y vertical para el sitio 2-7.	22
Figura 4.3	Formas de onda en aceleración del registro 1	23
Figura 4.4	Formas de onda en aceleración del registro 2	23
Figura 4.5	Formas de onda en aceleración del registro 3	24
Figura 4.6	ESpectros horizontales escalados del registro 1.	24
Figura 4.7	ESpectros horizontales escalados del registro 2.	25
Figura 4.8	ESpectros horizontales escalados del registro 3.	25
Figura 5.1	Modelo CAD del telescopio Leighton (OVRO) entregado por Caltech.	26
Figura 5.2	Estructura general del LCT.	27
Figura 5.3	Conjunto inferior del LCT sin incluir el Teepee.	28
Figura 5.4	Tipos de elemento usados para modelar la estructura del LCT: Vigas (Azul), Cascarones (Rojo) y Sólidos (Amarillo).	28
Figura 5.5	Geometría de la base simplificada.	29
Figura 5.6	Geometría del cono simplificada.	29
Figura 5.7	Geometría del Teepee simplificada.	30
Figura 5.8	Geometría de la plataforma acimutal simplificada.	30
Figura 5.9	Geometría de la plataforma de elevación y contrapesos simplificada.	31
Figura 5.10	Geometrías de las antenas y el entramado de vigas simplificada.	31
Figura 5.11	Distribución de la calidad ortogonal de los elementos de la malla del LCT.	34
Figura 5.12	Distribución del Skewness de los elementos de la malla del LCT.	34
Figura 5.13	Mallado de la Base.	35
Figura 5.14	Mallado del Cono.	35
Figura 5.15	Mallado del Teepee.	36
Figura 5.16	Mallado de la plataforma Acimutal.	36

Figura 5.17 Mallado del BUS y Feedlegs.	36
Figura 5.18 Mallado de la plataforma de elevación.	37
Figura 5.19 Mallado de los contrapesos.	37
Figura 5.20 Conexiones entre los diferentes componentes del LCT mediante la formulación de restricción multipunto.	38
Figura 5.21 Puntos de aplicación del movimiento de la base.	38
Figura 6.1 Modos de vibrar del LCT: modos 1 al 6.	40
Figura 6.2 Modos de vibrar del LCT: modos 7 al 12.	41
Figura 6.3 Desplazamientos equivalentes para las elevaciones de 30°, 60° y 90° por efectos del peso propio de la estructura.	42
Figura 6.4 Esfuerzos locales máximos en la base, causados por el peso propio del telescopio.	43
Figura 6.5 Esfuerzos locales máximos en la plataforma acimutal, causados por el peso propio del telescopio.	44
Figura 6.6 Tendencia de los esfuerzos máximos en la base en función del tamaño de elemento.	44
Figura 6.7 Influencia del tamaño de elemento en los esfuerzos máximos y promedios de la plataforma acimutal bajo el peso propio.	45
Figura 6.8 Singularidades de esfuerzo encontradas en la base (Elemental mean).	45
Figura 6.9 Esfuerzos equivalentes calculados para una elevación de 30° con los tres registros escalados.	46
Figura 6.10 Esfuerzos equivalentes en la base para una elevación de 30° con los tres registros escalados.	47
Figura 6.11 Esfuerzos equivalentes y factores de seguridad en la plataforma de elevación a 30°.	47
Figura 6.12 Esfuerzos equivalentes calculados para una elevación de 60° con los tres registros escalados.	48
Figura 6.13 Esfuerzos equivalentes en la base para una elevación de 60° con los tres registros escalados.	48
Figura 6.14 Esfuerzos equivalentes en la plataforma de elevación a 60°.	49
Figura 6.15 Esfuerzos equivalentes calculados para una elevación de 90° con los tres registros escalados.	49
Figura 6.16 Esfuerzos equivalentes en la base para una elevación de 90° con los tres registros escalados.	49
Figura 6.17 Zonas de esfuerzo máximo en análisis transiente.	50
Figura 6.18 Tendencia de los esfuerzos máximos en la base en función del tamaño de elementos para simulaciones transientes de elevación 90° con registro sísmico 2.	51

Figura 6.19 Comparación de los esfuerzos máximos resultantes para el caso de elevación 90° registro 2 con distintos tamaños de elemento.	51
Figura A.1 Zonificación sísmica del territorio nacional en el norte de Chile	56
Figura B.1 Espectro vertical escalados del registro 1.	57
Figura B.2 Espectro vertical escalados del registro 2.	57
Figura B.3 Espectro vertical escalados del registro 2.	57
Figura C.1 Mallado de la base con vista inferior.	58
Figura C.2 Mallado de la plataforma de elevación.	58
Figura C.3 Mallado del conjunto inferior.	59
Figura C.4 Mallado del BUS y Feedlegs.	59
Figura D.1 Factores de seguridad para una elevación de 90° aplicando el registro 1. .	60
Figura D.2 Factores de seguridad para una elevación de 90° aplicando el registro 2. .	60
Figura D.3 Factores de seguridad para una elevación de 90° aplicando el registro 3. .	61
Figura D.4 Factores de seguridad para una elevación de 60° aplicando el registro 1. .	61
Figura D.5 Factores de seguridad para una elevación de 60° aplicando el registro 2. .	62
Figura D.6 Factores de seguridad para una elevación de 60° aplicando el registro 3. .	62
Figura D.7 Factores de seguridad para una elevación de 30° aplicando el registro 1. .	63
Figura D.8 Factores de seguridad para una elevación de 30° aplicando el registro 2. .	63
Figura D.9 Factores de seguridad para una elevación de 30° aplicando el registro 3. .	64

Lista de Tablas

Tabla 3.1	Tipos de conexiones que ofrece Ansys	17
Tabla 4.1	Parámetros usado para definir el espectro de diseño segun NCh2369.	21
Tabla 4.2	Datos sísmicos registrados	22
Tabla 4.3	Información sobre las estaciones donde se tomaron los registros seleccionados.	22
Tabla 5.1	Propiedades mecánicas de los materiales.	32
Tabla 5.2	Comparación de las masas de los componentes del LCT en memorias de Retamal y Carrasco.	32
Tabla 5.3	Estadísticas generales de la malla.	33
Tabla 6.1	Comparación entre las frecuencias naturales de los modelos SPIE 2020 y LCT 2025.	39
Tabla A.1	Valor de los parámetros que dependen del tipo de suelo	56

Glosario

LCT Leighton Chajnantor Telescope

OVRO Owens Valley Radio Observatory

Nomenclatura

A_0	: Aceleración efectiva máxima.
A_r	: Aceleración máxima de referencia.
I	: Coeficiente de importancia.
S_a	: Espectro de diseño.
S_{aH}	: Espectro de referencia horizontal.
S_{aV}	: Espectro de referencia vertical.
R	: Factor de modificación de la respuesta horizontal.
R_V	: Factor de modificación de la respuesta vertical.
S, T_0, p, q, r	: Parámetros relativos al tipo de suelo.
T_H	: Período de vibración del modo horizontal considerado.
T_V	: Período de vibración del modo vertical considerado.
ξ	: Razón de amortiguamiento crítico horizontal.
ξ_V	: Razón de amortiguamiento crítico vertical.
V_{S30}	: Velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad.

1 Introducción

La radioastronomía en Chile tiene una rica historia, particularmente el norte de Chile se ha consolidado como un centro mundial para la observación astronómica. Las condiciones climáticas únicas del desierto de Atacama, que incluyen cielos despejados y una atmósfera extremadamente seca, han convertido a la región en un lugar ideal para la instalación de observatorios de última generación [1]. Entre los proyectos más destacados se encuentra el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), un consorcio internacional que opera el radiotelescopio más grande del mundo en su clase. La región de Chajnantor ha sido elegida estratégicamente para ALMA debido a su estabilidad atmosférica y la baja cantidad de vapor de agua precipitable, lo que posibilita observaciones de alta precisión en el rango de longitudes de onda milimétricas y submilimétricas [1]. Otros proyectos, como el Observatorio Paranal y el Observatorio Cerro Tololo, también se encuentran en el norte de Chile, lo que refuerza la importancia de esta región en el ámbito de la investigación astronómica [1].

El Leighton Chajnantor Telescope (LCT) es un proyecto internacional liderado por el California Institute of Technology (Caltech), la Academia China de Ciencias (CAS) y la Universidad de Concepción (Udec). Su objetivo principal es trasladar y modernizar el telescopio Leighton de 10.4 metros (Figura 1.1), originalmente parte del Caltech Submillimeter Observatory (CSO) en Mauna Kea, Hawái, para reinstalarlo en el Cerro Toco, en el desierto de Atacama. El proceso de reubicación implica el desmontaje, transporte y reconstrucción del telescopio, junto con la modernización de sus equipos para mejorar la precisión y capacidad de observación. Caltech lidera el desmantelamiento y el traslado del telescopio, mientras que CAS y Udec se encargan de actualizar la infraestructura en el nuevo sitio y proporcionar una nueva cubierta protectora para el telescopio. Una vez instalado, el LCT operará principalmente de manera remota, minimizando la presencia de personal en el sitio y facilitando la observación global. Respecto a las tareas que va a realizar el LCT, estaría enfocado en grandes programas de mapeo del cielo, con al menos 10% del tiempo de observación reservado para la comunidad científica chilena. Además de su contribución al estudio del universo, el LCT servirá como plataforma para el desarrollo tecnológico en astronomía milimétrica y submilimétrica en Chile y China, fortaleciendo la colaboración internacional y fomentando la formación de nuevas generaciones de astrónomos e ingenieros especializados en instrumentación astronómica [2].

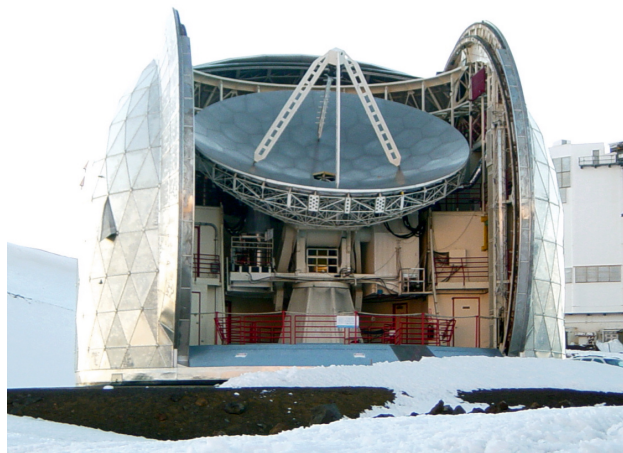


Figura 1.1 Telescopio Caltech Submillimeter Observatory montado en el volcán Mauna Kea.

1.1 Planteamiento del problema

El traslado del Leighton Chajnantor Telescope (LCT) desde su ubicación original en Mauna Kea hasta el cerro Toco implica una serie de desafíos técnicos y científicos que deben ser abordados para garantizar un correcto funcionamiento y durabilidad. Una diferencia clave entre ambos sitios es la actividad sísmica: mientras que Hawái presenta una sismicidad moderada asociada a la actividad volcánica, Chile se ubica en una de las regiones con mayor actividad sísmica del mundo debido a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana [3]. Dado que el reflector primario Leighton no fue diseñado para resistir sismos [2], es fundamental evaluar la estructura del radiotelescopio bajo condiciones de carga sísmica representativas de la zona. Por ello, se propone utilizar un modelo de elementos finitos para modelar el comportamiento de la estructura ante terremotos, considerando los lineamientos establecidos por la normativa chilena vigente, en específico, la NCh2369.

1.2 Objetivos generales y específicos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento estructural del radiotelescopio LCT en su nueva ubicación en el norte de Chile mediante el desarrollo de un modelo de elementos finitos, considerando cargas sísmicas y proponiendo mejoras estructurales con base en los resultados obtenidos.

1.2.2 Objetivos específicos

OE1: Establecer las sollicitaciones sísmicas de la nueva ubicación del LCT en el cerro Toco, acorde a la normativa chilena de diseño sísmico.

OE2: Desarrollar un modelo de elementos finitos del radiotelescopio LCT, validando su geometría y propiedades estructurales haciendo uso de datos experimentales levantados en trabajos previos.

OE3: Evaluar la respuesta estructural del telescopio ante eventos sísmicos representativos de la zona mediante simulaciones transientes con registros de eventos pasados.

OE4: Proponer recomendaciones estructurales o medidas de mitigación con base en los resultados obtenidos de las simulaciones, en caso de ser necesarias.

1.3 Hipótesis

Usar modelos numéricos para el análisis estructural del LCT permite identificar de forma detallada las zonas más propensas a fallar debido a las fuerzas impuestas por un terremoto. Además, permite la facilidad de hacer varios ensayos de forma relativamente rápida, dependiendo solamente del poder computacional disponible.

1.4 Metodología de trabajo

Para lograr los objetivos propuestos en este trabajo se realizaron las siguientes actividades, no necesariamente en el orden expuesto:

- **Levantamiento de información técnica y de trabajos previos:** Se realizó una revisión de la información almacenada de trabajos previos sobre el proyecto LCT, esto incluye: documentos técnicos sobre el LCT, planos de diseño, archivos CAD, fotografías, simulaciones, entre otros.

- **Establecimiento de la demanda sísmica de la zona:** A partir de la NCh 2369 y los estudios de mecánica de suelo del nuevo sitio de emplazamiento del LCT, se calcularon los espectros de diseño correspondientes y se seleccionaron tres registros sísmicos medidos en estaciones con un tipo de suelo similar; según la velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 metros de profundidad (V_{S30}). Posteriormente se realizó un ajuste espectral de los registros sísmicos para que coincidan con la demanda sísmica calculada.
- **Construcción del modelo numérico del telescopio:** A partir de los documentos obtenidos durante el levantamiento de información y los modelos geométricos existentes de los componentes del LCT, se construyó un modelo de elementos finitos del LCT en el programa Ansys 2025 R1. En esto se incluye el mallado de los subcomponentes, la imposición de condiciones de borde y la creación de las conexiones entre los distintos cuerpos del modelo.
- **Validación del modelo y modificaciones:** A partir de mediciones experimentales realizadas en trabajos previos, se compararon los modos de vibrar del modelo numérico con los experimentales y se hicieron los ajustes pertinentes para recrear el comportamiento dinámico real de la estructura.
- **Creación de los diferentes casos de estudio:** Posterior a la validación del modelo, se crearon diferentes archivos con los diferentes casos a simular, los cuales consideran tres elevaciones distintas del reflector primario y la aplicación de los tres registros sísmicos como condición de borde, haciendo en total nueve casos a simular.
- **Cálculo de resultados:** Se realizó la configuración de los archivos de salida del modelo para optimizar el almacenamiento requerido por simulación y se calcularon en serie los resultados de cada caso de estudio. Esta actividad incluyó solucionar varios problemas técnicos relacionados a las limitaciones computacionales de los ordenadores utilizados.
- **Análisis de resultados:** Para cada caso de simulación se calcularon los esfuerzos de Von Mises máximos dentro del rango de tiempo almacenado y los factores de seguridad a la fluencia. Luego se realizó un análisis de estos valores considerando todos los casos de estudio.
- **Propuestas de mejora:** A partir de las conclusiones obtenidas en el análisis de resultados se realiza una propuesta de mejora estructural. Por limitaciones de tiempo, la comprobación de la efectividad de esta propuesta queda pendiente para trabajos futuros.

2 Estado del arte

2.1 Evolución de los radiotelescopios

El desarrollo de los radiotelescopios ha experimentado una notable evolución en las últimas siete décadas, desde los primeros instrumentos operando en longitudes de onda métricas hasta estructuras sofisticadas capaces de alcanzar precisiones superficiales inferiores a 100 micrómetros. Los fundamentos de la radioastronomía se establecieron con el descubrimiento de la radiación cósmica por Karl Jansky en 1932 y los trabajos pioneros de Grote Reber, quien construyó un reflector parabólico de 9.6 metros en 1940 para mapear el cielo en radiofrecuencias [4]. Los primeros radiotelescopios grandes, como los de Jodrell Bank (76 m, 1957), Dwingeloo (25 m, 1956) y Parkes (64 m, 1961), enfrentaron desafíos estructurales significativos, con precisiones superficiales del orden de 1 cm para observar la línea del hidrógeno neutro a 21 cm [4]. En la Figura 2.1 se pueden observar estas tres estructuras.



Figura 2.1 Fotografías de los radiotelescopios de Jodrell Bank, Dwingeloo y Parkes (de izquierda a derecha).

Un hito clave fue la introducción del principio de homología por Sebastian Von Hoerner en 1967, que permitió diseños donde la deformación gravitacional mantiene una forma parabólica en todas las posiciones de elevación, aunque con cambios en la distancia focal [4]. Este concepto se aplicó exitosamente en el Radiotelescopio de Effelsberg (100 m, 1971), logrando una precisión superficial de 0.5 mm RMS y operando hasta longitudes de onda de 7 mm, con un peso total de solo 3150 toneladas [4]. La homología, combinada con análisis por elementos finitos, permitió superar las limitaciones de diseños tradicionales basados únicamente en rigidez estructural.

Para longitudes de onda milimétricas (1-3 mm), se desarrollaron telescopios con precisiones superficiales inferiores a 100 μm . El Telescopio Milimétrico de 30 metros (MRT, España, 1984) incorporó innovaciones como un sistema activo de control térmico que mantiene gradientes menores a 1 K, logrando una precisión de 60 μm RMS [4]. El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (LMT, 50 m, México) extendió estos principios con una superficie activa que corrige deformaciones gravitacionales de hasta 400 μm , alcanzando una precisión final de 70 μm [4].

En el rango submilimétrico (<1 mm), materiales como polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), con coeficientes de expansión térmica diez veces menores que el acero, fueron esenciales. El Telescopio Submilimétrico Heinrich Hertz (HHT, 10 m, 1994) logró una precisión récord de 12 μm RMS usando una estructura de CFRP [4]. Estos avances culminaron en el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, 2012), cuyos 66 antenas de 12 metros alcanzan 20 μm de precisión superficial y estabilidad de apuntado

de 0.6 arcosegundos, operando hasta 950 GHz [4]. Técnicas como holografía de radio y control activo de superficies han sido críticas para mantener estas precisiones bajo condiciones ambientales extremas.

2.1.1 Radiotelescopios tipo Leighton

Los radiotelescopios tipo Leighton, son 7 antenas parabólicas de 10.4 metros de diámetro, fueron concebidos por el físico Robert B. Leighton durante la década de 1970. Su visión se centró en la creación de telescopios de gran tamaño y alta precisión a un costo relativamente bajo, buscando abrir nuevas posibilidades de observación en astronomía. La fabricación de estos telescopios se llevó a cabo en el campus de Caltech entre los años 1970 y 1980. Seis de estos telescopios están actualmente en el Owens Valley Radio Observatory (OVRO) y el otro en proceso de transporte a Chile.

Los radiotelescopios desarrollados por Leighton representaron un avance significativo en la construcción de telescopios de la clase de 10 metros, especialmente diseñados para observaciones en longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. Estos telescopios fueron diseñados para operar con una precisión superficial inferior a 50 micrómetros. Para minimizar las deformaciones inducidas por la gravedad, la temperatura y el viento, emplean una estructura homóloga, lo que les permite lograr haces limitados por difracción en longitudes de onda tan cortas como 300 μm [5].

La estructura de soporte del reflector consiste en un espacio de acero con nodos dispuestos en un patrón triangular uniforme, como se muestra en la Figura 2.3, lo que simplifica el diseño y permite una implementación económica mediante uniones de pasador. Esta configuración garantiza que las fuerzas en cada nodo se intersecten en un punto central, eliminando momentos de flexión no deseados. Los miembros estructurales se clasifican en diferentes categorías de peso y rigidez, con secciones transversales reducidas hacia el borde del reflector para optimizar la homología. La estructura, compuesta por 216 nodos y 774 tirantes laterales y diagonales, pesa 3600 kg y se calcula que es 92% homóloga, con desviaciones menores a 17 μm RMS en todo el rango de elevación [5].

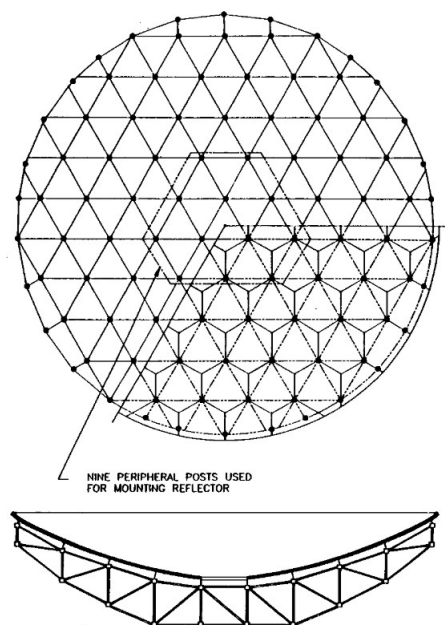


Figura 2.2 Estructura de soporte del reflector primario.

Los paneles reflectores están fabricados con núcleo de panel de aluminio y láminas frontales de aluminio de 1 mm de espesor, con una densidad superficial de 15 kg/m². Un aspecto innovador del diseño es el proceso de fabricación del reflector como una estructura monolítica. Los paneles, sin su lámina frontal, se unen a la estructura de soporte y se mecaniza su superficie mediante una máquina personalizada que corta la forma parabólica directamente en el núcleo de panel expuesto. Este método garantiza una precisión superficial mejor que 35 μm RMS sin necesidad de ajustes posteriores [5]. Toda esta estructura está soportada por una montura de tipo altazimutal, que permite cambiar la dirección de la antena en los ejes acimutal y de elevación. La Figura 2.3 muestra unos dibujos de dicha montura.

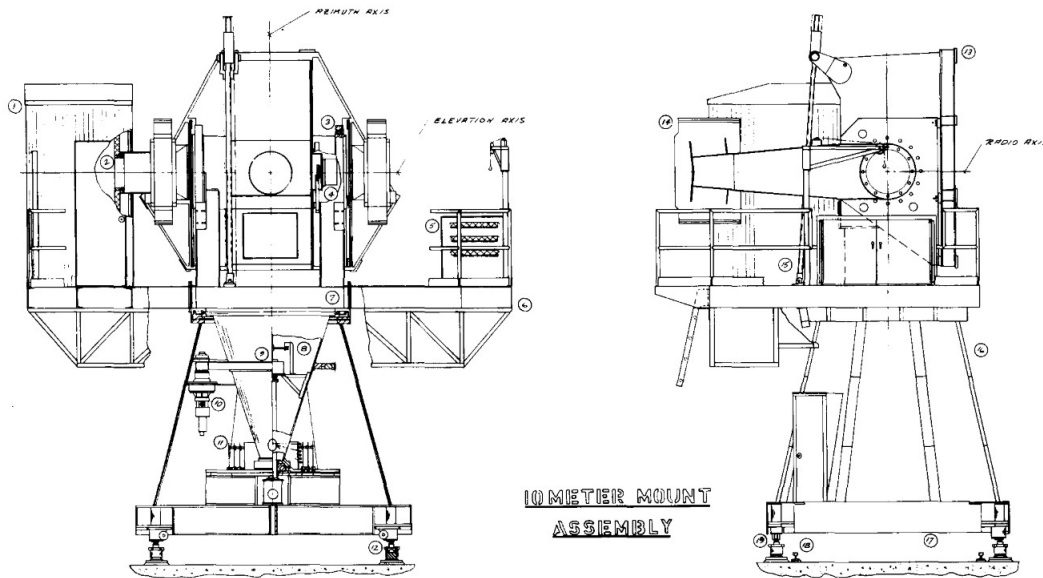


Figura 2.3 Dibujos del montaje que soporta los reflectores del telescopio Leighton.

El rendimiento térmico de los telescopios Leighton es notable debido a su estructura abierta y de pequeño espesor, que se equilibra rápidamente con la temperatura ambiente. Los gradientes térmicos calculados producen distorsiones menores a 25 μm RMS, mientras que la iluminación solar frontal de los paneles introduce distorsiones de aproximadamente 25 μm RMS. Para el telescopio anteriormente instalado en el Observatorio Submilimétrico de Caltech (CSO) en Mauna Kea (y ahora siendo trasladado a Chile), protegido por una cúpula y utilizado solo de noche, la precisión superficial alcanza menos de 20 μm RMS [5].

Las mediciones de la superficie del reflector se realizan mediante técnicas que incluyen holografía de radio utilizando fuentes astronómicas como Venus y cuásares. Estos métodos permiten verificar la homología y ajustar la superficie en condiciones operativas reales. Los resultados confirman que los telescopios Leighton cumplen con sus objetivos de precisión, incluso después de 15 años de operación en el desierto de Owens Valley [5].

2.2 Trabajos previos realizados del proyecto LCT

El proyecto Leighton Chajnantor Telescope (LCT) ha sido objeto de varias investigaciones clave para asegurar su óptimo funcionamiento tras el traslado al Llano de Chajnantor. Estos trabajos se han enfocado en diversos aspectos estructurales y de rendimiento, desarrollándose de manera progresiva y complementaria.

En 2019, Miguel Retamal llevó a cabo un análisis estructural exhaustivo del radiotelescopio LCT utilizando el método de elementos finitos [6]. El objetivo principal de su trabajo fue

evaluar la integridad estructural del telescopio bajo las condiciones de viento esperadas en el Llano de Chajnantor, considerando diferentes ángulos de elevación de la antena primaria. Para ello, generó un modelo de elementos finitos para simular las cargas de viento, obtenidas de registros de velocidad del viento del radiotelescopio APEX, ubicado cerca del sitio de instalación del LCT. El análisis incluyó la simulación del LCT en inclinaciones de la antena primaria de 30° , 45° , 60° y 90° , tanto con impacto de viento frontal como posterior. Como conclusiones, se encontró que el LCT soporta satisfactoriamente las cargas impuestas por separado y en combinación sin apoyos estructurales. Sin embargo, al simularlo con los apoyos, se generaron esfuerzos excesivamente altos, atribuidos al contacto y al pequeño diámetro de estos componentes, lo que llevó a la recomendación de no considerar estos resultados para la simulación principal. Se identificaron concentradores de esfuerzos en la plataforma azimutal, sugiriendo un análisis más detallado de esta área. Además, se obtuvieron los primeros 11 modos de vibrar del LCT, con frecuencias entre 3.3 Hz y 13.3 Hz, y se advirtió que operar los motores continuamente en este rango de frecuencias podría causar daños por resonancia. El estudio concluyó que el LCT soporta adecuadamente las cargas combinadas de peso propio e impacto de ráfaga de viento a 30 m/s, siendo el caso más crítico con la antena a 45° de inclinación, donde se alcanzó un esfuerzo máximo de 217 MPa. Los menores esfuerzos se observaron cuando la antena primaria estaba a 90° .

