



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE DOMOS PARA PROTECCIÓN DE
TELESCOPIO LEIGHTON**

POR

Vicente Antonio Molina Donoso

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:

Ingeniero civil mecánico, Doctor en ciencias aplicadas. Cristian Alexis Canales Cárdenas.

Agosto 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Vicente Antonio Molina Donoso

© 2023 Vicente Antonio Molina Donoso

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

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria está dedicada a mis Padres y hermano, que me han dado su apoyo incondicional desde el primer día de esta travesía y han estado en los momentos más difíciles y amargos.

A mis buenos amigos Rodrigo, Chris y Sebastián por estos años de compañerismo y hermandad.

RESUMEN

Leighton Chajnantor Telescope, es el nombre que recibe el proyecto asociado al traslado de un telescopio de ondas submilimétricas al norte de Chile, específicamente al valle de Chajnantor, región de Antofagasta. En este trabajo se encontrarán propuestas para la implementación de un domo que protegerá la antena telescópica que actualmente se encuentra en procedimiento de traslado desde Mauna Kea, Hawái, Estados Unidos. El objetivo de este proyecto radica en la comparación de distintas alternativas que puedan cumplir con los requerimientos mecánicos y lograr una selección justificada en base al modelo que mejor se adapte a los requerimientos de diseño, donde el principal desafío puede resumirse en la compatibilidad con efectos climatológicos presentes en el valle de Chajnantor como el viento, lluvia, nieve, bajas temperaturas o inclusive movimientos sísmicos. Una vez seleccionado el diseño a implementar, el objetivo radica en la resolución y optimización de la estructura para que no sufra grandes deformaciones o colapse, asumiendo la condición de trabajo más crítica del valle, con rangos elevados de la velocidad del viento, para finalmente realizar un análisis económico preliminar, no en detalle, de las componentes más relevantes del diseño.

Para poder realizar un marco comparativo de las distintas propuestas, se identifica el problema a resolver y se plantean los requerimientos de diseño en base a ello, con esto en mente se procede a una lluvia de ideas que pasan a través de filtros y posterior selección. Por otro lado, para llegar a la solución ideal, se identifican las zonas con mayores esfuerzos o deformaciones que están estrictamente relacionadas con la incidencia del viento y el efecto del propio peso de la estructura, de esta manera se optimiza el modelo, en función de planchas y entramados a utilizar.

Para alcanzar los objetivos propuestos se considera, en primer lugar, las dimensiones impuestas por la antena y los ángulos de trabajo de ella, de esta manera, se saben las dimensiones mínimas requeridas por la estructura envolvente, que varían levemente dependiendo del modelo propuesto y del sistema de apertura que se adopta. A su vez, se realiza un estudio del clima presente en el nuevo lugar de instalación que posteriormente definen las condiciones de borde del problema. Posteriormente y a través de una lluvia de ideas, se definen posibles modelos del domo, que luego de pasar por criterios de selección y determinar el mejor candidato, se realizan simulaciones a través del software ANSYS, realizando cambios iterativos en diversos parámetros como, por ejemplo, el espesor, entramados, tipos de material (Aleaciones de aluminio) e inclusive tipos de juntas entre los elementos del diseño impuesto. Adicionalmente, en este punto se incluyen las fuerzas externas actuando sobre la estructura, que corresponden a las presiones ejercidas por el viento, que son obtenidas a través de la herramienta CFD de ANSYS, por otro lado, también se considera el efecto del propio peso de la estructura.

Como resultado de las iteraciones realizadas, se obtienen factores de seguridad aceptables sobre 1 para un espesor de planchas de aluminio 6061 T6 presentes en el mercado nacional, alcanzados por la implementación de perfiles tubulares de acero ASTM A36, que logran aminorar las deformaciones impuestas por la incidencia del viento.

Como conclusión de la realización de este proyecto se puede decir que el modelo en estudio es factible de realizar visto desde un punto de las cargas de viento y peso de la estructura, sin embargo, aún se deben definir diversos parámetros relevantes que tienen directa influencia en la realización de un proyecto de esta envergadura.

ABSTRACT

Leighton Chajnantor Telescope is the name given to the project associated with the transfer of a submillimeter wave telescope to northern Chile, specifically to the Chajnantor Valley, Antofagasta region. In this work will be found proposals for the implementation of a dome that will protect the telescopic antenna that is currently in the process of being transferred from Mauna Kea, Hawaii, United States. The objective of this project lies in the comparison of different alternatives that can meet the mechanical requirements and achieve a justified selection based on the model that best suits the design requirements, where the main challenge can be summarized in the compatibility with climatological effects present in the Chajnantor valley such as wind, rain, snow, low temperatures, or even seismic movements. Once the design to be implemented has been selected, the objective lies in the resolution and optimization of the structure so that it does not suffer large deformations or collapse, assuming the most critical working condition of the valley, with high ranges of wind speed, to finally perform a preliminary economic analysis, not in detail, of the most relevant components of the design.

To make a comparative framework of the different proposals, the problem to be solved is identified and the design requirements are raised based on it, with this in mind we proceed to a brainstorming that passes through filters and subsequent selection. On the other hand, to reach the ideal solution, the areas with greater stresses or deformations that are strictly related to the incidence of wind and the effect of the weight of the structure itself are identified, in this way the model is optimized, depending on plates and frameworks to be used.

To achieve the proposed objectives, the dimensions imposed by the antenna and the working angles of it are considered, in this way, the minimum dimensions required by the envelope structure are known, which vary slightly depending on the proposed model and the opening system that is adopted. In turn, a study of the climate present in the new installation site is carried out, which subsequently defines the edge conditions of the problem. Subsequently, and through brainstorming, possible models of the dome are defined, which after going through selection criteria and determining the best candidate, simulations are carried out through the ANSYS software, making iterative changes in various parameters such as, for example, thickness, frameworks, types of material (aluminum alloys) and even types of joints between the elements of the imposed design. Additionally, this point includes the external forces acting on the structure, which correspond to the pressures exerted by the wind, which are obtained through the ANSYS CFD tool, on the other hand, the effect of the weight of the structure itself is also considered.

As a result of the iterations carried out, acceptable safety factors are obtained over 1 for a thickness of 6061 T6 aluminum plates present in the national market, achieved by the implementation of ASTM A36 steel tubular profiles, which manage to reduce the deformations imposed by the incidence of wind.

As a conclusion of the realization of this project it can be said that the model under study is feasible to perform seen from a point of the wind loads and weight of the structure, however, several relevant parameters that have direct influence on the realization of a project of this magnitude must still be defined.

Tabla de Contenidos

1	Glosario.....	xii
1	CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema.	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Metodología.....	3
1.4	Hipótesis	4
1.5	Carta Gantt.....	5
2	CAPÍTULO 2: Marco teórico	6
2.1	El diseño	6
2.1.1	Esfuerzo, resistencia mecánica e incertidumbre.	7
2.2	Método de elementos finitos.....	8
2.2.1	Conceptos relevantes.....	8
2.2.2	No linealidad	8
2.2.2.1	No linealidad geométrica.....	9
2.2.2.2	No linealidad del material.....	9
2.2.2.3	No linealidad en las condiciones de contorno.	9
2.3	Dinámica de fluido computacional (CFD).	9
2.3.1	Conservación de la masa.	10
2.3.2	Ecuación de momentum lineal.	11
2.3.3	Ecuación de la energía.....	11
2.3.4	Modelo $k - \epsilon$	12
3	CAPÍTULO 3: Estado del arte.....	13
3.1	Domos telescópicas en Chile.....	13
3.1.1	Observatorio Paranal.	13
3.1.2	Observatorio Gemini Sur.	15
3.1.3	Observatorio la Silla.....	16
3.1.4	Observatorio SOAR.	16
3.1.5	Proyecto gran telescopio de estudio sinóptico, LSST.	17
3.1.6	Proyecto E-ELT.....	18
3.2	Domos telescópicas fuera de Chile.	20

3.2.1	Eastern Anatolia Observatory-DAG (Turquía).....	20
3.2.2	Large Binocular Telescope-LBT. (USA).....	20
3.2.3	Submillimeter telescope-SMT. (USA).....	21
3.2.4	WIYN Telescope (USA).....	21
3.2.5	James Clerk Maxwell Telescope-JCMT. (Hawái).....	22
3.3	Telescopio Leighton en Hawái.....	23
3.3.1	Antena.....	23
3.3.2	Domo.....	25
4	CAPÍTULO 4: Clima en el valle de Chajnantor.....	27
5	CAPÍTULO 5: Diseño conceptual.....	29
5.1	Requerimientos de diseño.....	29
5.2	Primera propuesta de diseño.....	29
5.2.1	Sistema de apertura.....	29
5.3	Segunda propuesta de diseño.....	31
5.3.1	Sistema de apertura.....	31
5.4	Tercera propuesta de diseño.....	32
5.4.1	Sistema de apertura.....	32
5.5	Cuarta propuesta de diseño.....	32
5.5.1	Sistema de apertura.....	33
6	CAPÍTULO 6: Evaluación y selección.....	34
7	CAPÍTULO 7: Simulaciones y resultados.....	36
7.1	Dinámica de fluido computacional.....	36
7.2	Fuerzas aplicadas.....	37
7.3	Resultados.....	37
7.3.1	Primera iteración, fuerza gravitacional.....	37
7.3.2	Segunda Iteración, dirección de viento “x”.....	38
7.3.3	Tercera iteración, dirección de viento “y”.....	39
7.3.4	Cuarta iteración, entramados.....	39
7.3.5	Quinta iteración, entramados.....	39
7.3.6	Sexta iteración. Entramado, cambio de sección.....	40
7.3.7	Séptima iteración. Propuesta de entramados diferente.....	40
8	CAPÍTULO 8: Comparación y análisis de resultados.....	42
8.1	Zonas con mayores esfuerzos y deformaciones.....	42

8.2	Diámetro mínimo de pasadores	44
8.3	Requerimientos de actuadores hidráulicos	45
9	CAPÍTULO 9: Análisis económico	47
9.1	Materiales relevantes de fabricación	47
9.1.1	Planchas	47
9.1.2	Perfiles estructurales	48
9.2	Resumen	48
10	CAPÍTULO 10: Conclusiones	50
10.1	Perspectivas	52
	Bibliografía.....	53
	ANEXOS.....	56
A.1	Domo Leighton Telescope. Hawái	56
A.2	Clima Valle Chajnantor.....	56
A.3	Segundo diseño conceptual, Mesa tijera.	61
A.4	Computational fluid dynamics. Resultados.....	61
A.5	Tablas de resultados	63
A.6	Entramados propuestos.....	68
A.7	Cotizaciones	70

Lista de figuras

Figura 2.1: Etapas de diseño. [8]	6
Figura 3.1: Ilustración domo telescópico [15]	14
Figura 3.2: Vista aérea domos en observatorio Paranal [15]	14
Figura 3.3: Esquema completo telescopio y domo [16]	15
Figura 3.4: Domo abierto sobre rieles [17]	15
Figura 3.5: Vista por el interior del domo [18]	15
Figura 3.6: Domo Gemini sur por el exterior. [19]	15
Figura 3.7: NTT domo octogonal cerrado. [20]	16
Figura 3.8: Parabrisa protector de antena. [20]	16
Figura 3.9 y 3.10: Domo telescopio SOAR abierto y cerrado. [22]	17
Figura 3.11: Esquema cúpula del domo LSST.	18
Figura 3.12: Configuración final de la estructura telescópica LSST. [24]	18
Figura 3.13: Construcción base fija ELT. [26]	19
Figura 3.14: Entramados ELT. [26]	19
Figura 3.15: Modelo final domo ELT. [26]	19
Figura 3.16 y 3.17: Domo telescópico DAG. [28]	20
Figura 3.18 y 3.19: Domo LBT abierto y cerrado. [29]	21
Figuras 3.20 y 3.21: Apertura completa de domo SMT. [30]	21
Figura 3.21 y 3.22: Apertura y vista general domo telescopio WIYN. [31]	22
Figura 3.23 y 3.24: Apertura Domo JCMT con membrana protectora. [33]	23
Figura 3.25: Vista isométrica parte trasera. [35]	24
Figura 3.26: Vista isométrica parte frontal. [35]	24
Figura 3.27: Vista frontal de la antena. [35]	24
Figura 3.28: Vista lateral con dimensiones relevantes de la antena.	25
Figura 3.29: Etapa de construcción domo para telescopio Leighton. [36]	26
Figura 3.30: Domo telescopio Leighton año 2022. [37]	26
Figura 5.1: Juntas primera propuesta de diseño	30
Figura 5.2: Juntas segunda propuesta de diseño	31
Figura 5.3: Juntas tercera propuesta de diseño	32
Figura 8.1: Zonas con mayor deformación. Geometría abierta y cerrada respectivamente	42

Figura 8.2: Zonas con mayores esfuerzos y factores de seguridad más bajos respectivamente. Geometría completamente abierta.....	42
Figura 8.3: Deformaciones máximas y factores de seguridad mínimos, geometría a medio abrir. ($e = 0,6 \text{ mm}$).....	43
Figura 8.6: Principal influencia de cambio de sección	43
Figura 8.7: Influencia en las deformaciones	44
Figura 8.8: Diagrama de cuerpo libre pasadores.	45
Figura A.1: Planos de domo en Hawái. [35].....	56
Figura A.2.1: Velocidad del viento anual, 2022.	57
Figura A.2.2: Velocidad del viento anual, 2021.	57
Figura A.2.3: Velocidad del viento anual, 2020.	57
Figura A.2.4: Velocidad del viento anual, 2019.	57
Figura A.2.5: Velocidad del viento anual, 2018.	57
Figura A.2.6: Temperatura anual, 2022.	58
Figura A.2.7: Temperatura anual, 2021.	58
Figura A.2.8: Temperatura anual, 2020.	58
Figura A.2.9: Temperatura anual, 2019.	58
Figura A.2.10: Temperatura anual, 2018.	59
Figura A.2.11: Precipitación anual, 2018.	59
Figura A.2.12: Precipitación anual, 2019.	60
Figura A.2.13: Precipitación anual, 2020.	60
Figura A.3.1: Implementación mesa tijera. [35]	61
Figura A.4.1: Distribución de presión y velocidades en geometría cerrada. Dirección viento “x” ..	61
Figura A.4.2: Distribución de presión y velocidades en geometría cerrada. Dirección viento “y” ..	62
Figura A.4.3: Distribución de presión y velocidades en geometría medianamente abierta. Dirección viento “x”	62
Figura A.4.4: Distribución de presión y velocidades en geometría medianamente abierta. Dirección viento “y”	62
Figura A.4.5: Distribución de presión y velocidades en geometría abierta. Dirección viento “x” ...	63
Figura A.4.6: Distribución de presión y velocidades en geometría abierta. Dirección viento “y” ...	63
Figura A.6.1: Primera propuesta de entramado	68
Figura A.6.2: Segunda propuesta de entramado	69
Figura A.7.2: Cotización SODAL	71

Figura A.7.3: Cotización componentes hidráulicos 72

Figura A.7.4: Precio referencial planchas aluminio 6061 T6 73

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Componentes del domo en Hawái. [35].....	26
Tabla 4.1: Datos meteorológicos influyentes de los últimos 5 años.	27
Tabla 4.2: Datos de precipitaciones.	28
Tabla 6.1: Comparación en base a requerimientos de diseño.	34
Tabla 7.1: Resultados primera iteración.....	38
Tabla 7.2: Resultados relevantes segunda iteración.....	38
Tabla 7.3: Resultados relevantes tercera iteración.	39
Tabla 7.4: Resultados relevantes cuarta iteración.	39
Tabla 7.5: Resultados relevantes quinta iteración.....	40
Tabla 7.6: Resultados relevantes sexta iteración.....	40
Tabla 7.7: Resultados relevantes séptima iteración.	41
Tabla 8.2: Longitud máxima de actuadores hidráulicos	45
Tabla 9.1: Área de pétalos.....	48
Tabla 9.2: Longitud total de perfiles por pétalos	48
Tabla 9.3: Resumen de costos asociados	49
Tabla A.5.1: Resultados primera iteración.....	63
Tabla A.5.2: Resultados segunda iteración.	64
Tabla A.5.3: Resultados tercera iteración.	65
Tabla A.5.4: Resultados Cuarta iteración.	65
Tabla A.5.5: Resultados quinta iteración.	66
Tabla A.5.6: Resultados sexta iteración.	67
Tabla A.5.7: Resultados relevantes séptima iteración.	67

Glosario

CFD	:	Computational fluid dynamics
DAG	:	Observatorio de Anatolia Oriental (Dogu Anadolu Gozlemevi)
E-ELT	:	European Extreme large telescope
ESO	:	European southern observatory
\vec{g}	:	Fuerza de gravedad
I	:	Inercia de área
J	:	Momento polar de inercia
k	:	Energía cinética
LBT	:	Large Binocular Telescope
LCT	:	Leighton Chajnantor Telescope
LSST	:	Large synoptic survey telescope
M	:	Momento flector
Ma	:	Número de Mach
msnm	:	Metros sobre el nivel del mar
n	:	Factor de seguridad
NTT	:	New Technology Telescope
P	:	Presión
PTFE	:	Politetrafluoroetileno
r	:	Radio de circunferencia
RANS	:	Reynolds Averaged Navier Stokes
Re	:	Número de Reynolds
SOAR	:	Southern Astrophysical Research
t	:	Tiempo
T	:	Temperatura
T	:	Torque
V	:	Volumen
\vec{v}	:	Vector velocidad
WIYN	:	Wisconsin Indiana Yale NOIRLab

Símbolos griegos

ρ	:	Densidad
ε	:	Disipación energía turbulenta
∇	:	Operador nabla
σ	:	Esfuerzo normal admisible
$\bar{\sigma}$:	Tensor de esfuerzos
τ	:	Esfuerzo cortante admisible
μ	:	Viscosidad dinámica
\hat{u}	:	Energía específica
ϕ	:	Función de disipación viscosa
θ	:	Ángulo de inclinación de la antena

Subíndices

ent	:	Entrada
Sal	:	Salida

CAPÍTULO 1: Introducción

El norte de nuestro país tiene una gran ventaja con respecto a otros lugares del mundo, y es que su clima característico con cielos despejados durante la mayor parte del año, lo hacen un lugar ideal para observar lo que sucede fuera de nuestro planeta. Muchas son las cualidades que reúne el valle de Chajnantor, en el desierto de Atacama, para la implementación de observatorios astronómicos. Una de ellas es la sequedad en el ambiente, ya que, el vapor de agua que está presente en la atmósfera absorbe las ondas que son captadas por algunos telescopios. Además de lo anterior, se le suma la escasez de nubes, contaminación lumínica y los más de 5000 msnm que dan esa cercanía hacia el universo.

1.1 Planteamiento del problema.

Este proyecto de investigación se basa en el traslado del actualmente llamado telescopio Leighton, en honor a su diseñador, a territorio chileno. Dicho telescopio fue puesto en marcha a eso del año 1987 a 4000 msnm y actualmente se encuentra en proceso de desmantelamiento desde el observatorio submilimétrico Caltech del cerro Mauna Kea, Hawái, Estados Unidos. El telescopio fue cerrado el año 2015, sin embargo, el 14 de enero de 2022, fue aprobado el permiso para su desmantelamiento [1].

El traslado se realizará al valle de Chajnantor, en la segunda región de Antofagasta, Chile, con un total de 10.600 km de viaje. Leighton Chajnantor Telescope o bien proyecto LCT, fue firmado por un convenio entre la Universidad de Concepción, el instituto de tecnología de California (Caltech) y la universidad Normal de Shanghái, China, que actualmente colaboran en conjunto para el reacondicionamiento del radiotelescopio de ondas submilimétricas [2]. Si bien dicho telescopio lleva más de 3 décadas en funcionamiento, aún posee la tecnología y condiciones para operar y generar ciencia por al menos 10 años más [3], y no tan solo esto, sino que, además, su traslado implica un trabajo conjunto de diversas áreas de la ingeniería que permiten el desarrollo y aprendizaje de docentes y estudiantes.

Cabe resaltar que LCT, se trata de un proyecto multidisciplinario donde no solo la rama de la astronomía está involucrada, sino también diversas áreas de la ingeniería, que permitirán el control y diseño de las componentes del telescopio. Desde ya se puede anticipar que la reubicación de este telescopio representa todo un desafío para la ingeniería, en primer lugar, se busca trasladar la antena completa y sin desarmar, lo cual implica un delicado procedimiento que asegure no dañar estructuras urbanas ni mucho menos la superficie de la antena. En la otra cara de la moneda, se necesita la implementación de un nuevo domo que resguarde la antena telescópica de las condiciones meteorológicas a las que se va a ver expuesta en esta nueva zona de funcionamiento, ya que, no está en planificación el traslado de esta estructura desde Hawái. Este último punto, da apertura al presente proyecto investigativo, donde lo que se busca es barajar opciones que cumplan con los requerimientos impuestos por el nuevo lugar geográfico, para lo anterior se necesita llevar a cabo un previo análisis técnico económico, que permita seleccionar una opción fundamentada en base a resultados y cumpla con el objetivo de cubrir la antena que espera pruebas de funcionamiento a inicios del 2024 [4].

Una de las ventajas de este telescopio, de 10,4 m de diámetro [5], es la capacidad para realizar barridos profundos en el cielo, debido a que, trabaja en rangos submilimétricos que permite observar el universo desde otro punto de vista, un universo frío donde se generan las condiciones para el

nacimiento de las estrellas o un universo distante y de más baja radiación, que permite indagar más en un tema que resulta escaso y difícil de trabajar en la actualidad, la vida temprana del universo.

El traslado del telescopio implica un directo crecimiento de la ciencia astronómica nacional, ya que, sería un instrumento operado por científicos chilenos. Es importante resaltar, que los observatorios internacionales operando en Chile, son regularizados y considerados por el gobierno como organismos internacionales, lo cual les favorece, destinando solamente un 10% de su tiempo para la investigación de astrónomos que trabajan en instituciones chilenas [6]. El traslado del telescopio e implementación del domo pudiese en cuestión, afectar socialmente a grupos indígenas que se vean representados con la tierra donde se realizará el reacondicionamiento del telescopio, principalmente al grupo Lickan Antay o mejor conocidos como atacameños, que a pesar de lo inhóspito del lugar, por años se han dedicado a criar llamas o alpacas en la zona y a imponer su propio estilo de cosmovisión desde la antigüedad, formulando su propia identidad cultural [7]. Sin embargo, por otro lado, las inversiones sujetas al traslado del telescopio e instalación del domo repercuten indirectamente en conocimiento, que, si bien no es algo tangible, permite el entendimiento de nuestra existencia y con ello el desarrollo como especie. Inclusive, repercutiendo en la tecnología.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto consiste en la propuesta de diseños y poder realizar un análisis comparativo en base a un estudio técnico económico, de esta forma, se busca llegar a la selección de un modelo de domo en específico que cumpla con los requerimientos necesarios en el nuevo lugar de instalación. Se propone analizar los pro y contras de cada uno de ellos hasta llegar a una selección final que sea viable económica y mecánicamente.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificación y análisis del problema de ingeniería en específico.
- Realizar investigación de los tipos de domos implementados en Chile y el mundo.
- Generar propuestas de diseño en base a la investigación realizada.
- Seleccionar una propuesta en base a los requerimientos de diseño establecidos.
- Importar modelos 3D del diseño seleccionado al software de simulación ANSYS.
- Generar resultados a través de simulaciones, incorporando las condiciones dadas en el nuevo lugar geográfico de instalación, tales como el viento, temperatura y efecto del propio peso de la estructura.
- Comparar las disposiciones del modelo, Identificar el caso más desfavorable y optimizar en base a resultados las opciones propuestas, considerando el cumplimiento de los requerimientos mecánicos.
- Analizar la opción más viable mecánica y económicamente.
- Obtener conclusiones fundamentadas en resultados de la realización del proyecto y propuesta de trabajos futuros.

1.3 Metodología

Se propone como primer método de trabajo, el correcto entendimiento y análisis del problema de ingeniería presente en este proyecto, para lo cual se deberán considerar las condiciones de trabajo tales como dimensiones de la antena a proteger, condiciones meteorológicas/sísmicas dadas por el nuevo lugar geográfico de instalación o altitud del valle de Chajnantor, condiciones que tienen directa repercusión en la realización del proyecto.

Una vez definida y comprendida en su totalidad la problemática, se comenzará con el planteamiento de soluciones a través de un primer filtro de diseño conceptual. Dichas propuestas deberán englobar todas las características que se deban cumplir y se podrán basar en un estado del arte que contemple trabajos similares realizados en Chile o en diferentes partes del mundo, obviamente barajando materiales realmente factibles de utilizar, que contemplen una reducción monetaria y sean fáciles de conseguir dada la zona de instalación. Para este último punto se deberá realizar un análisis de mercado que contemple las diferentes opciones.

Como siguiente paso se propone modelar y posteriormente simular las propuestas mediante un software ingenieril 3D (ANSYS), donde se permitan incorporar los parámetros más importantes como lo son temperaturas de trabajo, presiones ejercidas por el viento y efecto de la fuerza gravitacional. Donde previo a la obtención de resultados se deben definir las condiciones de borde que gobiernan cada una de las propuestas, dando sentido al mecanismo de apertura o cierre de las estructuras.

Con resultados preliminares obtenidos se tiene como siguiente paso la comparación de cada uno de los casos con la variación de los parámetros más influyentes, dando hincapié a un procedimiento de prueba y error con las propuestas generadas, que permita llegar a la obtención de la mejor solución.

Finalmente se pueden presentar los resultados obtenidos, detallando las zonas con máximos esfuerzos equivalentes y deformaciones en las estructuras, incorporando además un análisis no detallado, pero sí referencial de los costos asociados a la utilización de perfiles estructurales y materiales en general para la realización del diseño.

En base a lo anterior y realizando un análisis técnico económico se puede llegar a la conclusión de un diseño en específico con el cual se pueden plantear trabajos futuros más detallados para la realización del proyecto.

1.4 Hipótesis

Se debería tratar de minimizar lo más posible el espesor del material a utilizar y la cantidad de perfiles estructurales, con la finalidad de reducir la masa total de la estructura, ya que, para la dinámica de apertura y cierre se debiese seleccionar un motor y sistemas de accionamiento que permitan realizar dicha acción, implicando sobredimensionar estos componentes mecánicos si la estructura resulta más masiva y por ende añadiendo valor monetario a la inversión.

La disposición geométrica del diseño en análisis que presente mayores deformaciones y en teoría el factor de seguridad más bajo definirá el espesor del material a implementar, pudiendo tener diferentes requerimientos según el estado de apertura en el que se encuentre.

Las estructuras deben contar con entramados que disminuyan las deformaciones y esfuerzos máximos. Los perfiles estructurales que conformen los entramados estarán en función de la geometría y el mecanismo de apertura que se adopte.

El mecanismo de apertura pudiese ser el sistema más complejo o sometido a condiciones más críticas en la estructura, producto de vencer la inercia o simplemente las condiciones de apoyo que se generen.

Debería trabajarse con una estructura que sea fácil de ensamblar e idealmente ligera debido a los efectos de la altura de trabajo.

Debido al lugar de instalación no debiesen presentarse atmósferas corrosivas, que malogren algún tipo de acero estructural.

1.5 Carta Gantt.

ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE DOMOS PARA PROTECCIÓN DE TELESCOPIO LEIGHTON						
Duración del proyecto: 19 semanas, considerando como semana uno a la fecha del 6 de marzo del 2023						
RESULTADO	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	RESPONSABLE DE LA ACTIVIDAD (Persona responsable de la ejecución de cada actividad)	INICIO DE LA ACTIVIDAD (Semana en que se iniciará la actividad)	DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD (Semanas)	REALIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD
						1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
INSCRIPCIÓN TEMA						
1. CAPÍTULO INTRODUCTORIO	Objetivo 1. Definir el contexto y problemática del proyecto	1. Búsqueda y lectura de bibliografía y/o papers.	Vicente Molina D.	2	2	■
	Objetivo 2. Definir la metodología de trabajo	2. Ordenar las ideas del proyecto, estructurando los pasos a seguir durante la realización del mismo.	Vicente Molina D.	3	2	■
	Objetivo 3. Presentar la planificación del proyecto a través de una carta gantt	3. Plasmar cada una de las ideas a través de una carta gantt, generando hipótesis de la realización del trabajo.	Vicente Molina D.	4	1	■
ENTREGA PRIMER AVANCE						
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	Objetivo 4. Definir conceptos importantes que permitan la realización del proyecto.	4. Búsqueda y lectura de bibliografía y/o papers.	Vicente Molina D.	5	2	■
		5. Identificación de trabajos similares desarrollados en Chile o el mundo.				
3. DISEÑO CONCEPTUAL	Objetivo 5. Planteamiento de distintas soluciones para el domo telescópico.	6. Análisis de las condiciones de trabajo impuestas por la nueva zona geográfica de instalación o dimensiones requeridas.	Vicente Molina D.	5	1	■
		7. Realizar un estudio de mercado, identificando posibles materiales accesibles en el mercado nacional.		5	2	
		8. Plantear distintas soluciones en base a las actividades anteriores.		5	3	
4. INCORPORACIÓN A UN SOFTWARE DE DISEÑO 3D	Objetivo 6. Definir y diseñar mediante software ingenieril las soluciones planteadas.	9. Definir el modo de apertura que tendrían las distintas propuestas.	Vicente Molina D.	6	3	■
		10. Seleccionar propuesta en base a los requerimientos de diseño y modelarla con un software 3D.		7	3	
5. OBTENCIÓN DE RESULTADOS A TRAVÉS DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	Objetivo 7. Simular mediante software ANSYS.	11. Definir cada una de las juntas y superficies en contacto, dando sentido al mecanismo de apertura/cierre.	Vicente Molina D.	9	1	■
		12. Obtención de resultados incorporando presiones del viento, temperatura promedio de trabajo en la zona de instalación y el efecto del propio peso.		9	3	
ENTREGA SEGUNDO AVANCE						
6. ANÁLISIS COMPARATIVO Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	Objetivo 8. Identificar las diferencias entre cada una de las propuestas y realizar comparaciones entre ellas.	13. Realizar cambios de parámetros.	Vicente Molina D.	10	2	■
		14. Presentar formalmente, en base a las simulaciones realizadas condiciones de esfuerzos y deformaciones.		11	2	
		15. Comparar y optimizar las propuestas en base a los resultados obtenidos, cumpliendo los requerimientos mecánicos.		12	4	
7. FINALIZACIÓN DEL ANÁLISIS COMPARATIVO	Objetivo 9. Llegar a la propuesta de un diseño óptimo para el domo telescópico.	16. Ver si la opción es viable mecánica y economicamente, en función de los resultados obtenidos.	Vicente Molina D.	14	2	■
8. CONCLUSIONES	Objetivo 10. Comparar los resultados con las hipótesis establecidas.	17. En base a las hipótesis formuladas, obtener conclusiones acerca de la realización del proyecto y propuesta de trabajos futuros.	Vicente Molina D.	15	2	■
		18. Revisión de detalles antes de la entrega final.	Vicente Molina D.	16	2	
ENTREGA TERCER AVANCE						
SESIÓN COMISIONES						

CAPÍTULO 2: Marco teórico

2.1 El diseño

Diseñar consiste en proponer o formular un plan para poder satisfacer una necesidad o resolver algún problema, y es una tarea compleja que requiere de diversas habilidades, donde usualmente se trabaja de manera en que la gran tarea sea dividida en partes más simples y abarcar el problema paulatinamente. El diseño es considerado como un proceso iterativo y con múltiples retroalimentaciones como se resume en la **Figura 2.1**, y además hay procedimientos que deben ser guiados por códigos y normas, por seguridad, economía o la responsabilidad legal detrás.

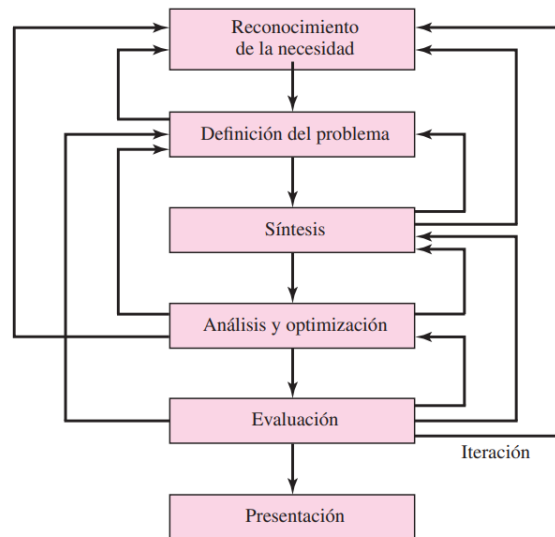


Figura 2.1: Etapas de diseño. [8]

Al crear algo físicamente real como por ejemplo el domo telescópico siguiendo las etapas del diseño, se debe tener en cuenta que, en primer lugar, debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo y útil de tal manera que pueda fabricarse y sea capaz de comercializarse. Para lo anterior se puede decir que el diseño mecánico consta de bases que son conformadas por la mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, transferencia de masa o momento, procesos de manufactura e inclusive teoría eléctrica.

Antes de comenzar se debe identificar una necesidad, en este caso resguardar la antena telescópica. Seguida de la definición del problema, la cual debiese ser más específica y debe abordar las especificaciones del objeto que va a diseñarse, donde se delimitan las características, dimensiones y todas las variantes de entrada o salida, como, por ejemplo: velocidades, avances, temperaturas de trabajo, variaciones esperadas en las variables, limitaciones dimensionales, peso, además, muchos materiales suelen incluirse en los catálogos de algún proveedor, pero no todos pueden conseguirse con facilidad y suelen sufrir de escasez. De esta forma se van construyendo restricciones a la libertad de diseñar y se acota el universo de soluciones posibles. En resumen, cualquier cosa que limite la libertad de elección del diseñador significa una restricción.

En base a lo anterior, se deben proponer esquemas de soluciones y posteriormente deben someterse a un análisis para evaluar que tan bien se podrían desempeñar bajo las especificaciones establecidas. Los esquemas que cuentan con potencial se trabajan un poco más y se optimizan hasta lograr un mejor desempeño de dicho esquema. Por su parte los esquemas que no sobreviven al análisis se revisan, se mejoran o se desechan completamente. Luego, los esquemas se comparan de manera que se pueda seleccionar el camino que conduzca al producto más competitivo. Finalmente, el esquema triunfal llega a una etapa de evaluación que, por lo general, implica una prueba de prototipo en laboratorio donde se verifica realmente si es confiable y exitoso en general, pudiendo realizar retroalimentaciones e inclusive mejorar o reemplazar partes defectuosas o no tan eficaces.

Adicionalmente se puede hablar de algún impedimento o resistencia cuando se está en presencia de una consideración de diseño importante y que puede llegar a influir en el diseño de un solo elemento o del sistema completo, como puede ser funcionalidad, desgaste, corrosión, seguridad, confiabilidad, peso, vida, ruido, estilo, forma, entre muchas otras, y que dan origen al concepto de demanda que se entiende como las condiciones que deben cumplirse bajo toda circunstancia y deseo, que deben tenerse en cuenta siempre que sea posible.

2.1.1 Esfuerzo, resistencia mecánica e incertidumbre.

El éxito y prevalencia de un diseño dependerá de la forma en la que se trabajen los esfuerzos inducidos por las diferentes cargas, de esta manera dichos esfuerzos deben ser menor que la resistencia de ese material en un punto de interés. La resistencia es una propiedad característica del material o de un elemento mecánico que depende del tratamiento y el procesamiento que reciba. Es una propiedad inherente a las demás condiciones externas y define la capacidad que se tiene para resistir esfuerzos, fuerzas aplicadas sin romperse, o bien adquirir deformaciones plásticas.

Por su parte el esfuerzo es una propiedad de estado en un punto específico del cuerpo, y se puede decir que está en función de la geometría adoptada, las cargas aplicadas, la temperatura e inclusive el proceso de manufactura.

Siempre que se diseña se deben contemplar ciertas incertidumbres que están presentes como lo pueden ser la composición de los materiales y el efecto de las variaciones en las propiedades, el efecto de la corrosión, efectos de ensamblajes como soldaduras, ajustes por contracción, la intensidad y distribución de las cargas, validez de los modelos matemáticos, entre otras. Por esta razón es que existen modelos matemáticos para enfrentar las incertidumbres, donde se establece un factor de diseño basado en las incertidumbres absolutas de un parámetro de pérdida de función y un parámetro máximo permisible. Luego es muy común trabajar con un factor de seguridad n que recibe la misma definición que un factor de diseño, sin embargo, es común utilizar los términos de límite elástico y esfuerzo máximo permisible, teniendo en consideración que dichos esfuerzos y resistencia deben tener las mismas unidades de medida y aplicarse en la misma ubicación crítica. [8]

$$n = \frac{\text{Resistencia de pérdida de función}}{\text{Esfuerzo permisible}} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

2.2 Método de elementos finitos.

Antes de iniciar cualquier construcción y materializar el trabajo, se debe contar con el ante proyecto o proyecto técnico que es donde se justifica todo el trabajo a realizar a través de resultados. Es por esto, que es importante definir una de las herramientas útiles en la etapa de selección y diseño, que corresponde al método de elementos finitos.

El área de la mecánica se puede dividir en 3 ramas principales, teórica, aplicada y computacional. En este presente proyecto, se dará atención a esta última categoría, la mecánica computacional, que se basa en la resolución de problemas a través de métodos numéricos, donde una de sus sub-ramas, corresponde al análisis de sólidos y estructuras. El método de elementos finitos es una forma de discretizar problemas lineales o no lineales, convirtiendo el elemento en estudio en un modelo discreto con un número finito de grados de libertad para analizar su comportamiento.

2.2.1 Conceptos relevantes

Para esclarecer lo anterior, se debe tener conocimiento de ciertos conceptos previos que se utilizarán. Por ejemplo, en el caso del domo en estudio, se puede decir que a su geometría se le denomina dominio. Donde dicho dominio ha de formar subdominios que se denominan elementos, en otras palabras, se puede decir que se discretiza el dominio para formar los elementos. En función de la dimensión del dominio, es que se pueden encontrar elementos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, que definirán la resolución de las ecuaciones respectivas.

A su vez, se le denomina nodo al punto en el que concurren dos lados de un elemento. En estos nodos es que se establecen las ecuaciones de comportamiento, equilibrio y compatibilidad, que permiten describir el comportamiento del elemento en base a las condiciones de contorno que se establezcan. [9]

Al conjunto de todos los elementos, se les denominará malla, y en ella se reflejará la distancia que existe entre cada uno de los nodos, en base a ella se podrán tener resultados más acercados o alejados de la realidad, considerando un menor o mayor tamaño en el mallado respectivamente. En base a esto, es que un mallado más fino tenderá a gastar más herramientas computacionales debido a que involucra una mayor cantidad de ecuaciones que resolver, aumentando los tiempos de espera para dar una solución al problema.

Por otro lado, el número de grados de libertad que se presenten en un nodo es entendido como el número de parámetros independientes necesarios para especificar de forma única ese nodo.

2.2.2 No linealidad

En el estudio de los problemas reales en la mecánica, muy pocas veces se presentan casos que pueden ser clasificados como lineales, solo procesos físicamente sencillos caben dentro de esta categoría, que contempla hipótesis de pequeños desplazamientos, concepto de elasticidad lineal donde deformaciones y tensiones en el cuerpo están gobernadas por relaciones lineales, es decir, si se duplican las fuerzas aplicadas, los desplazamientos y esfuerzos internos se duplican de igual forma. Otra característica de un comportamiento lineal sería que las condiciones de borde son constantes.

Se pueden presentar a su vez, distintos tipos de no linealidades, clasificadas geoméricamente, a través de sus condiciones de contorno o bien por la no linealidad del material.

2.2.2.1 No linealidad geométrica

Se estará en presencia de una no linealidad de este tipo, cuando las deformaciones o tensiones que se presentan, a partir de la aplicación de una carga son suficientes para provocar que la geometría que está en estudio, presente cambios drásticos. Debido a este cambio en la estructura, se producirá un cambio en la rigidez. Dicho cambio en la rigidez será función de los desplazamientos nodales de dicha estructura, de esta forma, aparece el concepto de fuerza residual que representa la suma de fuerzas exteriores e interiores, y debe de cero igual a 0.

Este tipo de no linealidad puede estar presente en las simulaciones desarrolladas en el informe, debido a que precisamente pueden existir deformaciones significativas en las propuestas de domos dependiendo del espesor y materiales seleccionados, induciendo cambios significativos.

2.2.2.2 No linealidad del material

En los casos reales, la mayoría de los materiales tienen un comportamiento no lineal, que viene dado simplemente por su composición interna, generando relaciones no lineales entre tensión y deformación. Para definir el comportamiento que los gobierna, por lo general se usan modelos matemáticos dependiendo de sus condiciones elásticas o plásticas.

En el caso de este informe, se asumirán los materiales de las simulaciones como lineales, trabajando en una zona elástica sin entrar en la zona de plasticidad.

2.2.2.3 No linealidad en las condiciones de contorno.

Por último, se puede dar el caso en que, debido a la aplicación de fuerzas sobre la estructura, las condiciones de borde vayan cambiando, redefiniendo de esta manera las condiciones generales del análisis.

Este tipo de no linealidad también se puede presentar en las simulaciones desarrolladas, debido a que la aplicación de las presiones ejercidas por el viento y el propio peso de la estructura induce a que las condiciones de la geometría vayan cambiando.

2.3 Dinámica de fluido computacional (CFD).

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta de gran utilidad en la realización de este proyecto, ya que, permite describir el movimiento del aire en función de la geometría dispuesta, de esta manera, es posible cuantificar las presiones ejercidas por el viento y visualizar el comportamiento de la estructura bajo estas cargas. El método de dinámica de fluido computacional (CFD) utiliza algoritmos y métodos matemáticos para resolver las ecuaciones fundamentales: las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía, sin embargo, para obtener una resolución al problema propuesto es necesario realizar una discretización finita, dividiendo el dominio en mallas de celdas tal como se mencionó en la sección anterior, adicionalmente, se debe trabajar con condiciones de contorno que especifican como el flujo

interactúa con los límites del dominio y una condición de entrada, que en este caso es la velocidad máxima del viento.

Son 3 principales elementos claves en CFD: la generación de la malla, el modelo de turbulencia y el desarrollo de los algoritmos. Para lograr resultados que puedan representar la realidad, se debe trabajar con un estudio de convergencia de malla, en resumidas cuentas, corresponde al análisis del mismo caso con refinamiento de la malla, de esta forma, cuando los resultados no sufren una gran alteración se dice que la convergencia de malla fue alcanzada y los resultados obtenidos debiesen acercarse a una representación real.

Por su parte, se dice que un fluido es turbulento cuando su flujo se caracteriza por un movimiento irregular con la formación de estructuras caóticas y aleatorias en el tiempo y espacio. De esta forma, en un flujo con estas características se producen remolinos y vórtices de diferentes tamaños, lo que resulta en una distribución desordenada de velocidades y presiones de flujo.

Cuando el viento se encuentra con un obstáculo, como pudiese ser una colina, edificio o en este caso en específico un domo telescópico, existen cambios en el perfil de velocidades, generando turbulencias que dependen de esa configuración. Dichas turbulencias son irregulares y su comportamiento es difícil de predecir, sin embargo, se emplean modelos matemáticos para estimar la influencia del obstáculo sobre la dinámica del viento.

2.3.1 Conservación de la masa.

Esta expresión nace del principio de que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo que se debe conservar en un estado inicial y final. Matemáticamente este principio se expresa con la ecuación de continuidad (3 o 4), que a su vez nacen de las condiciones impuestas en (2), donde la pérdida de masa dentro del volumen debe ser igual al flujo neto de masa en un intervalo dt. **Figura 2.1.**

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i v_i)_{sal} - \sum_i (\rho_i A_i v_i)_{ent} = 0 \quad (2)$$

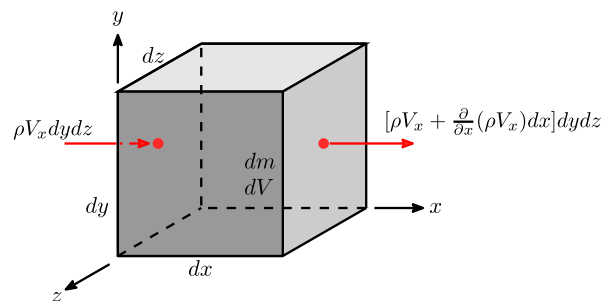


Figura 2.1: Volumen de control, con flujos másicos de entrada y salida.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho V_z) = 0 \quad (3)$$

O bien:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

2.3.2 Ecuación de momentum lineal.

$$\sum \vec{F} = \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} dx dy dz \quad (5)$$

En base a la ecuación de momentum lineal, se tiene que las fuerzas actuantes sobre la partícula de fluido corresponden a fuerzas de volumen (gravedad) o de superficie (esfuerzos), que pueden ser representadas a través de un tensor de esfuerzos ($\bar{\sigma}$). De esta forma, desarrollando la expresión (5), se llega a:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{\sigma} + \rho \vec{g} \quad (6)$$

De igual forma, se pueden expresar dichos esfuerzos en términos de viscosidad, presión, velocidad y volumen, dando forma a las ecuaciones de Navier-Stokes [10], donde se definen en cada una de las direcciones (x,y,z) respectivamente.

$$\rho \frac{DV_x}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \right] \quad (7)$$

$$\rho \frac{DV_y}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \right] \quad (8)$$

$$\rho \frac{DV_z}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \right] \quad (9)$$

2.3.3 Ecuación de la energía.

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\nabla \cdot \vec{V}) = \nabla \cdot (k\nabla T) + \phi \quad (10)$$

Donde ϕ corresponde a la función de disipación viscosa. [10]

$$\phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Dichas ecuaciones, se trabajan considerando que el aire, es un fluido Newtoniano e incompresible, simplificando términos de las ecuaciones presentadas.

2.3.4 Modelo $k - \varepsilon$

En la realidad muy pocas veces se trabaja con la presencia de un flujo laminar, es más, esta condición se da bajo circunstancias muy precisas y acotadas. Se dice que se está en presencia de un flujo con estas características cuando el flujo es suave y ordenado siguiendo trayectorias bien definidas y predecibles. Las condiciones para que un fluido sea laminar dependen del número de Reynolds (Re), un parámetro adimensional que relaciona la fuerza inercial del flujo con las fuerzas viscosas, usualmente valores de este parámetro bajo el orden de 2.000 son considerados como laminares.

El caso en estudio difiere completamente al comportamiento de un flujo laminar, es por esta razón que se debe pensar en una forma de representar la turbulencia. El modelo RANS propuesto por Reynolds consiste en descomponer las variables de interés en un valor medio y otro fluctuante. La idea detrás del enfoque de este método es promediar las ecuaciones de Navier Stokes en el tiempo para eliminar las fluctuaciones rápidas y caóticas del flujo turbulento, lo que permite obtener una descripción más manejable y comprensible del flujo. De esta forma, nace el modelo K-épsilon, que corresponde a un cierre del modelo RANS, caracterizado por su bajo costo computacional y que consiste en la resolución de 2 ecuaciones adicionales, para el transporte de energía cinética turbulenta (k) y para la tasa de disipación de energía turbulenta (ε). Este método es utilizado para flujos con alto número de Reynolds, ya sea en régimen compresible o incompresible, y bajo la primicia de un número de Mach (Ma) $< 0,3$. En otras palabras, para un flujo sub-sónico en el cuál la velocidad del objeto o fluido es significativamente menor a la velocidad del sonido en el medio en el que se encuentren. [11]

- Ecuación energía cinética turbulenta:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla) \cdot k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (12)$$

- Ecuación tasa de disipación energía turbulenta:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla) \cdot \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

Donde las constantes $C_{\varepsilon 1}$ y $C_{\varepsilon 2}$ se obtienen de forma empírica, a través de la realización de experimentos en laboratorios, datos experimentales y ajustes iterativos que permitan representar el flujo. [11]

CAPÍTULO 3: Estado del arte

Los telescopios son instrumentos que amplifican las imágenes de objetos lejanos permitiendo una observación con mucho más detalle. Actualmente son un medio sumamente importante para recolectar y analizar información proveniente desde fuera de nuestro planeta que permite el desarrollo de la ciencia y el entendimiento del universo. Fue a eso del año 1608 que se atribuye su creación al Neerlandés Hans Lippershey [12], desde ese entonces el desarrollo de la ingeniería y tecnología ha permitido la creación de telescopios más modernos, con mayor alcance e inclusive móviles que permitan compensar la rotación de la Tierra y se pueda dar seguimiento a lo que se intenta observar. Sin embargo, la calidad del telescopio va ligado con el tamaño que puedan alcanzar, haciendo necesario la implementación de domos telescopios para resguardar estos equipos tan valiosos y mantener su integridad.

Actualmente se pueden encontrar diferentes tipos de domos telescópicos, dependiendo de su geometría, tamaño, sistema de rotación y apertura. Por lo general la geometría más utilizada en la actualidad corresponde a modelos semiesféricos, sin embargo, no es la única implementada pudiendo encontrarse modelos cilíndricos e inclusive poliedros, cada uno gobernado por su propio sistema de apertura que puede ser rotacional, traslacional o una combinación de ambos.

El proceso de instalación de un domo telescópico, en la actualidad, conlleva diversos pasos que involucran el diseño conceptual, el proceso de construcción y finalmente la puesta en marcha a través de algún sistema de control, abarcando una amplia variedad de mecanismos e ingeniería, que debe contar con equipos de manipulación y sistemas auxiliares. A su vez, también se deben tener en cuenta ciertos problemas que se puedan generar al interior del recinto, por ejemplo, el calentamiento interior o las corrientes de aire que puedan deteriorar la calidad de la señal y generar una mala investigación. Debido a esto la climatización en el domo debe ser un tema también a tratar y con esto evitar que se produzcan flujos turbulentos en la interfaz.

A rasgos generales, los domos telescópicos que ya se han implementado a través del mundo y el territorio nacional, poseen como material base acero o aluminio [13], sin embargo, en algunos casos con domos de menor tamaño se utiliza plástico reforzado con fibra de vidrio [14].