Posteriormente, en 2022, Julio Navarro se centró en el análisis del rendimiento electromecánico del radiotelescopio CSO (LCT) [7]. Su investigación buscó determinar la magnitud de los desplazamientos del reflector primario y del subreflector, así como el impacto de la deformación en la capacidad de recolección de energía. Se emplearon métodos de elementos finitos (FEA) para cargas propias y dinámica de fluidos computacional (CFD) para el viento, acoplados a un análisis estructural para determinar los errores de superficie y los cambios de apuntamiento. Navarro concluyó que los efectos mecánicos sí impactan el comportamiento electromagnético del radiotelescopio. Se encontró que el impacto del viento en los errores de superficie es mínimo, con un valor RMS máximo de 8 μm , en comparación con los 25 μm mínimos debido al peso propio, lo que implica un impacto menor en el patrón de radiación. En particular, la degradación del patrón de radiación fue más pronunciada en la condición de peso propio a 30° de elevación. Por otro lado, los resultados del análisis de cambio de apuntamiento y desalineamiento del subreflector fueron prometedores, permitiendo caracterizar las posibles ventanas de observación del radiotelescopio. Se identificó que, con una velocidad del viento de 10 m/s, ciertas posiciones de observación (como 30EL-225AZ y 45EL-180AZ) presentarían dificultades para una observación óptima, especialmente a altas frecuencias.

En 2023, Néstor Carrasco abordó el diseño de plataformas adicionales para equipos complementarios del LCT [8]. Su trabajo se centró en dimensionar estas estructuras para la instalación de compresores, motores, equipos criogénicos y aparatos radioastronómicos, considerando las cargas externas y de funcionamiento. Se utilizaron y desarrollaron modelos CAD y de elementos finitos del LCT, y se investigaron restricciones de diseño como la operación del telescopio, la lista de equipos y las normas de carga de viento. Se determinó la distribución de esfuerzos en puntos críticos de la estructura actual para establecer el peso máximo admisible de las nuevas plataformas y equipos. El diseño se optimizó iterativamente mediante Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo (MOGA). Se concluyó que la estructura existente del LCT (excluyendo los apoyos) puede soportar una carga total máxima de 2700 kg, distribuida asimétricamente. Los máximos esfuerzos se localizan en las uniones apernadas que conectan las plataformas laterales existentes con las plataformas central y trasera. El diseño óptimo de plataforma adicional, denominado AX_(Y), pesa 591 kg y es capaz de resistir cargas de viento cercanas a los 42 m/s cuando se combina con un peso máximo de

equipos de 900 kg. Esta plataforma presenta una primera frecuencia modal de 21.93 Hz, significativamente mayor que la del LCT (3.57 Hz), lo que indica una buena rigidez. Aunque la hipótesis de admisibilidad de diseño para 1.5 toneladas no se cumplió completamente, se propuso instalar la misma estructura AX_(Y) en el “lado gabinete” con una carga máxima de 600 kg de equipos, distribuyendo el peso restante en otras partes del telescopio. Se sugirió la necesidad de futuras simulaciones de viento en CFD y un modelado más detallado de las uniones apernadas para refinar los resultados.

También en 2023, Bastián Hernández realizó un análisis dinámico del radiotelescopio LCT para determinar la factibilidad de duplicar su velocidad de giro acimutal. Su investigación se enfocó en verificar la integridad de los componentes del sistema de transmisión y proponer mejoras si fuera necesario. A través de simulaciones computacionales, se comparó el comportamiento estructural bajo la velocidad angular actual y la nueva condición de mayor velocidad. Los resultados mostraron que las diferencias estructurales entre ambas condiciones de velocidad (actual y duplicada) no son muy grandes. La distribución de esfuerzos en la plataforma acimutal se mantuvo suave, y en la base estructural, el movimiento acimutal tuvo poca influencia en los esfuerzos, siendo estos muy similares al caso estático. Se observaron esfuerzos máximos en la zona de contacto del manto del cono con el engranaje principal y en las plataformas de los reductores de velocidad, especialmente en la que transfiere más torque. Hernández Serón recomendó realizar un rediseño de los soportes de la base estructural para eliminar concentradores de esfuerzo.

Finalmente, Francisco Salgado, también en 2023, se dedicó al diseño de la fundación para el radiotelescopio Leighton en el Llano de Chajnantor [9]. Su trabajo implicó la caracterización geotécnica del sitio mediante prospecciones geofísicas, la estimación de la demanda sísmica y el dimensionamiento de la fundación para garantizar su seguridad y estabilidad. Para esto, se utilizaron datos de cargas de viento y peso propio de estudios previos, así como una demanda sísmica obtenida de espectros de diseño y un modelo predictivo para la zona de subducción chilena. La modelación se realizó con el método de elementos finitos y se verificaron aspectos de estabilidad como el vuelco, deslizamiento y hundimiento. Se concluyó que una losa de fundación cuadrada de 6 m x 6 m x 1 m cumple con los requisitos normativos y estructurales. El estudio geofísico permitió identificar un estrato competente a 2 metros de profundidad con una velocidad de onda de corte (V_s) de 480 m/s para el sello de fundación. La ausencia de resistividades muy bajas o altas en los perfiles eléctricos sugirió la ausencia de cavidades, hielo o agua subterránea hasta los 12 metros de profundidad. Se determinó un asentamiento máximo elástico de solo 1.38 mm, muy por debajo de los límites aceptables. El diseño garantiza una instalación segura y estable del radiotelescopio, destacando que una reducción en las dimensiones de la fundación podría desfavorecer su comportamiento ante eventos sísmicos. Se recomendó un sello de fundación a 2 m de profundidad y un relleno con base estabilizada compactada.

3 Marco teórico

3.1 Normas chilenas aplicadas al diseño de estructuras

Chile es un país de alta sismicidad, y sus normas de diseño sísmico se basan en una amplia experiencia derivada de terremotos pasados, particularmente los de 1960 y 1985. Esta práctica nacional ha demostrado ser eficiente y económica [10].

Existen dos normas chilenas principales que rigen el diseño sísmico, cada una con un alcance específico:

1. NCh2369: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales [10].
 - Alcance: Esta norma establece los requisitos para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, tanto livianas como pesadas. Se aplica a las estructuras propiamente tales, a los sistemas de ductos y cañerías, y a los equipos de proceso, mecánicos y eléctricos, así como a sus anclajes. También abarca las estructuras de bodegas o recintos de vocación industrial, y las construcciones estructuradas con columnas en voladizo.
 - Excepciones: Solo se exceptúan las estructuras y equipos de categoría C3, para los cuales basta con la presentación de planos firmados por el diseñador original con indicación de dimensiones, materiales, pesos, centros de gravedad y detalles de anclaje.
2. NCh433: Diseño sísmico de edificios [11].
 - Alcance: Esta norma establece los requisitos exigibles para el diseño sísmico de edificios. También se refiere a las exigencias sísmicas que deben cumplir los equipos y otros elementos secundarios de edificios. Incluye recomendaciones sobre la evaluación del daño sísmico y su reparación.
 - No Aplicación: Esta norma no se aplica al diseño sísmico de otras obras civiles como puentes, presas, túneles, acueductos, muelles o canales. Específicamente, tampoco se aplica a edificios industriales ni a instalaciones industriales; el diseño de estas obras debe regirse por la norma chilena correspondiente (que es la NCh2369). Es aplicable solo a materiales o sistemas con una norma técnica de diseño sísmico o que demuestren resistencia y ductilidad equivalente mediante ensayos cíclicos no lineales.

La norma NCh2369 fue desarrollada complementariamente a la norma de edificios (NCh433) porque las estructuras industriales rara vez presentan las características típicas de los edificios, como una repartición discreta y uniforme de masas, diafragmas horizontales rígidos en varios niveles, excentricidad reducida y amortiguamientos del orden del 5%. Las estructuras industriales suelen tener amortiguamientos del 2%, basado en la práctica chilena e investigaciones.

Ambas normas se orientan a lograr estructuras que:

- Resistan sin daños movimientos sísmicos de intensidad moderada.
- Limiten los daños en elementos no estructurales durante sismos de mediana intensidad.
- Aunque presenten daños, eviten el colapso durante sismos de intensidad excepcionalmente severa.

Ambas normas reflejan la práctica y experiencia chilena, complementadas con referencias a códigos y recomendaciones internacionales (como ACI, AISC, UBC, SEAOC, normas neozelandesas, etc.), adaptando sus disposiciones a las condiciones locales. El Anexo C de NCh2369 y el Anexo D de NCh433 proporcionan comentarios informativos que explican el origen y la justificación de muchas de las disposiciones de la norma, basadas en la experiencia y los estudios técnicos realizados en Chile [11, 10].

3.2 Método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos (FEM) es una herramienta fundamental para resolver ecuaciones diferenciales parciales en ingeniería y ciencias aplicadas. Su eficacia radica en discretizar el dominio continuo en subdominios finitos, lo que permite manejar geometrías complejas y diversas condiciones de contorno, como cargas aplicadas y restricciones de movimiento. Como señala Bathe [12], el método de elementos finitos se basa en discretizar el continuo en una cantidad finita de elementos interconectados por nodos. La aplicación del método de elementos finitos al análisis estructural del LCT implica resolver un problema de análisis estático de los esfuerzos bajo condiciones de carga específicas. En este contexto, el análisis estático asume que las cargas se aplican suficientemente lento como para ignorar los efectos inerciales [12].

La implementación de este método en programas comerciales, como Ansys, comienza con la selección del tipo de elemento utilizado para representar los componentes de la estructura a analizar, ya sean elementos de línea (para representar vigas), de superficie (para placas y láminas) o sólidos (para componentes tridimensionales); en la Figura 3.1 se muestran algunos ejemplos. La elección del tipo de elemento suele ser un compromiso entre la exactitud de la solución buscada y el costo computacional requerido para resolver los modelos. Según Bathe [12], la selección de elementos depende de la geometría, la física del problema y la precisión deseada, destacando que elementos de mayor orden pueden mejorar la precisión pero incrementan el costo computacional.

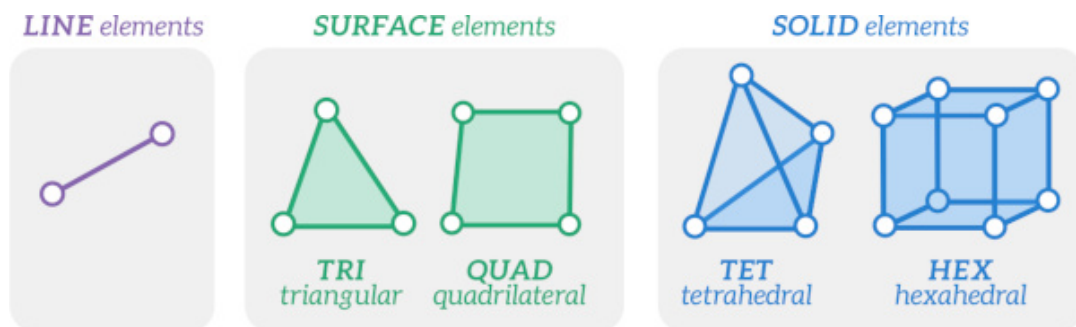


Figura 3.1 Tipos de elementos comúnmente usados para discretizar modelos numéricos.

Dependiendo de los tipos de elementos seleccionados, se crea la geometría que posteriormente se entregará al programa de mallado. Este proceso suele realizarse mediante programas de diseño asistido por computadora (CAD). Antes de generar la malla, la geometría se prepara mediante un proceso de limpieza que incluye eliminar puntos y aristas superfluos, verificar la ausencia de cuerpos traslapados y asegurar que los componentes que deben unirse compartan nodos o caras. Esta limpieza es crucial para evitar errores en el mallado y garantizar la correcta transmisión de fuerzas entre los componentes. Además, se recomienda eliminar características geométricas locales (como pequeños redondeos o perforaciones) que, aunque presentes en el diseño real, no aportan significativamente al análisis pero incrementan

innecesariamente la complejidad del mallado. Bathe enfatiza que la malla debe representar la geometría con precisión, especialmente en regiones de concentración de esfuerzos [12], lo que justifica esta optimización.

El mallado representa una etapa fundamental en el método de elementos finitos, donde el dominio continuo se subdivide en elementos finitos interconectados por nodos, formando así la discretización del problema. La calidad de esta discretización afecta tanto la precisión de los resultados como la eficiencia del cálculo, dado que un mallado demasiado grueso puede omitir concentraciones de esfuerzos locales, mientras que uno excesivamente denso aumenta el tiempo de solución sin garantizar mejoras significativas. Para optimizar este proceso, se consideran parámetros como el tamaño de elemento, la distorsión geométrica y la refinación adaptativa (donde el tamaño de los elementos se reduce automáticamente en zonas de alta concentración de esfuerzos) en áreas de interés, los cuales pueden definirse manualmente o mediante algoritmos automáticos integrados en los preprocesadores de los programas de análisis. En este sentido, Bathe advierte [12] que elementos mal conformados pueden llevar a matrices de rigidez mal condicionadas y resultados inexactos, y recomienda el uso de técnicas de refinamiento de malla guiadas por estimaciones de error para equilibrar precisión y costo computacional.

3.2.1 Tipos de conexiones disponibles en Ansys

Para modelos numéricos que involucren múltiples cuerpos es necesario definir cómo interactúan los elementos en los extremos colindantes de los cuerpos. El software Ansys permite conectar cuerpos mediante: contactos, uniones, conexiones de malla, entre otros. Dentro de los alcances contemplados en el modelo numérico del LCT, el tipo de conexión más usado son los contactos. Los tipos de contacto disponibles se describen en la Tabla 3.1, diferenciándose en el movimiento relativo que permiten entre los cuerpos en contacto, ya sea deslizamiento y/o separación de los cuerpos involucrados [13].

Tabla 3.1 Tipos de conexiones que ofrece Ansys [13].

Formulación	Separación	Deslizamiento
Bonded	No permitido	No permitido
No separation	No permitido	Permitido
Frictionless	Permitido	Permitido
Frictional	Permitido	Permitido
Rough	Permitido	No permitido

Para asegurar que los cuerpos en contacto no se interpenetren durante el análisis, la aplicación establece una relación entre sus superficies, previniendo el paso mutuo. Este proceso se conoce como imponer la compatibilidad de contacto [13]. La Figura 3.2 ilustra esquemáticamente la interacción entre dos superficies en contacto.

Dado que los cuerpos en contacto no pueden interpenetrarse, el programa debe establecer una relación entre las dos superficies para evitar que estas se atraviesen mutuamente durante el análisis. Cuando el programa previene la interpenetración, se dice que impone la compatibilidad de contacto [13]. En casos donde no se cumpla esto, los nodos de un cuerpo podrán penetrar en la superficie del otro, como se observa en la Figura 3.2.

Ansys dispone de varias formulaciones de contacto para asegurar la compatibilidad en la interfaz, definiendo así el método de solución empleado [13]. Entre ellas se incluyen Pe-

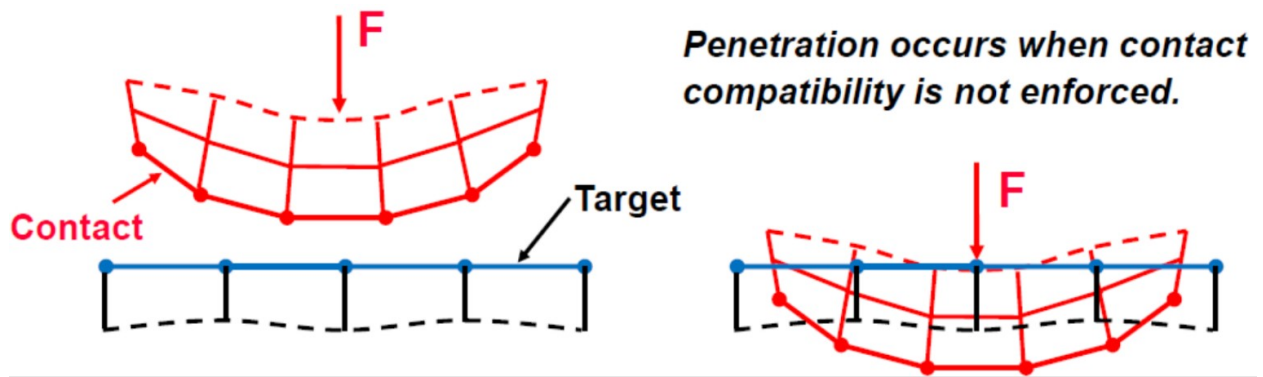


Figura 3.2 Esquema explicativo del contacto entre dos superficies [13].

nalidad pura, Lagrange aumentado, Lagrange normal y Restricción multipunto (MPC). En particular, los contactos de tipo Bonded y No Separation usan la formulación de restricción multipunto (MPC). Según la guía del usuario de Mechanical [13], la formulación MPC añade internamente ecuaciones de restricción para "atar" los desplazamientos entre las superficies en contacto. Este enfoque no se basa en penalizaciones ni en multiplicadores de Lagrange, sino que constituye una manera directa y eficiente de relacionar superficies de regiones de contacto que están unidas. Es importante destacar que el contacto Bonded basado en MPC soporta efectos de grandes deformaciones [13]. En esencia, el MPC asegura que los nodos en las superficies unidas se muevan como si fueran una única entidad, impidiendo cualquier movimiento relativo entre ellos.

4 Caracterización del sitio y preparación de registros para análisis tiempo-historia

4.1 Caracterización del emplazamiento

La ubicación del emplazamiento del radiotelescopio LCT ha cambiado en relación con el trabajo realizado por Salgado en su memoria de título [9], donde se diseñaron las fundaciones según las solicitudes sísmicas de la ubicación previa. Actualmente, el sitio está ubicado en el Cerro Toco, en la Región de Antofagasta (ver Figura 4.1). Se encuentra cerca del límite con Bolivia, aproximadamente a 50 kilómetros al este de San Pedro de Atacama, y próximo al complejo volcánico Licancabur. La altitud del emplazamiento es de 5110 metros sobre el nivel del mar. Dicho emplazamiento es denominado "LCT Side 2-7" en los informes de mecánica de suelos [14], realizados por ABC Geotechnical Consulting en 2024, de los cuales se extraen los parámetros necesarios para estimar la demanda sísmica del sitio según la NCh2369:2025 [10].

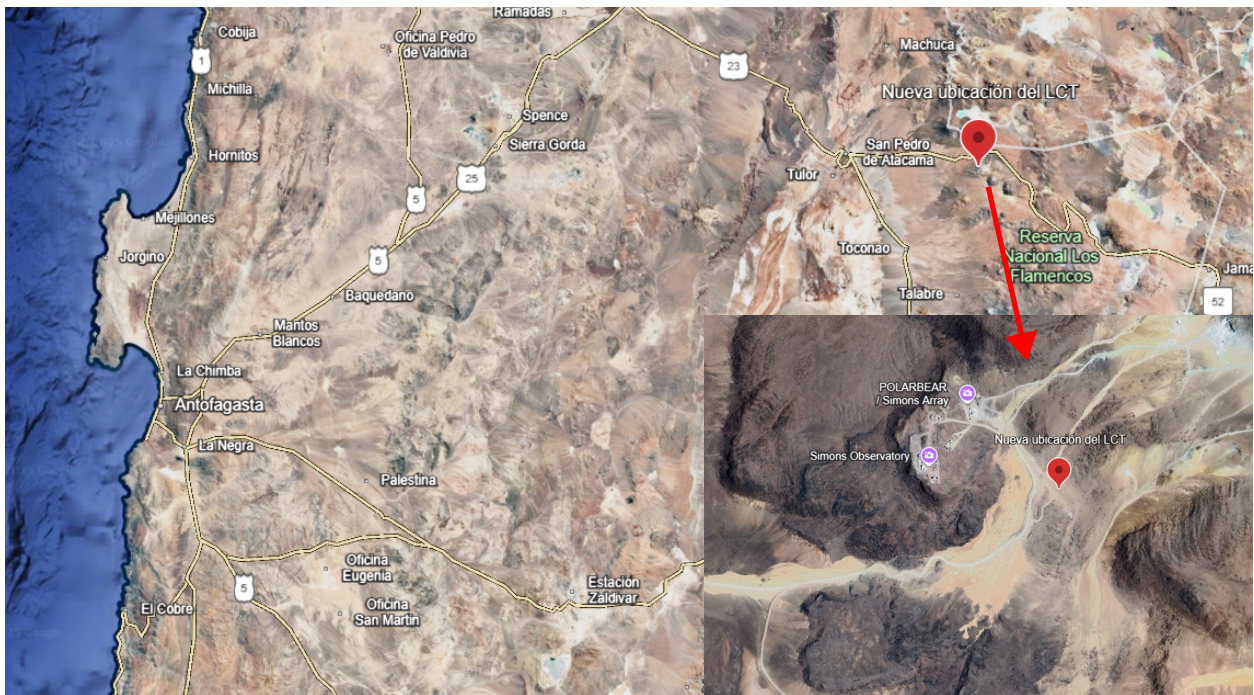


Figura 4.1 Ubicación del nuevo emplazamiento del radiotelescopio LCT.

Geomorfológicamente, el Cerro Toco es parte de la Cordillera de los Andes Volcánicos, una región definida por estructuras volcánicas como conos, cráteres y domos de lava. El paisaje se caracteriza por depósitos piroclásticos y lavas andesíticas a dacíticas, comunes en la región, y presenta influencias de procesos erosivos y eólicos debido a las condiciones climáticas áridas del desierto de Atacama. Desde el punto de vista geológico, el Cerro Toco es un volcán extinto del Cuaternario que forma parte del Cinturón Volcánico de los Andes Centrales, originado por la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana. La composición lítica incluye lavas andesíticas a dacíticas, con minerales como cuarzo, plagioclasa, piroxenos y anfíboles. Las condiciones climáticas del Cerro Toco son de desierto de altura, con bajas precipitaciones y temperaturas extremas, lo que favorece el intemperismo físico de las rocas. Los suelos son generalmente delgados o ausentes, con predominancia de coladas lávicas expuestas y depósitos de cenizas [14].

La estratigrafía en profundidad del Cerro Toco, según datos volcánicos y sedimentarios recopilados por ABC [14], se describe de la siguiente manera:

- **0 - 50 m:** Depósitos recientes de cenizas volcánicas y suelos delgados.
- **50 - 150 m:** Coladas de lava andesíticas compactas con fracturas y vesículas.
- **150 - 300 m:** Piroclastos y tobas volcánicas, material fragmentado de erupciones explosivas.
- **300 - 500 m:** Basamento volcánico antiguo con lavas dacíticas de alto contenido de sílice.
- **> 500 m:** Rocas sedimentarias subyacentes que incluyen areniscas y lutitas con intercalaciones volcánicas.

4.2 Espectro de diseño según NCh2369:2025

Para definir el espectro de diseño, la NCh2369 establece una serie de parámetros que se deben seleccionar en función de los estudios del suelo y el tipo de estructura analizada. A continuación, se definen estos parámetros y los valores considerados (ver resumen en la Tabla 4.1):

- **Categoría de ocupación:** Clasificación de los tipos de estructura según las actividades que se llevan a cabo en esta y el riesgo asociado, toma valores de I a IV. Para los propósitos de este proyecto, el radiotelescopio está clasificado dentro de la categoría IV, definida para instalaciones de alta inversión y difícil reemplazo.
- **Zona sísmica:** La ubicación del proyecto en el Cerro Toco, Región de Antofagasta, se enmarca en la Zona Sísmica 1 de acuerdo con la NCh2369:2025 [10]. En la Figura A.1 se muestra la clasificación sísmica del territorio chileno.
- **Tipo de suelo:** La clasificación sísmica del suelo se determina a partir de la velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 metros (V_{S30}). Los resultados del perfil geofísico indican un V_{S30} de 619.98 m/s, con una velocidad de ondas de corte que aumenta monótonamente con la profundidad [14]. Basado en este resultado, se establece que el suelo se clasifica como tipo B, caracterizado como roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme. A partir de esta clasificación se seleccionan los parámetros S , p , q y r de la Tabla A.1, mostrada en el Anexo A.
- **Aceleración efectiva máxima:** La aceleración efectiva máxima (A_0) para el sitio se establece en 0.20 g, según lo indicado en [10].
- **Coefficiente de importancia:** Este coeficiente (I) refleja la relevancia de la estructura y las consecuencias de su falla. Dado que el radiotelescopio se considera una instalación de alta inversión y difícil reemplazo (Categoría IV), se adopta un coeficiente de importancia de 1.2.
- **Factor de modificación de respuesta:** El factor de modificación de respuesta (R) y su análogo vertical (R_V) son parámetros estructurales que consideran la capacidad de la estructura para disipar energía sísmica a través de un comportamiento dúctil. Para el diseño, se utilizan los valores de $R = 1.5$ y $R_V = 2$, según se indica en [10]. Estos valores son definidos por el diseño estructural de la edificación, no por los estudios de suelo.

- **Factor de amortiguamiento:** El factor de amortiguamiento (ξ) y su análogo vertical (ξ_V) representan la capacidad de la estructura para disipar energía a través de mecanismos distintos a la deformación plástica. Para el diseño, se consideran valores de $\xi = 0.02$ y $\xi_V = 0.03$, tal como se especifica en [10]. Estos son valores típicos para estructuras con amortiguamiento bajo o moderado.

Tabla 4.1 Parámetros usado para definir el espectro de diseño segun NCh2369.

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Categoría de ocupación	-	IV
Zona sísmica	-	1
Tipo de suelo	-	B
Aceleración efectiva máxima A_0	g	0.2
Coefficiente de importancia I	-	1.2
Factor de modificación de respuesta R^*	-	1.5
Factor de modificación de respuesta vertical R_V	-	2
Factor de amortiguamiento ξ	-	0.02
Factor de amortiguamiento vertical ξ_V	-	0.03
S	-	1.0
$T_0(s)$	s	0.3
p	-	1.6

Luego, el espectro de diseño para la dirección horizontal está definido por la ecuación 1:

$$S_a(T_H) = \frac{IS_{aH}(T_H)}{R^*} \left(\frac{0,05}{\xi} \right)^{0,4} \quad (1)$$

Por otro lado, los espectros de diseño para la dirección vertical están definidos por la ecuación 2.

$$S_a(T_V) = \frac{IS_{aV}(T_V)}{R_V} \left(\frac{0,05}{\xi_V} \right)^{0,4} \quad (2)$$

Donde los parámetros S_{aH} y S_{aV} son los espectros de referencia horizontal y vertical definidos por las ecuaciones 3 y 4.

$$S_{aH}(T_H) = A_r S \left(\frac{1 + r \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^p}{1 + \left(\frac{T_H}{T_0} \right)^q} \right) \quad (3)$$

$$S_{aV}(T_V) = 0.7 A_r S \left(\frac{1 + r \left(1.7 \frac{T_V}{T_0} \right)^p}{1 + \left(1.7 \frac{T_V}{T_0} \right)^q} \right) \quad (4)$$

Para los parámetros expuestos en la Tabla 4.1, los espectros de diseño calculados se muestran en la Figura 4.2.