3.1 Domos telescópicos en Chile.

En el norte de nuestro país es donde se encuentran la mayor cantidad de observatorios astronómicos destinados a la investigación, debido a la escasez de nubes y contaminación lumínica. Por ende, consta de múltiples antenas telescópicas que son resguardadas bajo distintos tipos de Domos. Dentro de los observatorios astronómicos más relevantes en el territorio nacional se encuentran:

3.1.1 Observatorio Paranal.

El observatorio Paranal ubicado en la segunda región de Antofagasta, consta de múltiples telescopios que pueden operar de manera independiente o en conjunto. Cuatro de ellos poseen un diámetro de 8,2 m y poseen domos con una base cilíndrica, construidos sobre una armazón de

acero estructural con techos y fachadas cubiertas con paneles revestidos, impermeables y aislantes térmicos. Los domos se conforman de una parte cilíndrica fija y una cúpula móvil. (**Figura 3.1 y 3.2**)

La parte cilíndrica fija de cada uno de los 4 domos, se eleva unos 5.144 m por encima del nivel nominal del área del telescopio, además, en esta parte fija es donde se tienen rendijas de ventilación que permiten la circulación del aire y con esto lograr una óptima ventilación en el interior. En la parte superior de esta estructura fija, se instala una pasarela circunferencial para acceder y realizar mantenimiento al sistema de rotación de la cúpula. [15]

A la parte superior de los domos se le denomina cúpula, las cuales poseen una rendija de observación de 9,5 m de ancho equipadas con un parabrisas de permeabilidad variable, conformada por dos puertas que deslizan sobre rieles y que al abrirse permite que el telescopio tenga un campo de visión libre. Las cúpulas pueden girar de manera independiente al telescopio y al igual que la zona fija poseen rendijas de ventilación.

Los domos telescópicos incluyen por el interior una grúa, escaleras y plataformas de acceso que son indispensables en base a los requerimientos de mantenimiento.

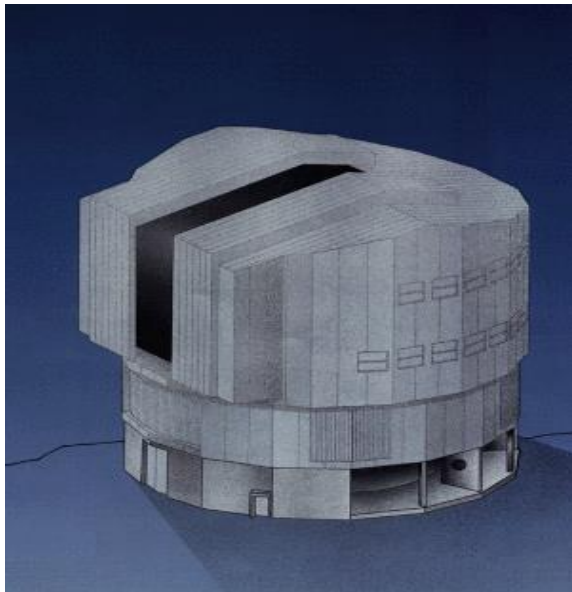


Figura 3.1: Ilustración domo telescópico [15]



Figura 3.2: Vista aérea domos en observatorio Paranal [15]

A su vez, este observatorio consta de 4 telescopios auxiliares con un diámetro de 1,8 m cada uno, resguardados con modelos de domos semiesféricos móviles los que se pueden desplazar a través de rieles para ser posicionados en la ubicación que se requiera, **Figuras 3.3 y 3.4**. Su sistema de apertura consiste en un sistema de revolución conformado por dos secciones semiesféricas que rotan con respecto a un eje central de la geometría.

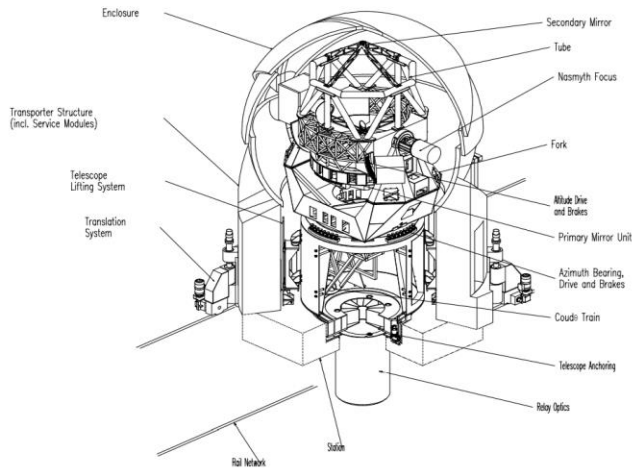


Figura 3.3: Esquema completo telescopio y domo [16]



Figura 3.4: Domo abierto sobre rieles [17]

3.1.2 Observatorio Gemini Sur.

El observatorio Gemini consta de dos telescopios gemelos de 8,1 m cada uno, El primero se ubica en el hemisferio sur (Cerro Pachón, Chile) y el otro en el hemisferio norte (Mauna Kea, Hawái). Cada telescopio posee un conjunto de instrumentos que cubren un rango de longitud de onda infrarroja.

Los telescopios son resguardados por domos con una parte fija cilíndrica y con una cúpula semiesférica móvil definiendo una altura total desde el piso de 46 metros, capaces de realizar una rotación completa de 360° en 2 minutos (**Figuras 3.5 y 3.6**). La estructura de 780 toneladas posee rejillas de ventilación ajustables en su parte móvil que se pueden abrir hasta abarcar una longitud de 10 m, de esta manera se proporciona un flujo de aire suave sobre el espejo principal para así poder regular la temperatura sobre él, coincidiéndola con la temperatura exterior y así evitar flujos turbulentos que interfieran en la captación de información. [18]



Figura 3.5: Vista por el interior del domo [18]



Figura 3.6: Domo Gemini sur por el exterior. [19]

3.1.3 Observatorio la Silla.

Este observatorio ubicado en la región de Coquimbo a una altitud de 2.400 msnm es el lugar de múltiples telescopios operados por organismos internacionales. Uno de los más relevantes corresponde al telescopio de nueva tecnología (NTT) de 3,58 m de diámetro, que fue el primer telescopio en el mundo en tener un espejo principal controlado por computador, tecnología que actualmente es aplicada en la mayoría de los grandes telescopios del mundo.

El telescopio se encuentra resguardado dentro de un domo giratorio de forma octagonal (**Figura 3.7**), que garantiza la máxima exposición del telescopio durante las observaciones y a su vez lo protege de los fuertes vientos y polvos del desierto. Una de las características que posee esta instalación, es la implementación de dos muros internos que separan la sala del telescopio de la sala de instrumentos, asegurando una buena ventilación y evitando que se formen fuentes de calor. Por otro lado, también se diseñó un parabrisa fabricado a tela para optimizar aún más el flujo de aire dentro del recinto (**Figura 3.8**). El domo también fue provisto de un sistema neumático para sello inflable azimuthal, sistemas de accionamiento eléctricos para parabrisas, puertas correderas y persianas, sistema de climatización e iluminación.



Figura 3.7: NTT domo octogonal cerrado. [20]



Figura 3.8: Parabrisa protector de antena. [20]

3.1.4 Observatorio SOAR.

Muy cercano al observatorio Gemini sur, se encuentra el observatorio SOAR, ubicado en la IV región de coquimbo a una altura de 2.738 msnm. Posee un telescopio óptico de 4,1 m resguardado en un domo telescópico semiesférico hecho de fibra de vidrio, con la finalidad de reducir el peso de la estructura. La cúpula construida en Brasil [21], a su vez está aislada con un anillo de acero y vigas de arco. El modo de apertura consiste en un sistema de puerta de persiana que se ubica en la parte superior del domo, por otro lado, cuenta con rejillas de ventilación en la parte fija de la estructura. (**Figura 3.9 y 3.10**)



Figura 3.9 y 3.10: Domo telescopio SOAR abierto y cerrado. [22]

3.1.5 Proyecto gran telescopio de estudio sinóptico, LSST.

El LSST es un telescopio de 8,4 m que actualmente se encuentra en construcción en el cerro Pachón IV región de Chile. El domo que resguardará este telescopio ha sido diseñado para protegerlo de los fuertes vientos y polvo del desierto, tendrá 27 m de altura y estará conformado por una parte fija cilíndrica de hormigón aislado de 30 m de diámetro. Sobre esta estructura descansará la cúpula giratoria (**Figura 3.11**) que tendrá un sistema de rotación completamente independiente del telescopio mismo. Además, contará con una pantalla de luz/viento para minimizar los efectos de la dispersión y viento dentro del edificio, estará provisto de un control térmico, rejillas de ventilación en su cúpula y será hermético a la luz durante el día para permitir la prueba y calibración del sistema óptico del telescopio [23].

El diseño finalmente será como el que se muestra en la **Figura 3.12**, con la antena telescópica ubicada en el recinto principal de la estructura, mientras que todo lo que conlleva operaciones y servicios propiamente tal, descienden en un área común sobre el cerro. Lo anterior se puede realizar debido al previo análisis geotécnico realizado en la zona, concluyendo que el suelo es fuerte y resistente a la erosión y adicionalmente a la simulación dinámica de fluidos computacional (CFD) que permiten estimar la menor perturbación del aire sobre la estructura y así definir la mejor orientación para el telescopio.

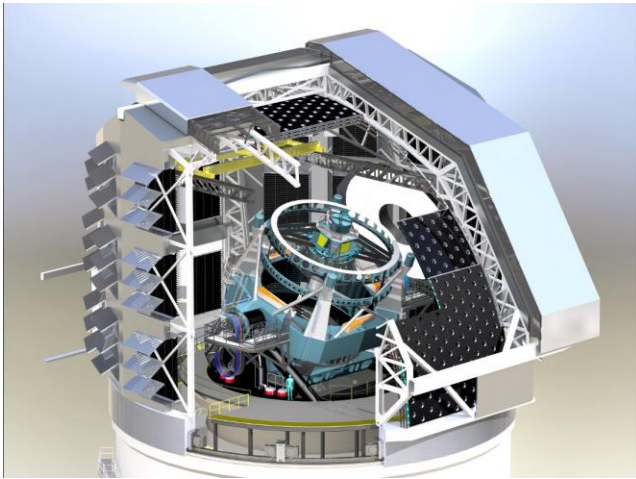


Figura 3.11: Esquema cúpula del domo LSST.

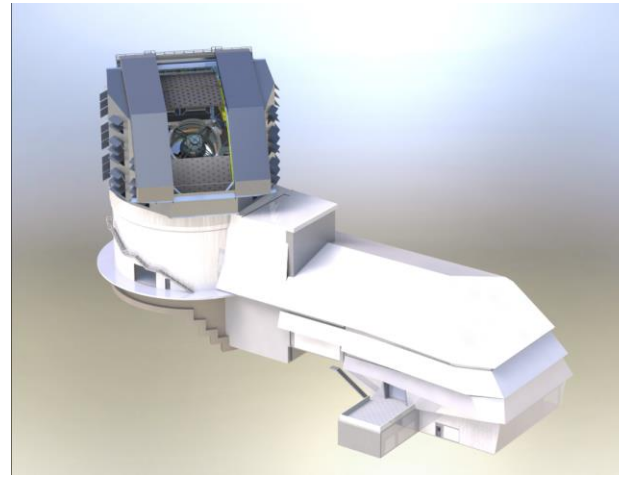


Figura 3.12: Configuración final de la estructura telescópica LSST. [24]

3.1.6 Proyecto E-ELT.

El extremely large telescope (ELT) es un telescopio que se encuentra en proceso de construcción en nuestro país (**Figura 3.13**). Tendrá un espejo principal de 39 m, convirtiéndolo en el telescopio de luz visible e infrarroja más grande del mundo y estará ubicado en el cerro armazones en la región de Antofagasta, Chile. Será operado por ESO y se espera que esté en funcionamiento para el año 2028 con la misión de hacer seguimiento a planetas similares a la Tierra donde podría existir vida extraterrestre.

Para proteger este gran telescopio hace falta un gran domo, con una cúpula de 80 m de altura y un diámetro de 88 m, lo que dará una superficie equivalente a la de un campo de fútbol. La parte superior de la estructura girará para permitir que el telescopio apunte en cualquier dirección y estará equipado con dos puertas motorizadas que se abrirán lateralmente para permitir la observación del cielo nocturno. El recinto constará además con un edificio auxiliar donde serán distribuidas las distintas salas de operación: eléctricas, térmicas e hidráulicas, correspondientes a la parte fija de la estructura, la cuál será construida con pilares de hormigón que descansen sobre amortiguadores montados sobre los cimientos con el fin de apaciguar las vibraciones sísmicas.

La cúpula del recinto tendrá un revestimiento de aluminio aislado térmicamente (**Figura 3.14**), que permitirá el acondicionamiento térmico de la cámara del telescopio durante el día y limitará el enfriamiento durante la noche. Adicionalmente, las puertas estarán dotadas de mecanismos de enclavamiento para conseguir continuidad estructural y juntas especiales para garantizar la estanqueidad ambiental cuando están cerradas.

En cuanto a la cúpula, estará sostenida por una viga redonda con una pista especial en su parte inferior que descansará sobre 36 carros a una altura de 11 m desde el suelo, de esta manera el mecanismo giratorio estará en la medida de lo posible desacoplado estructuralmente de la base fija de hormigón, logrando así evitar la propagación de las vibraciones hacia la antena telescópica. Adicionalmente la estructura principal se completa con tres arcos estructurales apoyados sobre la

viga rotatoria, y una serie de vigas secundarias que permitirán el montaje del cerramiento aislante de aluminio. La cúpula del ELT ha sido diseñada para permitir una correcta ventilación que no interfiera en las investigaciones, de esta manera el domo está equipado con rejillas de ventilación y parabrisas que permiten regular el flujo de aire. (Figura 3.15)

Este gran proyecto de ingeniería actualmente en desarrollo contará finalmente con un domo de unas 6100 toneladas, con la utilización de 30 millones de pernos y golillas, 500 km de cables y 1.500 km de fibra óptica. [25]



Figura 3.13: Construcción base fija ELT. [26]



Figura 3.14: Entramados ELT. [26]

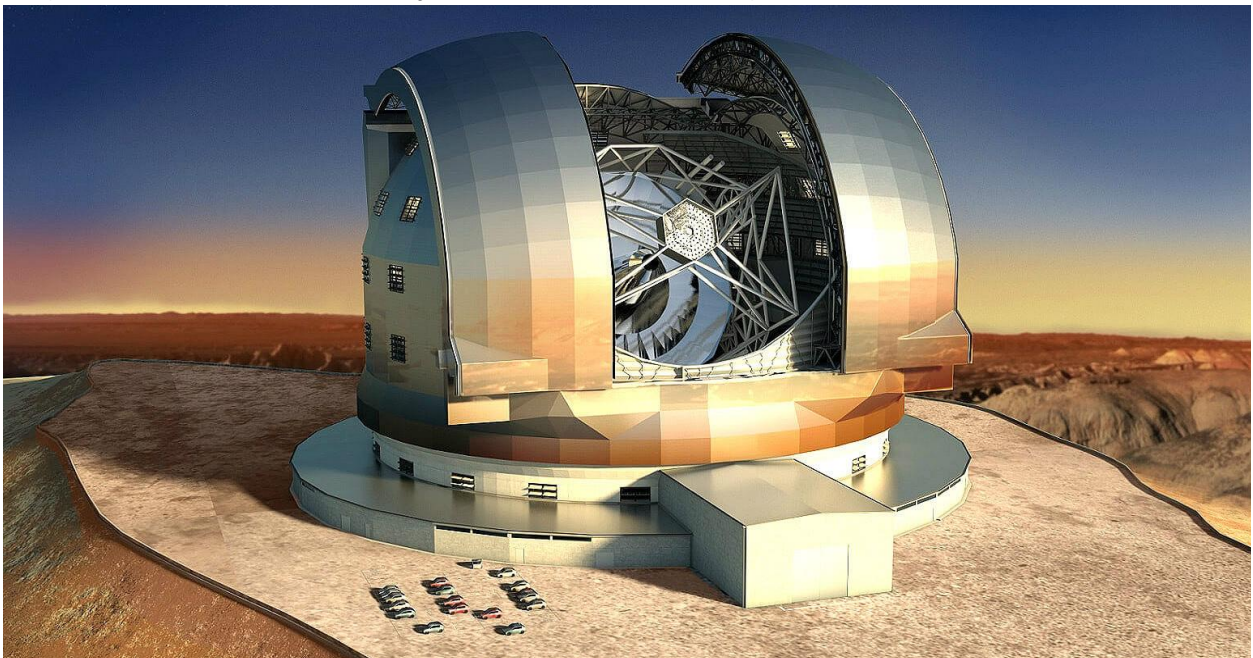


Figura 3.15: Modelo final domo ELT. [26]

3.2 Domos telescópicas fuera de Chile.

Si bien Chile puede considerarse como la capital de la astronomía, no es el único país en implementar telescopios con avanzada tecnología, y por ende no es el único en implementar domos para proteger estos valiosos equipos. Es por esto por lo que, también se da investigación a las estructuras que son desarrolladas en otros países y que sirven como referencia en el actual proyecto.

3.2.1 Eastern Anatolia Observatory-DAG (Turquía).

DAG es un telescopio óptico e infrarrojo de 4 m ubicado en Turquía a unos 3.170 msnm en la meseta de Erzurum. El telescopio es protegido de las condiciones climáticas, polvo y rayos por un domo octogonal giratorio, con una fachada revestida con paneles termoaislantes y láminas exteriores de aluminio [27]. Al igual que la mayoría de los modelos de domos implementados en Chile, consta de una base fija la cual se encarga de soportar la cúpula giratoria de acero. Posee un sistema de apertura que consta de dos puertas ranuradas y un parabrisas hecho de paneles permeables al flujo de aire que es capaz de seguir el movimiento del telescopio (**Figuras 3.16 y 3.17**). Adicionalmente el modelo consta de tres puertas de ventilación que están previstas de aletas fijas que permiten la salida del aire desde el interior del recinto regulando el flujo.



Figura 3.16 y 3.17: Domo telescópico DAG. [28]

3.2.2 Large Binocular Telescope-LBT. (USA)

Este telescopio ubicado a 3200 msnm, en Mount Graham, Arizona – USA. Corresponde a un telescopio óptico binocular que utiliza dos espejos primarios de 8,4 m cada uno (**Figura 3.18**), para observaciones visibles, infrarrojas y de interferometría. La implementación de este domo telescópico fue todo un desafío ingenieril, debido a las dimensiones de los dos espejos, la estructura debía ser rígida y segura, pero a la vez ligera. Para lo anterior se usaron láminas de aluminio delgadas de 8 mm de espesor, que a su vez hizo posible el aumento de intercambio de calor dentro de la estructura y la minimización de las perturbaciones durante las observaciones.

La estructura consta de una parte inferior fija de 30 m, sobre la que se ha fijado una caja giratoria. La parte superior consta de dos puertas ranuradas que deslizan lateralmente 10,2 m cada una para dejar libres ambos espejos del telescopio para la observación. El recinto también posee varias puertas que permiten en flujo de aire y la correcta temperatura dentro del edificio (**Figura 3.19**). La cúpula posee el mismo eje azimutal del telescopio y a su vez puede girar de manera

independiente de él, sin ninguna interferencia física entre ambos dada cualquier posición. Este domo telescópico también posee amortiguadores antisísmicos, sistema neumático para sellos inflables, escaleras, plataformas y pasarelas de acceso a todos los niveles del telescopio, a su vez está dotado de grúas para la manipulación, transporte y/o elevación de instrumentos.

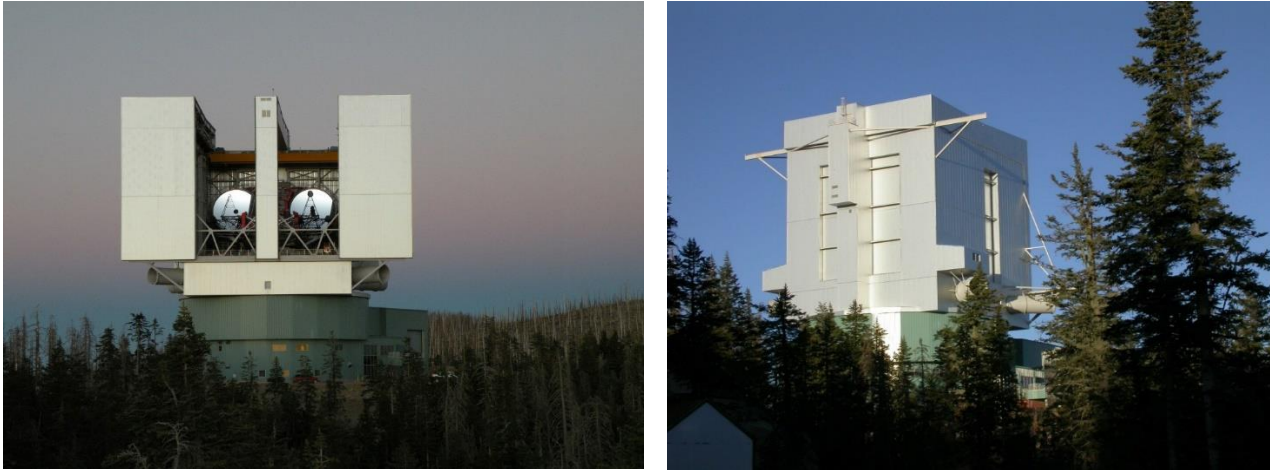
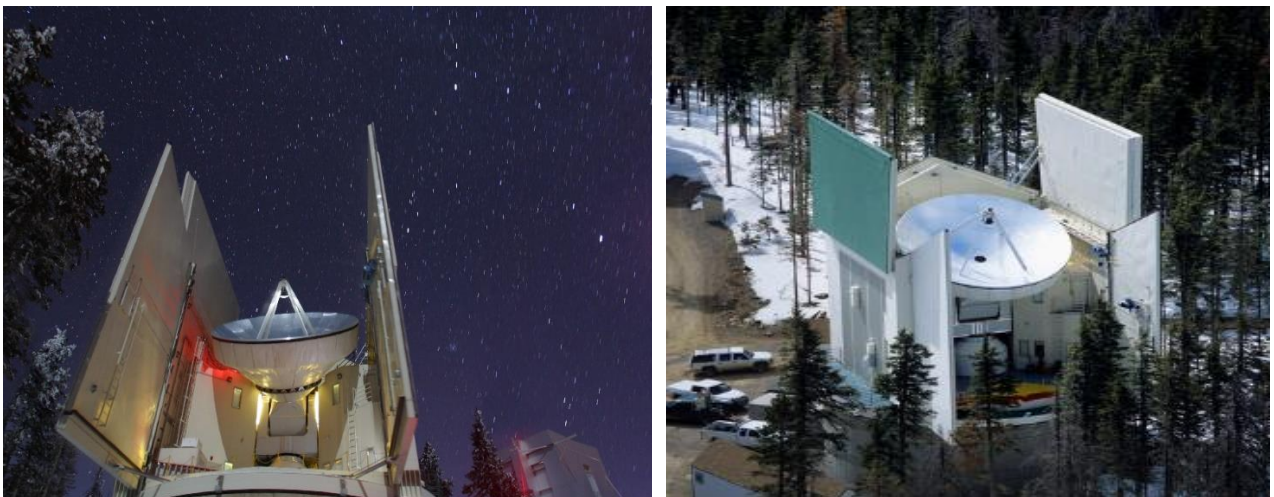


Figura 3.18 y 3.19: Domo LBT abierto y cerrado. [29]

3.2.3 Submillimeter telescope-SMT. (USA)

A unos cuantos metros del LBT se encuentra ubicado el telescopio submilimétrico SMT, en el radio observatorio de Arizona. Consiste en un telescopio de 10 m que es resguardado con un domo rotatorio novedoso, simple y de bajo costo, distinto a las usuales propuestas. Posee una base fija cilíndrica y sobre ella un mecanismo de apertura que utiliza pistones hidráulicos abriendo las puertas de la estructura tal como se muestra en las **Figuras 3.20 y 3.21**.



Figuras 3.20 y 3.21: Apertura completa de domo SMT. [30]

3.2.4 WIYN Telescope (USA)

El observatorio WIYN está ubicado en el observatorio nacional Kitt Peak (KPNO) en Arizona, USA a una altura de 2100 msnm. Posee un diámetro de 3,5 m y está resguardado en un recinto sostenido por vigas de acero, aislado y revestido por el exterior con polietileno (Mylar) reflectante

para minimizar la emisividad (**Figura 3.21**). El domo telescópico posee 7 aberturas de ventilación compuestas por 3 paneles con bisagra (**Figura 3.22**), que son abiertas completamente con vientos menores a 32 km/h. Adicionalmente, el modo de apertura de este domo corresponde a dos grandes puertas que se abren lateralmente a través de rieles. Los controles son a través de conmutación manual por actuadores eléctricos, que son los encargados de abrir las puertas. Para garantizar la estanqueidad del recinto, todas las puertas están selladas por el exterior por medio de tiras de goma tipo limpiaparabrisas, que cubren los huecos alrededor de la periferia. Por otro lado, el calor residual se canaliza a través de conductos ubicados a favor del viento del recinto, ayudando a regular la temperatura y evitando interferencias al momento de las observaciones.