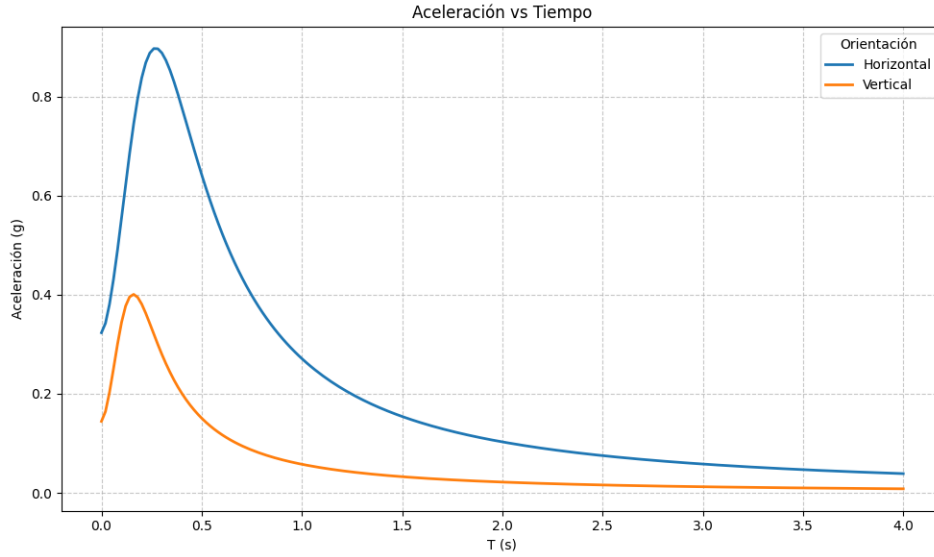


Figura 4.2 Espectros de diseño horizontal y vertical para el sitio 2-7.

4.3 Selección de registros sísmicos

Los acelerogramas necesarios para realizar el análisis estructural fueron obtenidos de la página del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile [15]. Estos fueron seleccionados a partir del parámetro V_{S30} , calculado en los estudios de mecánica de suelos [14]. Los registros elegidos fueron medidos en lugares con un V_{S30} similar al del emplazamiento del LCT, con un margen de error máximo del 20%. En la Tabla 4.2 se muestran los detalles de los registros seleccionados.

Tabla 4.2 Datos sísmicos registrados [15].

Registro	Fecha	Latitud [°]	Longitud [°]	Profundidad [km]	Magnitud [*]
Registro 1	2019-08-01	-34.28	-72.51	13	6.6
Registro 2	2024-07-19	-23.12	-68.07	144	7.4
Registro 3	2019-11-04	-31.81	-71.34	56	6.1

Los registros 1 y 3 fueron tomados en la estación R05M y el registro 2 en la T03A. En la Tabla 4.3 se muestra información de cada una de las estaciones, incluyendo la ubicación, valor del V_{S30} e instrumento usado para realizar las mediciones.

Tabla 4.3 Información sobre las estaciones donde se tomaron los registros seleccionados.

Estación	Latitud [°]	Longitud [°]	V_{S30} [m/s ²]	Instrumentación
R05M	-33.4	-70.5	635	Episensor FBA - Basalt Serial 1059
T03A	-20.2	-70.1	11	Episensor FBA - Basalt Serial 1316

En las Figura 4.3, 4.4, 4.5 se muestran las formas de onda de los registros considerados para el análisis, las unidades de medida de la amplitud están en m/s².

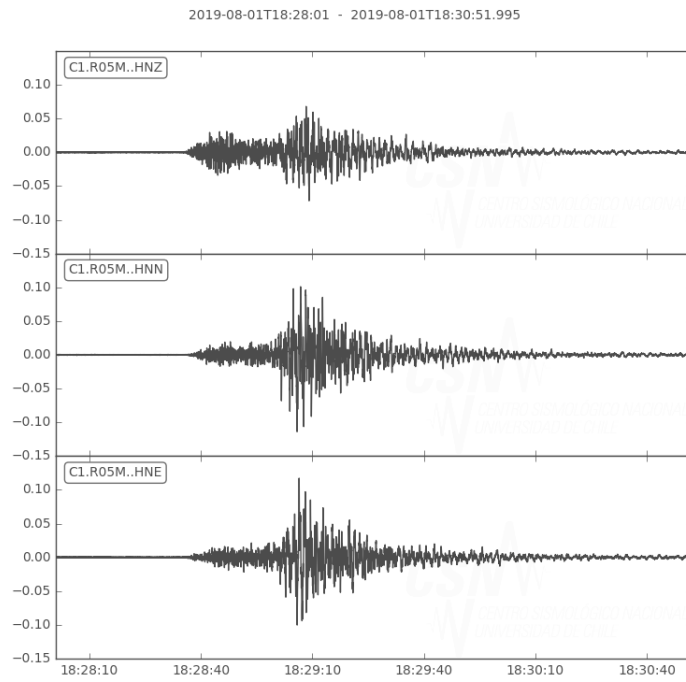


Figura 4.3 Formas de onda en aceleración del registro 1 [15].

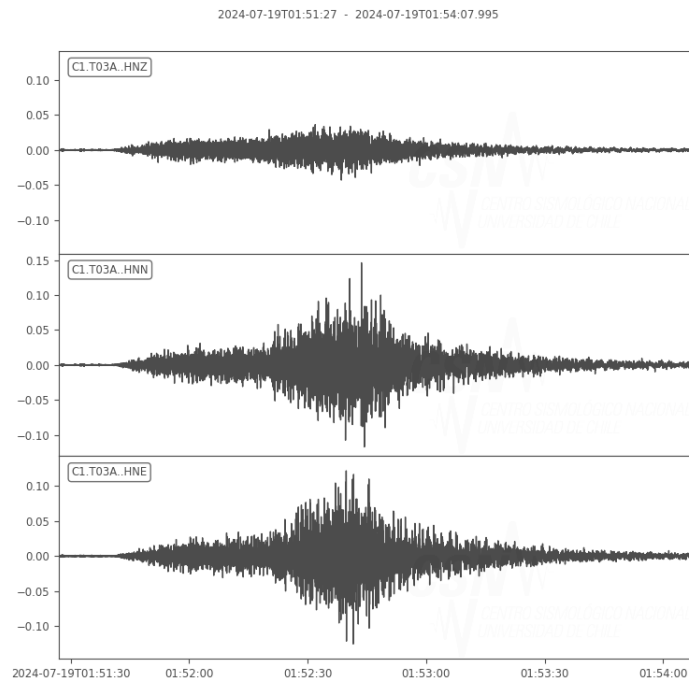


Figura 4.4 Formas de onda en aceleración del registro 2 [15].

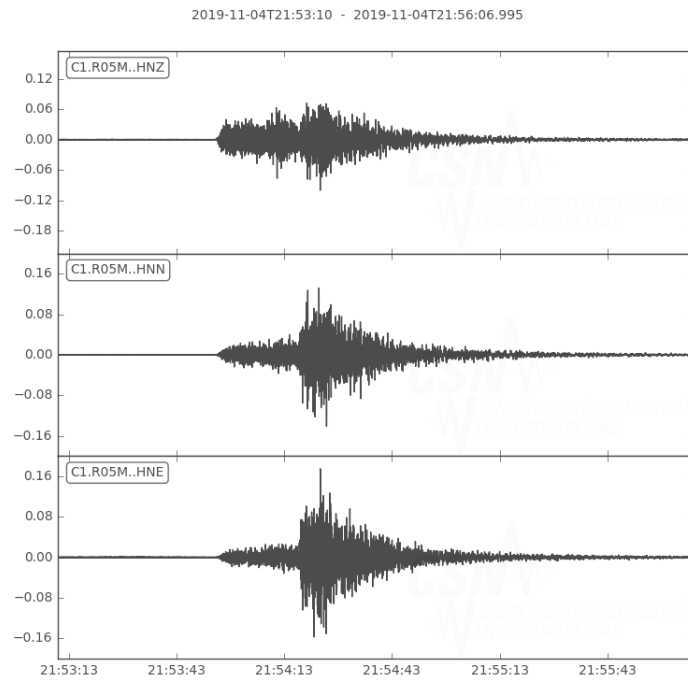


Figura 4.5 Formas de onda en aceleración del registro 3 [15].

4.4 Ajuste espectral de los registros

Según la NCh2369, los espectros de los registros usados para el análisis estructural deben coincidir con el espectro de diseño calculado para el lugar donde se hace el análisis [10]. Si bien existen varios métodos para lograr esto, se optó por usar el método propuesto por Al Atik y Abrahamson en 2010 [16]; para aplicar este algoritmo se usó el programa SeismoMatch, considerando un periodo entre 0.1 a 4 segundos. Los resultados para la dirección horizontal se ilustran en las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8.

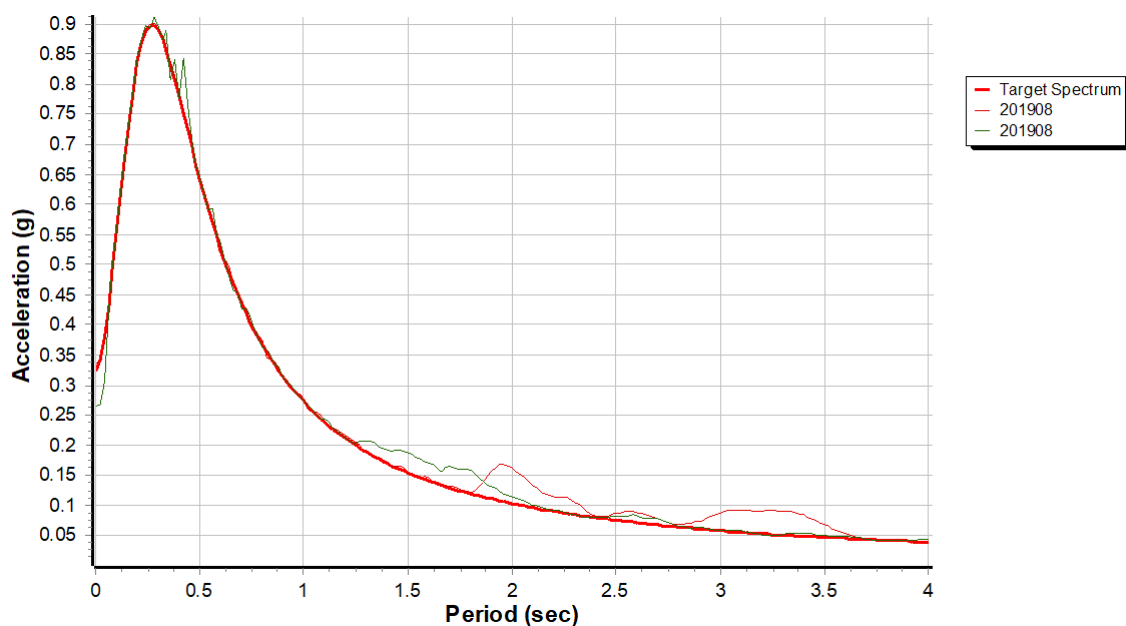


Figura 4.6 ESpectros horizontales escalados del registro 1.

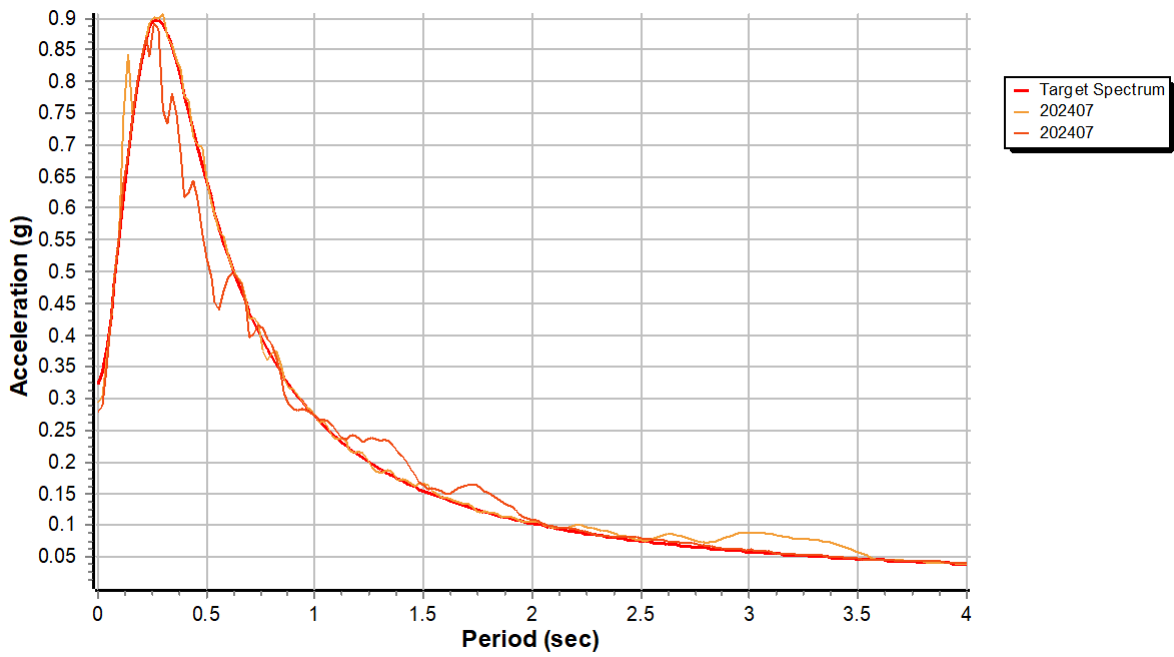


Figura 4.7 ESpectros horizontales escalados del registro 2.

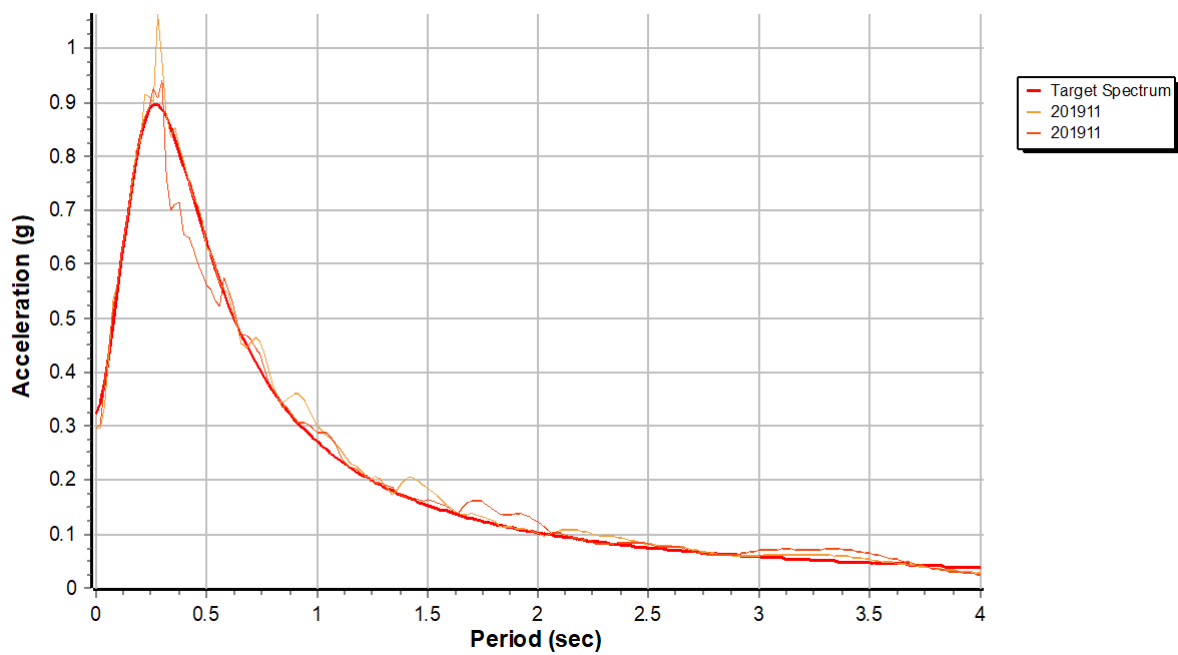


Figura 4.8 Espectros horizontales escalados del registro 3.

5 Modelo numérico del LCT

5.1 Antecedentes del modelo

Para desarrollar el modelo numérico del LCT se utilizó el software Ansys 2025 R1, complementado con otros programas de diseño asistido por computador (CAD), principalmente SpaceClaim e Inventor. La principal ventaja de emplear Ansys Workbench radica en su carácter modular, lo que permitió construir el modelo por partes y realizar pruebas de forma relativamente ágil en comparación con otros programas de elementos finitos.

En cuanto a la información disponible para construir el modelo, se contó con el modelo CAD de los telescopios tipo Leighton ubicados en OVRO, proporcionado por Caltech; en la Figura 5.1 se muestra un detalle de este modelo. Es importante precisar que, si bien los telescopios Leighton instalados en OVRO comparten gran parte del diseño con el LCT, no son idénticos, existiendo diferencias estructurales en los apoyos y en las extensiones de la plataforma acimutal. No obstante, este modelo fue utilizado en múltiples ocasiones como referencia para obtener información sobre la estructura del LCT, particularmente en lo referente a los espesores de la base y de la plataforma central.

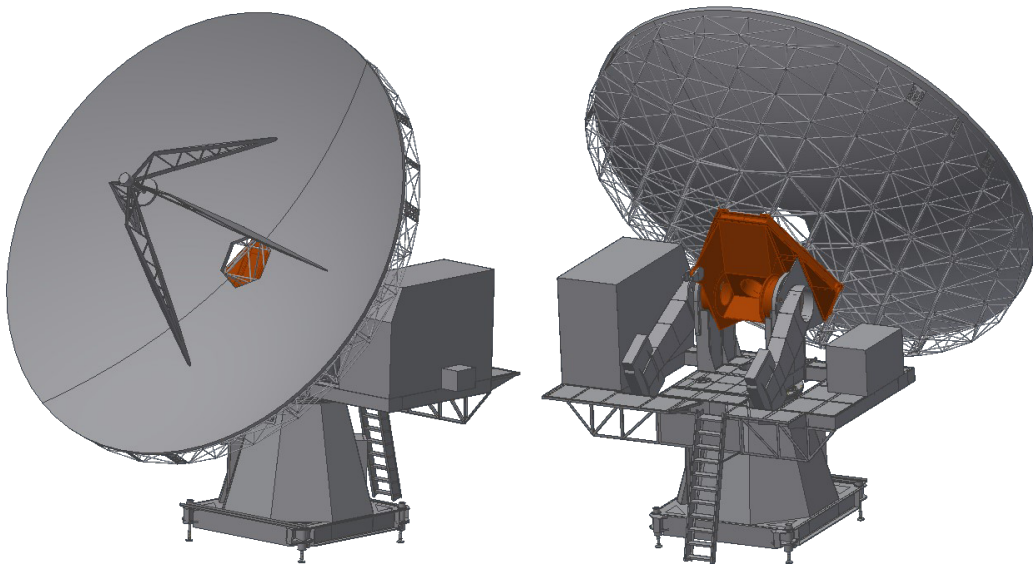


Figura 5.1 Modelo CAD del telescopio Leighton (OVRO) entregado por Caltech.

Otras fuentes de información que resultaron útiles para la construcción del modelo fueron archivos generados en trabajos previos desarrollados en el marco del proyecto LCT, en particular las memorias de Retamal [6], Carrasco [8] y Hernández [17], así como la tesis de Navarro [7]. Se encontraron archivos de SpaceClaim que contenían las geometrías de algunos componentes del LCT; sin embargo, varios de estos archivos no pudieron abrirse debido a diferencias entre versiones de software, lo que derivó en archivos corruptos. En general, casi todas las geometrías debieron ser modificadas para evitar problemas durante la generación de la malla.

Por otro lado, se dispuso de un informe técnico elaborado en los años previos a la construcción del telescopio, el cual detalla aspectos técnicos del reflector primario y de la plataforma de elevación [18]. Finalmente, se contó con escaneos de los planos originales del telescopio, los que complementaron la información disponible.

5.2 Geometría

5.2.1 Componentes del LCT

En esta sección se establece la nomenclatura usada para nombrar los distintos subcomponentes del telescopio, además de algunos aspectos generales usados durante el desarrollo del modelo.

Se puede dividir el LCT en tres conjuntos según su ubicación, como lo hizo Carrasco [8], se usa esta forma porque la construcción del modelo, en general, se realizó desde abajo hacia arriba:

- Conjunto superior: Reflectores primario y secundario, feedlegs, estructura de soporte (BUS), eje de elevación, rodamientos, plataforma de elevación, brazos y contrapesos.
- Conjunto intermedio: Plataforma acimutal central mas extensiones laterales y trasera.
- Conjunto inferior: Apoyos, base, rodamiento axial, motores, eje cónico, bullgear y el Teepee.

En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran etiquetados los nombres de los componentes del telescopio. Notar que en la Figura 5.2 el reflector secundario está representado por un elemento de viga, para más detalle ver la Figura 5.1.

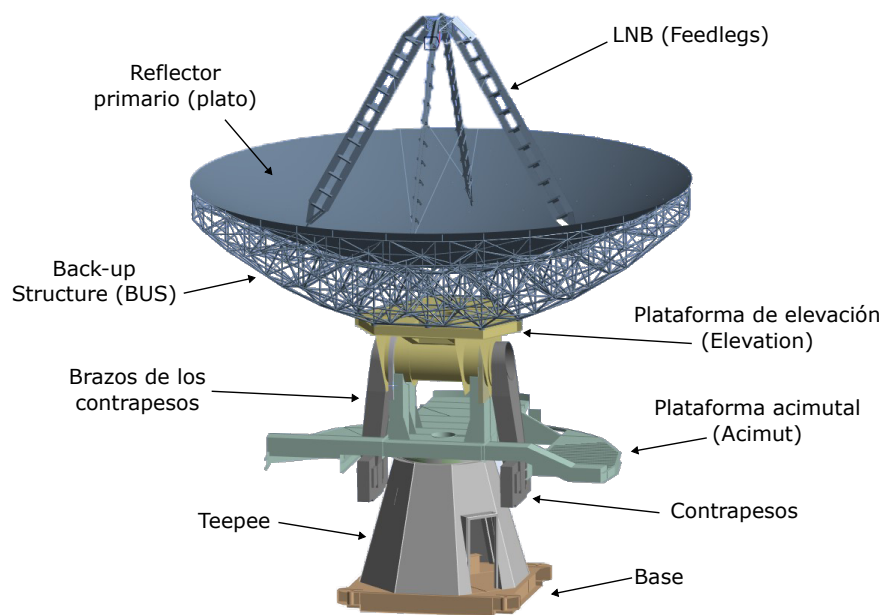


Figura 5.2 Estructura general del LCT.

5.2.2 Geometría simplificada y clasificación según posición

Para modelar la estructura del LCT se emplearon principalmente elementos de tipo cascarón y de viga en la mayoría de los componentes. La Figura 5.4 muestra el detalle de los elementos utilizados para cada parte del modelo. Se destaca el entramado del BUS, que, debido a su complejidad, se representó mediante elementos de viga. Es importante señalar que los reflectores primario y secundario no se incluyeron explícitamente en la geometría, sino que se modelaron como cargas equivalentes distribuidas sobre los elementos que los sostienen, con el fin de reducir el costo computacional de la integración numérica. Esta decisión fue clave, ya que, a diferencia de trabajos previos de carácter estático, las simulaciones transientes de

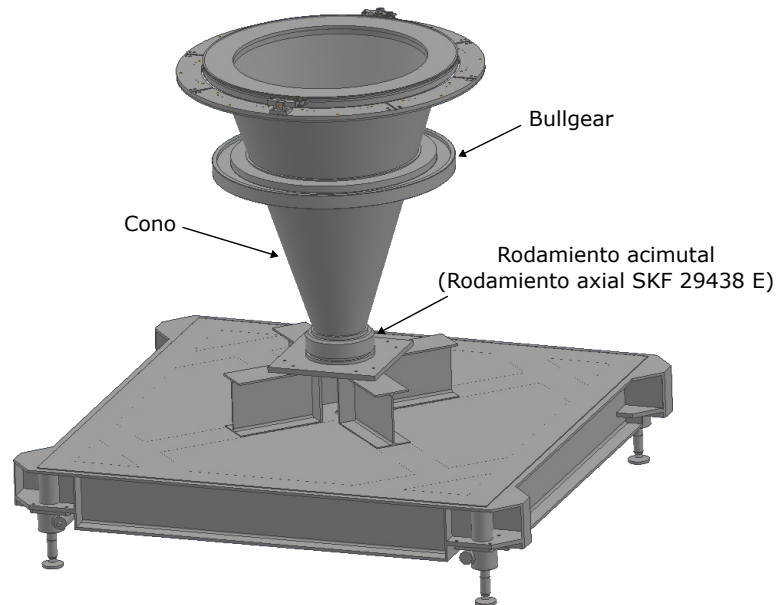


Figura 5.3 Conjunto inferior del LCT sin incluir el Teepee.

este estudio requieren resolver casos de más de 60 segundos de duración, lo que implica una demanda computacional significativamente mayor.

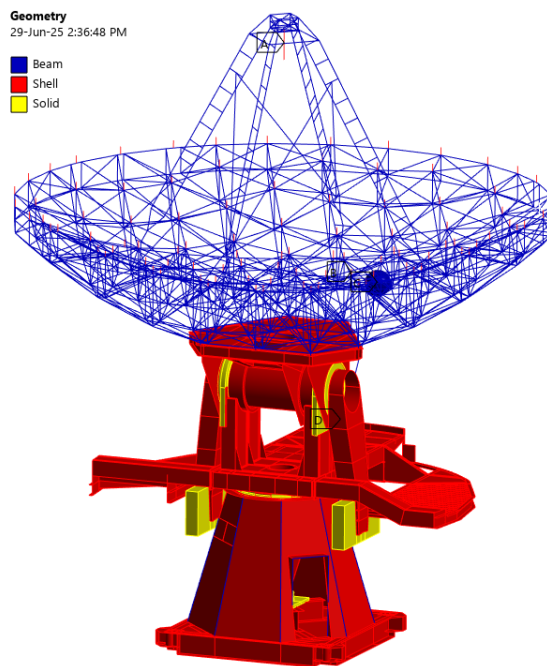


Figura 5.4 Tipos de elemento usados para modelar la estructura del LCT: Vigas (Azul), Cascarones (Rojo) y Sólidos (Amarillo).

Conjunto inferior

La geometría de la base fue elaborada a partir del modelo CAD del telescopio Leighton ubicado en OVRO (Figura 5.1). Utilizando las herramientas de SpaceClaim, el sólido original fue dividido en varios cuerpos individuales, los cuales posteriormente se convirtieron

en superficies para facilitar la generación de la malla. La geometría resultante se presenta en la Figura 5.5. Es relevante señalar que estas simplificaciones geométricas generaron, en etapas posteriores del análisis, singularidades en los esfuerzos concentrados, especialmente en las esquinas de 90° de las vigas que soportan el cono. Estas concentraciones de esfuerzo se atribuyen a la ausencia de los cordones de soldadura, los cuales no fueron incluidos en el modelo debido a limitaciones técnicas y de tiempo. De haberse considerado, estas singularidades habrían sido mitigadas o eliminadas.

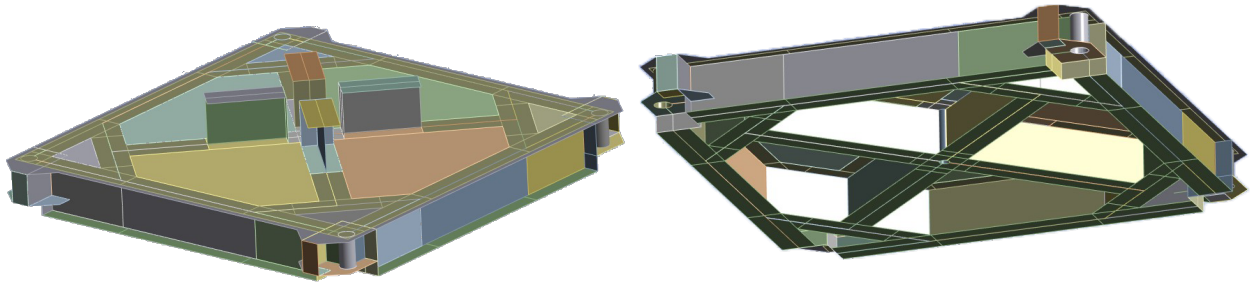


Figura 5.5 Geometría de la base simplificada.

La placa base del cono, que corresponde a la zona donde se concentran los mayores esfuerzos de la estructura, se mantuvo modelada como un sólido y se discretizó mediante elementos de volumen. Para optimizar el proceso de mallado y reducir la complejidad del modelo, se simplificaron detalles geométricos secundarios, como los agujeros para pernos y los radios de soldadura, ya que su influencia local se consideró poco relevante frente a la escala global del análisis. De forma similar, tanto el rodamiento acimutal como los anillos superiores se representaron como cuerpos sólidos, omitiendo el detalle interno de los elementos rodantes, lo que permitió disminuir el número de elementos sin afectar de manera significativa la rigidez global del sistema. En la Figura 5.6 se muestra la geometría resultante del cono, tal como fue incluida en el modelo numérico.

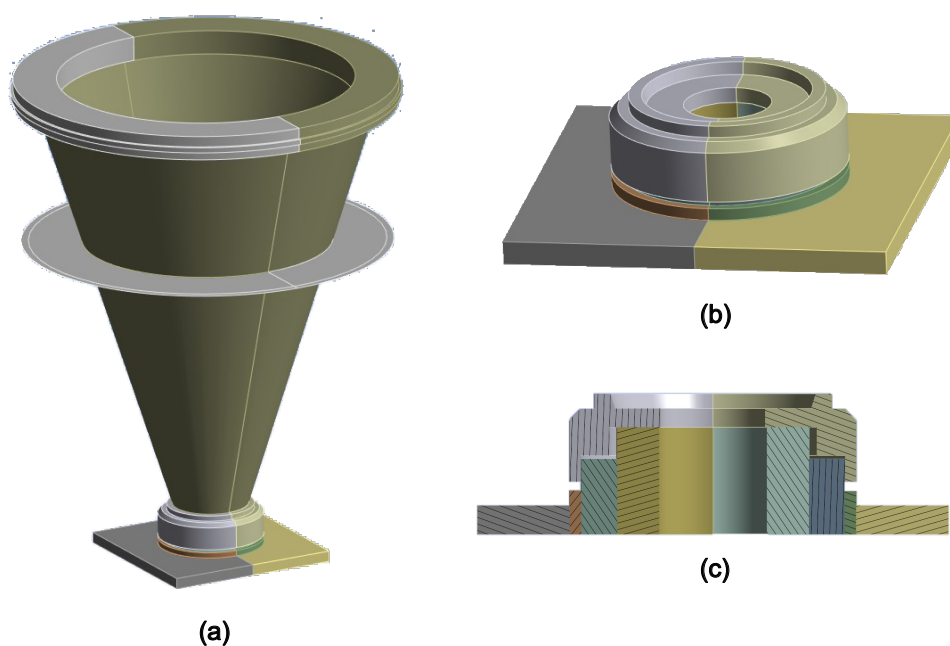


Figura 5.6 Geometría del cono simplificada.

El Teepee es la estructura que protege el cono y parte de la instrumentación del telescopio. Para su modelado, se utilizaron elementos de tipo cascarón para representar las placas de acero, mientras que los perfiles laterales fueron discretizados mediante elementos de viga. La geometría y discretización del Teepee se ilustran en la Figura 5.7.

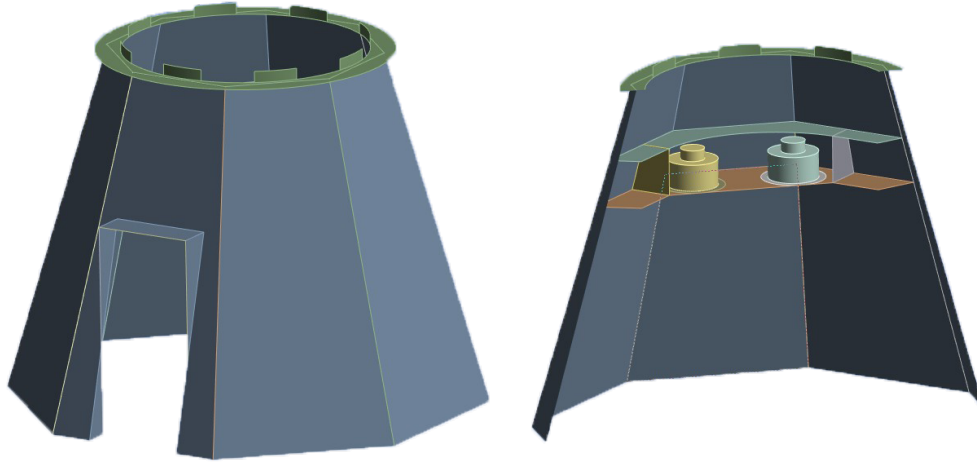


Figura 5.7 Geometría del Teepee simplificada.

Conjunto intermedio

La plataforma acimutal, presentada en la Figura 5.8, es uno de los componentes con mayor complejidad debido a la cantidad de detalles pequeños que presenta. Para su modelado, se emplearon exclusivamente elementos de tipo cascarón, lo que permitió una representación adecuada de sus características estructurales. A diferencia de estudios previos [6, 17, 8], en este trabajo la plataforma central y sus extensiones laterales se diseñaron integradamente en un único archivo CAD, lo que permitió que estos componentes compartan nodos en el modelo numérico, asegurando una mejor continuidad y transferencia de cargas entre ellos.

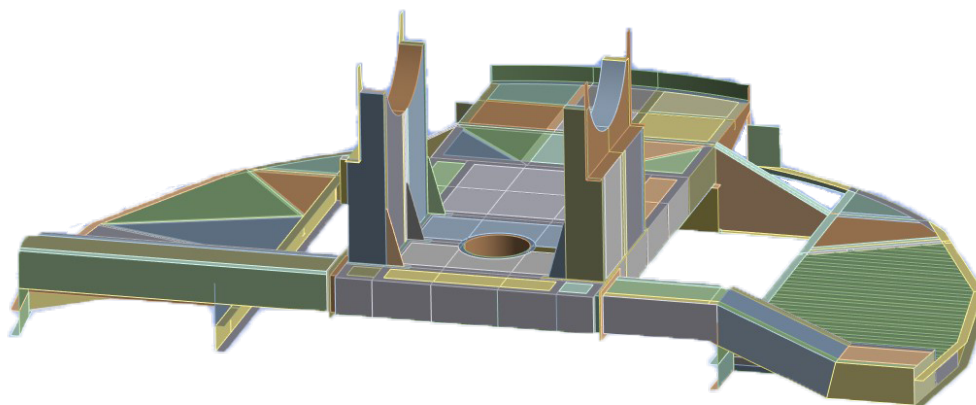


Figura 5.8 Geometría de la plataforma acimutal simplificada.

Conjunto superior

La plataforma de elevación, mostrada en la Figura 5.9, es el componente donde está apoyado el BUS y permite el cambio en la elevación de la antena. Este fue modelado principalmente con elementos de tipo cascarón, a excepción de los contrapesos y rodamientos que son sólidos.

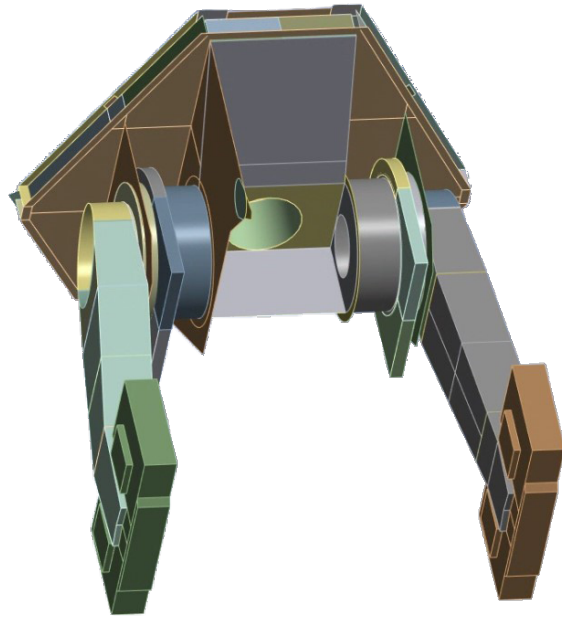


Figura 5.9 Geometría de la plataforma de elevación y contrapesos simplificada.

Finalmente, la geometría del BUS, los reflectores y el LNB fue la más simplificada en comparación con la realidad, debido a la gran cantidad de detalles menores que exceden el alcance del modelo. Como se mencionó anteriormente, los reflectores primario y secundario fueron representados mediante cargas distribuidas aplicadas en los elementos que los soportan en la realidad. Los pesos asignados a estas estructuras son 1370 kg para el reflector primario y 100 kg para el secundario. El peso del reflector primario fue estimado a partir del artículo de Woody [5], que especifica una densidad superficial de 15 kg/m^2 , mientras que el peso del reflector secundario se obtuvo de la tesis de Navarro [7]. En la Figura 5.10 se presenta el entramado de vigas que conforman esta estructura, cuya captura está renderizada con las secciones transversales asignadas a cada elemento.

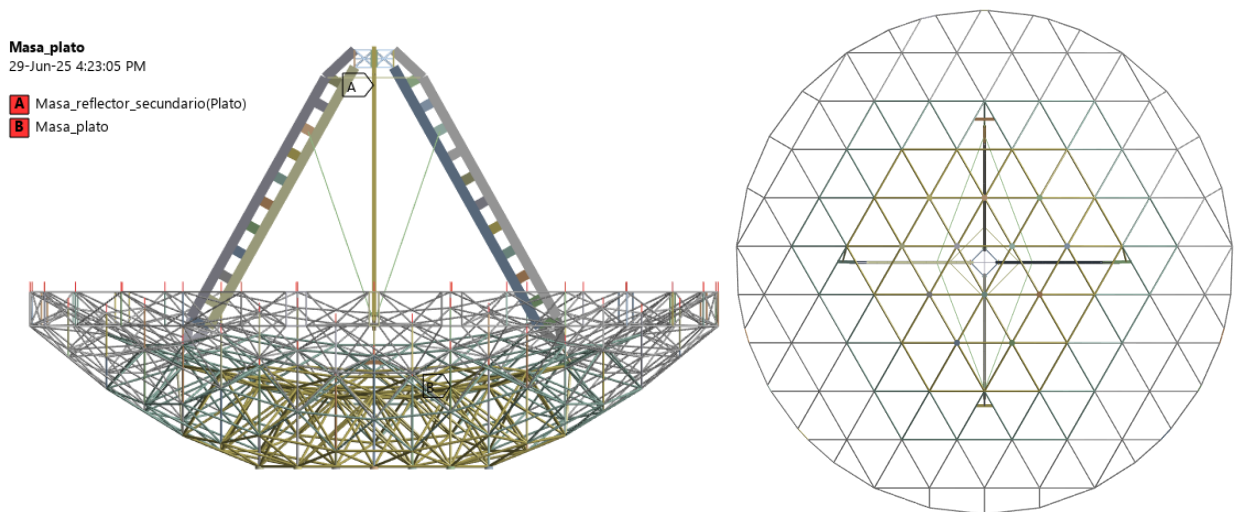


Figura 5.10 Geometrías de las antenas y el entramado de vigas simplificada.

5.3 Materiales

En esta sección se presentan las propiedades mecánicas de los materiales usadas en el modelo, dicha información fue obtenida a partir de los datos recopilados en la memoria de Carrasco [8] y se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas de los materiales.

Material	σ_0 [MPa]	σ_r [MPa]	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν
Acero ASTM A36	250	460	200	7850	0.3
Acero ASTM A283D	230	415	200	7850	0.3
Acero AISI 1020 CD	390	470	200	7850	0.3
Aluminio 6061 T-6	270	310	69	2770	0.33

Respecto al peso de los componentes del LCT, se tienen valores de referencia obtenidos de los trabajos de Retamal y Carrasco en sus memorias de título [6, 8], estos se encuentran resumidos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Comparación de las masas de los componentes del LCT en memorias de Retamal y Carrasco.

Componente	Retamal [kg]	Carrasco [kg]
Reflector primario	1372	1373
Reflector secundario	224	225
Brazos de los contrapesos	2624	2736
Eje cónico	1722	1722
Contrapesos	5191	5192
BUS	3058	3058
Plataforma azimutal	5561	5374
Plataforma base / Base y apoyos	4076.66	4077
Plataforma de elevación	2840	2840
TeePee	3278.13	3363
Transductor	497	-
Tornillo elevación	-	82
Total	30448	31020

5.4 Discretización del modelo y calidad del mallado

La discretización del modelo se realizó de manera independiente para cada conjunto, siguiendo la geometría previamente descrita. Se empleó el generador automático de malla de Ansys, aplicando ajustes en los parámetros de entrada y añadiendo controles locales para obtener una malla más estructurada en cada componente del telescopio. Todos los elementos de la malla son de tipo cuadrático, lo que contribuye a mejorar la precisión de los resultados, especialmente en la estimación de esfuerzos.

El criterio general aplicado consistió en utilizar principalmente elementos cuadrados para las superficies y elementos hexagonales para los sólidos. Sin embargo, en ciertos casos se recurrió a elementos tetraédricos en zonas donde el algoritmo del software presentaba dificultades, como en los rodamientos de la plataforma de elevación. En total, se generaron 84,071

elementos y 219,240 nodos, de los cuales un 4.8% corresponden a elementos de tipo viga, un 77.4% a cascarones y un 17.7% a elementos sólidos. Más detalles sobre la distribución de tipos de elementos pueden consultarse en la Tabla 5.3. En comparación con modelos desarrollados en trabajos anteriores, la malla presentada en este estudio cuenta con un menor número de elementos, decisión motivada principalmente por la necesidad de reducir los tiempos de cómputo durante la integración numérica y evitar cierres inesperados del programa.

Tabla 5.3 Estadísticas generales de la malla.

Propiedad	Valor
Nodes	219240
Elements	84071
Corner Nodes	82883
Mid Nodes	132146
Shared Nodes	2718
Orientation Nodes	4119
Beam Elements	4119
Beam3	4119
Shell Elements	65067
TriShell3	727
TriShell6	1072
QuadShell4	21171
QuadShell8	42097
Solid Elements	14885
Tet10	6345
Hex20	8540

Respecto a las métricas usadas para evaluar la calidad del mallado, se usaron principalmente la calidad ortogonal y el Skewness. En específico, se buscó que más del 90% de los elementos tengan una calidad ortogonal superior a 0,8. En las Figuras 5.11 y 5.12 se muestran histogramas que muestran la calidad ortogonal y Skewness del mallado del modelo. En el Anexo se pueden encontrar esquemas que muestran visualmente los valores de calidad ortogonal en la malla de los varios componentes del telescopio.

Partiendo por la base (ver Figura 5.13), esta fue discretizada en casi su totalidad por elementos cuadrados de un tamaño máximo de 50 mm, habiendo una reducción en las zonas cercanas a los cinco cuerpos cilíndricos, principalmente el central. Con estos tamaños se logra tener hasta 8 elementos en la sección transversal del alma de las vigas y 6 en las solapas. La calidad ortogonal mínima de los elementos en este componente es de 0.647 y la cantidad total es de 15831 elementos.

El mallado del cono (ver Figura 5.14) está compuesto en su mayoría por elementos cuadrados y hexagonales, con algunos triángulos como elementos de transición entre zonas de malla fina y gruesa. Los elementos del rodamiento fueron dispuestos de manera que mantengan una simetría axial respecto al eje acimutal. Respectos a parámetros de calidad de la malla, la calidad ortogonal mínima es de 0.609 y 0.192 para elementos 2D y 3D, respectivamente. Por otro lado, el número total de elementos es de 6047.

El mallado del Teepee se expone en la Figura 5.15, este está compuesto por elementos de

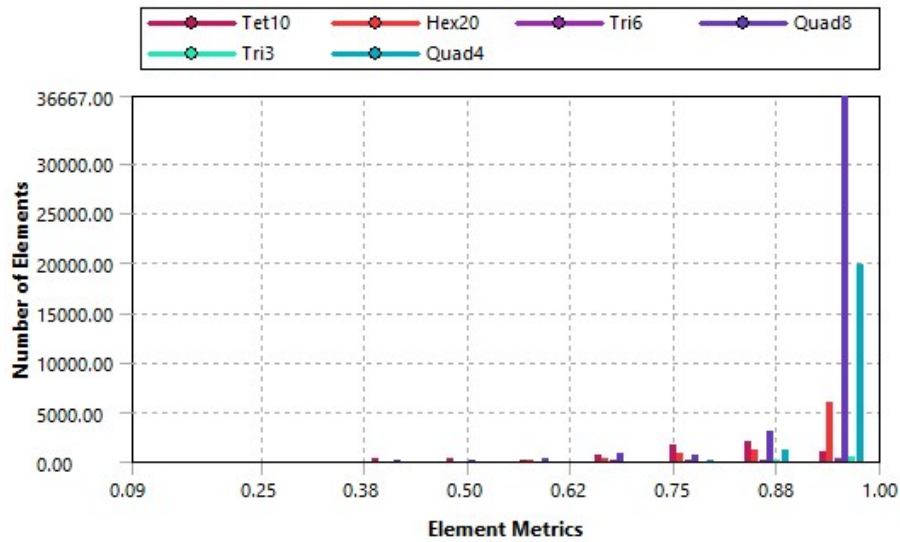


Figura 5.11 Distribución de la calidad ortogonal de los elementos de la malla del LCT.

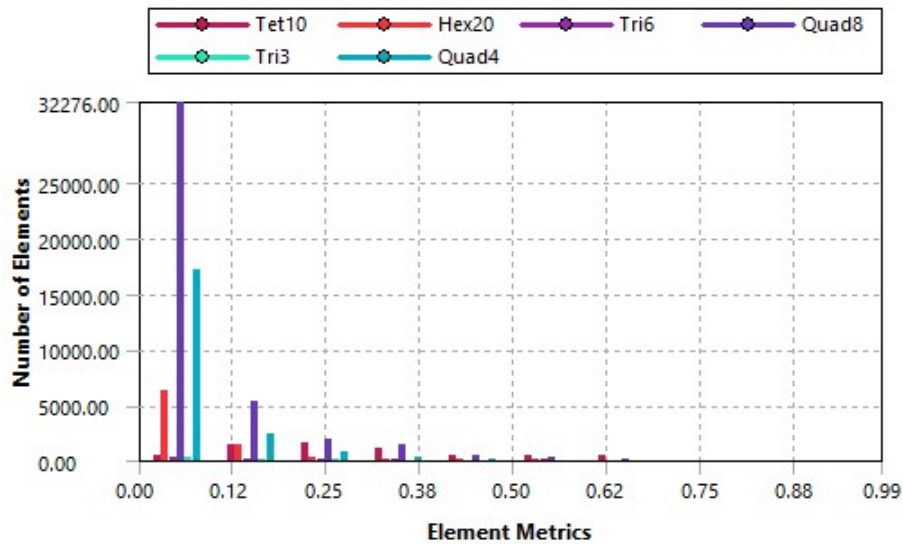


Figura 5.12 Distribución del Skewness de los elementos de la malla del LCT.

superficie para modelar las paredes y por elementos de viga para representar los perfiles que sostienen las mismas; además de los elementos sólidos usados para representar los motores. La calidad ortogonal mínima es de 0.216 y 0.296 para elementos 2D y 3D, respectivamente. El total de elementos es de 7518.

En la Figura 5.16 se muestra la discretización de la plataforma acimutal, la cual está compuesta totalmente por elementos de superficie de un tamaño máximo de 60 mm; el 96.6% de estos elementos, corresponden a cuadrados. La calidad ortogonal mínima de esta malla es de 0.093 y el total de elementos es de 25599, siendo el componente con mayor cantidad de elementos en el modelo.

La discretización del BUS y Feedlegs mostrada en la Figuras 5.17 está compuesta en su totalidad de elementos de viga, los reflectores primario y secundarios son representados por masas equivalentes distribuidas en los elementos que serían de apoyo. Respecto a los controles de tamaño de los elementos, estos se dividieron en 3 secciones para cada perfil, haciendo un total de 3739 elementos. Una vista más detallada de esta estructura se puede apreciar en la

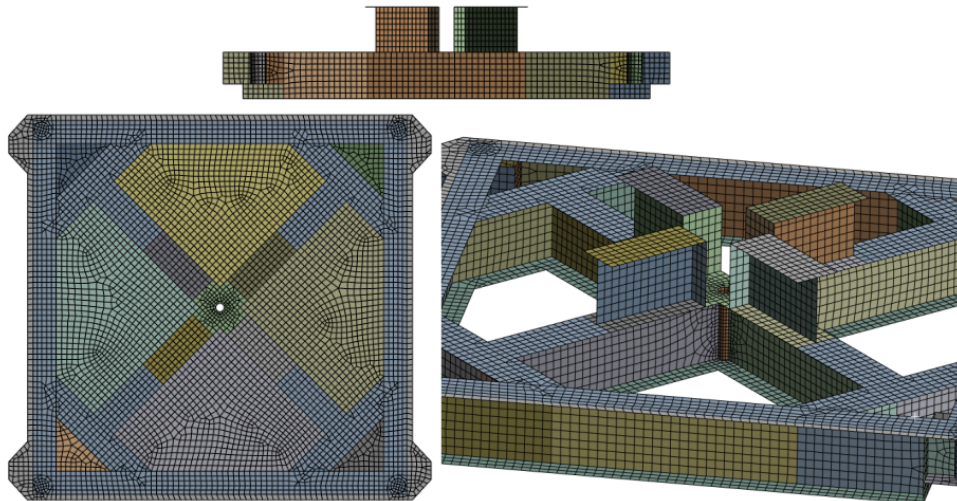


Figura 5.13 Mallado de la Base.

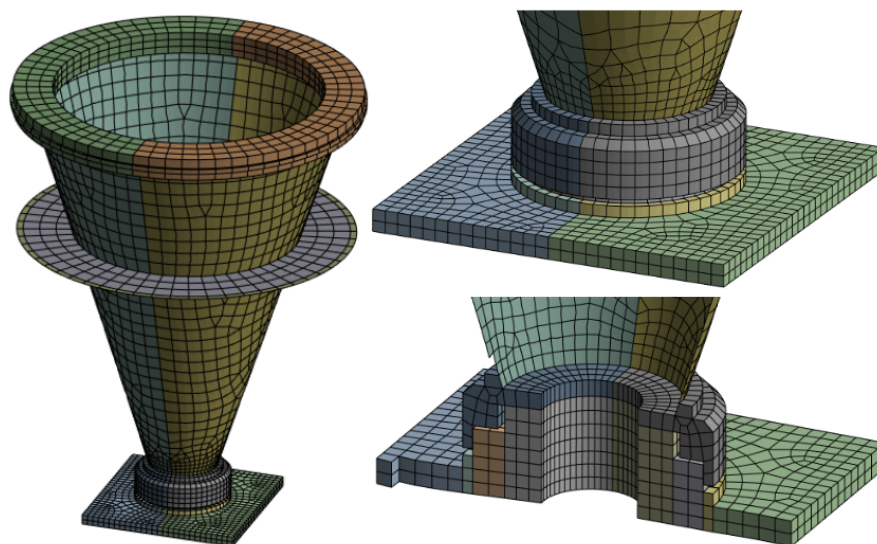


Figura 5.14 Mallado del Cono.

Figura C.4 en el Anexo.

La plataforma de elevación está compuesta por varios cuerpos unidos usando conexiones tipo Bonded con la formulación MPC. En la Figura C.2 se muestra la discretización de este componente, pudiéndose encontrar elementos de superficie y volumen con un tamaño máximo de 60 mm. La cantidad total de elementos de este componente es de 19482. Respecto a la calidad ortogonal de los elementos de superficie y volumen, los valores son de 0.158 y 0.18, respectivamente.

Por último, la malla de los contrapesos, mostrada en la Figura 5.19, está compuesta por elementos de superficie y de volumen, ambos con un tamaño máximo de 70 mm, siendo en total 5830 elementos (contando los dos contrapesos y los brazos). Respecto a la calidad ortogonal mínima de los elementos, esta es de 0.151 para los elementos de superficie y 0.779 para elementos de volumen.

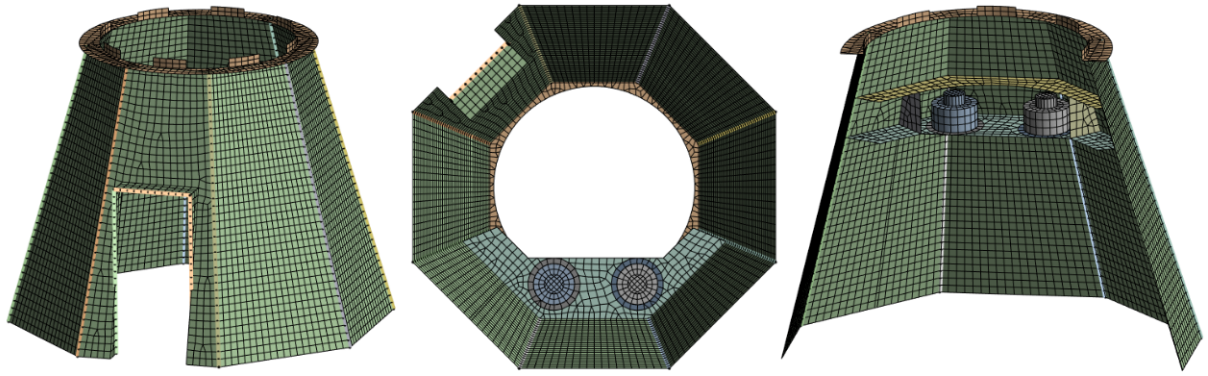


Figura 5.15 Mallado del Tepee.