Figura 3.21 y 3.22: Apertura y vista general domo telescopio WIYN. [31]

3.2.5 James Clerk Maxwell Telescope-JCMT. (Hawái)

El JMCT es el telescopio submilimétrico más grande del mundo, con un diámetro de 15 m ubicado en Mauna Kea, Hawái, a una altura de 4.092 msnm. Este importante telescopio está resguardado por un domo denominado carrusel que posee un entramado de acero estructural, es capaz de rotar en conjunto con la antena y brindar seguridad tanto a los elementos del telescopio como a los astrónomos e ingenieros que trabajan en el lugar. La estructura diseñada provee la protección necesaria contra tormentas, inclusive nieve y vientos de hasta 160 km/h. Cuando las condiciones son buenas, la estructura abre sus puertas lateralmente y desliza el techo hacia atrás que reposa sobre una estructura de acero, no obstante, la antena sigue estando protegida debido a la implementación de una membrana hecha en base a PTFE (Teflón) **Figura 3.23**. Esta membrana se despliega frente a la antena en todo momento y es transparente para las ondas milimétricas y submilimétricas. Se encarga de brindar protección contra el viento y refleja hasta un 70% de la radiación solar incidente y del infrarrojo cercano, brindando protección contra el calor que podría dañar la antena y permitiendo inclusive realizar observaciones astronómicas durante el día. Esta membrana es lo suficientemente fuerte para suspenderse sin la necesidad de incorporar algún tipo de estructura o cables.

En cuanto a la ventilación del JCMT (**Figura 3.24**), se puede decir que está provisto por ventanas que son abiertas automáticamente que regulan el aire al interior del recinto. Adicionalmente, la estructura por el exterior es pintada de color blanco para minimizar la absorción solar. [32]



Figura 3.23 y 3.24: Apertura Domo JCMT con membrana protectora. [33]

3.3 Telescopio Leighton en Hawái.

3.3.1 Antena

La antena telescópica de 10,4 m de diámetro que actualmente se encuentra en proceso de desmantelamiento en Mauna Kea, Hawái para su eventual llegada a Chile, se compone de una superficie de aluminio, compuesta por 84 paneles desmontables en forma de panal de abeja. Una de las ventajas del diseño es que el plato se puede montar y desmontar sin una pérdida significativa de exactitud. El telescopio posee una montura de tipo horquilla altazimutal con una alta precisión, que permite explorar el cielo nocturno y por lo demás ajustar la orientación de los paneles para una forma de plato óptima en un ángulo cenital de aproximadamente 45° reduciendo el error de la superficie. [34]

Las dimensiones más relevantes que posee el ensamblaje del telescopio Leighton son presentadas a continuación. En base a estas mediciones, considerando el ángulo de trabajo y el giro de la antena con respecto al eje “z”, es que se debe pensar en dimensiones para un diseño de domo. En las **Figuras 3.25 y 3.26** se muestra la vista isométrica trasera y frontal de la antena respectivamente.

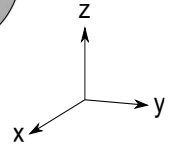
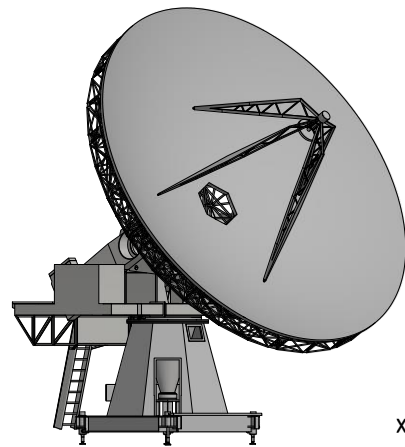
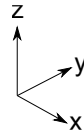
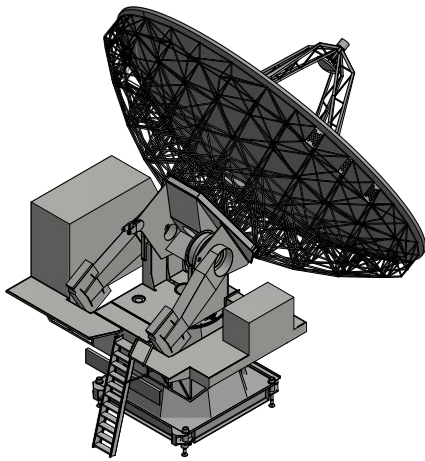


Figura 3.25: Vista isométrica parte trasera. [35] **Figura 3.26:** Vista isométrica parte frontal. [35]

A través de la vista frontal de la antena es que se presenta su diámetro y la distancia que existe entre el borde del plato hasta el piso, con un ángulo de trabajo de 30° (**Figura 3.27**). Lo anterior sirve como guía para que en los diseños propuestos no exista obstrucción de las ondas provenientes desde el exterior y define además una longitud máxima de trabajo en el eje “x” del esquema.

Por otro lado, para definir la longitud máxima de trabajo que posee el telescopio en el eje “y”, se definen las longitudes de la antena en la **Figura 3.28**. Con esta información es posible determinar las longitudes mínimas que debiese tener el domo telescópico para no colisionar con la antena y garantizar un correcto funcionamiento, cabe mencionar que dependiendo de la idea de diseño a implementar es que pudiesen variar un poco las dimensiones a considerar, pero siempre teniendo en cuenta lo mínimo requerido que está dado por estas dimensiones.

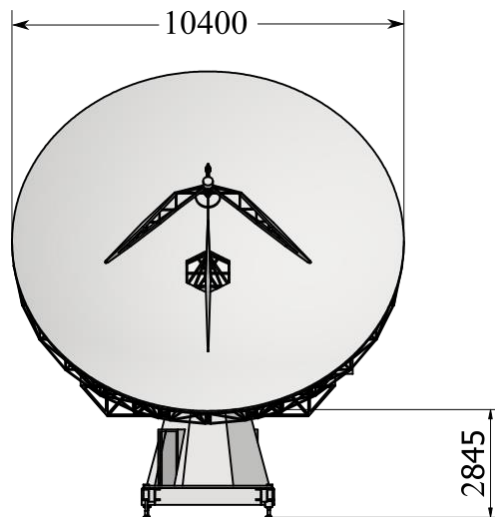


Figura 3.27: Vista frontal de la antena. [35]

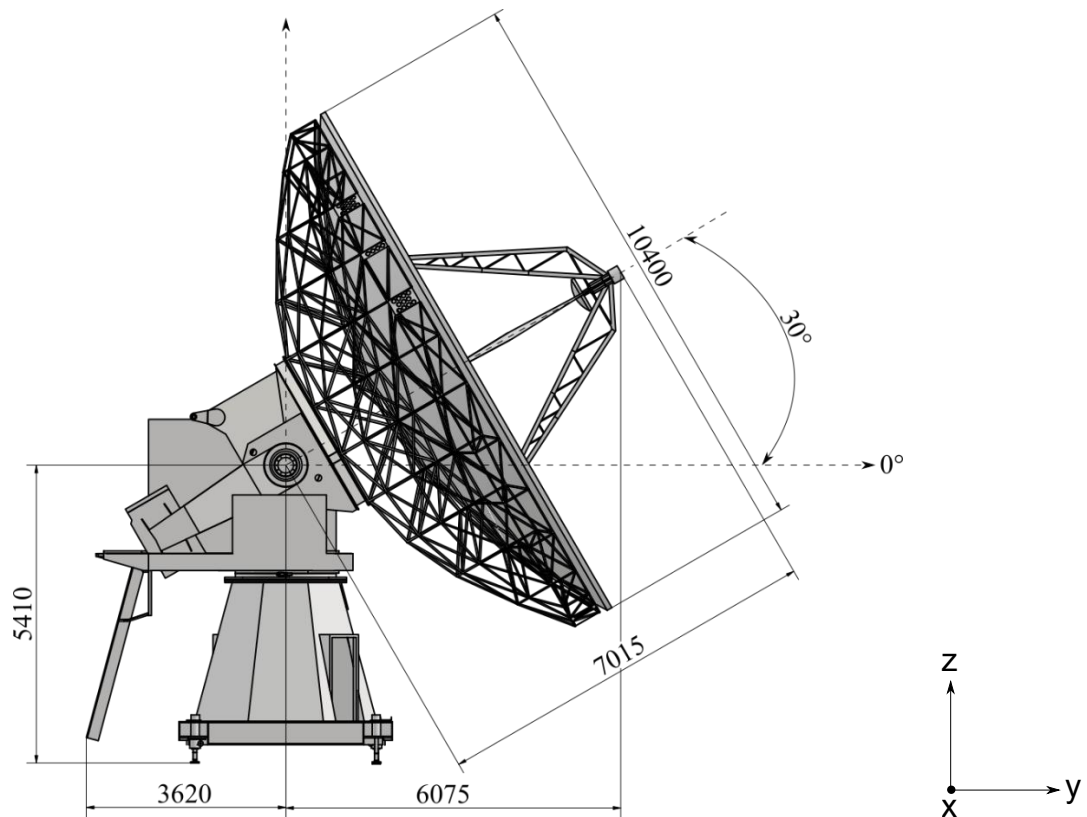


Figura 3.28: Vista lateral con dimensiones relevantes de la antena. [35]

3.3.2 Domo

La cúpula del telescopio Leighton implementada en Hawái, fue diseñada por Robert Leighton en 1981, con el aporte de Robert Hoggan y Ray Hill. El diseño al cuál llegaron representó un gran desafío en esa fecha, debido a la implementación de una ranura de apertura que abarca el 63% del diámetro de la cúpula. El diseño permite que la cúpula gire en acimut junto con el telescopio con un movimiento controlado por computadora, y a través del software implementado, es posible operar el movimiento del telescopio y la cúpula evitando que exista colisión entre ambos.

La estructura tiene la apariencia de una esfera truncada de 17 m de diámetro y 15 m de alto (**Figura 3.29 y 3.30**), y posee paneles de aluminio (6061-T6) con sección triangular por el exterior de 1.27 mm de espesor cumpliendo con la condición de material ligero. Toda la cúpula gira sobre una pista circular a nivel de suelo impulsada por 4 motores, y desplazada con la acción de 20 bogies que se componen de 2 ruedas cada uno. Dicho movimiento es independiente del giro de la antena telescópica, pero como se dijo en el párrafo anterior ambos movimientos rotacionales están controlados de manera que se detienen de forma automática si existe colisión inminente entre ellos. [36]

Para mantener aislada la cúpula del exterior, se implementa una plataforma de goma pesada que rodea la cúpula y hace contacto con el hormigón. De esta manera se evita que el viento, la suciedad y la nieve entren por debajo del domo, manteniendo las condiciones óptimas para la observación, sin embargo, debido al sistema de apertura que posee el domo, durante las tormentas de nieve en el

lugar se debe de retirar lo antes posible, ya que, si se derrite y se vuelve a congelar durante las bajas temperaturas, el domo puede quedar sellado al suelo dificultando su apertura.



Figura 3.29: Etapa de construcción domo para telescopio Leighton. [36]



Figura 3.30: Domo telescopio Leighton año 2022. [37]

Además de perfiles de acero estructural, el entramado del domo implementado en Hawái posee perfiles que corresponden a aleaciones de aluminio de sección circular, con un largo máximo de 1,3 m, que a su vez son unidos con juntas denominadas “Spiders”. Los detalles son presentados en la **Tabla 3.1** y en la **Figura A.1** presentada en los anexos.

Tabla 3.1: Componentes del domo en Hawái. [35]

Item	Componente	Material	Dimensiones
1	Spiders	Aluminio	Sin información
2	Struts	Aluminio	1 $\frac{5}{8}$ "x1 $\frac{1}{2}$ "x3/16"
3	Paneles	Aluminio	0.05"
4	Pernos	Acero	5/16" y 3/8"
5	Perfiles	Aluminio	3/8"x1 $\frac{1}{2}$ "x50"

CAPÍTULO 4: Clima en el valle de Chajnantor

El clima en el valle de Chajnantor es la principal condición de diseño que se tiene en cuenta en la realización de este proyecto, debido a que, las estructuras a propuestas se verán afectadas por fuerzas, provocadas precisamente por precipitaciones en forma de nieve y sobre todo por las presiones ejercidas por las masas de aire en movimiento. Lo anterior puede ser justificado con los registros históricos de las estaciones meteorológicas. En esta sección se utilizan datos obtenidos desde el sitio oficial del telescopio APEX, ubicado en la zona geográfica aledaña a la instalación del telescopio Leighton, debido a que los portales de obtención de datos tales como Explorador solar o Agromet, no cuentan con estaciones meteorológicas a la altura sobre el nivel del mar que se requiere, siendo la más cercana la estación de Toconao que si bien se encuentra a unos 33 km, en línea recta, de la instalación del telescopio Leighton solamente está a unos aproximados 2500 msnm, que pudiesen variar en cuanto a las velocidades del viento en cuestión.

Las condiciones climáticas de la región de Antofagasta se caracterizan por una marcada aridez, comportándose de distinta manera dependiendo de la cercanía al océano o hacia la cordillera de los andes, definiendo cuatro subtipos climáticos desérticos. Por ejemplo, en la zona costera se presenta un clima desértico nuboso, que se traduce en presencia de abundante humedad, neblinas matinales y ausencia de precipitaciones. En la franja intermedia de la región se desarrolla un clima desértico propiamente tal, con escasas precipitaciones, gran sequedad atmosférica y una marcada amplitud térmica entre el día y la noche. A medida que se gana altura, entre 2000 o 3500 msnm, se presentan algunas precipitaciones en los meses de verano, con un promedio de entre 20 a 60 mm anuales. Esta condición se sigue dando por sobre los 3500 msnm, que corresponde a las condiciones a las que se verá expuesto el telescopio Leighton, con precipitaciones que no superan los 100 mm anuales y cuyo clima más representativo se traduce en bajas temperaturas [38].

Para tener una idea cuantitativa y más representativa de las condiciones climáticas en el valle de Chajnantor, se consideran los datos meteorológicos de los últimos 5 años, resumidos en la **Tabla 4.1**, obtenidos desde la estación meteorológica del telescopio APEX [39]. Dichos datos fueron graficados y se presentan en los **Anexos A.2**, donde se registra una máxima de 24,6 [m/s] en los últimos 5 años. Además, existe un registro histórico máximo de 29,4 [m/s] en el año 2011.

Tabla 4.1: Datos meteorológicos influyentes de los últimos 5 años.

Datos meteorológicos	2018	2019	2020	2021	2022	\bar{X} últimos 5 años
Promedio Temperatura [°C]	-2,63	-2,18	-1,98	-3,24	-3,63	-2,51
Mínima Temperatura [°C]	-15,3	-14,0	-15,5	-15,0	-15,3	-15,02
Promedio Velocidad del viento [m/s]	5,66	6,06	5,84	6,12	6,74	5,92
Máxima Velocidad de viento [m/s]	14,9	15,7	15,5	15,0	24,6	17,4

Por su parte, en cuanto a los datos obtenidos de las precipitaciones, se puede decir que usualmente se concentran en los meses de enero o febrero. Los registros fueron extraídos desde la dirección general de aguas [40], región de Antofagasta estación Talabre, debido a la inexistencia de

mediciones en la estación de Chajnantor, donde en los últimos años con registro, no se superan los 180 mm anuales. En resumen, las precipitaciones no influyen de manera crítica en el análisis de las simulaciones, primero por la cantidad de agua caída en la zona y segundo por la geometría dispuesta en el diseño a analizar especificado más abajo, que contempla una superficie curva de pétalos que hace que no se acumule sobre la estructura sino más bien que escurra, pudiendo despreciarse fuerzas externas sobre la estructura. Los datos obtenidos se resumen en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2: Datos de precipitaciones.

Datos de precipitaciones	2018	2019	2020	2021
Promedio agua caída [mm]	0,15	0,48	0,01	Sin registro
Total, agua caída [mm]	53,00	77,00	4,20	Sin registro
Mayor precipitación por día [mm]	16,00	62,00	4,20	Sin registro

CAPÍTULO 5: Diseño conceptual

5.1 Requerimientos de diseño

Antes de comenzar con la implementación de alguna idea en concreto, se debe de tener en cuenta todos los requerimientos de diseño, es decir, las condiciones bajo las cuales el proyecto debe tener sustentación y son indispensables. Se debe comenzar con una lluvia de ideas, donde las opciones candidatas serán las que puedan satisfacer todos los requerimientos de diseño impuestos en este proyecto. En el proyecto LCT, lo que se busca es generar una estructura que pueda resguardar la antena telescópica traída desde Hawái, donde se debe cumplir con las siguientes especificaciones:

1. El domo NO debe molestar en la observación, por ende, se debe contemplar el giro de la antena con respecto a los ejes “x” y “z” presentados en la **Figura 3.25**
2. El recinto debe ser capaz de resguardar toda la antena.
3. La estructura debe soportar velocidades del viento de hasta 30 *m/s*.
4. Debe ser posible realizar mantención a los principales componentes del domo y antena.
5. La antena debe ser capaz de captar información desde cualquier parte del cielo.
6. Debe ser una estructura ligera.
7. La estructura debe ser capaz de admitir una cierta cantidad de nieve, sin presentar grandes deformaciones y obstruir la apertura del recinto. A su vez, al momento de la apertura de la estructura no debe caer nieve sobre la antena telescópica.
8. Rápida velocidad de observación.
9. El modelo debe tener la mayor cantidad de partes fijas.
10. Debe ser una estructura de fácil montaje y compatible con las limitaciones del trabajo en altura (5000 msnm).
11. El diseño debe admitir rejillas de ventilación para el correcto flujo de aire al interior del recinto.

5.2 Primera propuesta de diseño

Para una primera propuesta se considera una base fija de hormigón, sobre la cual se propone la implementación de una estructura hexagonal, constituida por 4 puertas verticales y 2 paredes laterales fijas que servirán como sustentación para el mecanismo de apertura del techo. El mecanismo de apertura consiste en la implementación de pistones en cada una de las puertas verticales existentes, que se abrirán con una junta de revolución con respecto a las paredes laterales fijas en unos aproximados 75° desde su posición cerrada. Por su parte, el techo debe ser abierto cada vez que se pretenda realizar una observación y al igual que las puertas verticales, también constaría con un sistema de pistones que permitan la apertura en unos aproximados 90° con respecto a la horizontal.

5.2.1 Sistema de apertura

El primer modelo propuesto, se compone por las juntas representadas en la **Figura 5.1**, y que se detallan a continuación, contemplando una base de hormigón fija a tierra. Sobre la base de

hormigón, una sobrebase fija y que está pensada para la sustentación de cada una de las puertas del modelo. Adicionalmente, se contemplan dos paredes laterales fijas a la sobrebase establecida. Las puertas y techo poseen juntas de revolución con respecto a las paredes laterales fijas descritas con anterioridad y que son accionadas mediante juegos de pistones que han de ser estimados luego de los resultados obtenidos. Es importante mencionar, además, que ambos paneles que conforman el techo estarán en contacto con las puertas verticales cuando el domo se encuentre completamente cerrado. En caso de apertura, el techo descansará solamente sobre el juego de pistones, dando opciones de mejoras por el exterior de ambas paredes laterales con el fin de generar un apoyo adicional al momento de su apertura completa.

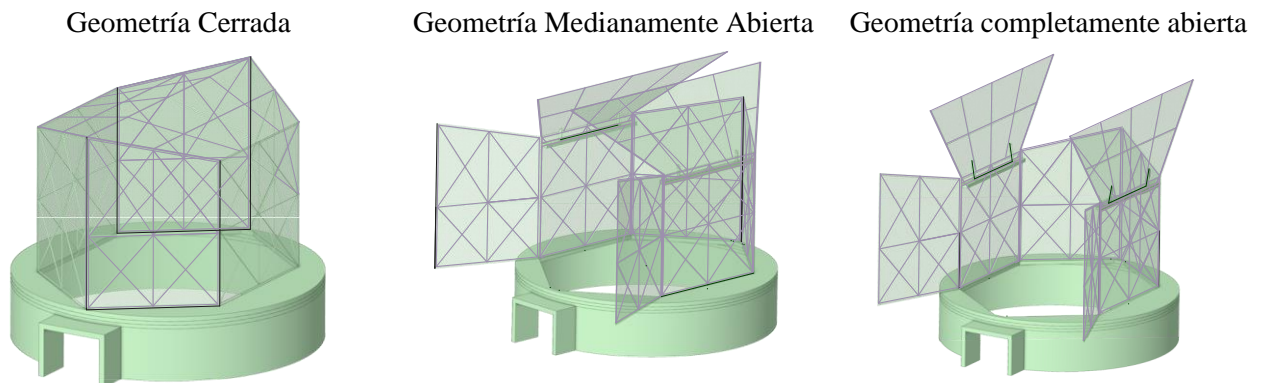
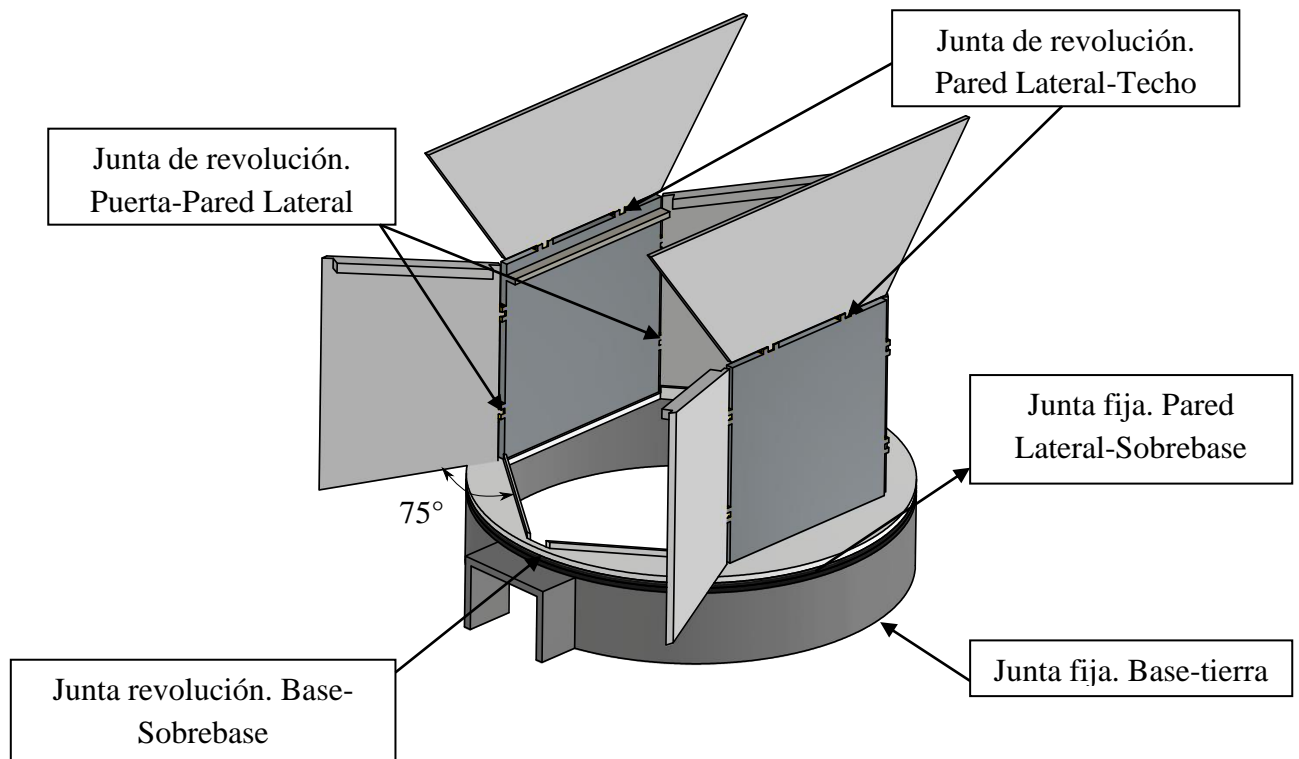


Figura 5.1: Juntas primera propuesta de diseño

5.3 Segunda propuesta de diseño

Para una segunda propuesta se define nuevamente una base fija de hormigón, compuesta de una parte cilíndrica y sobre ella una sección rectangular que permita el soporte de rieles para una geometría tipo paralelepípedo. El sistema de apertura no contempla una rotación, sino más bien se implementa el movimiento traslacional para las puertas del domo. Adicional a la estructura principal, el diseño contempla una serie de perfiles estructurales debidamente organizados que permitan el sustento de los rieles sobre los cuales deslizen las puertas, los perfiles verticales tendrán una altura de 2,9 m, que coinciden con los rieles dispuestos sobre la base fija de hormigón y son parámetros que se irán probando al momento de realizar las simulaciones, de esta manera se podría estimar un óptimo de perfiles para el sustento de las puertas.

Para no molestar en la observación, se proponen rieles en las direcciones “x” e “y” presentadas en la **Figura 5.2**, de esta forma las puertas se deberían mover en una dirección u otra, dependiendo de donde apunte la antena telescópica.