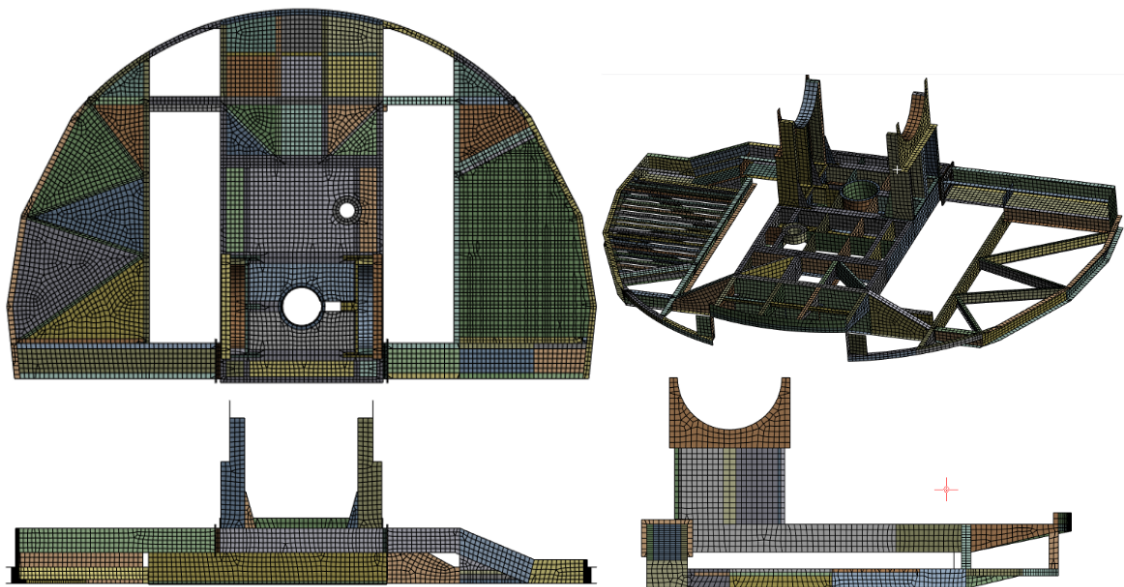


Figura 5.16 Mallado de la plataforma Acimutal.

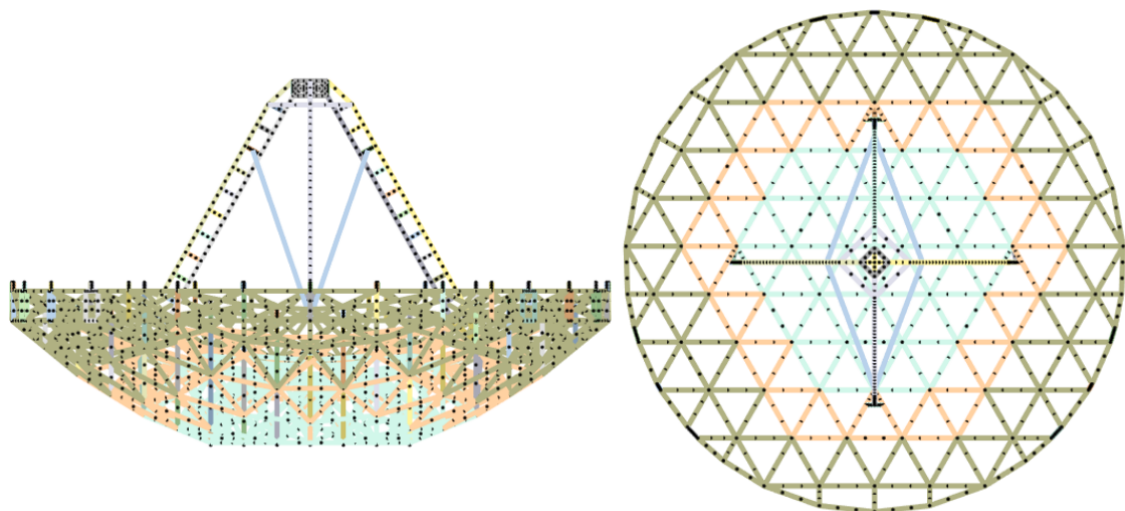


Figura 5.17 Mallado del BUS y Feedlegs.

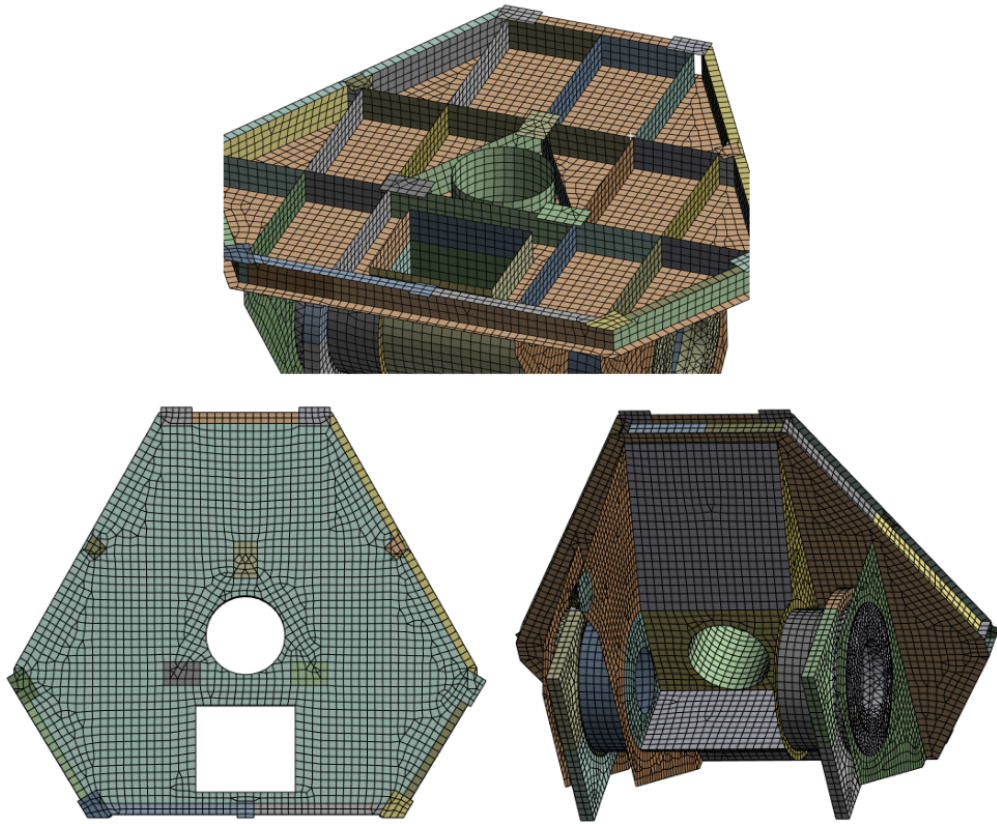


Figura 5.18 Mallado de la plataforma de elevación.

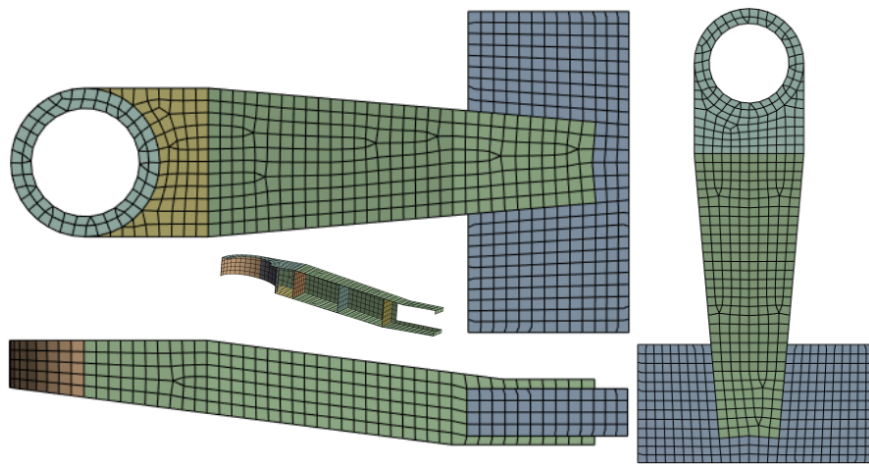


Figura 5.19 Mallado de los contrapesos.

5.5 Condiciones de borde

5.5.1 Conexiones

Para ensamblar las mallas de las diferentes partes que conforman el LCT, se emplearon conexiones del tipo Bonded, utilizando la formulación de restricción multipunto (MPC). En la Figura 5.20 se destacan en color rojo las zonas donde se aplicaron estas restricciones.

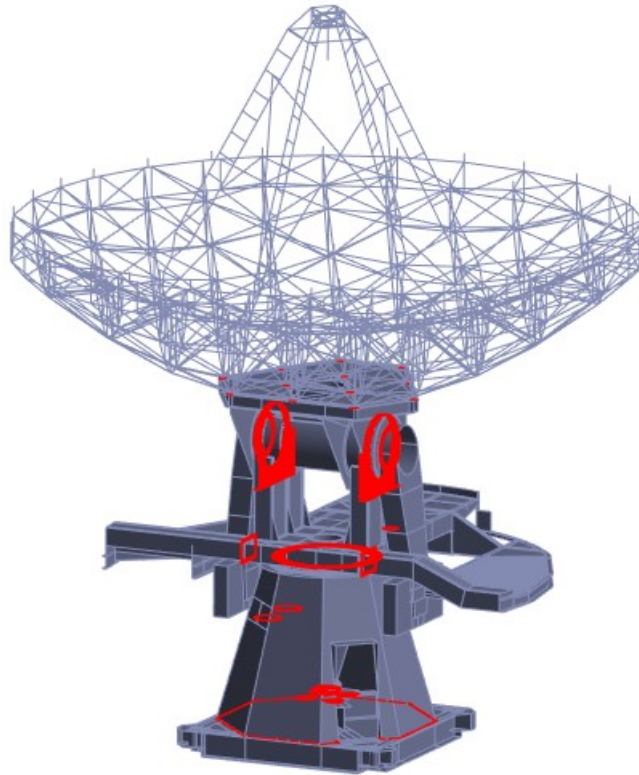


Figura 5.20 Conexiones entre los diferentes componentes del LCT mediante la formulación de restricción multipunto.

5.5.2 Aplicación del movimiento de la base y gravedad

Los registros sísmicos presentados en el Capítulo 4 fueron aplicados sobre los elementos resaltados en color azul en la Figura 5.21. Para cada caso de estudio, el movimiento de la base se impuso utilizando las velocidades corregidas obtenidas mediante el programa SeismoMatch. Estas cargas se aplicaron en las tres direcciones principales.

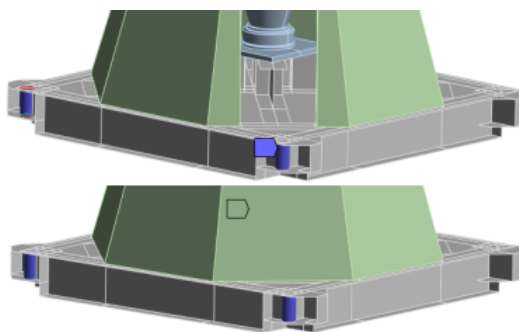


Figura 5.21 Puntos de aplicación del movimiento de la base.

6 Análisis de resultados

6.1 Validación del modelo numérico

Con el propósito de validar el modelo numérico desarrollado en este trabajo, se tomaron como referencia los resultados presentados en la conferencia SPIE 2020 por José Vial [19], en su presentación llamada “The Leighton Chajnantor Telescope: Project update and mechanical structural analysis in preparation for new deployment in Chajnantor, Chile”. En específico, se utilizaron los primeros 10 modos de vibrar (y sus respectivas frecuencias) del modelo validado en 2020 con los datos experimentales que se recolectaron en ese tiempo.

El procedimiento de validación del modelo actual consistió, en una primera etapa, en reproducir los modos de vibrar del modelo presentado en SPIE 2020, independiente de las diferencias en las frecuencias naturales de dichos modos. Para lograr esta correspondencia modal se establecieron cuidadosamente todas las conexiones entre los distintos componentes del LCT y se asignaron las propiedades mecánicas de los materiales correspondientes.

Inicialmente, los modos de vibrar presentes en el modelo de referencia coincidieron con el modelo actual, salvo por las frecuencias naturales, en donde se encontraron diferencias pequeñas de un máximo de 5 Hz aproximadamente. Luego, para mejorar la concordancia numérica, se ajustaron las propiedades de los materiales en algunos componentes concretos, en específico la densidad. De esta forma fue posible alterar las masas involucradas en los modos de vibrar que presentaban mayores diferencias en las frecuencias naturales. En particular, se tuvo que parametrizar el valor numérico de la densidad y hacer un estudio de su efecto en los modos de interés. Finalmente, se obtuvo una diferencia máxima de un 18% en las frecuencias naturales, estos resultados se muestran en la 6.1.

Tabla 6.1 Comparación entre las frecuencias naturales de los modelos SPIE 2020 y LCT 2025.

Modo	SPIE 2020	LCT 2025	Error (%)
1	3.66	3.00	18.03
2	4.12	3.85	6.55
3	4.44	4.43	0.23
4	7.03	7.67	9.11
5	7.78	7.11	8.61
6	8.34	8.47	1.56
7	8.62	9.24	7.19
8	8.88	9.18	3.38
9	10.78	10.83	0.46
10	11.53	12.78	10.85

En las Figuras 6.1 y 6.2 se ilustran los primeros doce modos de vibración obtenidos para el modelo numérico validado. Estos resultados evidencian una adecuada correlación, tanto cualitativa como cuantitativa, con los modos de referencia empleados para la validación. En cuanto a las formas modales, se observa que el primer modo, con una frecuencia de 3 Hz, corresponde a un modo torsional de la antena. Los modos segundo y tercero se asocian al tornillo sin fin, mientras que los modos cuarto y quinto representan movimientos de inclinación de la antena en las direcciones Z y X, respectivamente. El sexto modo describe una torsión de los feedlegs. Por su parte, los modos séptimo y octavo se relacionan

principalmente con vibraciones de los contrapesos. Los modos noveno, décimo y undécimo corresponden nuevamente a modos de los feedlegs, y finalmente, el duodécimo modo combina el movimiento de los contrapesos con oscilaciones del reflector secundario.

Es importante mencionar que la similitud de los modos de vibrar entre el modelo de referencia y el actual fue estimada por comparación visual entre los videos existentes de las formas modales del modelo de referencia y los resultados del modelo actual obtenidos con el módulo "modal". Esto fue hecho de esta manera por ausencia de los archivos originales que guardaban los resultados de SPIE 2020, no permitiendo usar métodos cuantitativos de comparación como el "Modal Assurance Criterion" (MAC).

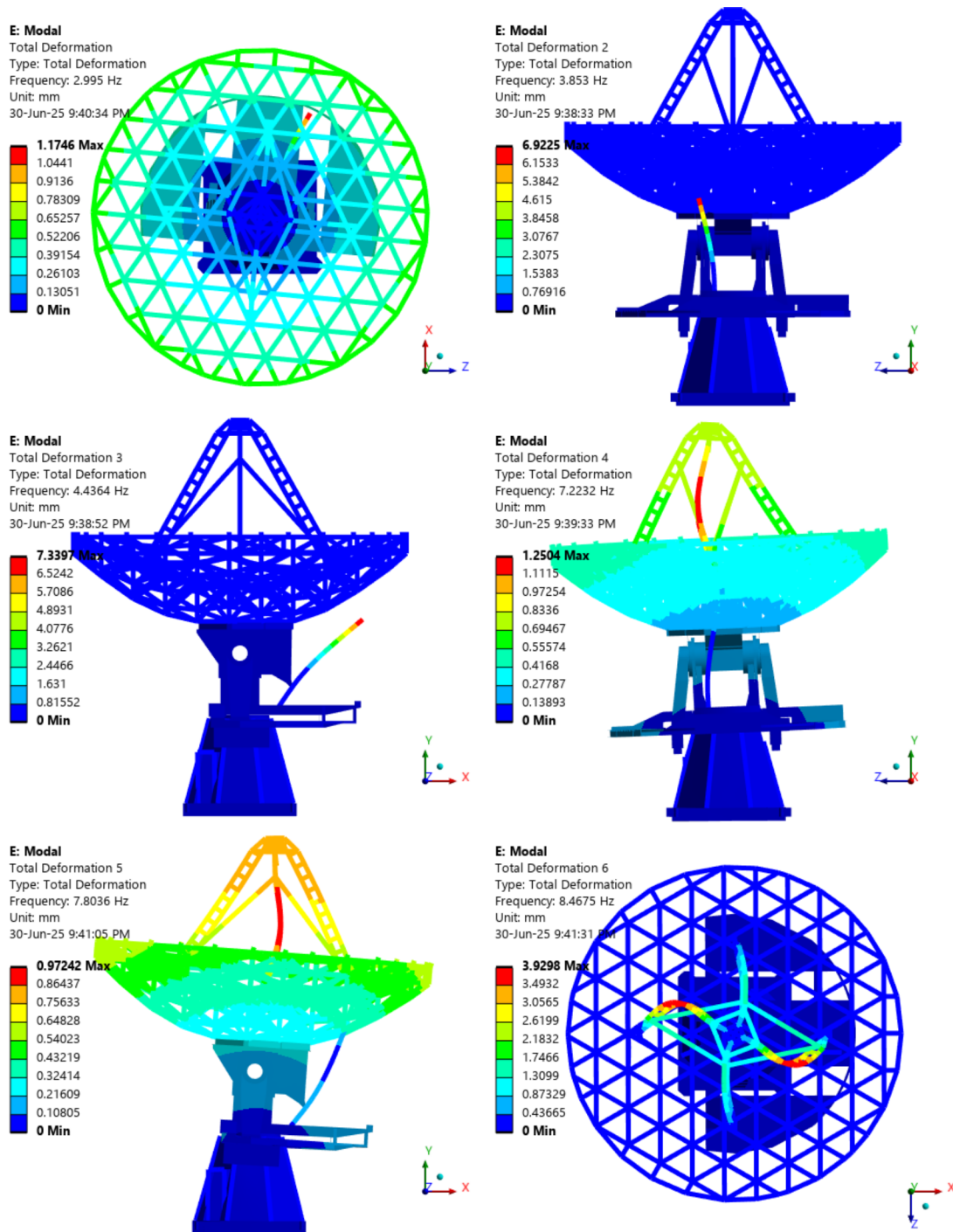
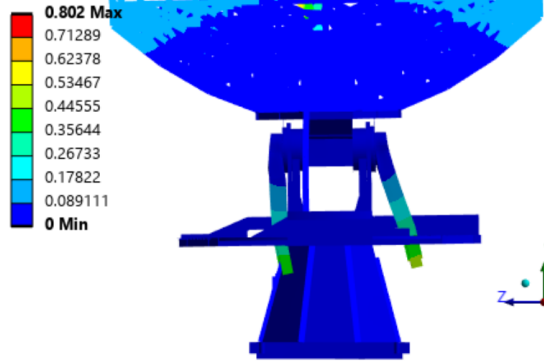
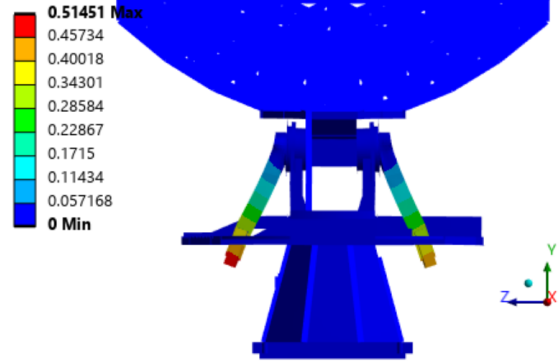


Figura 6.1 Modos de vibrar del LCT: modos 1 al 6.

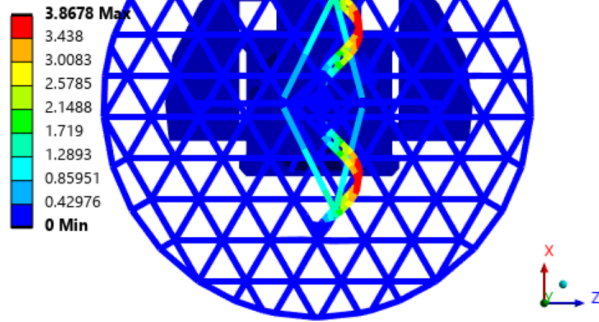
E: Modal
 Total Deformation 7
 Type: Total Deformation
 Frequency: 9.2096 Hz
 Unit: mm
 30-Jun-25 9:47:28 PM



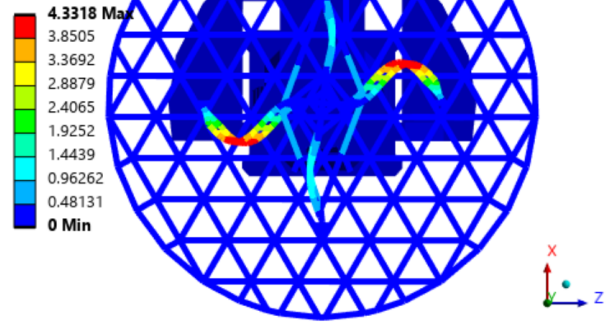
E: Modal
 Total Deformation 8
 Type: Total Deformation
 Frequency: 9.2647 Hz
 Unit: mm
 30-Jun-25 9:50:57 PM



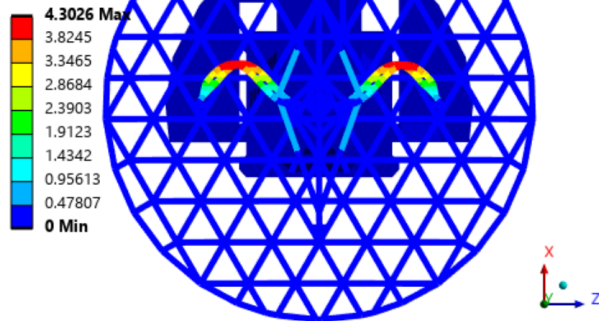
E: Modal
 Total Deformation 9
 Type: Total Deformation
 Frequency: 10.853 Hz
 Unit: mm
 30-Jun-25 9:51:33 PM



E: Modal
 Total Deformation 10
 Type: Total Deformation
 Frequency: 12.725 Hz
 Unit: mm
 30-Jun-25 9:52:27 PM



E: Modal
 Total Deformation 11
 Type: Total Deformation
 Frequency: 12.787 Hz
 Unit: mm
 30-Jun-25 9:54:15 PM



E: Modal
 Total Deformation 12
 Type: Total Deformation
 Frequency: 16.28 Hz
 Unit: mm
 30-Jun-25 9:54:45 PM



Figura 6.2 Modos de vibrar del LCT: modos 7 al 12.

6.2 Resultados estáticos considerando solamente el peso propio

Previo a los resultados de las simulaciones transientes, se analizan los resultados estáticos considerando únicamente el peso propio de la estructura. Esto permite obtener una noción preliminar sobre el comportamiento del modelo ante cargas dinámicas, además de posibilitar algunas pruebas que, debido a limitaciones computacionales, no se pueden realizar en el análisis transiente.

6.2.1 Desplazamientos y distribución de esfuerzos

En la Figura 6.3 se muestran los desplazamientos equivalentes de la estructura bajo el peso propio para los tres casos estudiados. Esta figura proporciona una idea general sobre la rigidez de la estructura; en particular, se observa que el conjunto superior y la plataforma acimutal son los componentes que más se deforman por acción de la gravedad, por lo que es esperable que sean estos los que presenten mayores desplazamientos durante un sismo. De esta forma, se espera que las antenas y los contrapesos sean los elementos que más contribuyan a las fuerzas inerciales generadas durante un evento telúrico. Por el contrario, el conjunto inferior resulta ser bastante rígido y se anticipan esfuerzos de mayor magnitud en esta zona durante las simulaciones transientes.

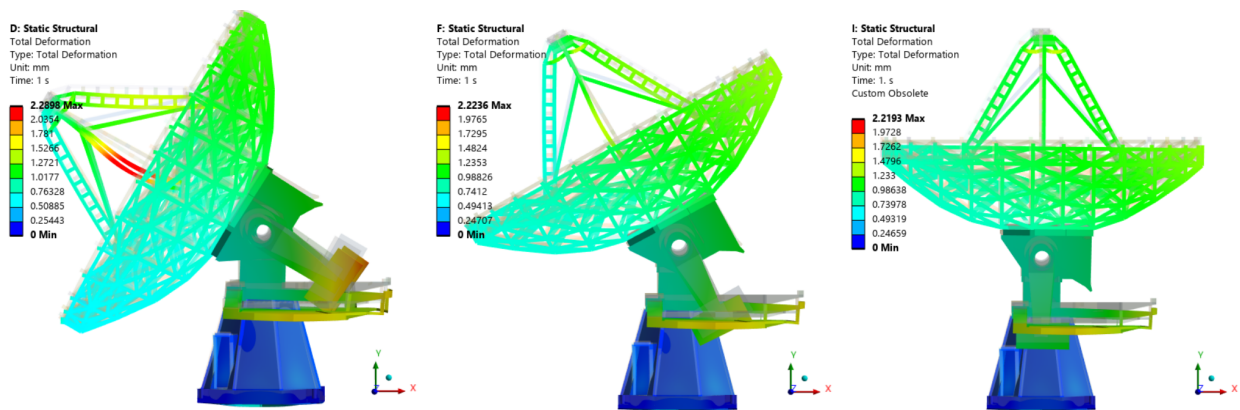


Figura 6.3 Desplazamientos equivalentes para las elevaciones de 30°, 60° y 90° por efectos del peso propio de la estructura.

En cuanto a los esfuerzos, se identificaron varias zonas específicas del modelo donde se registran esfuerzos de mayor magnitud que en el resto de la estructura. El resultado más destacado se encontró en la base, que presenta los mayores esfuerzos, específicamente en las vigas superiores que soportan el rodamiento axial en la base del cono. En esta zona se observaron varias singularidades de esfuerzos en las esquinas del alma de las vigas, como se aprecia en la Figura 6.4. Cabe destacar que los esfuerzos máximos de 42 MPa corresponden al valor promedio de esfuerzos en todo el elemento (Elemental mean). Estas singularidades serán analizadas en la siguiente sección.

Otras zonas donde también se presentaron máximos locales de magnitud relevante es en las extensiones laterales de la plataforma acimutal, como se muestra en la Figura 6.5. Al contrario del caso anterior, estos esfuerzos no son generados en esquinas de 90° y no parecieran ser singularidades generadas por la malla; de igual forma será investigado el efecto del tamaño de los elementos en la siguiente sección.

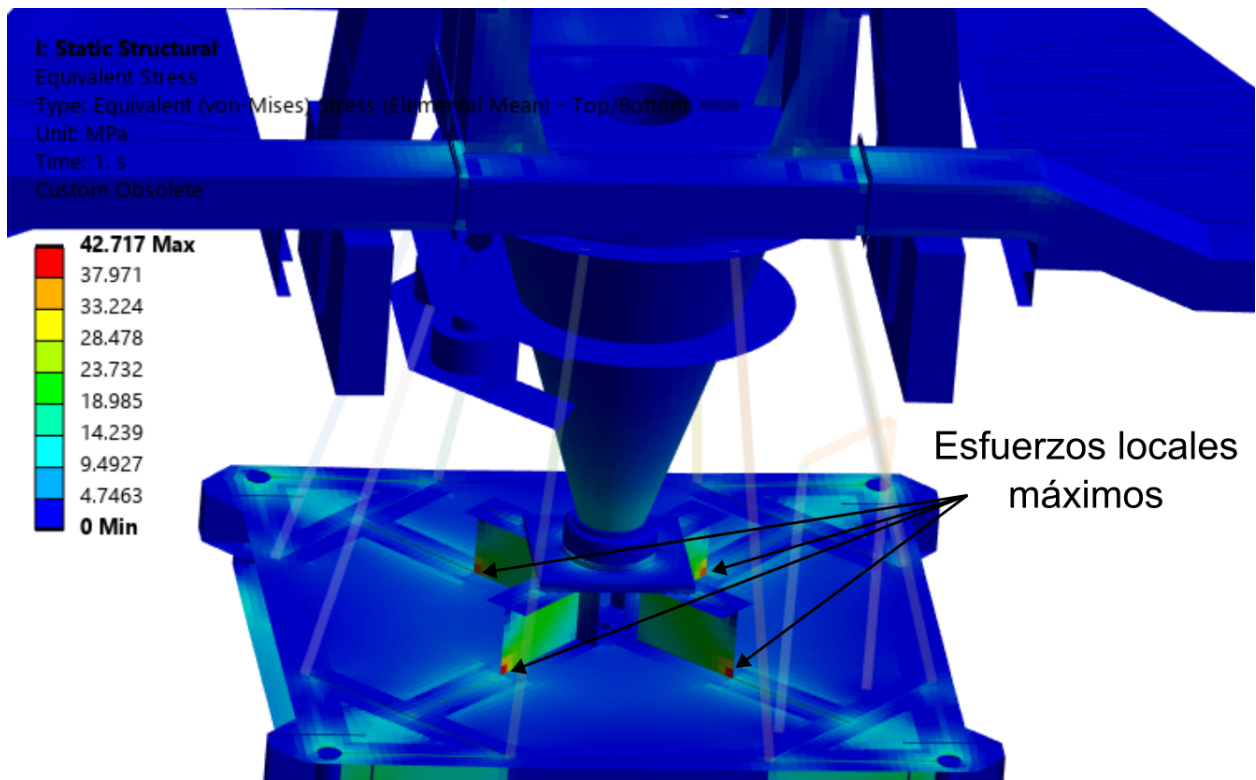


Figura 6.4 Esfuerzos locales máximos en la base, causados por el peso propio del telescopio.

6.2.2 Singularidades de esfuerzos en el modelo para el caso estático

Con base en los resultados obtenidos del análisis estático del modelo, no es del todo seguro que las concentraciones de esfuerzos observadas en el modelo sean resultados que se den en la realidad. De hecho, el tamaño de los elementos podría estar incidiendo en los resultados obtenidos, elevandolos de manera artificial. Para confirmar esto, se realizó una comparación de los esfuerzos equivalentes obtenidos en función del tamaño de los elementos. Específicamente, se parametrizó el tamaño de los elementos para realizar pruebas con varios tamaños de elemento de forma rápida y eficiente.

Primero se investigó la base del telescopio, como referencia se consideró primero el tamaño por defecto de los elementos y luego se calcularon los esfuerzos con discretizaciones cada vez más finas. Las zonas a investigar fueron las vigas superiores de la base y el resto de la base por separado. Los resultados indican que los esfuerzos no convergen en ningún valor específico, de hecho crecen exponencialmente al ir disminuyendo el tamaño de los elementos, como se observa en el gráfico de la Figura 6.6. Es importante recalcar que el tamaño mínimo de elemento investigado fue de 8 mm, en este punto el número total de elementos era de 520621 con 1560413 nodos, por lo que no se continuó afinando la malla por limitaciones técnicas.

Posterior a investigar la base, se optó por revisar los efectos del tamaño de elemento en la plataforma acimutal, pues ahí también se observaron algunas concentraciones de esfuerzo. Siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, se calcularon los esfuerzos promedio y máximos considerando solamente el acimut, los resultados se muestran en el gráfico de la Figura 6.7. Se observa que a medida que disminuye el tamaño de los elementos, el esfuerzo promedio se mantiene en un rango de 1.44-1.49 MPa, mientras que los esfuerzos máximos suben de 23 a 26.5 MPa. Esto indica que, en general, los esfuerzos en el acimut no cambian

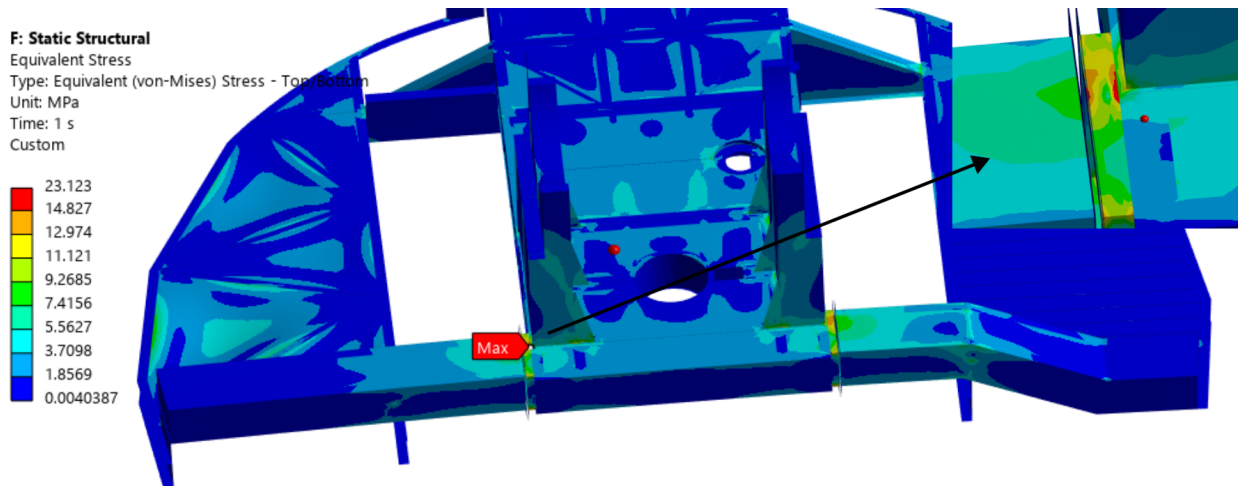


Figura 6.5 Esfuerzos locales máximos en la plataforma acimutal, causados por el peso propio del telescopio.

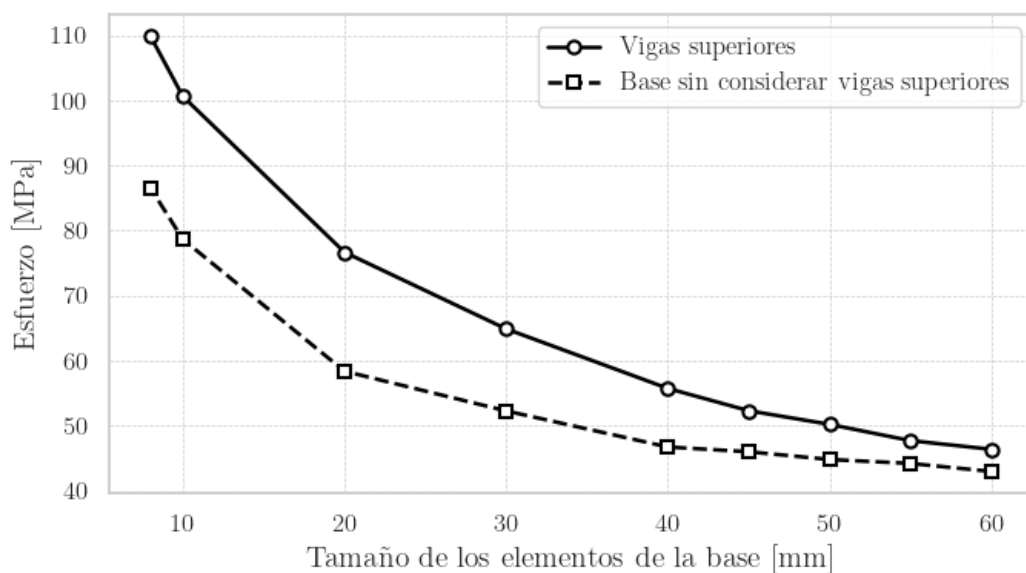


Figura 6.6 Tendencia de los esfuerzos máximos en la base en función del tamaño de elemento.

considerablemente al ir cambiando el tamaño de elemento dentro del rango de 30 a 60 mm a excepción de algunos elementos donde los esfuerzos aumentan consistentemente (Ver Figura 6.5). Si bien se puede observar una tendencia, esto no confirma del todo que los esfuerzos máximo puedan convergir en algún valor finito debido a que el tamaño mínimo comprobado es de 30 mm. Esta última limitación fue introducida por el programa Ansys al no permitir generar mallas más finas.

En base a los resultados presentados en esta sección, se concluye que el modelo posee elementos donde el esfuerzo aumenta de manera indefinida a medida que se afina el mallado. Dichas singularidades se muestran en la Figura 6.8, y tendrán que ser consideradas durante el análisis transiente. No obstante, no se descarta el hecho de que puedan presentarse otras singularidades de esfuerzo en el modelo bajo distintas condiciones de carga.

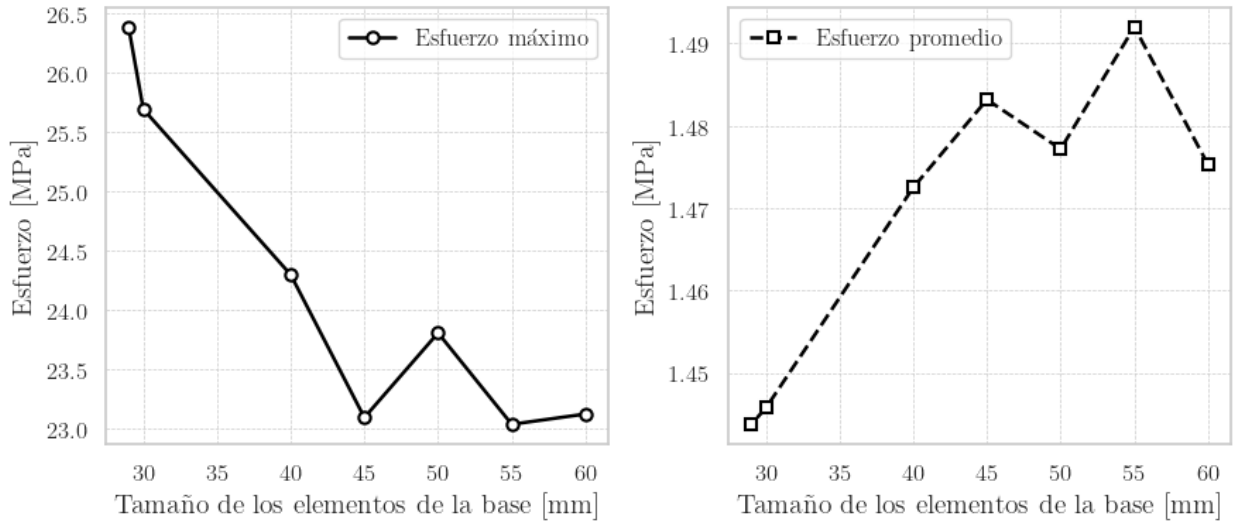


Figura 6.7 Influencia del tamaño de elemento en los esfuerzos máximos y promedios de la plataforma acimutal bajo el peso propio.

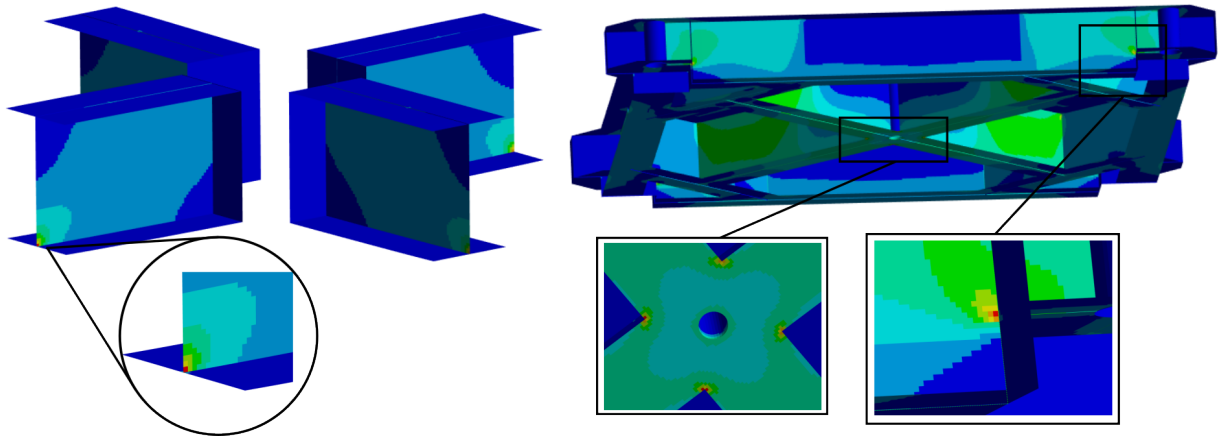


Figura 6.8 Singularidades de esfuerzo encontradas en la base (Elemental mean).

6.3 Simulaciones transientes

6.3.1 Configuración de los casos de estudio

Para el análisis estructural se consideraron 3 casos distintos de elevación de la antena: 30° , 60° y 90° . En cada uno se aplicaron los movimientos correspondientes a los 3 registros descritos en el Capítulo 4, con un paso de tiempo de 0.01 segundos. En total se guardaron los resultados de 9 simulaciones distintas, el peso aproximado final de cada simulación ronda los 90 GB.

Todas las simulaciones transientes se llevaron a cabo en un equipo de cómputo con un procesador Intel i7-13700 de 16 núcleos, 24 GB de memoria RAM y 500 GB de almacenamiento disponible. Gracias a estas especificaciones, no se presentaron inconvenientes significativos relacionados con la capacidad de procesamiento para realizar la integración numérica. Sin embargo, se identificaron limitaciones vinculadas al almacenamiento de los resultados, lo que hizo necesario restringir tanto los cuerpos para los cuales se registraron datos como la cantidad de elementos del modelo. Por este motivo, se decidió guardar únicamente los esfuerzos y se excluyeron los contrapesos y los motores del registro de resultados, ya que

ambos se modelaron como cuerpos sólidos. En particular, los contrapesos no fueron considerados en el análisis porque su función en el modelo es principalmente la de representar las masas correspondientes que se asocian al comportamiento dinámico de la estructura. Por otro lado, también se limitaron los pasos de tiempo almacenados, considerando solo los intervalos en que se aplicaron movimientos de mayor amplitud, pues en estos periodos se concentran los máximos esfuerzos estructurales. Gracias a estas medidas, se logró reducir el tamaño promedio de los archivos de resultados de aproximadamente 300 GB a los 90 GB mencionados.

6.3.2 Parámetros de salida considerados para el análisis de resultados

Los resultados contemplados para este trabajo son los esfuerzos equivalentes y los factores de seguridad a la fluencia calculados a partir del criterio de Von Mises. Estos últimos fueron obtenidos con la herramienta "Stress Tool". En particular, se consideraron los esfuerzos máximos en todo el intervalo de tiempo de resultados guardados, los cuales representan el caso más desfavorable. Para los factores de seguridad se realizó lo mismo, pero considerando los valores mínimos. En las siguientes secciones se muestran los resultados obtenidos separados por elevación de la antena y condiciones de borde aplicadas. Notar que los factores de seguridad máximos calculados por el programa tienen un valor de 15, esto quiere decir que para esfuerzos equivalentes menores a un quinceavo del esfuerzo de fluencia, el factor de seguridad establecido tomará este valor. Esto no representa un problema para el análisis, pues en las zonas con esfuerzos bajos no es de interés el realizar una comparación precisa de los valores.

6.3.3 Elevación de 30°

Para el caso de elevación de 30° de la antena se obtuvo, en la mayoría de los componentes, esfuerzos por debajo de los 100 MPa, como se muestra en la Figura 6.9. Sin embargo se registraron concentraciones de esfuerzo de valores altos y por sobre el límite de fluencia, alcanzando máximos de 1073, 1104 y 1191 MPa para los registros 1, 2 y 3, respectivamente. Dichos valores máximos, para los tres registros, fueron localizados en las zonas indicadas en la Figura 6.10. Notar que dichos elementos no fueron identificados como singularidades de esfuerzo durante el análisis de sensibilidad mostrado en la sección 6.2.2, por lo que las diferencias se atribuyen a las distintas condiciones de carga impuestas en a cada caso de análisis.

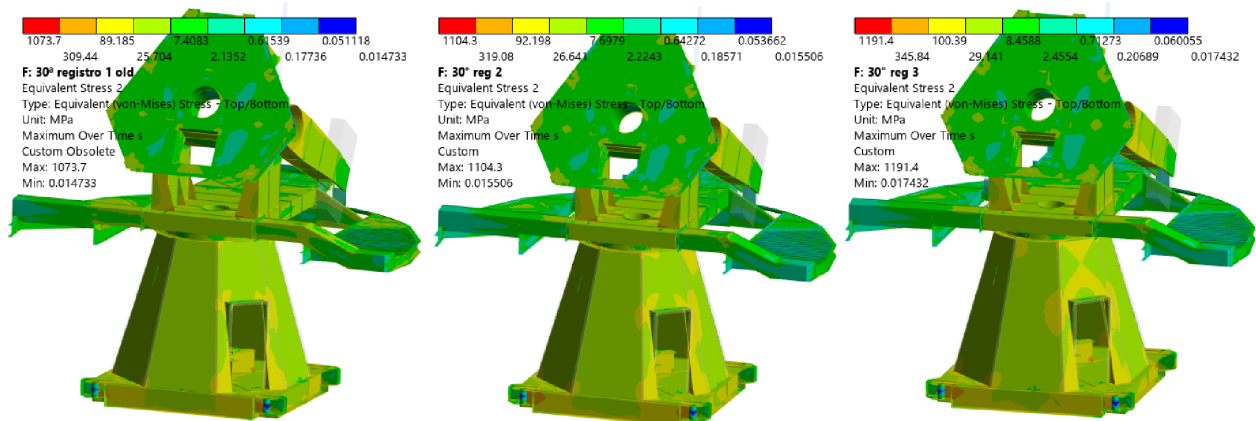


Figura 6.9 Esfuerzos equivalentes calculados para una elevación de 30° con los tres registros escalados.

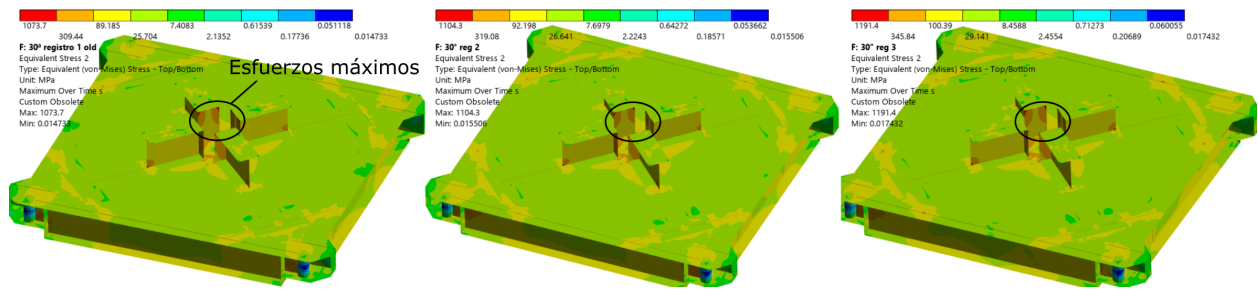


Figura 6.10 Esfuerzos equivalentes en la base para una elevación de 30° con los tres registros escalados.

El segundo cuerpo donde se obtuvieron esfuerzos altos en relación al límite elástico fue en la plataforma de elevación. En la Figura 6.11 se muestran los esfuerzos equivalentes y los factores de seguridad calculados, incluyendo algunos máximos y mínimos locales etiquetados con sus valores respectivos. Dichos esfuerzos se encuentran en la placa que conecta la plataforma de elevación con el tornillo sin fin. Notar que en la mayoría de esta parte, el factor de seguridad calculado está entre menor 1.22 y 2.16, siendo los valores más bajos en la estructura sin tener en cuenta las singularidades de esfuerzo de la base. Este fenómeno se atribuye a un movimiento excesivo de la placa durante el evento sísmico, asociado a una baja rigidez en el componente. Una solución posible para distribuir de mejor manera los esfuerzos en este componente sería soldar placas de metal a ambos lados.

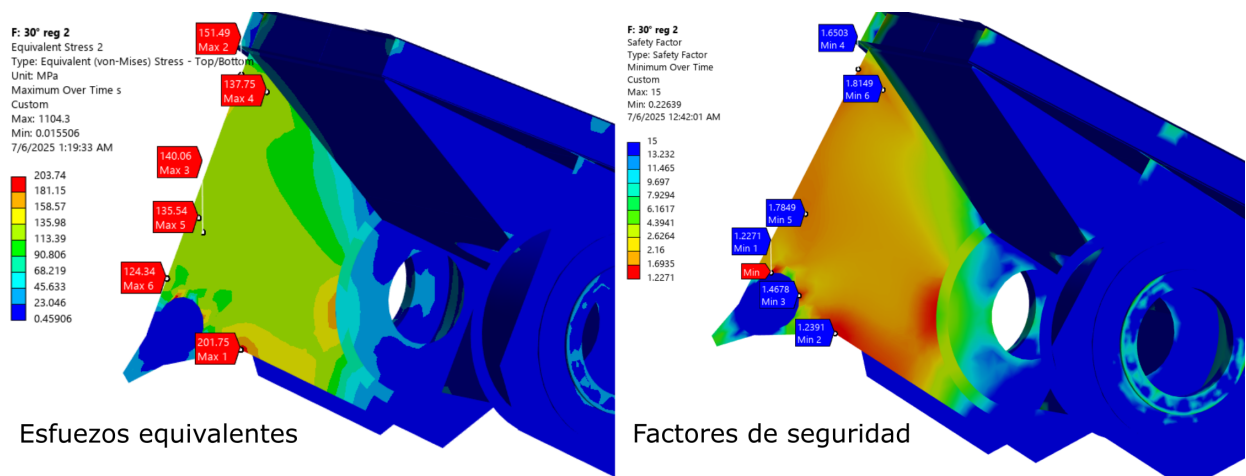


Figura 6.11 Esfuerzos equivalentes y factores de seguridad en la plataforma de elevación a 30°.

6.3.4 Elevación de 60°

Para el caso de elevación de 60° se obtuvieron esfuerzos similares a los del caso anterior (véase Figura 6.12), con la diferencia de que en esta elevación se alcanzaron esfuerzos máximos mayores, llegando a los 1613 MPa para el registro 1. Notar que esto no ocurre para todos los registros comprobados, de hecho, usando el registro 2 se obtienen valores de esfuerzo máximo de 562 MPa. Por otro lado, se encontraron similitudes en las ubicaciones de los esfuerzos máximos, estos ocurrieron en los mismos lugares que en el caso de elevación de 30°. En la Figura 6.13 se muestra una comparación de los esfuerzos de la base para los tres registros sísmicos impuestos como condición de borde.

Al igual que en el caso anterior de 30° de elevación, se observaron esfuerzos equivalentes

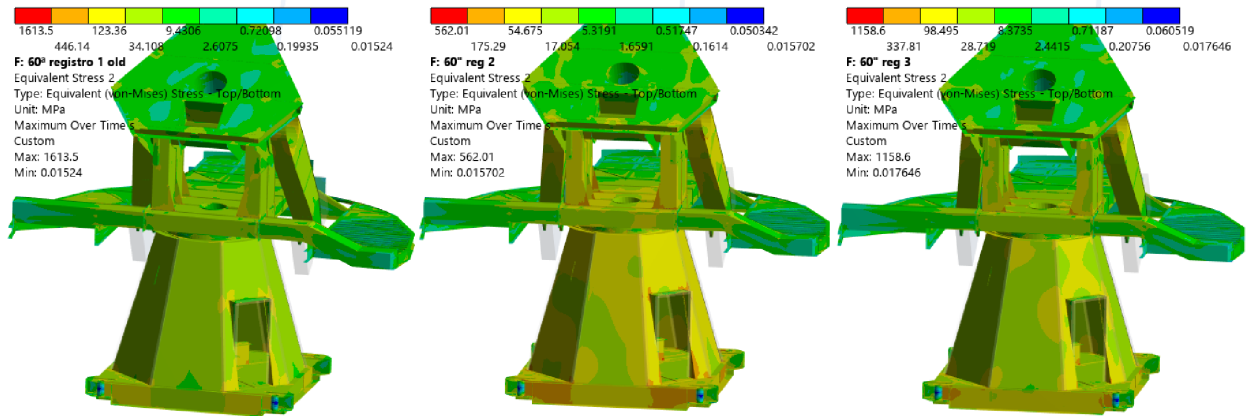


Figura 6.12 Esfuerzos equivalentes calculados para una elevación de 60° con los tres registros escalados.

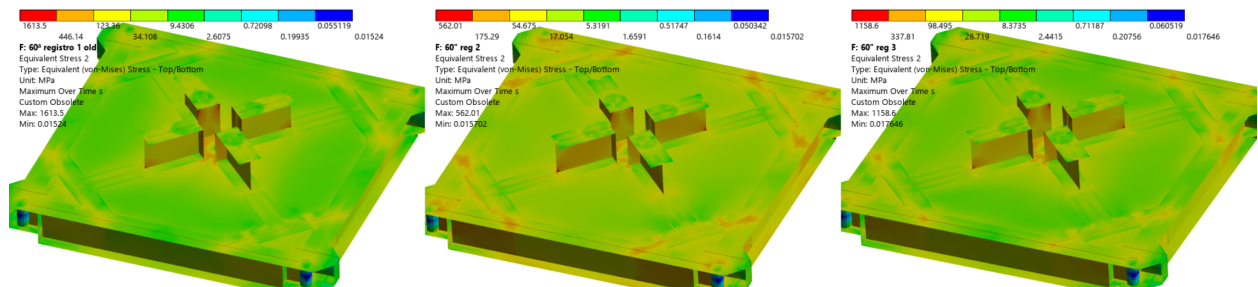


Figura 6.13 Esfuerzos equivalentes en la base para una elevación de 60° con los tres registros escalados.

cercanos al límite de fluencia en la plataforma de elevación. En comparación, estos presentan coeficientes de seguridad mayores. A partir de estos resultados se puede indicar que existe una tendencia de los esfuerzos en esta placa a ser menores a medida que se aumenta la elevación de la antena. En la Figura 6.14 se muestran los resultados calculados para el caso más desfavorable, que corresponde a aplicar el registro 3 como movimiento de la base.