5.3.1 Sistema de apertura

El segundo modelo propuesto se conforma por las juntas definidas en la **Figura 5.2**, y que son resumidas a continuación: Se contempla de manera similar al primer diseño una base de hormigón cilíndrica fija a tierra. Sobre ella, nuevamente se propone una sobre base esta vez rectangular, fija, que permita el asentamiento de rieles que generen la apertura del domo. El modelo contempla dos grandes puertas que poseen una junta traslacional con respecto a los rieles implementados en la sobre base. Las puertas se deslizarán hacia un lado o hacia el otro dependiendo de la posición que adopte la antena. Finalmente, el sistema de rieles descansa sobre perfiles estructurales verticales que poseen una junta fija a tierra.

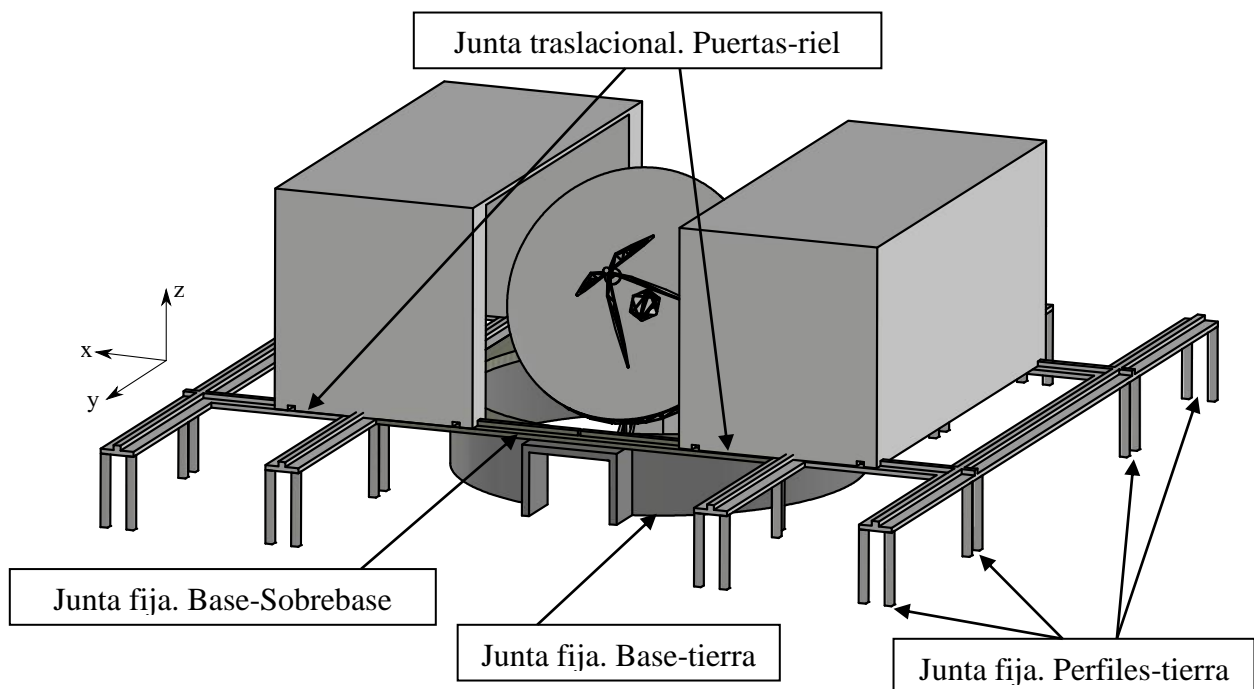


Figura 5.2: Juntas segunda propuesta de diseño

5.4 Tercera propuesta de diseño

Para una tercera propuesta, se define una base fija de hormigón que esta vez dará sustento a una geometría semi-esférica conformada por 4 pétalos que giran sobre rieles circulares. Cada uno de los pétalos converge en la zona superior del diseño a través de un pasador con el que mantienen contacto en todo momento. Para evitar el contacto al momento de la apertura, se proponen 2 pétalos de menor dimensión que queden recubiertos por los otros 2 más grandes al momento de girar, proponiendo un ensamblaje alternado de cada uno de ellos, es decir, el pétalo pequeño va adyacente al pétalo grande, y no a un mismo pétalo pequeño. Adicionalmente, se contempla un huelgo entre de los pétalos de distinto tamaño para la implementación de entramados en la estructura.

5.4.1 Sistema de apertura

Esta propuesta se piensa con un movimiento independiente a la rotación de la antena y se conforma por las juntas definidas en la **Figura 5.3**, y que se resumen en una junta fija de la base cilíndrica a tierra, sobre ella se dispone nuevamente una junta fija entre los rieles y la parte superior de la base. Además, se contempla una junta traslacional de pétalos y rieles y una junta de revolución entre cada uno de los pétalos y el pasador.

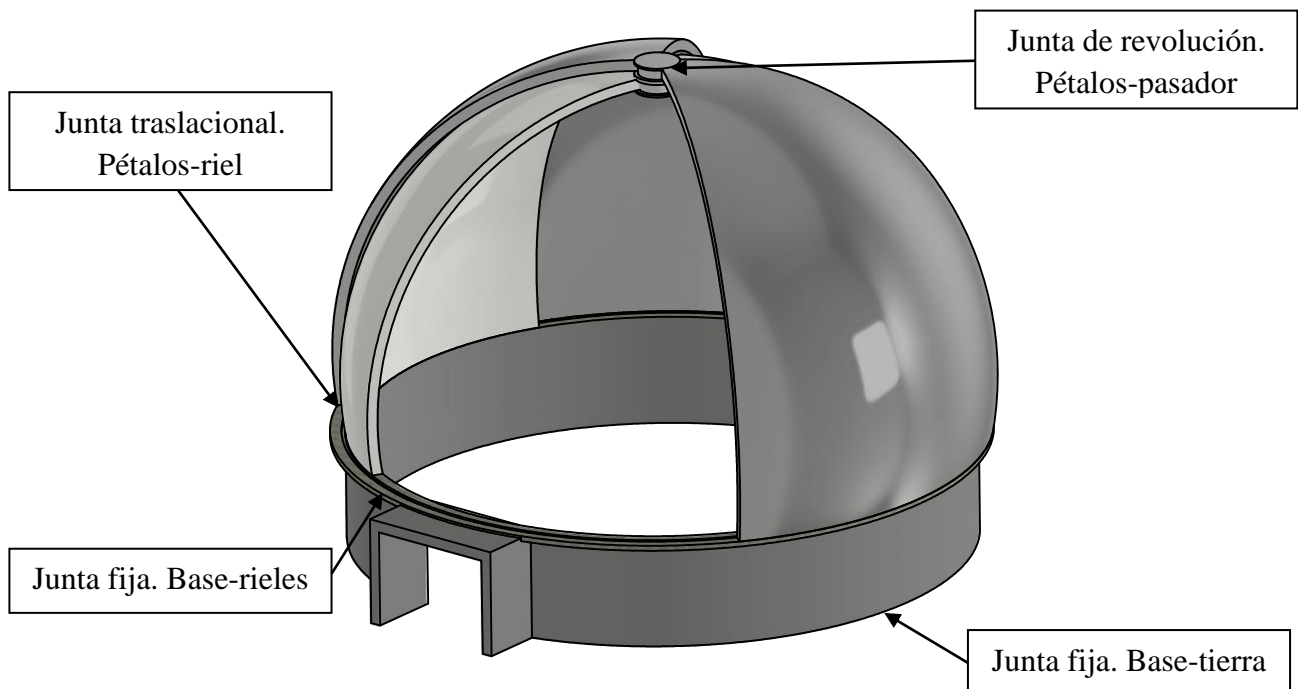


Figura 5.3: Juntas tercera propuesta de diseño

5.5 Cuarta propuesta de diseño

Para una cuarta propuesta de diseño, se piensa en una base cilíndrica fija, idealmente de hormigón, con la implementación de 4 pasadores por el exterior que permitan el ensamblaje de 6 superficies curvas que resguarden la antena. Los pétalos dispuestos deberán tener diferentes dimensiones, de

manera tal, que al momento de abrirse no se genere una eventual interferencia entre ellos. De esta manera, se definen los pétalos superiores con mayor radio de curvatura.

5.5.1 Sistema de apertura

La estructura se piensa con un sistema de apertura dependiente entre pétalos e independiente del giro de la antena, donde se propone la implementación de actuadores hidráulicos por el interior entre pétalos, contemplando un total de 12 originalmente, 2 por cada pétalo establecido. Los tipos de junta son definidos en la **Figura 5.4** y se resumen en: una junta fija de la base cilíndrica a Tierra, juntas de revolución entre cada uno de los pétalos y pasadores, juntas de revolución entre los actuadores hidráulicos y los pétalos, y a su vez, juntas de revolución pistones hidráulicos-Tierra en 4 actuadores correspondientes a los pétalos inferiores.

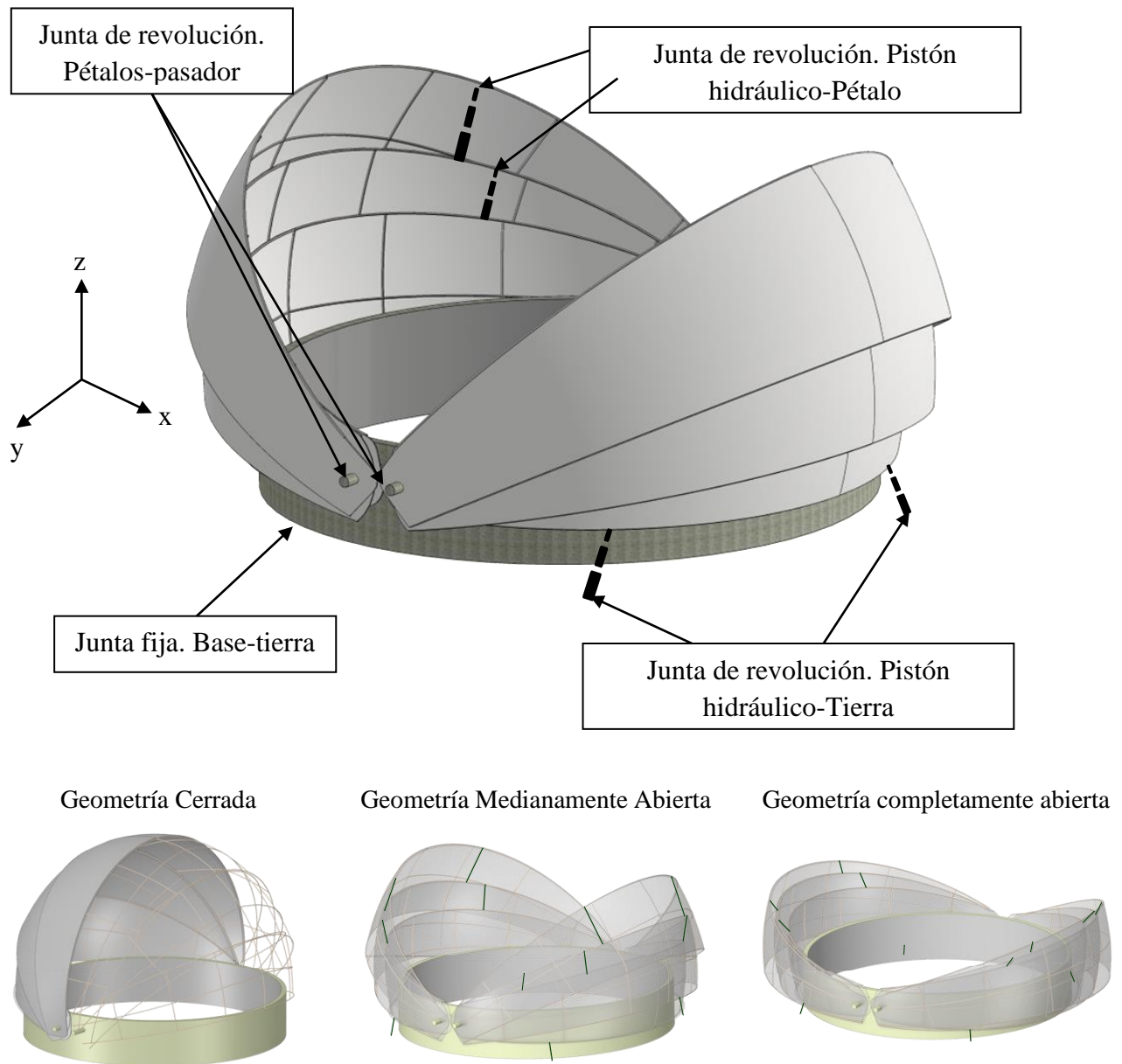


Figura 5.4: Juntas cuarta propuesta de diseño.

CAPÍTULO 6: Evaluación y selección

En base a que tan bien cumplen los requerimientos de diseño, es que se realiza una primera tabla comparativa con una escala que va desde el 1 al 5, donde 1 es muy malo y 5 es muy bueno. Dicha tabla, no está basada en resultados sino netamente en la geometría impuesta de los diseños y que tan bien satisfacen los requerimientos de diseño.

Tabla 6.1: Comparación en base a requerimientos de diseño.

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
No debe molestar en la observación	3	4	4	5
Resguarda toda la antena	5	5	5	5
Es fácil realizar una mantención a sus componentes	4	4	3	3
Antena es capaz de captar información desde cualquier parte del cielo, moviendo lo menos posible el domo.	2	3	3	5
Admite la nieve	5	3	5	5
Velocidad de observación	3	3	4	5
Facilidad de montaje a 5000 msnm	3	2	4	3
Ventajas aerodinámicas	3	2	5	5
Factibilidad técnica preliminar	5	4	2	5
TOTAL	33	30	35	41

En base a lo anterior, la cuarta propuesta aparece como principal candidata bajo los requerimientos de diseño, principalmente por no obstruir en la observación mientras el domo se encuentre completamente abierto, en otras palabras, no se necesitaría mover los pétalos del domo de esta posición, ya que, es suficiente para que la antena pueda explorar todo el cielo nocturno sin interferencia alguna, cosa que no ocurre en las demás propuestas. En el primer caso de diseño conceptual **Figura 5.1**, se necesitaría de un gran sistema de accionamiento para abarcar la observación de todo el cielo nocturno, debido a que, para seguir la trayectoria de la antena se requeriría vencer la inercia de toda la estructura, lo que implica mover el conjunto de puertas, paredes laterales y techo con el tipo de entramado propuesto, dificultando su viabilidad.

Por otro lado, la segunda propuesta de diseño conceptual **Figura 5.2** cubre un poco mejor la necesidad de observación, a pesar de que en una disposición del domo completamente abierto la antena no tendría total libertad para explorar todo el cielo nocturno. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, la inercia a vencer para generar el movimiento de las puertas y lograr una completa observación no sería tan grande, siendo el principal inconveniente la implementación de la gran cantidad de perfiles estructurales y rieles sobre los cuales guiar el movimiento. No hay que olvidar que los trabajos se realizarían a 5000 msnm, haciendo tediosa y compleja la tarea de generar eventuales excavaciones y un plan de izaje vertical para cada uno de los perfiles estructurales que deben soportar el peso de la estructura. Una posible solución para la reducción de perfiles y evitar la

obstrucción de la antena cuando la estructura se encuentre abierta en su totalidad, sería la implementación de mesas de tijera para cada una de las puertas, logrando bajar la estructura a un nivel requerido, tal como se muestra en el **Anexo A.3**, sin embargo, económicamente no sería conveniente y los trabajos en altura implicarían, aún, una gran complejidad.

Por su parte, la tercera propuesta de diseño conceptual **Figura 5.3** posee puntos a favor en cuanto al comportamiento del fuerte viento y la admisión de nieve que se pudiese presentar, al poseer una geometría semiesférica el flujo de aire por el exterior de la estructura es guiado de una manera más suave que en los demás casos, reduciendo la formación de vórtices o remolinos en el flujo de aire. Además, permitiría que la nieve no se acumulase en la estructura, sin embargo, dadas las dimensiones impuestas por la antena, se debiese contar con un sistema adicional que permita la sujeción de los pétalos y de esta manera evitar que se deforme o caiga por el efecto gravitatorio, entorpeciendo el rango de observación e inclusive pudiendo molestar al giro de la antena.

De esta forma, la cuarta propuesta de diseño conceptual asoma como una posible solución viable, que debe ser simulada bajo las adversas condiciones impuestas por el lugar geográfico y desarrollada más en profundidad con el fin de cumplir los requerimientos mecánicos.

CAPÍTULO 7: Simulaciones y resultados.

Para lograr la obtención de resultados, es necesario realizar simulaciones que contemplen ciertas condiciones de bordes y configuraciones previas, es decir, el tipo de mallado o la discretización realizada. Tipos de juntas entre los elementos del diseño, definiendo las partes que permanecen fijas o tendrán movimiento entre ellas, asignación de materiales a las componentes del diseño en cuestión y aplicación de fuerzas externas actuando sobre las geometrías dispuestas. En esta sección se detallarán todas estas indicaciones en función del modelo seleccionado en el capítulo 6.

Poder estimar realmente el espesor mínimo de las planchas que recubren la estructura tiene estrecha relación con el material a utilizar debido a que las propiedades mecánicas que presentan. De trabajos anteriores, complementado con el estado del arte del presente informe, se identifica que el material más utilizado para la fabricación de este tipo de estructuras corresponde a planchas laminadas de aluminio [41], que descansan sobre perfiles estructurales. Su uso se debe principalmente al menor peso en comparación con otros materiales como el acero y el menor costo en comparación con las planchas de fibra de vidrio que son también utilizadas para la fabricación de domos telescópicos.

Obtener resultados que representen los modelos propuestos involucra proponer el sistema de apertura de ellos, es decir, interpretar cuáles serán los esfuerzos o deformaciones máximas cuando el diseño impuesto se encuentre completamente cerrado, en procedimiento de apertura y completamente abierto, debido a que, dependiendo de la posición en la que se encuentren los elementos de la estructura, es que se tendrán diferentes esfuerzos y deformaciones máximas. En resumen, la disposición del modelo que presente las mayores concentraciones de esfuerzos o deformaciones será la que gobierne los parámetros de fabricación de ese modelo en específico.

La obtención de resultados finales no es algo que se pueda dar a través de una primera simulación, sino que, es un juego de prueba y error donde se debe ir iterando hasta lograr los resultados óptimos que permitan que la estructura no falle, pero a su vez sin realizar un sobredimensionamiento de los componentes de los diseños. Es por lo que, en primer lugar, se trabaja con geometrías de tipo cáscara en el software de simulación Ansys, lo anterior es para tener una primera aproximación del espesor mínimo admitido en las geometrías del diseño propuesto, de esta manera se evita modificar en el programa de diseño 3D cada vez que se requiera probar un espesor diferente. Como se señaló en el Capítulo 2.

7.1 Dinámica de fluido computacional.

Antes de un análisis estructural como tal, se trabaja con la generación de un modelo que permita simular el actuar del viento y obtener resultados de las presiones que serían ejercidas sobre la estructura, para lo anterior se utiliza la herramienta computacional CFD de Ansys la cual se trabaja en función de los datos meteorológicos obtenidos, donde se evidencian picks de velocidades cercanas a los 30 m/s en el lugar geográfico de instalación.

Para obtener valores de las presiones del viento en la cara de los pétalos, se utiliza el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ mencionado en el capítulo 2, sección 2.3, donde para la implementación se hace necesario asumir un volumen de control sobre el modelo impuesto, que limite el movimiento del

fluido y que permita generar condiciones de entrada y salida. Dicho volumen es considerado lo suficientemente grande para envolver toda la estructura y a su vez que la última capa de aire ya no tenga influencia alguna en la generación de vórtices cercano a la estructura. De esta manera, para una correcta iteración de las ecuaciones promediadas de Navier Stokes se define una temperatura promedio de $-2,51^{\circ}\text{C}$ ($270,5\text{ K}$), correspondiente al promedio de los últimos 5 años en el lugar de instalación y una presión promedio de 555 hpa a la altura de trabajo [42]. De esta forma, inicialmente la densidad del aire sería de unos cercanos $0,715\text{ [kg/m}^3\text{]}$.

Es bajo estas condiciones que se establece una velocidad de entrada de 30 [m/s] en una de las caras del volumen de control definido, aplicando un método de resolución simple de segundo orden a las ecuaciones del modelo $k - \varepsilon$, lo cual define un aumento en la precisión de la resolución del problema.

Para representar el caso más desfavorable en la estructura, es que se realizan múltiples simulaciones del comportamiento del aire, simulando el efecto cuando el modelo adopte una configuración abierta, a medio abrir o completamente cerrada, adicionalmente, se trabaja con una incidencia del viento con una dirección referenciada “x”, y también “y”, en la **Figura 5.4**. Los resultados preliminares se muestran en la sección de **Anexos A.4**

7.2 Fuerzas aplicadas

Las fuerzas aplicadas sobre la estructura corresponden a la presión ejercida por el viento y además la fuerza de gravedad. Dichas presiones máximas alcanzadas fluctúan entre los 845 a 1181 [Pa] dependiendo del tipo de configuración adoptado y pueden apreciarse en detalle en Anexos, sección **A.4**

7.3 Resultados

Los resultados se irán presentando de manera iterativa, donde se comenzará con un análisis básico de solamente el diseño considerado como planchas, para dar avance a las respectivas mejoras dependiendo de los parámetros establecidos. A su vez, se presentan los resultados dependiendo de la posición adoptada por el modelo propuesto, obteniendo así resultados de cuando se encuentre cerrado, abierto o a medio abrir. Los materiales de los pétalos, pasadores y base permanecerán fijos en primera instancia y corresponderán a aluminio, acero estructural y concreto respectivamente.

7.3.1 Primera iteración, fuerza gravitacional.

La primera iteración solo contempla el actuar de la fuerza gravitacional, con las juntas definidas en la **Figura 5.4** y sin la presencia del viento, para posteriormente analizar el efecto que tiene sobre la estructura. Además, no se considera la implementación de ningún entramado y con una aleación de aluminio 6061 T-6 para las planchas a implementar. En la **Tabla 7.1** se muestran los resultados relevantes, presentados en detalle en la sección de **Anexos A.5**

Tabla 7.1: Resultados primera iteración.

	Completamente Cerrada			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	224,6	338,3	864,1	2761
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	93,36	138,01	210,91	253,53
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-85209	-57898	-28879	-14114
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-27152	-18338	-8088	-2670
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	3241	3783	5445	5863
Factor de seguridad mínimo	2,78	1,88	1,23	1,02
	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	82,73	171,2	588,8	1625
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	67,58	84,16	136,27	224,30
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-182800	-124210	-64639	-34562
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-94248	-63047	-34785	-20592
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-39000	-26008	-15357	-9497
Factor de seguridad mínimo	3,84	3,08	1,90	1,15
	Completamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	239,3	366,4	801,8	1859
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	217,49	291,19	490,45	788,6
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-180700	-123440	-64859	-35202
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-90532	-64723	-39721	-24811
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-44314	-30091	-15953	-8468
Factor de seguridad mínimo	1,19	0,89	0,53	0,33

7.3.2 Segunda Iteración, dirección de viento “x”

En base a la primera iteración realizada, los factores de seguridad más bajos y deformaciones más elevadas se generan en una disposición completamente abierta, para comprobar si esto se mantiene en función de la velocidad del viento es que se realiza una segunda iteración que contemplará la implementación de la presión generada por el viento en una dirección “x” definida con anterioridad, y efecto del propio peso. Bajo estas condiciones se obtienen los resultados relevantes presentados en la **Tabla 7.2** y mostrados en detalle en la tabla de **Anexos A.5.2**.

Tabla 7.2: Resultados relevantes segunda iteración.

	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	137,4	335,7	1893,8	11977
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	628,1	1017,4	2009	4447,1
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-189960	-133000	-75742	-46456
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-109200	-77261	-43236	-33606
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-45904	-31906	-19127	-19637
Factor de seguridad mínimo	0,41	0,25	0,13	0,058

7.3.3 Tercera iteración, dirección de viento “y”

Esta vez se contempla como parámetro de simulación la incidencia del viento en una dirección “y” y además la fuerza de gravedad, los resultados se presentan en la **Tabla 7.3** y mostrados en detalle en la tabla de **Anexos A.5.3**

Tabla 7.3: Resultados relevantes tercera iteración.

Espesor planchas [mm]	Completamente Abierta			
	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	231,82	440	2056	12661
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	229,20	320,63	609,15	2160
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-190660	-134020	-76621	-49080
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-93867	-68514	-43550	-29517
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-45761	-31063	-16189	-7127
Factor de seguridad mínimo	1,13	0,81	0,43	0,12

7.3.4 Cuarta iteración, entramados.

En esta ocasión se propone la implementación de una configuración de entramados de sección circular de 2”, que se muestran en la **Figura A.6.1** presentada en los anexos del presente informe. Se consideran las presiones del viento provenientes de una dirección “x”, la fuerza gravitacional, y la utilización de aluminio 6061 T-6 para planchas, los perfiles son considerados como acero A36. Debido a la superficie curva que define los pétalos, es que se opta en primera instancia por entramados de sección circular, ya que, su forma hace que se puedan adaptar de manera más eficiente a la geometría impuesta.

Tabla 7.4: Resultados relevantes cuarta iteración.

Espesor planchas [mm]	Medianamente Abierta			
	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,14	7,08	14,54	63,91
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	82,40	53,66	95,57	170,34
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-12677	-8250	-4437	-3960
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1612	-1236	-1122	-1070
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1384	1310	1273	1368
Factor de seguridad mínimo	2,62	2,31	1,15	0,44

7.3.5 Quinta iteración, entramados.

Bajo el mismo entramado descrito en la cuarta iteración, se analiza esta vez lo que sucede bajo la condición más desfavorable presentada con una incidencia del viento en una dirección “y”. Se presentan los resultados relevantes en la **Tabla 7.5** y mostrados en detalle en los **Anexos A.5.5**

Tabla 7.5: Resultados relevantes quinta iteración.

Espesor planchas [mm]	Completamente Abierta			
	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,19	3,80	7,33	24,33
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	161,99	138,97	111,61	106,32
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-2714	-1505	-1223	-916
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	905	639	387	350
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-394	-820	-203	458
Factor de seguridad mínimo	2,35	2,23	1,80	1,51

7.3.6 Sexta iteración. Entramado, cambio de sección.

En esta oportunidad, se trabaja con una sección tubular en vez de un perfil cerrado circular, con el fin de verificar la influencia que posee sobre los estados de deformación y esfuerzos en la estructura. Esta iteración solo contempla el caso más desfavorable hasta el momento, correspondiente a una geometría medianamente abierta y con una incidencia del viento desde una dirección “x”, mostrada en la **Figura 5.4**. La sección tubular de 2”, corresponde a acero ASTM A36, mientras que las planchas continúan con una aleación de aluminio 6061-T6. Se presentan los resultados relevantes en la **Tabla 7.6** y mostrados en detalle en los **Anexos A.5.6**.

Tabla 7.6: Resultados relevantes sexta iteración.

Espesor planchas [mm]	Medianamente Abierta			
	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	1,77	5,81	12,77	41,67
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	68,45	41,42	71,44	186,87
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-3288	-1457	-1362	-1404
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-890	-1011	-1069	-1184
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1238	1048	1065	1095
Factor de seguridad mínimo	3,02	2,81	2,58	2,34

7.3.7 Séptima iteración. Propuesta de entramados diferente.

Para lograr reducir las deformaciones existentes, se propone otra configuración de entramados mostrados en la sección de **Anexos A.6.2**, donde en esta ocasión se implementan perfiles cruzados, longitudinales y transversales, con el mismo material, sin embargo, de sección tubular de 2” y espesor 3 mm. Este caso contempla solamente la condición más crítica en base a las iteraciones anteriores, contemplando una velocidad incidente desde una dirección “x” definida. Los resultados relevantes se presentan en la **Tabla 7.7** y se muestran en detalle en los **Anexos A.5.7**

Tabla 7.7: Resultados relevantes séptima iteración.

Espesor planchas [mm]	Medianamente Abierta			
	2	1	0,8	0,6
Deformación máxima [mm]	7,62	8,44	30,2	54,30
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	407,08	186,11	256,06	376,95
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-1683	-1492	-1545	-1672
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1374	-1354	-1350	-1341
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1209	1248	1264	1269
Factor de seguridad mínimo	2,35	1,77	1,74	1,21

CAPÍTULO 8: Comparación y análisis de resultados

8.1 Zonas con mayores esfuerzos y deformaciones.

Tras la incorporación de las fuerzas ejercidas por el viento y eventual obtención de resultados, hay zonas de principal interés en la estructura, visualizando mayores deformaciones en el centro de cada pétalo, llevándose la parte más afectada el pétalo superior o externo tal como se aprecia en la **Figura 8.1**, independiente de la disposición que adopte la estructura y el espesor de plancha implementado. Por otro lado, a pesar de las grandes deformaciones visualizadas, no resulta ser la parte más comprometida de la estructura, sino más bien, los factores de seguridad más bajos en conjunto con los esfuerzos equivalentes máximos se encuentran en la ubicación de los actuadores hidráulicos que soportan el peso de cada uno de los pétalos. **Figura 8.2**.

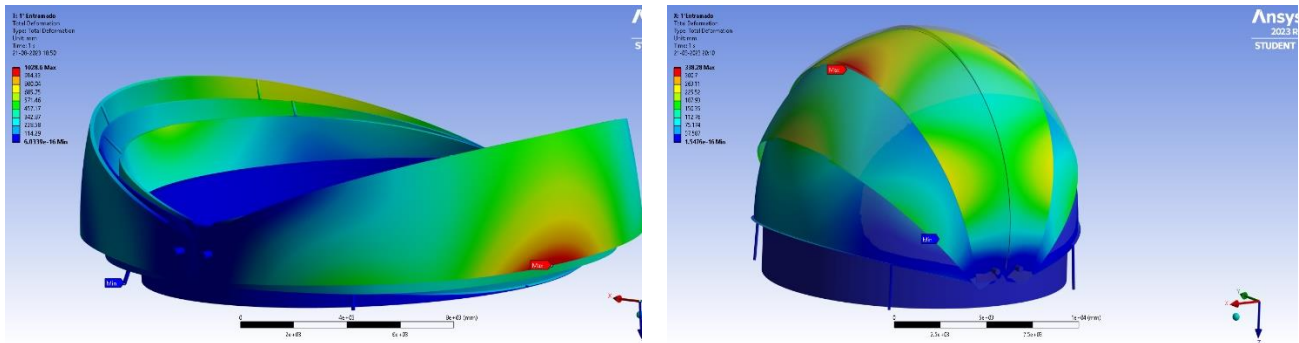


Figura 8.1: Zonas con mayor deformación. Geometría abierta y cerrada respectivamente.

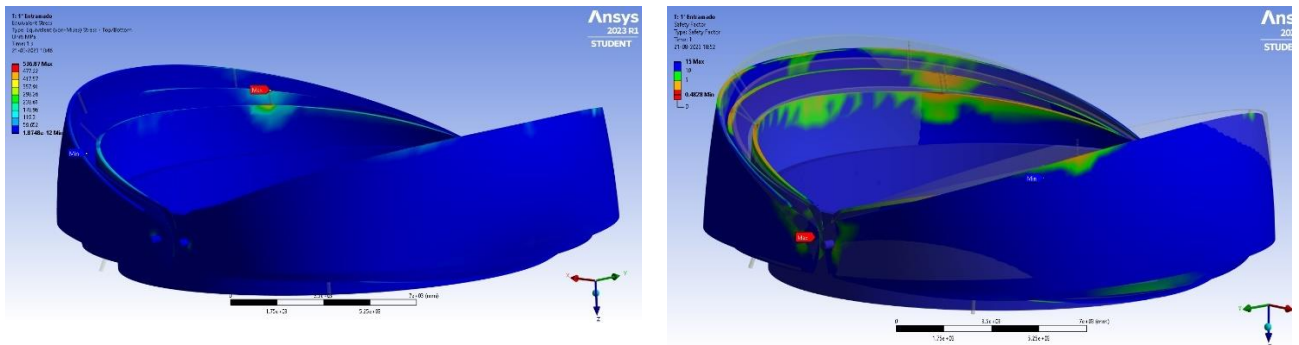


Figura 8.2: Zonas con mayores esfuerzos y factores de seguridad más bajos respectivamente. Geometría completamente abierta.

La situación más crítica se da en una disposición medianamente abierta, donde las deformaciones se incrementan, los actuadores se ven más exigidos a compresión y, a su vez, los factores de seguridad disminuyen.

Para cumplir con los requerimientos mecánicos se proponen los distintos tipos de entramados, como se mencionó en el capítulo anterior y se presenta en la sección de **Anexos A.6**, logrando reducir las deformaciones iniciales originadas por el actuar del viento y fuerza de gravedad en un 97% con una

primera propuesta de entramados y en un cercano 99% para la implementación del segundo entramado. Con esto, el espesor mínimo requerido para garantizar un factor de seguridad alto ($N = 1,77$) puede resumirse en 1 [mm]. En la **Figura 8.3** se presenta la condición con un espesor aún más bajo ($e = 0,6$ mm), obteniendo deformaciones del orden de 5 cm aproximadamente, aunque aún con un factor de seguridad sobre 1. Al igual que en los casos anteriores, las deformaciones máximas se presentan en la zona baja de los pétalos, alcanzando su máximo valor en el centro y con factores de seguridad más bajos cercanos a los cilindros hidráulicos dispuestos en el diseño.

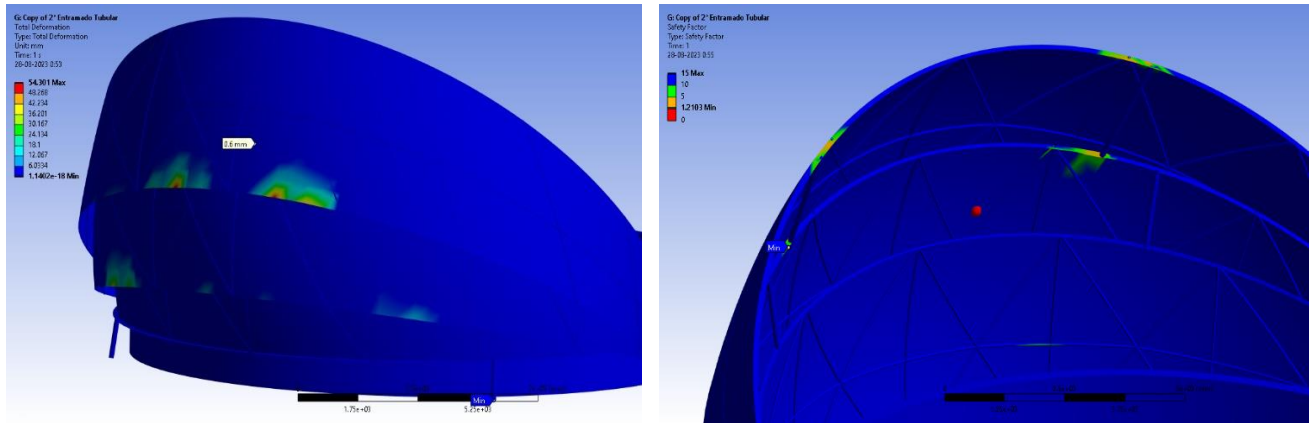


Figura 8.3: Deformaciones máximas y factores de seguridad mínimos, geometría a medio abrir. ($e = 0,6$ mm)

En cuanto al cambio de sección del perfil estructural, se presentan menos deformaciones y factores de seguridad más altos en una sección tubular del mismo diámetro, adicionalmente los cilindros hidráulicos no se someten a cargas axiales tan elevadas, siendo esta la principal influencia en el cambio del parámetro.

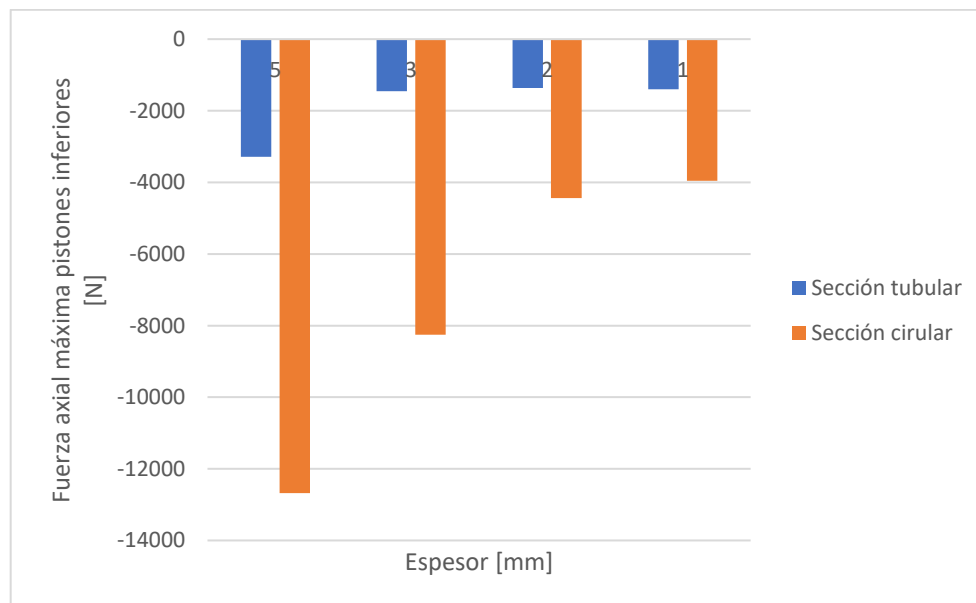


Figura 8.6: Principal influencia de cambio de sección

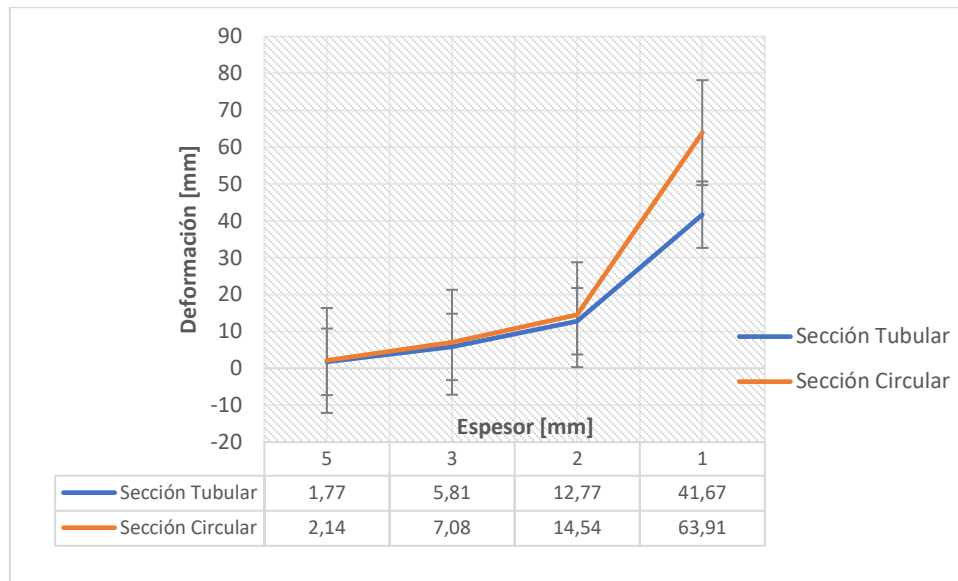


Figura 8.7: Influencia en las deformaciones

8.2 Diámetro mínimo de pasadores

La estimación del diámetro mínimo que debiesen tener los pasadores en el modelo dispuesto dependerá del espesor de plancha a utilizar y la configuración de entramados dispuesta, ya que son las condiciones que definen la carga sobre estos elementos, de esta forma, se deben analizar los esfuerzos cortantes y flectores en el punto de interés para lograr la estimación del diámetro mínimo requerido. Como eventualmente los pasadores que sustentan los pétalos son de sección circular, se tiene que:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{J} ; \text{ donde } J = \frac{\pi}{2} r^4 \quad (14)$$

De esta manera se llega a la siguiente expresión que define el radio mínimo requerido en el pasador:

$$r = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{max}}} \quad (15)$$

Un material comúnmente utilizado para la fabricación de ejes o pasadores corresponde a un acero AISI 4140, caracterizado por tener una baja aleación de cromo-molibdeno, lo que provee una gran templabilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga.

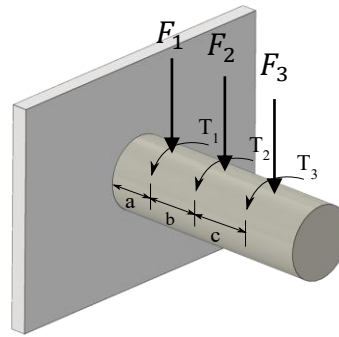


Figura 8.8: Diagrama de cuerpo libre pasadores.

Por otro lado, para el análisis de flexión se tiene:

$$\sigma = \frac{M \cdot r}{I}; \quad \text{donde } I = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \quad (16)$$

8.3 Requerimientos de actuadores hidráulicos

En base a los resultados del proceso iterativo desarrollado en el capítulo 7, se tienen las distribuciones de cargas axiales presentes sobre los elementos de barra dispuestos en el modelo, que simulan la implementación de pistones hidráulicos, en función de esto y la longitud máxima que debiese tener cada uno de ellos para lograr la posición correcta de cada pétalo, es que se debe buscar el más adecuado en algún catálogo proveedor. La **Tabla 8.2**, presenta los requerimientos de los cilindros hidráulicos.

Tabla 8.2: Longitud máxima de actuadores hidráulicos

Posición	Longitud máxima de estiramiento [m]	Carga axial máxima [N]
Pistones inferiores	2,4	1502
Pistones Intermedios	4,0	1322
Pistones Superiores	4,5	1248

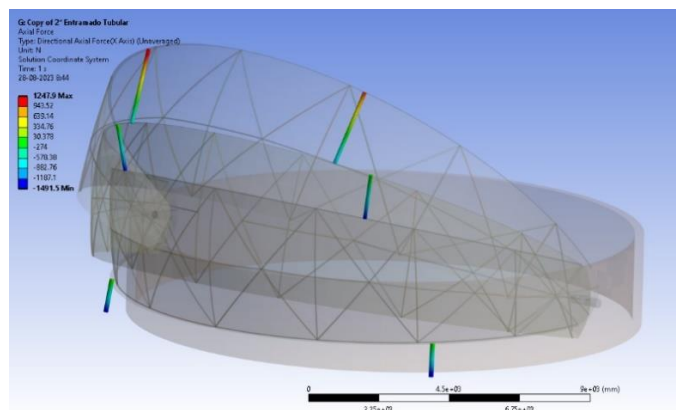


Figura 8.9: Cargas axiales

Conocidas las cargas se sabe que:

$$P = \frac{F}{A}; \text{ donde } A = \pi r_p^2 \quad (17)$$

Donde considerando la sección transversal circular del pistón hidráulico se tiene una expresión que define el radio mínimo que debiese tener el elemento mecánico (r_p).

$$r_p = \sqrt{\frac{F}{P \cdot \pi}} \quad (18)$$

En base a catálogo se puede seleccionar la presión máxima de trabajo establecida por parámetros de diseño, donde para el caso abordado es del orden de 200 bar, con esto, y las cargas axiales conocidas en la ecuación (18), se tiene que para los cilindros hidráulicos inferiores el diámetro mínimo requerido es de 9,78 [mm], cumpliendo con lo ofrecido en el mercado nacional y las exigencias impuestas por el diseño.

CAPÍTULO 9: Análisis económico

Para llevar a cabo un análisis económico preliminar correcto, se deben identificar todos los factores que intervienen económicamente en el proceso, como por ejemplo en este caso, el entorno sobre el cuál se asienta la empresa que desea implementar el domo telescópico o en otras palabras el mercado al cuál se va a dirigir, que podría capitalizarse como investigación. Otros aspectos relevantes que considerar son los recursos administrativos y requisitos legales para la puesta en marcha del proyecto. Finalmente, uno de los puntos fundamentales para el análisis económico y el tópico a tratar en este trabajo investigativo corresponde a los recursos empleados en las características técnicas. En este capítulo, por ende, se da un enfoque a los recursos necesarios para la implementación del domo, sin contemplar la antena, ya que, se asumen que los costos asociados a ella serán los mismos independiente del tipo de modelo propuesto.

Si bien estimar un costo real total es complejo en una etapa temprana de un proyecto, al menos se dará un costo estimado referencial para el diseño seleccionado en función de los cumplimientos mínimos de materiales que se necesitan para que la estructura no se caiga o deforme y funcione bajo un factor de seguridad admisible, contemplando principalmente planchas y perfiles estructurales a implementar. Dichos costos, estarán en función de los proveedores contactados y el lugar de instalación que involucra transporte de materiales a más de 5000 msnm.

Para la interpretación de este análisis económico, se debe tener en cuenta que no se entrará en un nivel de detalle final, debido a que el diseño debe ser definido con aún más detalle, que involucra eventualmente más gastos, como, por ejemplo, definir con detalle la cantidad de pernos, golillas, pintura, tuercas, pilares, cadenas o mallas para hormigón. Por otro lado, costos relevantes como la mano de obra para el ensamblaje, maestranzas, izaje o construcción en terreno que, si bien se puede dar una estimación preliminar, no será confiable al 100%. Sin embargo, se puede estimar al menos su costo en función de los pétalos y mecanismo de apertura.

9.1 Materiales relevantes de fabricación

La realización de este diseño involucra una serie de materiales para poder ser construido, cada uno de los pétalos impuestos tiene dimensiones específicas que permiten estimar la cantidad de cada uno de los recursos.

9.1.1 Planchas

En base a los resultados, se estima que el espesor mínimo aceptado para que la estructura resista las condiciones de viento bajo el entramado propuesto es de 1 mm, considerando un factor de seguridad de 1,77. De esta forma, sabiendo el espesor del material y las dimensiones de las superficies que conforman cada uno de los pétalos se puede obtener la cantidad de planchas necesarias para la eventual realización del proyecto.

Tabla 9.1: Área de pétalos.

Componente	Superficie [m^2]	Masa total sin entramado [kg]
Pétalo Superior	119,7	338
Pétalo Intermedio	115,1	321
Pétalo Inferior	98,4	285
Total	333,2	944

Como existen 2 pétalos de similares características por lado, la superficie total que se requiere cubrir es de unos aproximados $667 m^2$, considerando dimensiones estándar de venta de cada plancha de 1000 [mm] de ancho y 3000 [mm] de largo se necesitaría un total de 223 para abarcar toda el área necesaria.

9.1.2 Perfiles estructurales

En función de las iteraciones realizadas se define un entramado óptimo referencial, de esta forma es posible considerar un costo estimado de estas componentes en base a la longitud total de los perfiles dispuestos en los pétalos.

Tabla 9.2: Longitud total de perfiles por pétalos

Componente	Longitud total de perfiles [m]
Pétalo Superior	208,9
Pétalo Intermedio	201,3
Pétalo Inferior	185,3

Como el diseño impuesto consta de 6 pétalos, en realidad la longitud total de perfiles sería el doble de la que se muestra en la **Tabla 9.2**, definiendo un total de 1191 [m] necesarios para este tipo de entramado. Considerando un largo comercial de 6 [m], se necesitarían alrededor de 199 perfiles.

9.2 Resumen

En base a las cotizaciones realizadas, y presentadas en los anexos de este presente informe, es posible estimar el costo asociado a cada uno de los materiales en estudio presentados en la **Tabla 9.3**. Así, el costo preliminar estimado para pétalos y componentes optimizados ascendería a la suma de \$24.667.646, donde no son considerados factores importantes, como, por ejemplo, el transporte, maestranza, hormigón, izaje o mano de obra, pudiendo incluso repercutir en la realización del proyecto, a pesar de que mecánicamente se cumplan los requerimientos.

Tabla 9.3: Resumen de costos asociados

Componente	Magnitud referencial por cubrir	Cantidad Necesaria	Valor unitario estimado +IVA [CLP]	Total [CLP]
Planchas Aluminio	667 m^2	223	\$31.061	\$6.926.603
Perfiles sección tubular A36	1191 m	199	\$27.857	\$5.543.543
Pistón hidráulico inferior	2,4 m	2	\$1.338.750	\$2.677.500
Pistón hidráulico intermedio	4,0 m	2	\$2.142.000	\$4.284.000
Pistón hidráulico superior	4,5 m	2	\$2.618.000	\$5.236.000
				\$24.667.646

CAPÍTULO 10: Conclusiones

Luego de las simulaciones desarrolladas en el presente trabajo, se puede decir que las magnitudes máximas de esfuerzos y deformaciones dependerán del espesor de la plancha seleccionada, sin embargo, la ubicación de dichas zonas varía levemente independiente de la disposición que se adopte. Inicialmente, con la utilización de un espesor bajo del orden de los 10 mm se determinan deformaciones máximas en el centro de los pétalos superiores, del orden de metros, independiente inclusive de la dirección incidente del viento, lo cuál puede ser explicado netamente por la geometría curva adoptada y que los extremos de los pétalos se encuentran limitados en movimiento debido a la junta de revolución con respecto a los pasadores. En base a lo anterior, se cumple la hipótesis establecida que la estructura necesariamente necesita entramados para que realmente sea viable, debido a que, de otra manera el espesor de las planchas debiese ser como mínimo de 30mm, lo cual no solo es difícil de conseguir y aumenta en demasía el precio, sino que también, sobre exige a los actuadores hidráulicos inferiores haciendo muy difícil su implementación y trabajo en altura.

A través de los resultados obtenidos, es posible decir que la disposición geométrica con mayores exigencias mecánicas estará dada por la incidencia del viento, de esta manera, es posible concluir que si el viento proviene desde una dirección “x” las condiciones más desfavorables se darán cuando la geometría se encuentre medianamente abierta, sin embargo, en el caso contrario en que el viento provenga desde una dirección “y” las condiciones más desfavorables se darán cuando la geometría se encuentre completamente abierta. Ahora bien, si comparamos ambos casos críticos, lo más desfavorable se presentaría cuando el viento proviene desde una dirección “x” sobre una geometría medianamente abierta, siendo la principal causa de estudio.