6.3.5 Elevación de 90°

En la Figura 6.15 se muestra una comparación de los esfuerzos máximos para las 3 condiciones de borde impuestas en la base. Para el caso de elevación de 90° los esfuerzos calculados se encontraron en un rango de valores similares a los casos anteriores y también se registraron los valores más altos en la base, en las zonas mencionadas anteriormente. Los valores de dichos esfuerzos máximos son de 698, 823 y 643 MPa, en promedio, de menor magnitud que en los casos anteriores de 30° y 60°; estos valores se ilustran en la Figura 6.16. En relación a los esfuerzos vistos anteriormente en la plataforma de elevación, se confirma que a 90° de elevación los esfuerzos son menores que a 30° y 60°.

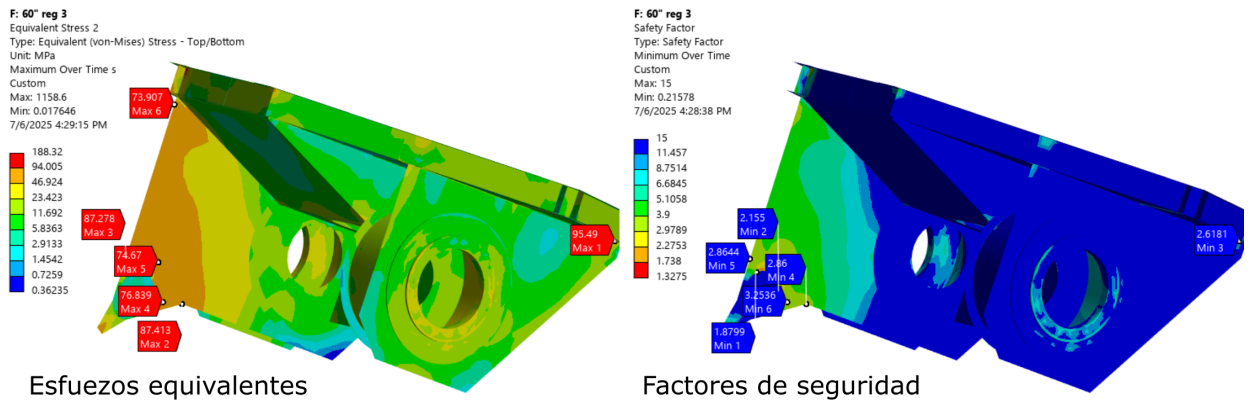


Figura 6.14 Esfuerzos equivalentes en la plataforma de elevación a 60°.

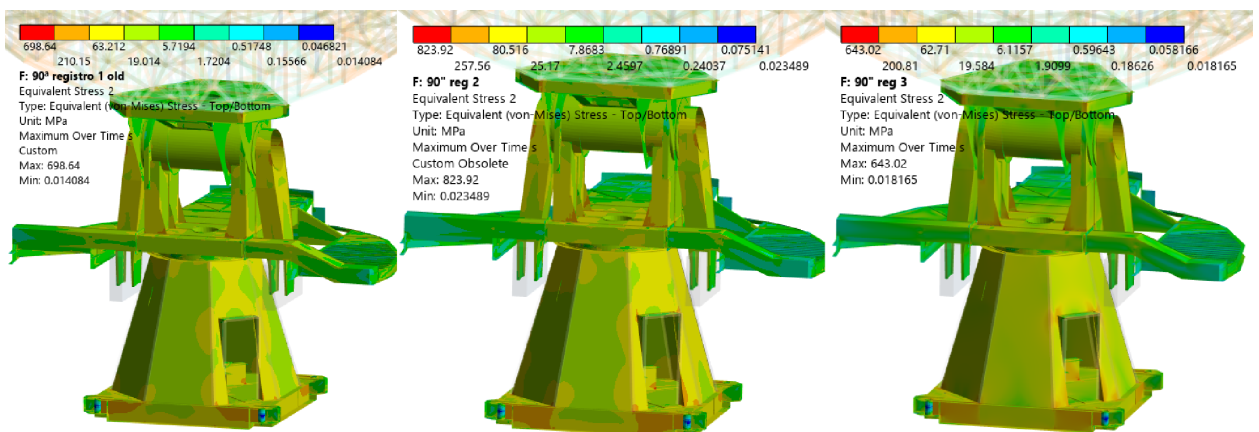


Figura 6.15 Esfuerzos equivalentes calculados para una elevación de 90° con los tres registros escalados.

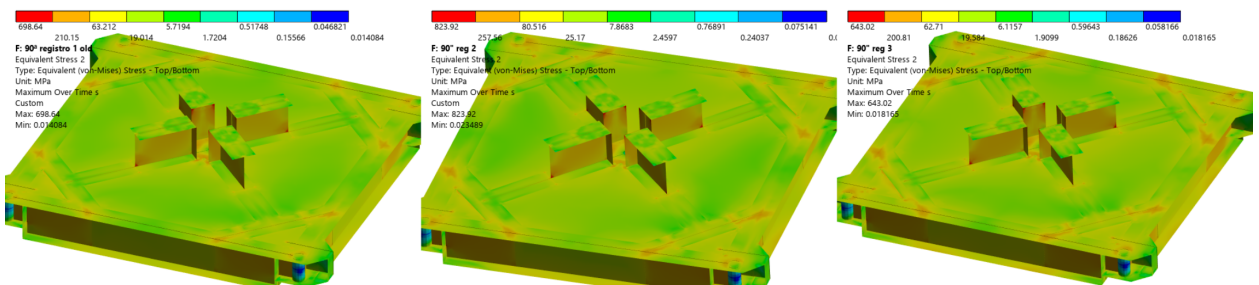


Figura 6.16 Esfuerzos equivalentes en la base para una elevación de 90° con los tres registros escalados.

6.3.6 Observaciones generales

En base a los resultados expuestos en las secciones anteriores se realizan las siguientes observaciones:

- En general, el campo de esfuerzos en la estructura presenta valores similares independiente de la elevación y registro sísmico aplicado como condición de borde. La excepción a esta regla son:
 - Las singularidades presentes en la base de la estructura, en las esquinas de 90° de la viga que soporta el cono.
 - La placa trasera de la plataforma de elevación que conecta con el tornillo sin fin.
- No se observa ninguna relación entre el esfuerzo máximo registrado en las singularidades de la base y el registro sísmico aplicado como movimiento de la base. Para el registro 1 los esfuerzos máximos ocurrieron a una elevación de 60° , para los registros 2 y 3 a una elevación de 30° .
- La elevación de la antena más desfavorable corresponde a 30° , que es donde se registran los esfuerzos más altos en la plataforma de elevación. Específicamente se determina que a mayor elevación, menores son los esfuerzos que presentaría la plataforma acimutal. De esta forma se asume que la condición de descanso más segura del telescopio es a 90° , lo cual es bastante favorable, pues este es el caso de elevación menos desfavorable para condiciones de viento extremas.
- Con base en el punto anterior, se recomienda que el LCT debiera estar a una elevación de 90° cuando este no esté realizando observaciones astronómicas.

6.3.7 Zonas de esfuerzo máximo y sensibilidad de la malla en la base

Como se pudo observar en los resultados expuestos anteriormente, para todos los casos de simulación, los esfuerzos más altos siempre se localizaron en la base, específicamente en los puntos en rojo marcados en la Figura 6.17. Con base en los elevados valores registrados, se optó por realizar otro estudio de la influencia del tamaño de los elementos en los esfuerzos máximos registrados en las esquinas de las vigas.

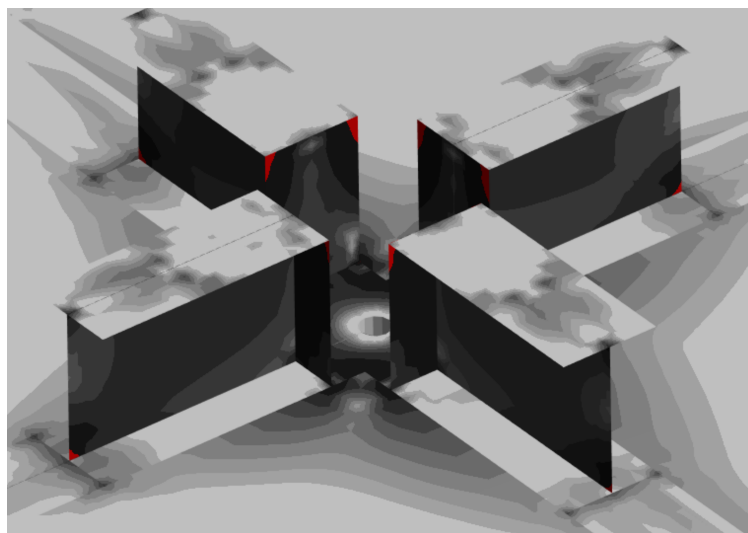


Figura 6.17 Zonas de esfuerzo máximo en análisis transiente.

Para contrarrestar el impacto de aumentar la cantidad de los elementos en el almacenamiento requerido para guardar los resultados, se optó por considerar solamente los esfuerzos de la base en los archivos de salida. En el gráfico de la Figura 6.17 se muestran los esfuerzos máximos obtenidos en función del tamaño de elemento utilizado, en él se observa una variación abrupta de aproximadamente 360 MPa al pasar de elementos de 50 mm a 38 mm. Por debajo de 38 mm se observó una tendencia al alza en los esfuerzos máximos a medida que se afina la malla.

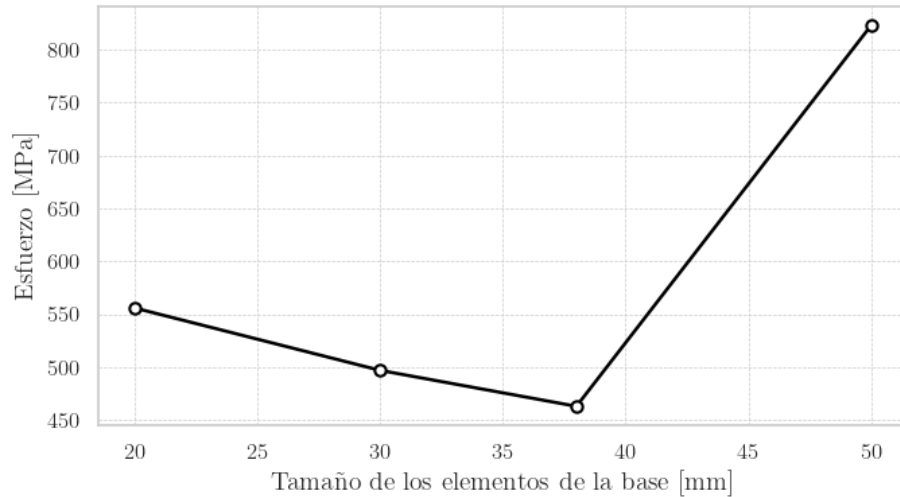


Figura 6.18 Tendencia de los esfuerzos máximos en la base en función del tamaño de elementos para simulaciones transientes de elevación 90° con registro sísmico 2.

De acuerdo con los resultados del análisis, se concluye que los esfuerzos en las esquinas de los elementos, mostrados previamente en la Figura 6.17, no son confiables debido a su alta dependencia del tamaño de los elementos. Sin embargo, al comparar de manera más general los esfuerzos en zonas alejadas de las singularidades, los resultados muestran valores similares, como se aprecia en la Figura 6.19 (cabe destacar que las escalas de color difieren ligeramente entre ambos casos).

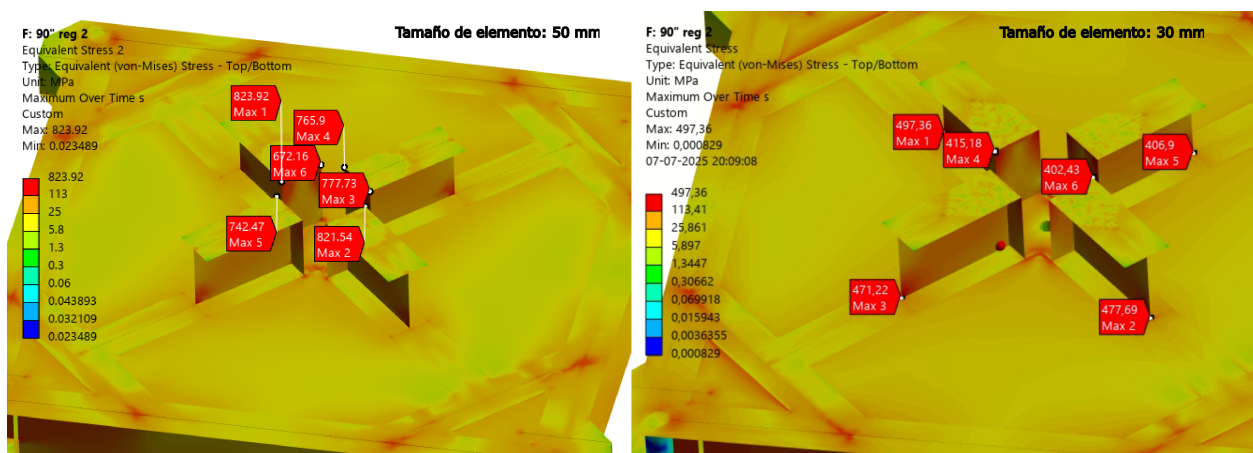


Figura 6.19 Comparación de los esfuerzos máximos resultantes para el caso de elevación 90° registro 2 con distintos tamaños de elemento.

Por otro lado, los esfuerzos obtenidos en la plataforma de elevación no presentan gradientes elevados, mostrando mayor consistencia en todo el cuerpo. Por ello, se concluye que

este componente debería ser reforzado para garantizar su integridad estructural en posibles eventos telúricos de gran magnitud.

7 Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo un análisis transiente de la estructura del radiotelescopio LCT, utilizando un modelo de elementos finitos en conjunto con los lineamientos establecidos en la norma NCh2369 de 2025 para análisis de tipo tiempo-historia. Las principales conclusiones obtenidas de este estudio se resumen a continuación:

- Se desarrolló un modelo numérico del LCT en el programa Ansys, el cual fue validado utilizando como referencia los resultados experimentales presentados por Tomás Vial en la conferencia SPIE 2020. Este modelo cuenta con una cantidad reducida de elementos en comparación con estudios previos, lo que facilita su aplicación en simulaciones transientes que requieren almacenar resultados de cientos de pasos de tiempo.
- La simplificación de la geometría de la base presenta como desventaja la generación de singularidades en las vigas de soporte del cono, en las esquinas de 90° .
- Los resultados del análisis transiente muestran que los esfuerzos equivalentes en la mayor parte de la estructura, durante un evento sísmico, no superarían el límite de fluencia de los materiales, manteniendo un factor de seguridad superior a 3.
- En la plataforma de elevación del LCT, específicamente en la placa de conexión con el tornillo sin fin, se estimaron esfuerzos cercanos al límite de fluencia del material. Este comportamiento se atribuye a un desplazamiento excesivo del componente durante un evento sísmico asociado a la baja rigidez de la placa. Se recomienda reforzar esta zona mediante la soldadura de placas laterales que permitan una mejor distribución de los esfuerzos y que aumenten la rigidez del componente.
- En los momentos en que el LCT no esté realizando observaciones astronómicas, se recomienda mantener una elevación de 90° de la antena, pues esta es la condición más segura de la estructura ante eventos telúricos y vientos fuertes.

8 Prospecciones y recomendaciones para trabajo futuro

Los avances presentados en este trabajo ofrecen diversas posibilidades de desarrollo en investigaciones futuras, siendo la principal la implementación de mejoras en el modelo numérico del LCT. En este sentido, existen varios aspectos que podrían incorporarse y que quedaron fuera del alcance del presente estudio. En primer lugar, se podría modelar de forma explícita las conexiones apernadas de las extensiones de la plataforma acimutal y de los brazos que soportan los contrapesos. Otra alternativa es eliminar las simplificaciones realizadas en la base y evaluar los esfuerzos reales que se generarían en las zonas donde actualmente se presentan singularidades. Para ello, se podría utilizar la geometría original proporcionada por Caltech, mostrada en la Figura 5.1, la cual incluye los filetes de las soldaduras. Dado que la principal limitación técnica de este trabajo fue la capacidad de almacenamiento de los resultados, se recomienda abordar esta restricción desde etapas tempranas del proyecto. Finalmente, otro posible trabajo futuro es dimensionar adecuadamente las placas de refuerzo propuestas para disminuir los esfuerzos en la plataforma de elevación.

Referencias

- [1] A. Otarola, C. De Breuck, T. Travouillon, S. Matsushita, L.-A. Nyman, A. Wootten, S. J. E. Radford, M. Sarazin, F. Kerber, and J. P. Pérez-Beaupuits, “Precipitable water vapor, temperature, and wind statistics at sites suitable for mm and submm wavelength astronomy in northern chile,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 131, 2019.
- [2] Caltech, CAS, UdeC, “Conceptual design report for the leighton chajnantor telescope,” 2016.
- [3] E. E. Vogel, F. G. Brevis, D. Pastén, V. Muñoz, R. A. Miranda, and A. C.-L. Chian, “Measuring the seismic risk along the nazca–south american subduction front: Shannon entropy and mutability,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 20, no. 11, pp. 2943–2960, 2020.
- [4] J. W. M. Baars and H. J. Kärcher, “Seventy years of radio telescope design and construction,” *URSI Radio Science Bulletin*, vol. 2017, no. 362, pp. 15–38, 2017.
- [5] D. Woody, D. Vail, and W. Schaal, “Design, construction, and performance of the leighton 10.4-m-diameter radio telescopes,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 5, pp. 673–686, 1994.
- [6] M. Retamal, *Análisis estructural de telescopio submilimétrico LCT bajo condiciones de viento y operación en llano de Chajnantor, región de Antofagasta*. Departamento de ingeniería mecánica, 2019.
- [7] J. Navarro, *Análisis de rendimiento electromecánico del radiotelescopio Caltech Sub-milimeter Observatory bajo condiciones externas en el Llano de Chajnantor, Chile*. Departamento de ingeniería mecánica, 2021.
- [8] N. Carrasco, *Diseño de plataformas adicionales para equipos complementarios del radiotelescopio LCT*. Departamento de ingeniería mecánica, 2023.
- [9] F. Salgado, *Diseño de fundación para el radiotelescopio Leighton emplazado en el llano de Chajnantor, Chile*. Departamento de ingeniería civil, 2023.
- [10] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh2369:2023. Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales,” 2023. Norma Chilena Oficial.
- [11] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh433 Mod 2009. Diseño sísmico de edificios,” 2009. Norma Chilena Oficial.
- [12] K.-J. Bathe, *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [13] Ansys Inc, Canonsburg, PA 15317, *Mechanical User’s Guide*, Release 2024 R1 ed.
- [14] ABS Geotechnical Consulting, “Informe de Mecánica de Suelos y Rocas - Proyecto 2024-136: Leighton Chajnantor Telescope,” 2024.
- [15] Centro Sismológico Nacional, “Registros Sísmicos.” <https://evtdb.csn.uchile.cl/events>, 2025.
- [16] L. A. Atik and N. Abrahamson, “An improved method for nonstationary spectral matching,” *Earthquake Spectra*, vol. 26, no. 3, pp. 601–617, 2010.

- [17] B. Hernández, *Análisis dinámico del radiotelescopio LCT considerando nuevas solicitudes de operación*. Departamento de ingeniería mecánica, 2023.
- [18] Leighton, Robert, “A 10-meter telescope for millimeter and sub-millimeter astronomy,” 1978.
- [19] J. Vial, D. Arroyo, C. Canales, J. Navarro, R. A. Reeves, E. Dufeu, S. R. Golwala, G. S. Parks, D. Woody, J. Li, J. Zhao, and Y. Ma, “The Leighton Chajnantor Telescope: Project update and mechanical structural analysis in preparations for new deployment in Chajnantor, Chile,” in *Ground-based and Airborne Telescopes VIII* (H. K. Marshall, J. Spyromilio, and T. Usuda, eds.), vol. 11445, p. 114453C, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020.

A Tablas y gráficos usados de la NCh2369:2025

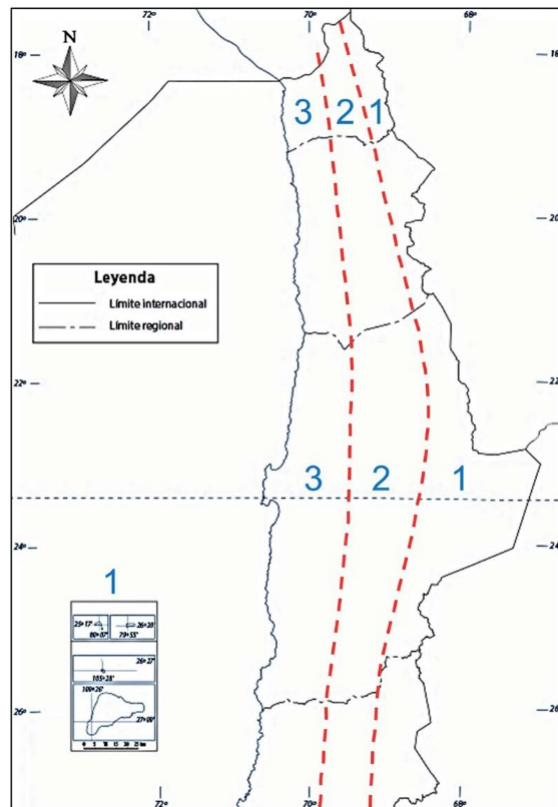


Figura A.1 Zonificación sísmica del territorio nacional en el norte de Chile [10].

Tabla A.1 Valor de los parámetros que dependen del tipo de suelo [10].

Tipo de suelo	S	r	T_0 (s)	P	q	T_1 (s)
A	0.90	4.50	0.15	1.85	3.00	0.15
B	1.00	4.50	0.30	1.60	3.00	0.27
C	1.05	4.50	0.40	1.50	3.00	0.35
D	1.00	3.50	0.60	1.00	2.50	0.41
E	1.00	3.00	1.20	1.00	2.70	0.79

B Espectro escalado de los registros verticales

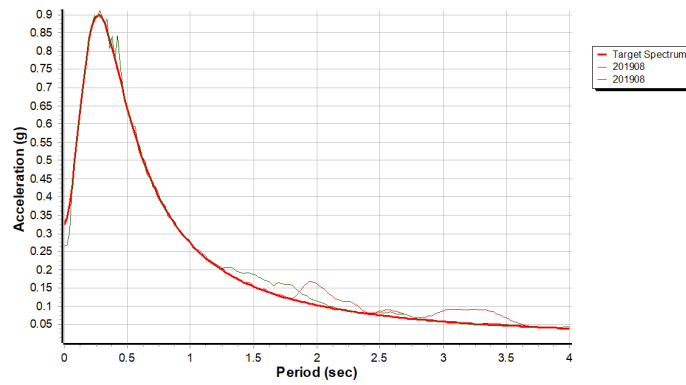


Figura B.1 Espectro vertical escalados del registro 1.

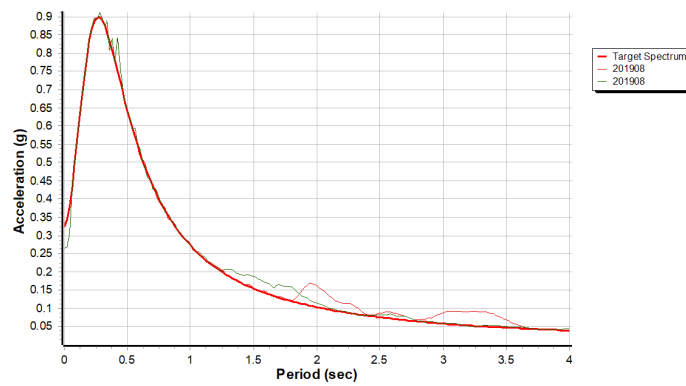


Figura B.2 Espectro vertical escalados del registro 2.

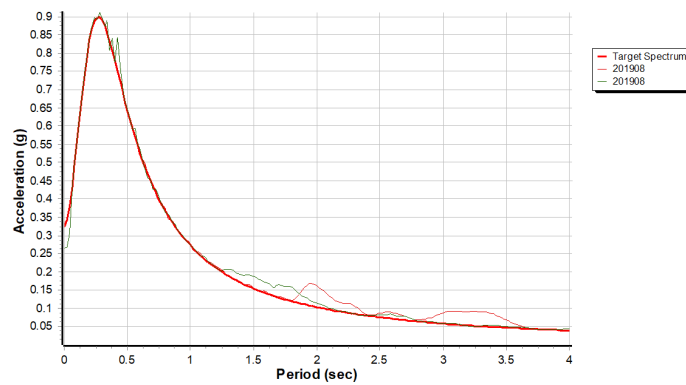


Figura B.3 Espectro vertical escalados del registro 2.

C Discretización del modelo numérico

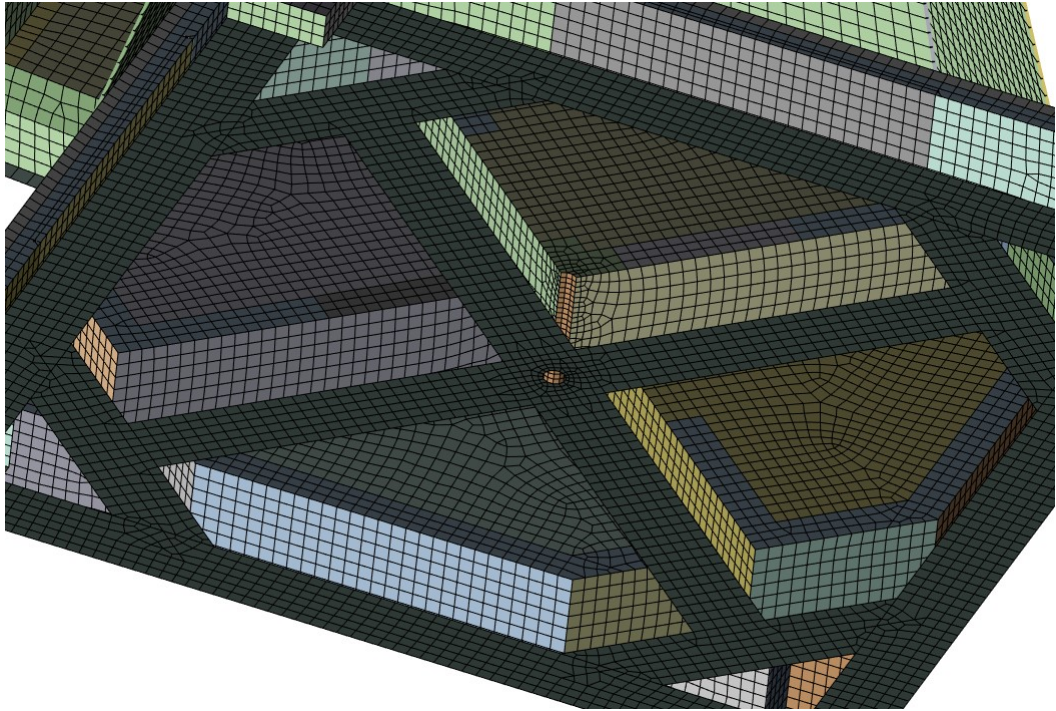


Figura C.1 Mallado de la base con vista inferior.