A través de la realización de los modelos de turbulencia, se presentan velocidades cercanas a 0 [m/s] en el borde de las superficies, haciendo que las presiones sean máximas en estos puntos. La superficie que en primer lugar recibe el contacto de estas masas de aire en movimiento corresponde justamente a la mitad de los pétalos, por lo que el impacto se va aminorando y acoplado al resto de la geometría, aun así, la influencia del viento sobre la estructura se resume en el crecimiento exponencial de las deformaciones a medida que se disminuye el espesor, logrando alcanzar un incremento del 86% con un espesor de 5 [mm]

En base a la sección de entramados a utilizar, se puede decir que una sección tubular presenta mejores condiciones que una sección circular cerrada, principalmente debido a la diferencia de masa de cada una de ellas, logrando con un perfil tubular redondo del mismo diámetro reducir las deformaciones en un 20% y las cargas axiales en los cilindros hidráulicos superiores, intermedios e inferiores en un promedio de 75%, 23% y 16% respectivamente, haciendo más viable la realización del diseño.

Por su parte, las máximas deformaciones tienden a presentarse en el centro de cada pétalo y son aún más significativas en los pétalos superiores o externos. Sin embargo, las zonas con presencia de factores de seguridad más bajos se dan en la condición de unión entre los cilindros hidráulicos y el pétalo, lo cual coincide con lo esperado de forma hipotética.

Como era de esperarse, los actuadores hidráulicos representados como elementos de barra en la simulación, están sometidos a compresión la mayor parte del tiempo, logrando alcanzar las reacciones máximas en la zona inferior. Dichas reacciones se ven incrementadas en función del espesor de las planchas a implementar, sin embargo, mantienen una relación de 1:3 aproximadamente, en otras palabras, las reacciones en los pistones ubicados en la zona inferior son 3 veces más grandes que en los pistones superiores.

La implementación de entramados de forma cruzada tiene una mejor respuesta que la utilización de perfiles solamente verticales u horizontales, debido a que se distribuyen mejor las cargas sobre la estructura, pudiendo reducir las deformaciones a pesar de tener más metros lineales de perfiles que involucra un mayor peso en la estructura. Además, no quiere decir que el entramado propuesto sea el único posible, de hecho, aún cabe la posibilidad de generar atezadores que sobresalgan de cada pétalo, teniendo la precaución de no entorpecer la apertura, inclusive, si se cuentan con los recursos económicos se pueden generar más perfiles cruzados entre sí generando una estructura aún más estable.

En cuanto al análisis económico realizado, se da un enfoque netamente a la optimización de los entramados, y su comportamiento bajo cargas críticas de viento. De esta manera, el análisis económico realizado solo contempla la utilización de planchas laminadas de aluminio, perfiles estructurales de acero y pistones hidráulicos adecuados a las longitudes que se deben recorrer para garantizar la apertura y cierre del domo. Con lo anterior se alcanza un valor máximo de \$24.667.646, que no consideran aún factores determinantes para la realización del proyecto, como por ejemplo dinero asociado al traslado de materiales, el tiempo estimado total para el izaje de componentes, mano de obra, hormigón y sus derivados como cadenas, pilares o mallas, implementación del sistema de ventilación, entre otros, pudiendo multiplicar dicha cifra.

Como conclusión, se puede decir que la realización del diseño analizado tal como se presenta es posible de ejecutar, ya que, los entramados dispuestos y los espesores mínimos requeridos son acordes a lo que se puede encontrar en el mercado nacional, habiendo diversas opciones para realizar el curvado necesario de los perfiles estructurales. Con lo anterior, es posible dar forma al pétalo a través de la implementación de las planchas seleccionadas. Sin embargo, su principal desafío correspondería al transporte y ensamblaje. En primer lugar, debido a las dimensiones impuestas en cada uno de los pétalos se hace imposible transportarlos íntegramente debiendo realizar el traslado por partes. De igual forma, si se quisiera llevar por la mitad cada pétalo, se debería optar por un traslado a través de escolta policial o permiso de vialidad debido al sobredimensionamiento lateral, limitando el traslado de la carga solamente de manera diurna, además, el costo se llegaría a incrementar hasta 4 veces más de lo normal en el caso hipotético que la maestranza colaboradora se encuentre en la capital del país, donde en este caso, lo más conveniente sería armar los entramados acorde a las dimensiones de la rampa e incrementar el trabajo en el sitio de instalación.

10.1 Perspectivas

El desarrollo de este proyecto aún se encuentra en una fase de análisis, debiendo aún tomar decisiones más específicas, cómo, por ejemplo, realizar la unión de los pétalos con los actuadores hidráulicos, el dimensionamiento de pasadores que permitan su revolución y eventual alargamiento. Adicionalmente, definir el tipo de eje que dará el movimiento a los pétalos, eje que estará sometido a cargas combinadas principalmente de flexión y torsión y determinar con esto su diámetro mínimo para alcanzar una vida infinita.

No hay que olvidar, además, que Chile es reconocido mundialmente por ser un país sísmico, lo que hace necesario la realización de un análisis de suelo y en función de eso poder estimar y distribuir la cantidad de mallas, cadenas o pilares para concreto a utilizar en la base fija propuesta.

Por otro lado, para conservar la integridad de la antena se debe pensar en un sistema de ventilación que permita recircular el aire en el interior del recinto, pudiendo agregar algún tipo de rejilla en la base fija o inclusive en los pétalos. Además, se hace necesario definir bien el tipo de acceso que pueda tener este modelo, con el fin de realizar manipulación de la antena desde el interior o realizar algún tipo de mantenimiento.

Bibliografía

- [1] California Institute of Technology, «Conservation District Use Permit issued for Decommissioning Caltech Submillimeter Observatory from Maunakea,» 2022. [En línea]. Available: <http://cso.caltech.edu/>.
- [2] C. Cornejo, «Universidad de Concepción se adelanta y busca traer el primer radiotelescopio operado por científicos chilenos,» *El mostrador*, 23 Octubre 2018.
- [3] J. A. D. C. C. N. J. R. R. D. E. G. S. P. G. W. D. J. L. J.-b. Z. & Y. M. Vial, «The Leighton Chajnantor Telescope: Project update and mechanical structural analysis in preparations for new deployment in Chajnantor, Chile.,» *Ground-based and Airborne Telescopes VIII.*, 2020.
- [4] K. Cifuentes, «Sabes,» 09 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://sabes.cl/2022/06/09/un-avance-para-la-ciencia-en-chile-udec-recibira-telescopio-para-observacion-astronomica-desde-el-norte/>.
- [5] California Institute of Technology, «CSO Observer information, Overview,» 08 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <http://www.cso.caltech.edu/wiki/cso/science/overview>.
- [6] SOCHIAS, «Reglas de elegibilidad para el uso del tiempo de telescopio chileno,» 2017. [En línea]. Available: <https://sochias.cl/tiempo-de-observacion/reglas-de-eligibilidad/>.
- [7] D. H. Reyes, «Cartografía emocional del pueblo Lickan Antai,» 2016.
- [8] R. G. B.-J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Octava edición, Ciudad de México: McGraw Hill, 2008.
- [9] E. L. Manuel Vázquez, *EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO AL ANÁLISIS ESTRUCTURAL*, Madrid: Noela, 2001.
- [10] F. M. White, *FLUID MECHANICS*, New York: McGraw-Hill, 2011.
- [11] J. Bardina, P. Huang y T. Coakley, «Turbulence modeling validation testing and development,» California, 1997.
- [12] B. S.-S. Cuevas, «El telescopio y su historia,» *Ciencias*, 95, 2010.
- [13] European Southern Observatory, «Cómo lucirá la cúpula del ELT de ESO,» 19 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.eso.org/public/chile/announcements/ann20031/>.
- [14] K. Scientific, «Observatorios de Fibra de Vidrio (Technical Innovations, E.U.A),» *KOSMOS*.
- [15] E. S. Observatory, «ESO,» 10 Marzo 2011. [En línea]. Available: <http://www.eso.org/sci/facilities/paranal/telescopes/ut/enclosure.html>.
- [16] C. F. a. P. G. O. Pirnay, «Auxiliary Telescopes at Dome C,» Lieja, 2005.
- [17] E. S. Observatory, «ESO,» 4 Diciembre 2014. [En línea]. Available:

<https://www.eso.org/public/australia/images/eso1440/>.

- [18] I. G. Observatory, «Gemini,» 15 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.gemini.edu/about/gemini-telescopes-science-and-technologies>.
- [19] NOIRLab, «Gemini sur en tierras lejanas,» 1 Marzo 2023. [En línea]. Available: https://noirlab.edu/public/es/images/iotw2309a/?fbclid=IwAR2Czc9h3j0_cnmS-uYM6AVNyfelCvrZwAGJq2v2YbmEVq52MhCSFzPbwOcnocache=true.
- [20] EIE Group, «NTT-New Technology Telescope,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.eie.it/en/progetti/ntt-project>.
- [21] NOIRLab, «SOAR Technical Specs,» 5 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://noirlab.edu/science/programs/ctio/telescopes/soar-telescope/technical-specs>.
- [22] M3 Architecture, Engineering y construction management, «M3eng,» 2018. [En línea]. Available: <https://m3eng.com/es/portfolio/soar-enclosure-es/>.
- [23] EIE Group, «LSST - Large Synoptic Survey Telescope,» [En línea]. Available: <https://www.eie.it/en/progetti/lsst-project>.
- [24] Vera C. Rubin , «LSST Summit Facilities,» [En línea]. Available: <https://www.lsst.org/about/tel-site/summit>.
- [25] European Southern Observatory, «Facts about the ELT,» [En línea]. Available: <https://elt.eso.org/about/facts/>.
- [26] European Southern Observatory, «THE EXTREMELY LARGE TELESCOPE. The World's Biggest Eye on the Sky,» [En línea]. Available: <https://elt.eso.org/>.
- [27] EIE Group, «DAG - Dogu Anadolu Gozlemevi - The Enclosure,» [En línea]. Available: <https://www.eie.it/en/progetti/dag-dome>.
- [28] ATASAM, «Atasam.atauni,» [En línea]. Available: <https://atasam.atauni.edu.tr/>.
- [29] EIE Group, «LBT - Large Binocular Telescope - The Enclosure,» [En línea]. Available: <https://www.eie.it/en/progetti/lbt-dome>.
- [30] M3 Architecture, Engineering y Construction management, «SUBMILLIMETER TELESCOPE (SMT),» 2018. [En línea]. Available: <https://m3eng.com/portfolio/submillimeter-telescope-smt/>.
- [31] NOAIRLab, «Telescopes, WIYN 3.5 meter Telescope,» Julio 7 2021. [En línea]. Available: <https://noirlab.edu/science/programs/kpno/telescopes>.
- [32] R. Hills, The James Clerk Maxwell telescope, Aspenas : ESO-IRAM-Onsala Workshop on (Sub)Millimeter Astronomy, 1985.
- [33] East Asian Observatory , «James Clerk Maxwell Telescope,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.eaobservatory.org/jcmt/about-jcmt/>.

- [34] R. B. Leighton, «10 meter telescope for millimeter and submillimeter astronomy,» 1977.
- [35] CePIa, «Proyecto LCT,» 2022. [En línea]. Available: <https://drive.google.com/drive/folders/1WvwVkrQLASKsC6VJocatmQbOFSB8qH63?usp=sharing>.
- [36] W. R. Steiger, «A BRIEF HISTORY OF THE CALTECH SUBMILLIMETER OBSERVATORY,» Hawái, 2007.
- [37] D. T. Valdéz, «Concluye con éxito etapa de desconexión del Telescopio LCT e inicia desarme para traslado a Chile,» *Noticias UdeC*, 8 Agosto 2022.
- [38] BCN, «Clima y vegetación región de Antofagasta,» [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region2/clima.htm>.
- [39] APEX, «Experimento pionero de Atacama (APEX),» 2022. [En línea]. Available: <https://www.apex-telescope.org/ns/es/clima/>.
- [40] Ministerio obras públicas, «Información oficial hidrometeorológica y calidad de aguas,» Dirección general de aguas, 2022. [En línea]. Available: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>.
- [41] V. M. D., «DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL DOMO PARA LEIGHTON CHAJNANTOR TELESCOPE,» Concepción, Chile, 2022.
- [42] APEX, «Apex-Telescope,» Grafana, 2023. [En línea]. Available: <https://www.apex-telescope.org/apex-dashboard/d/MQgvc4Onz/historical-weather?orgId=1&var-year=2022&var-month=4>.
- [43] SOCHIAS, «Telescopios y Organizaciones,» 2020.

ANEXOS

A.1 Domo Leighton Telescope. Hawái

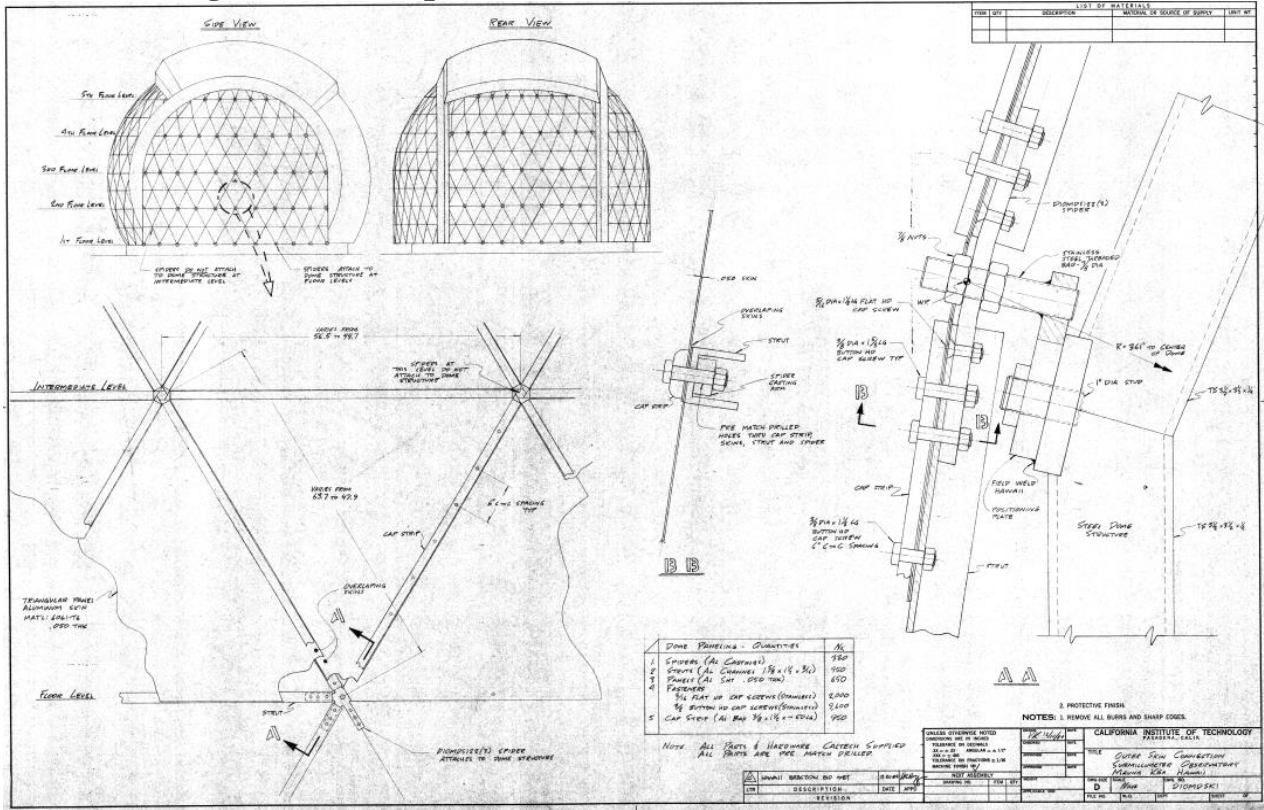
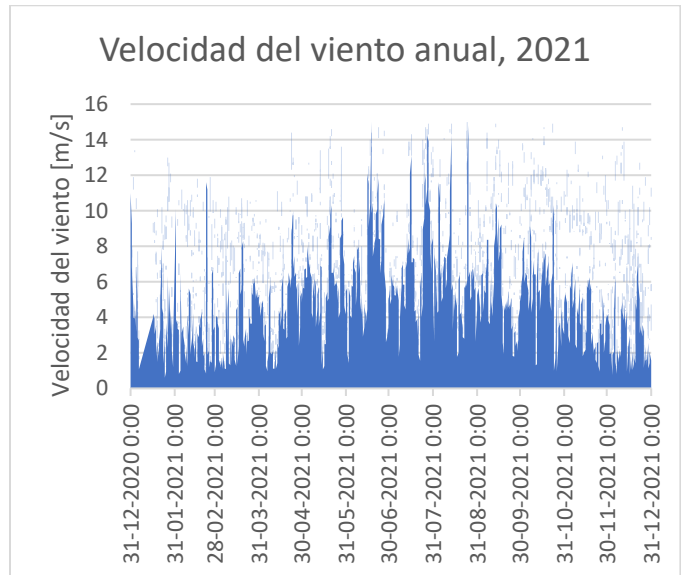
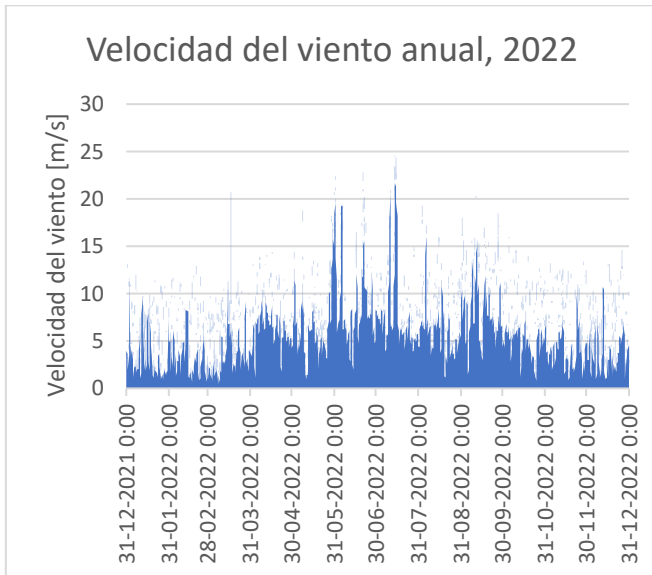


Figura A.1: Planos de domo en Hawái. [35]

A.2 Clima Valle Chajnantor

A.2.1 Velocidad del viento

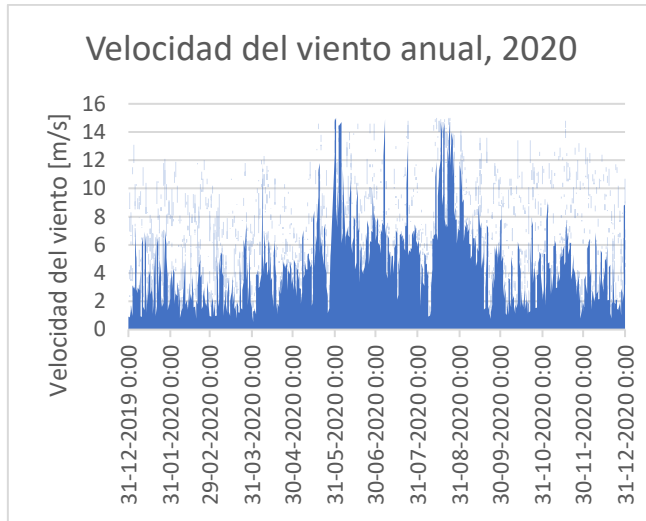


Mínimo [m/s] 0,427
 Máximo [m/s] 24,6
 Promedio anual [m/s] 6,74

Figura A.2.1: Velocidad del viento anual, 2022.

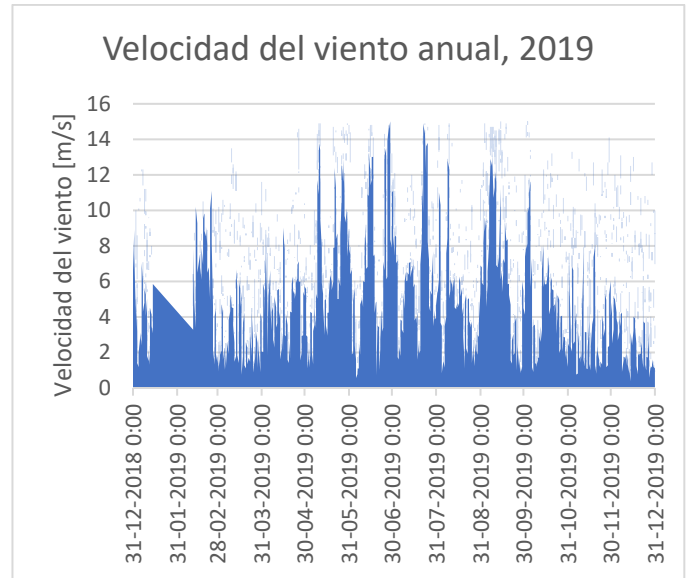
Mínimo [m/s] 0,53
 Máximo [m/s] 15,00
 Promedio anual [m/s] 6,12

Figura A.2.2: Velocidad del viento anual, 2021.



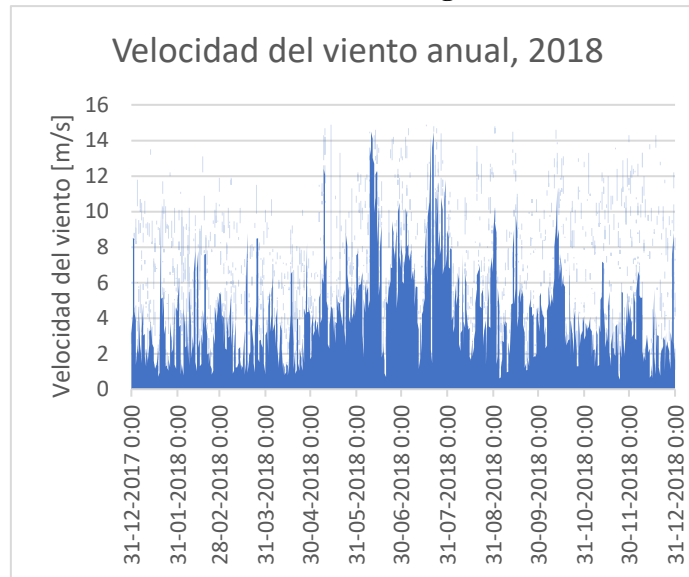
Mínimo [m/s] 0,41
 Máximo [m/s] 15,5
 Promedio anual [m/s] 5,84

Figura A.2.3: Velocidad del viento anual, 2020.



Mínimo [m/s] 0,37
 Máximo [m/s] 15,7
 Promedio anual [m/s] 6,06

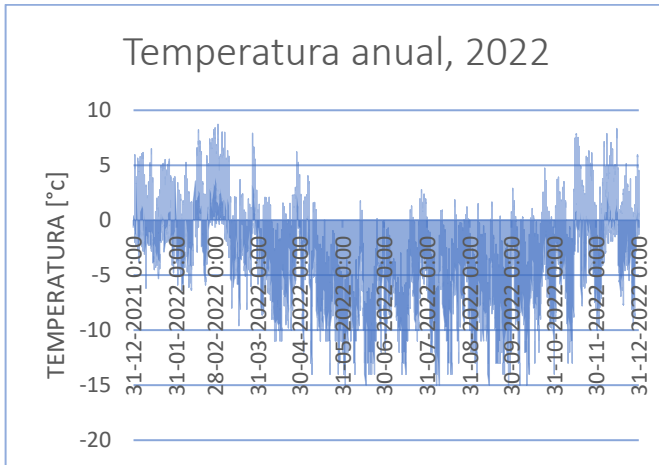
Figura A.2.4: Velocidad del viento anual, 2019.



Mínimo [m/s] 0,44
 Máximo [m/s] 14,90
 Promedio anual [m/s] 5,66

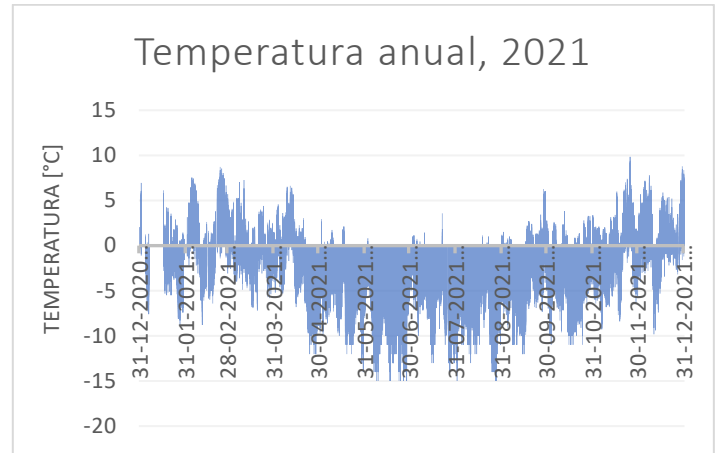
Figura A.2.5: Velocidad del viento anual, 2018.