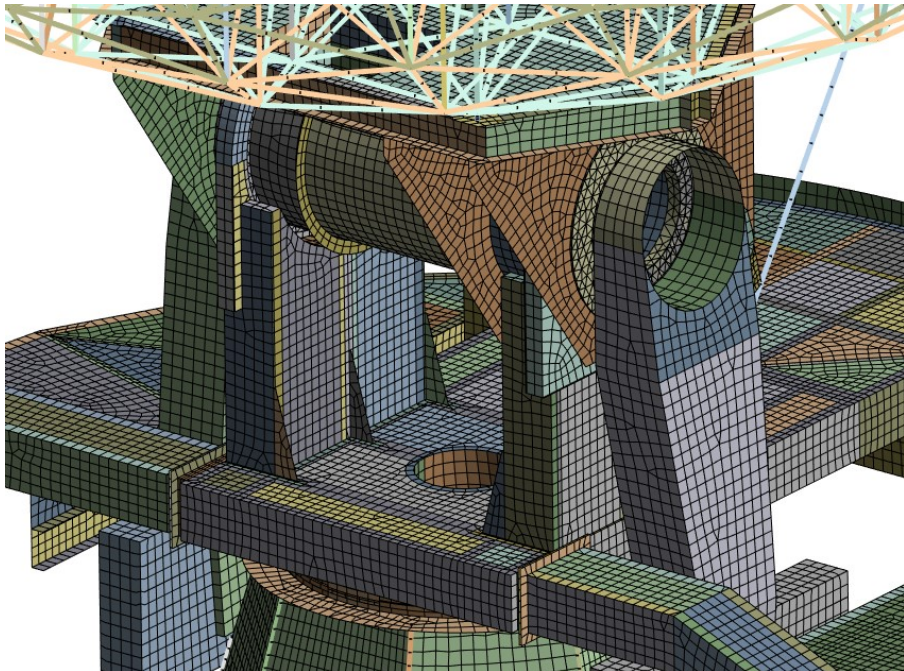


Figura C.2 Mallado de la plataforma de elevación.

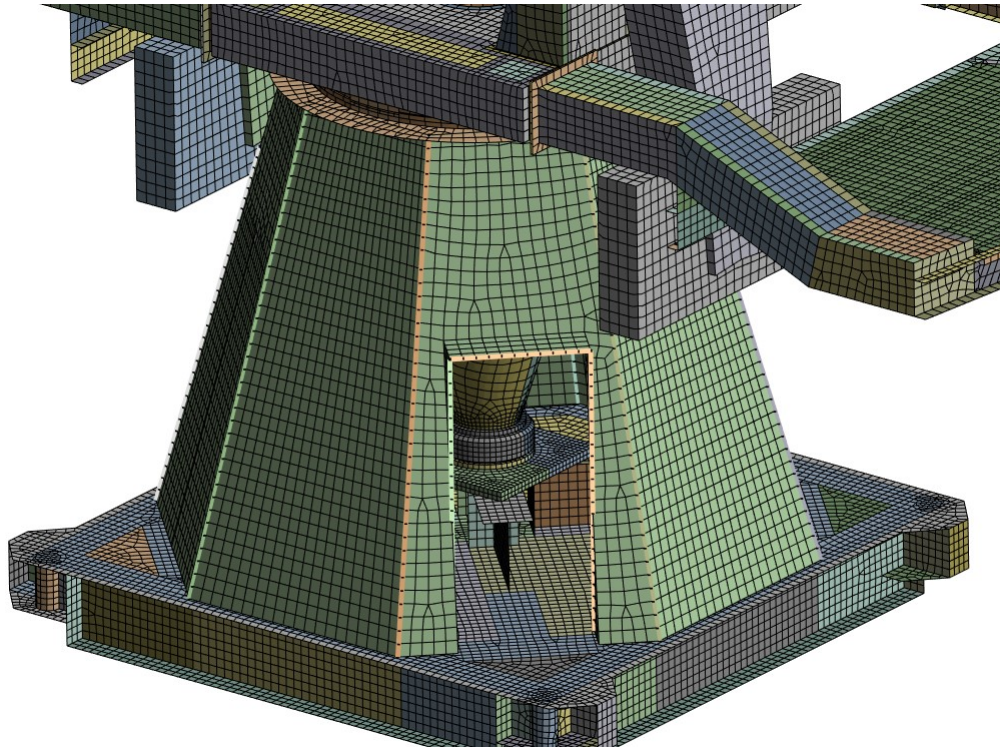


Figura C.3 Mallado del conjunto inferior.

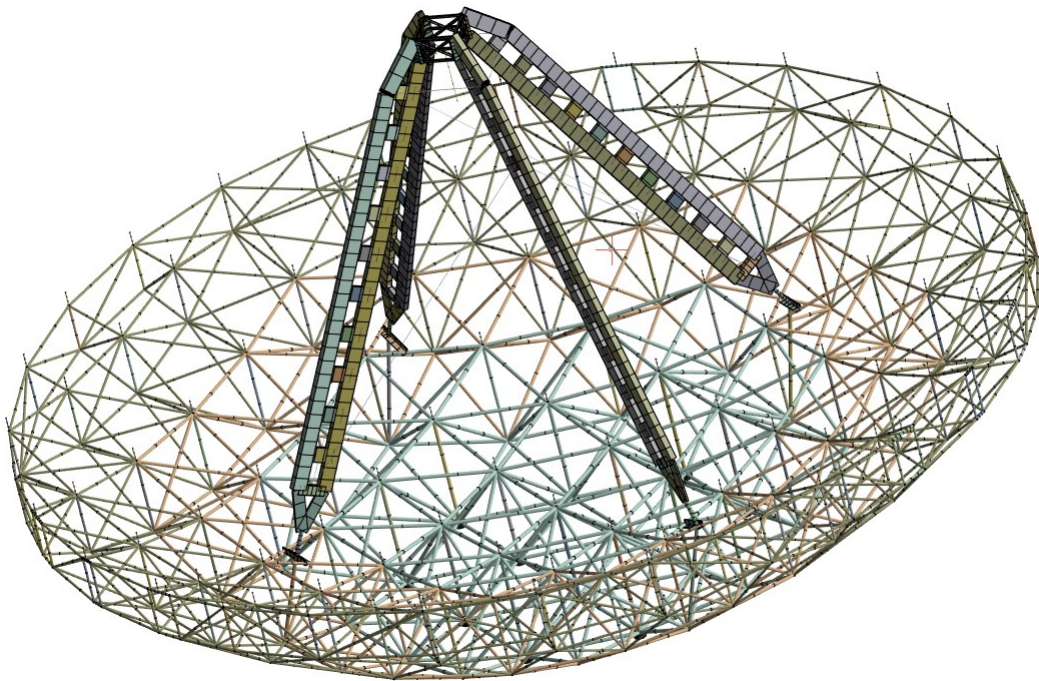


Figura C.4 Mallado del BUS y Feedlegs.

D Factores de seguridad de los casos de estudio considerados

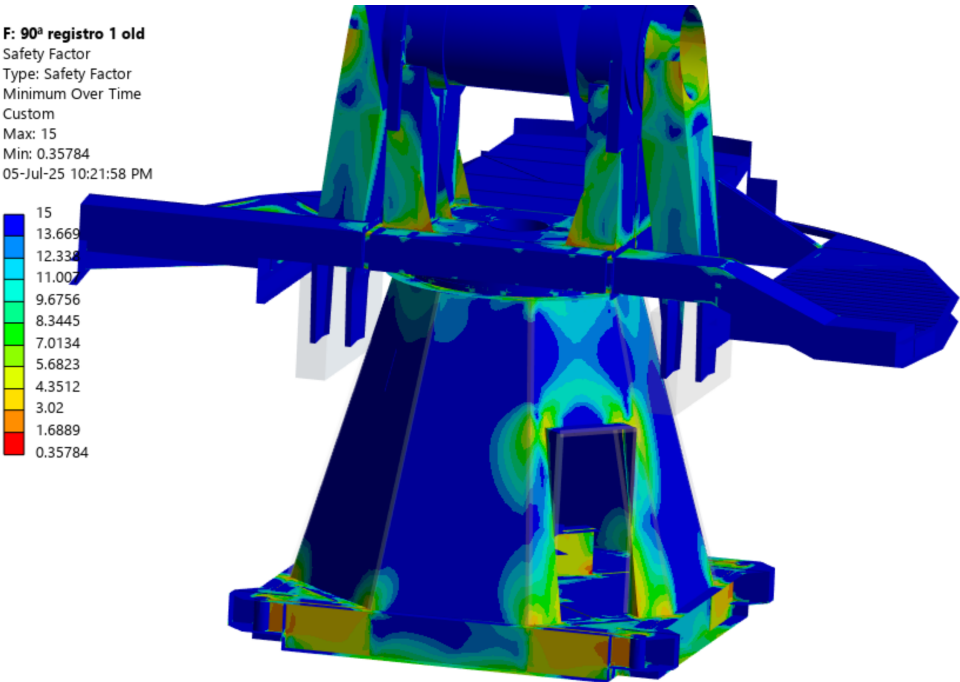


Figura D.1 Factores de seguridad para una elevación de 90° aplicando el registro 1.

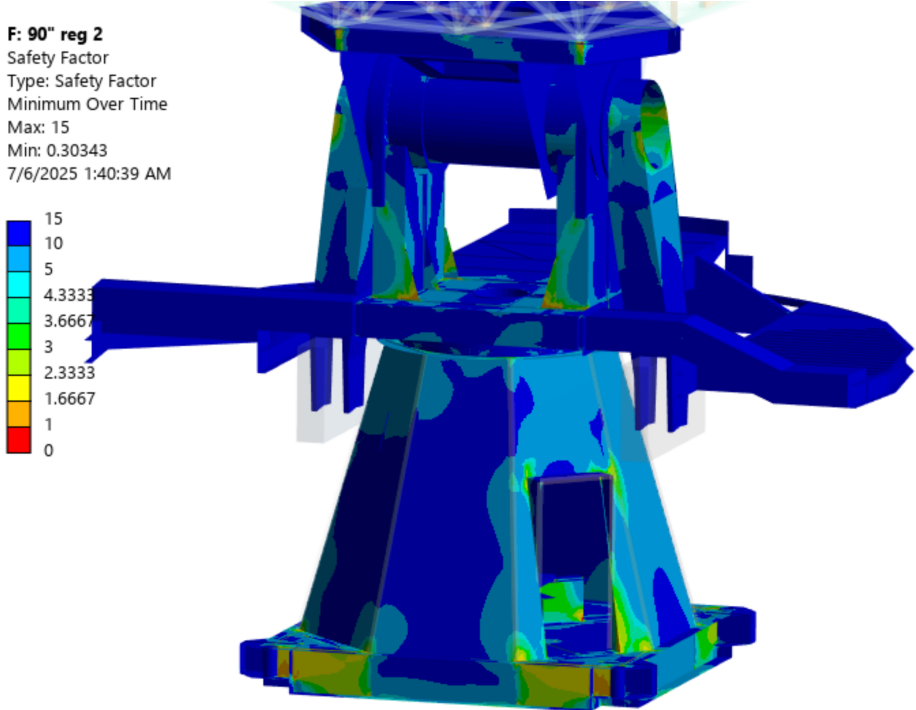


Figura D.2 Factores de seguridad para una elevación de 90° aplicando el registro 2.

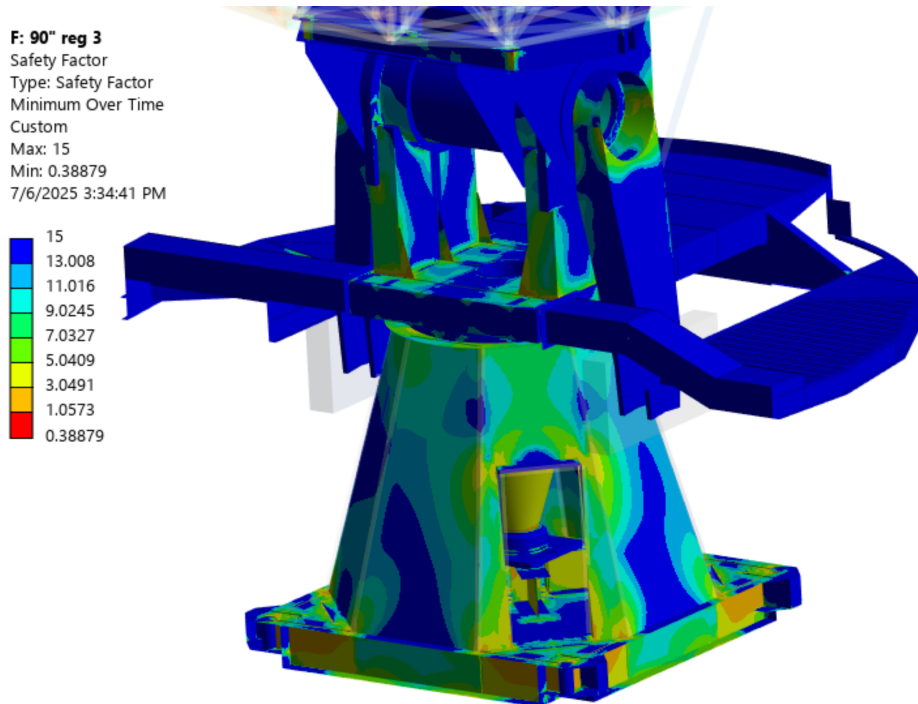


Figura D.3 Factores de seguridad para una elevación de 90° aplicando el registro 3.

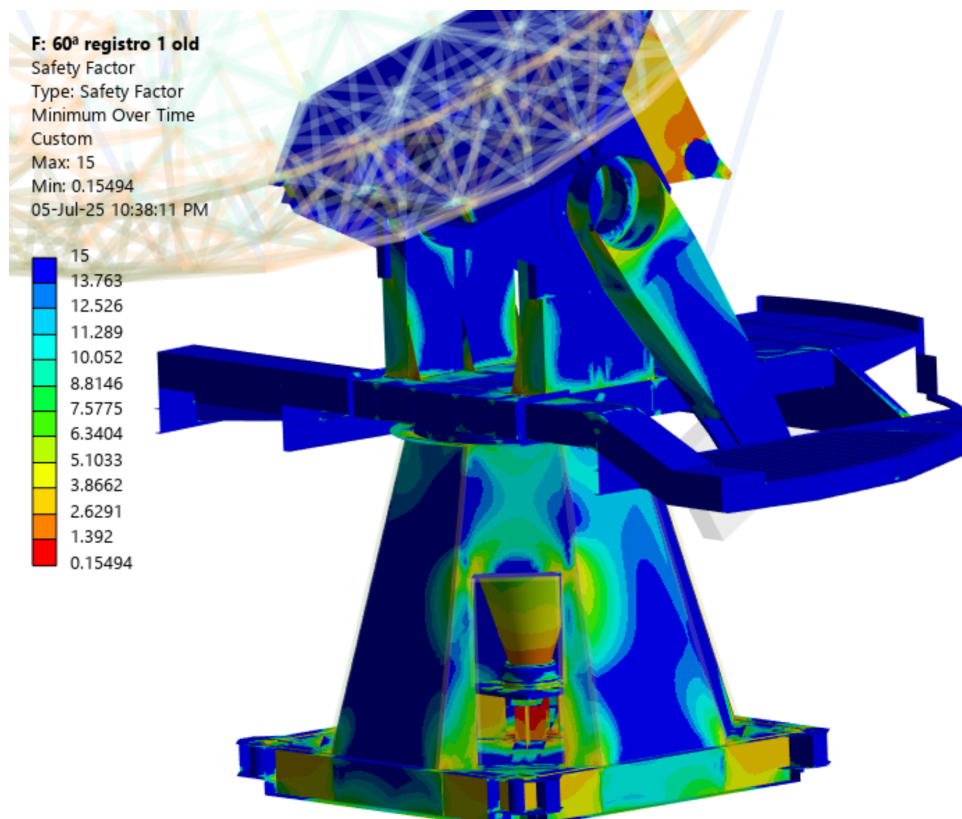


Figura D.4 Factores de seguridad para una elevación de 60° aplicando el registro 1.

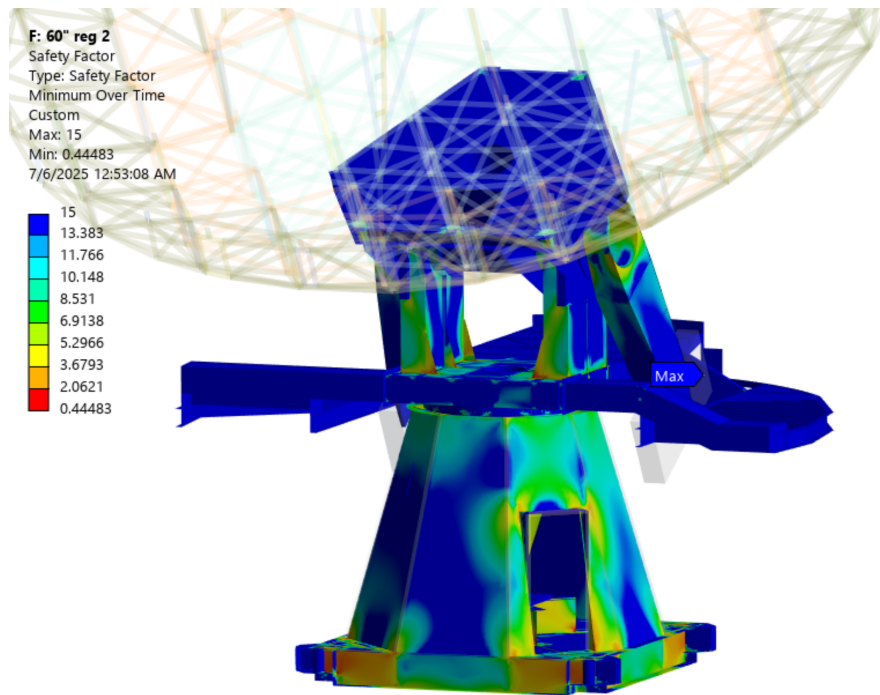


Figura D.5 Factores de seguridad para una elevación de 60° aplicando el registro 2.

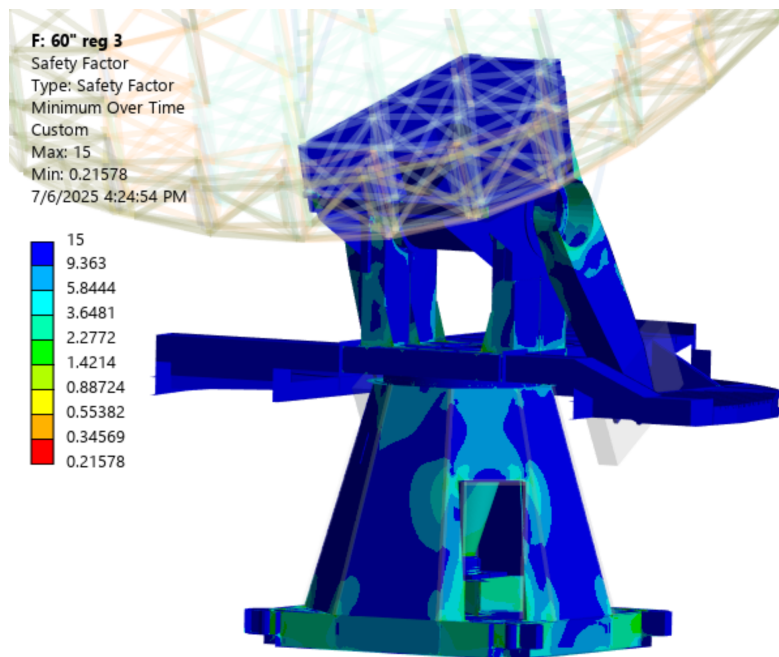


Figura D.6 Factores de seguridad para una elevación de 60° aplicando el registro 3.

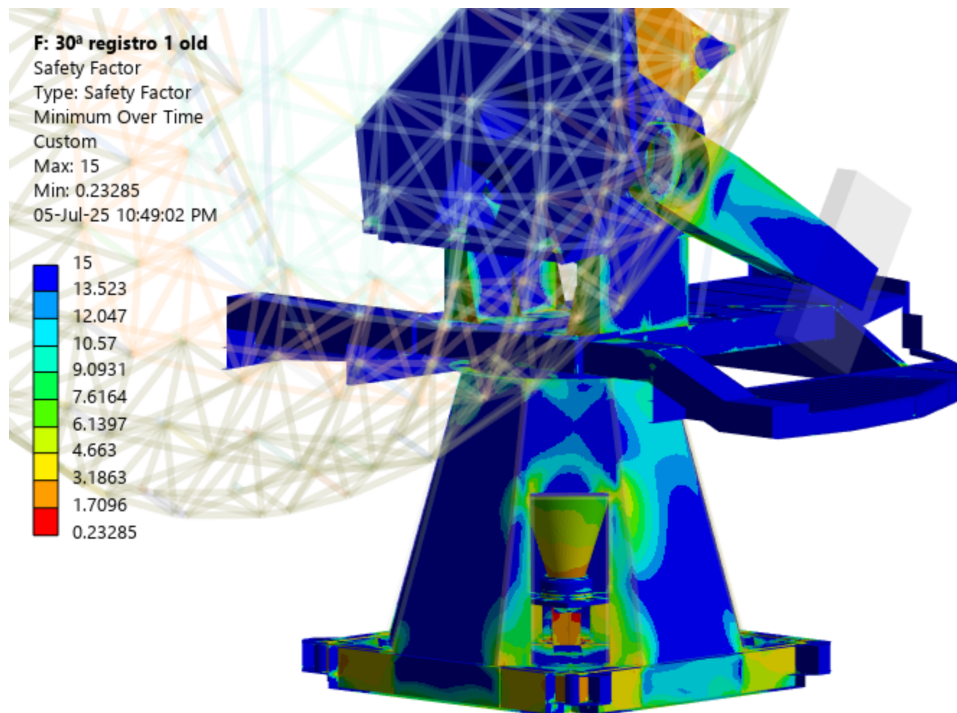


Figura D.7 Factores de seguridad para una elevación de 30° aplicando el registro 1.

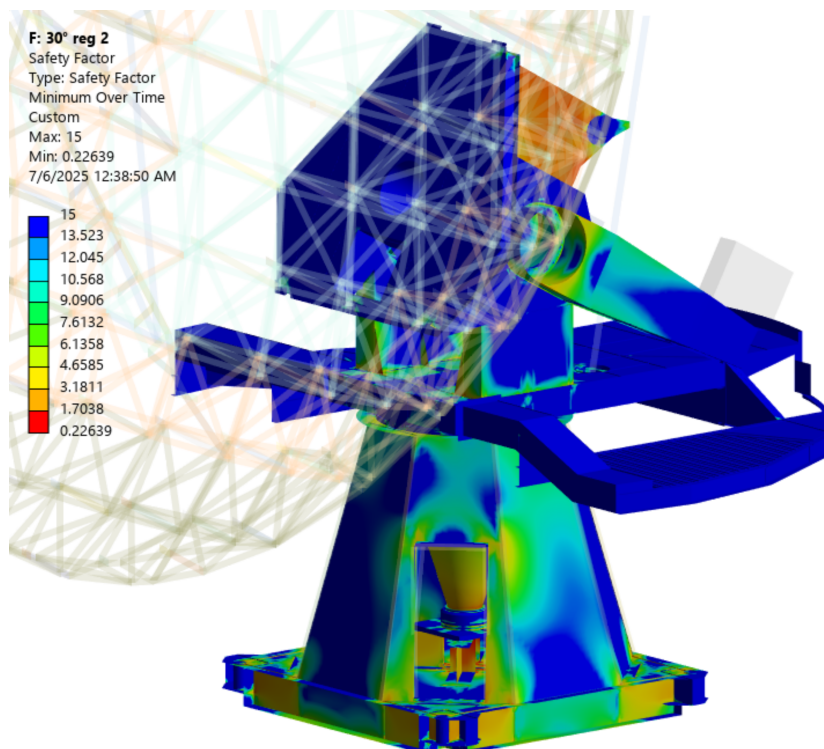


Figura D.8 Factores de seguridad para una elevación de 30° aplicando el registro 2.

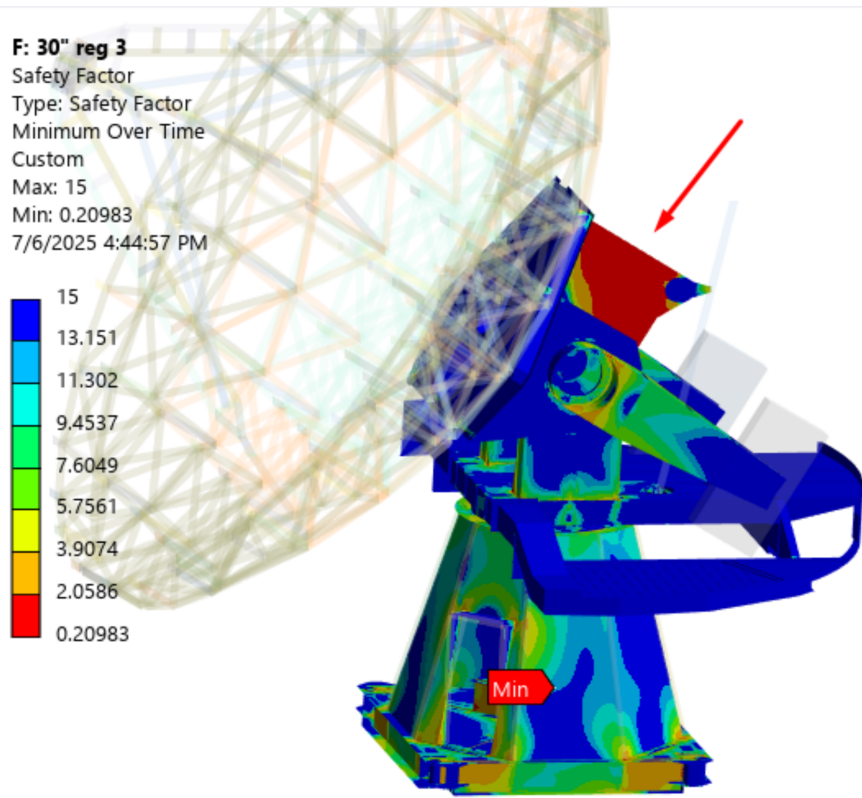


Figura D.9 Factores de seguridad para una elevación de 30° aplicando el registro 3.