A.2.2 Temperatura



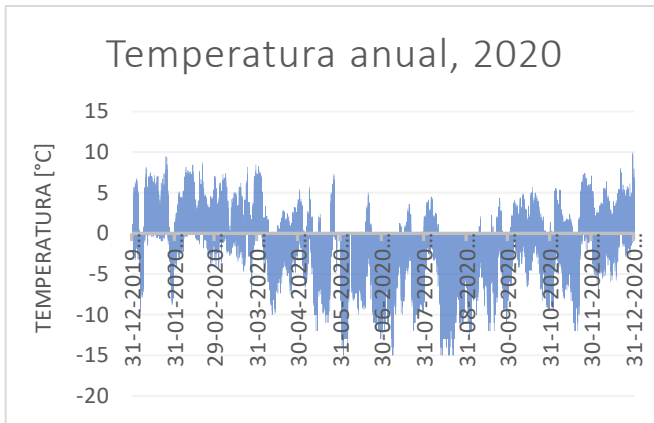
Mínima [°C] -15,3
 Máxima [°C] 8,71
 Promedio anual [°C] -3,63

Figura A.2.6: Temperatura anual, 2022.



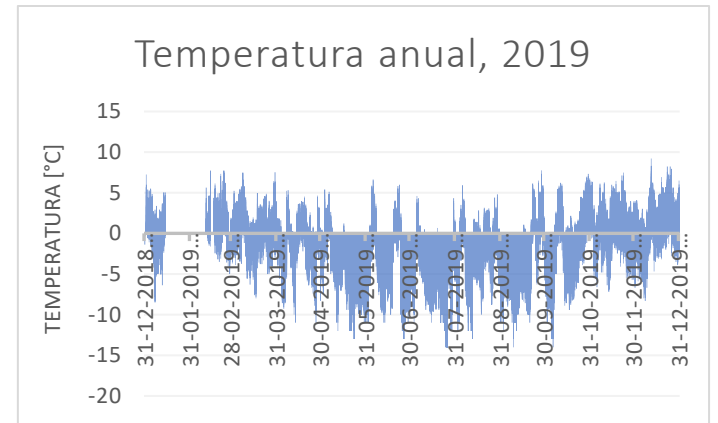
Mínima [°C] -15,00
 Máxima [°C] 9,85
 Promedio anual [°C] -3,24

Figura A.2.7: Temperatura anual, 2021.



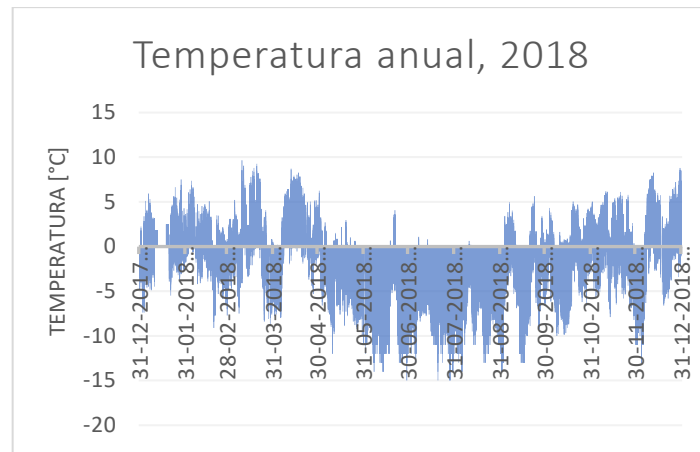
Mínima [°C] -15,5
 Máxima [°C] 9,91
 Promedio anual [°C] -1,98

Figura A.2.8: Temperatura anual, 2020.



Mínima [°C] -14,00
 Máxima [°C] 9,20
 Promedio anual [°C] -2,18

Figura A.2.9: Temperatura anual, 2019.



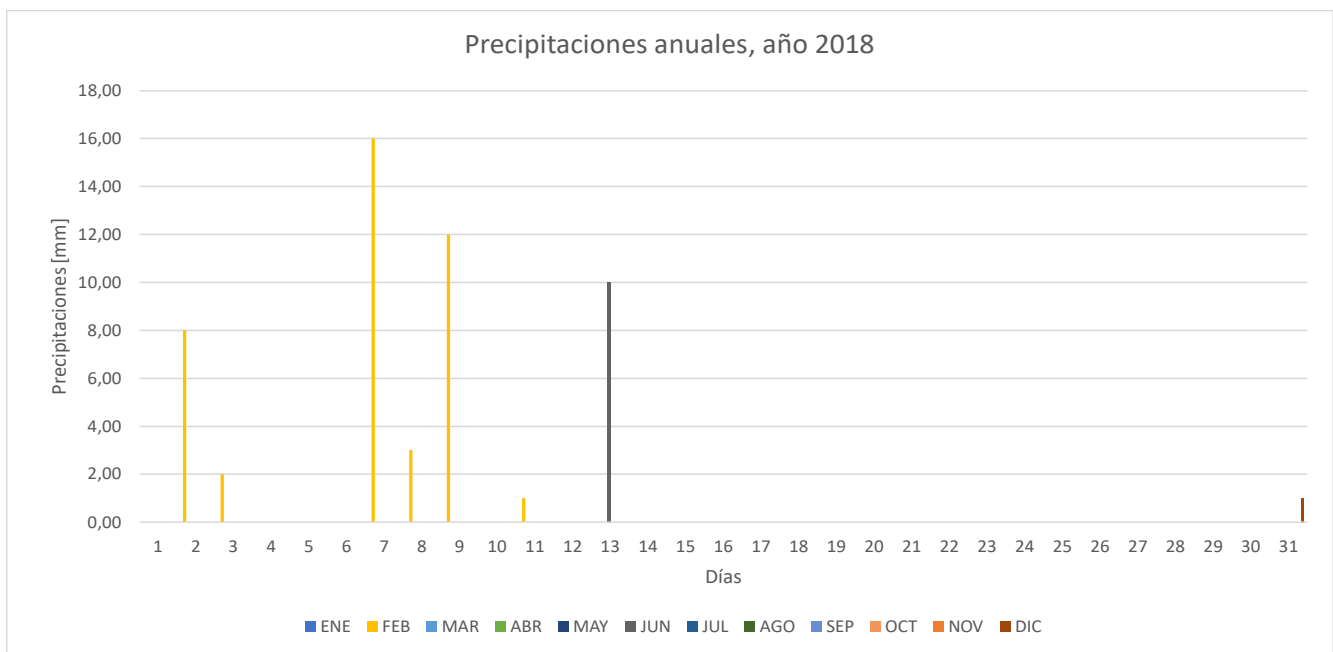
Mínima [°C] -15,3

Máxima [°C] 9,65

Promedio anual [°C] -2,63

Figura A.2.10: Temperatura anual, 2018.

A.2.3 Precipitaciones

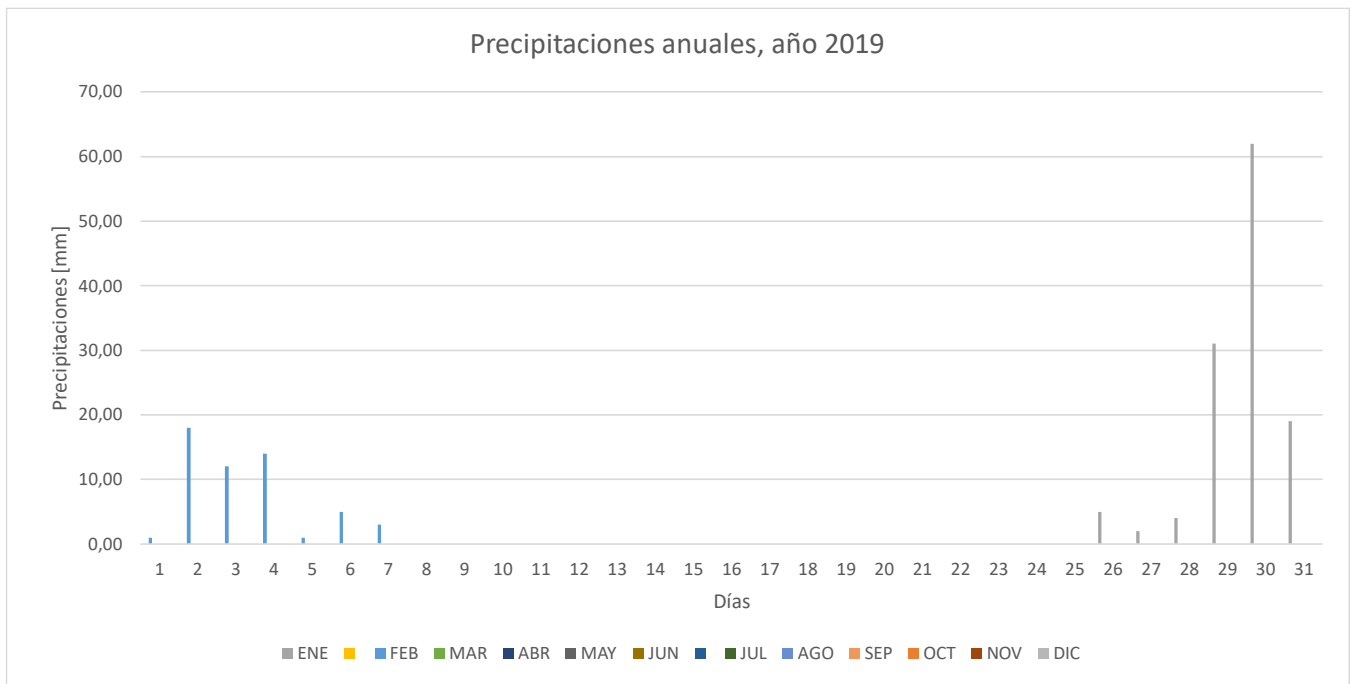


Promedio anual [mm] 0,15

Total, anual [mm] 53,00

Mayor precipitación por día [mm] 16,00

Figura A.2.11: Precipitación anual, 2018.



Promedio anual [mm]	0,48
Total, anual [mm]	177,00
Mayor precipitación por día [mm]	62,00

Figura A.2.12: Precipitación anual, 2019.



Promedio anual [mm]	0,01
Total, anual [mm]	4,20
Mayor precipitación por día [mm]	4,20

Figura A.2.13: Precipitación anual, 2020.

A.3 Segundo diseño conceptual, Mesa tijera.

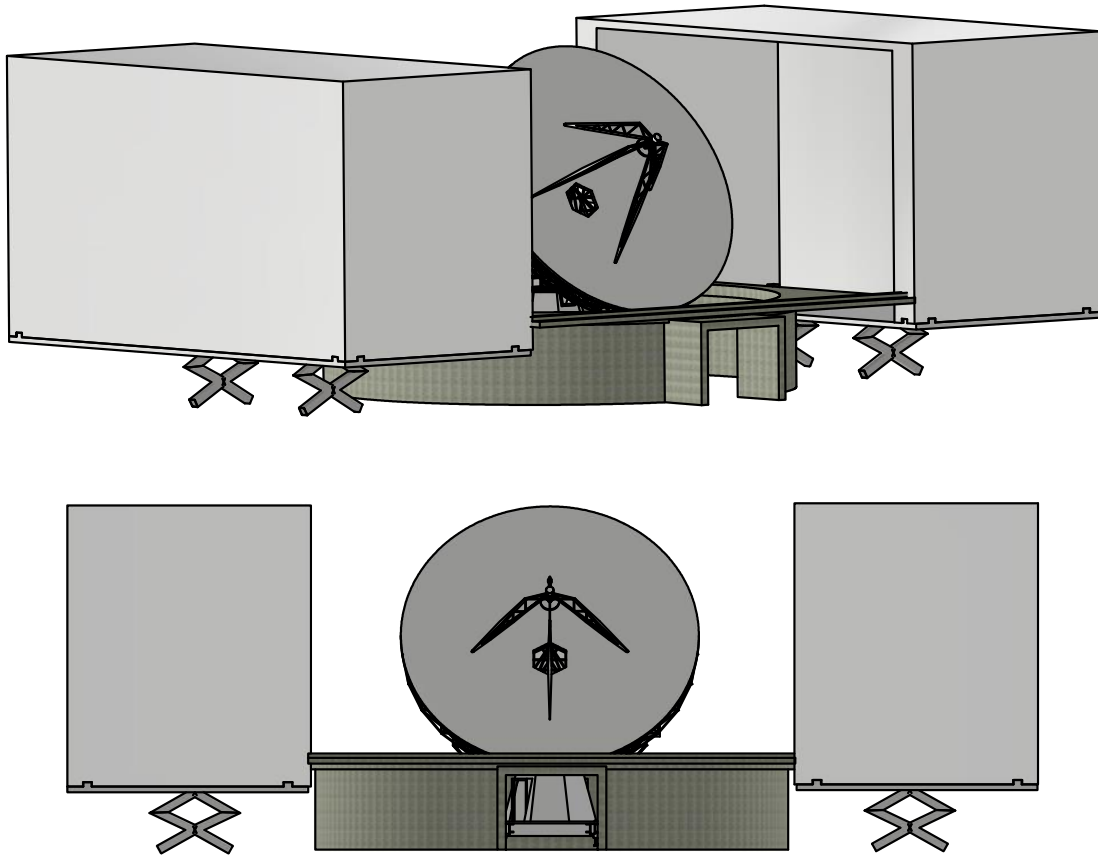


Figura A.3.1: Implementación mesa tijera. [35]

A.4 Computational fluid dynamics. Resultados

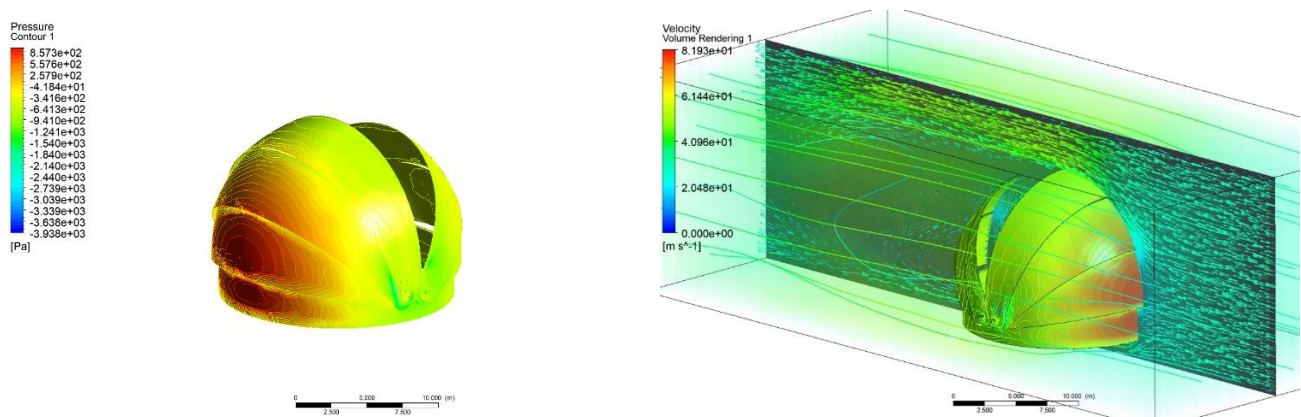


Figura A.4.1: Distribución de presión y velocidades en geometría cerrada. Dirección viento "x"

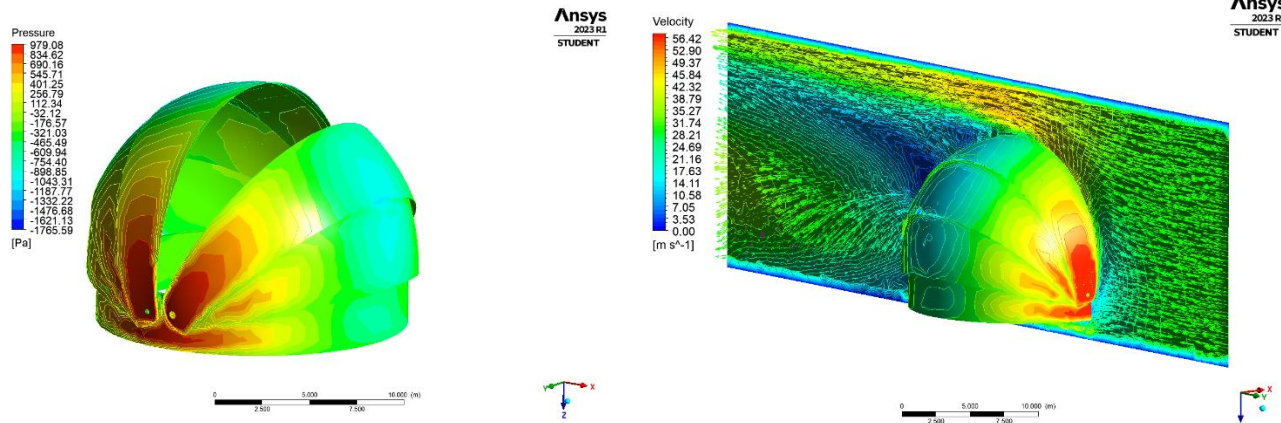


Figura A.4.2: Distribución de presión y velocidades en geometría cerrada. Dirección viento “y”

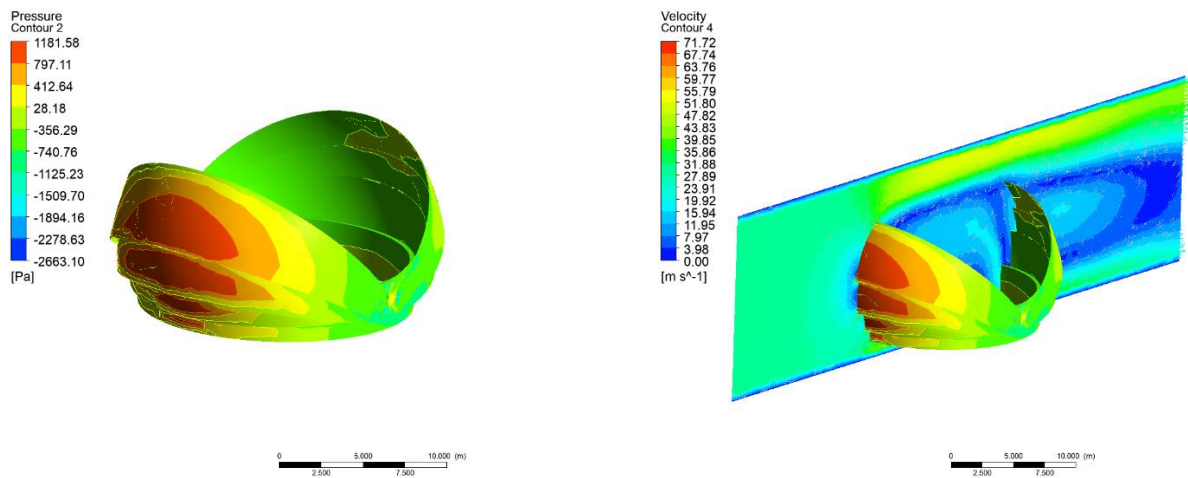


Figura A.4.3: Distribución de presión y velocidades en geometría medianamente abierta. Dirección viento “x”

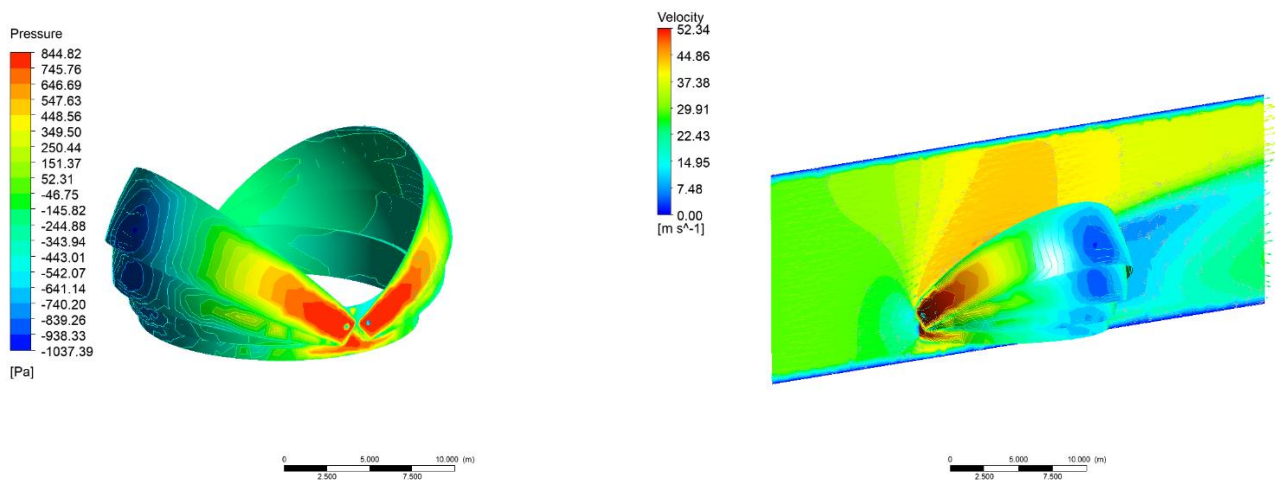


Figura A.4.4: Distribución de presión y velocidades en geometría medianamente abierta. Dirección viento “y”

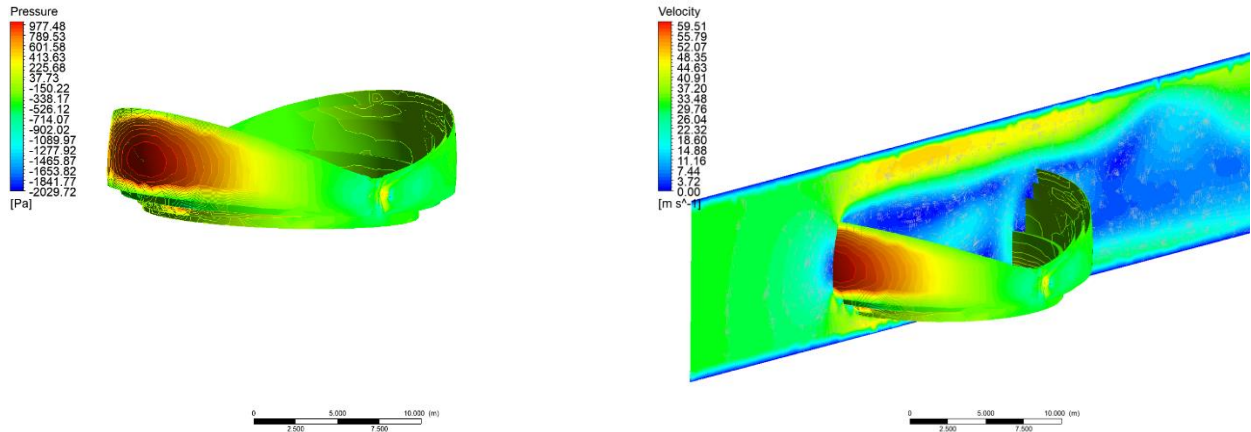


Figura A.4.5: Distribución de presión y velocidades en geometría abierta. Dirección viento “x”

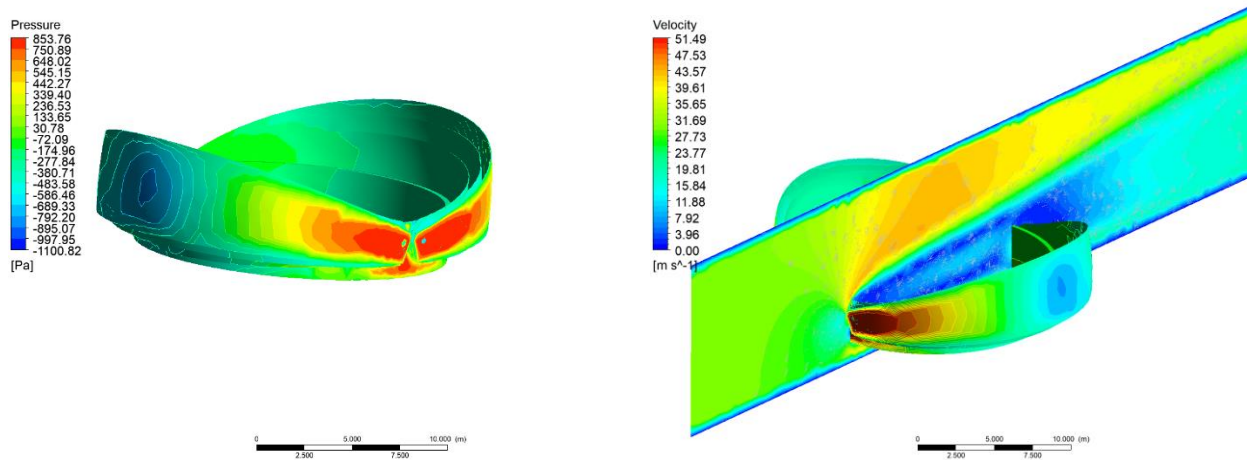


Figura A.4.6: Distribución de presión y velocidades en geometría abierta. Dirección viento “y”

A.5 Tablas de resultados

Tabla A.5.1: Resultados primera iteración.

	Completamente Cerrada			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	224,6	338,3	864,1	2761
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	93,36	138,01	210,91	253,53
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-85209	-57898	-28879	-14114
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-27152	-18338	-8088	-2670
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	3241	3783	5445	5863
Factor de seguridad mínimo	2,78	1,88	1,23	1,02
	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	82,73	171,2	588,8	1625

Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	67,58	84,16	136,27	224,30
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-182800	-124210	-64639	-34562
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-94248	-63047	-34785	-20592
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-39000	-26008	-15357	-9497
Factor de seguridad mínimo	3,84	3,08	1,90	1,15
	Completamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	239,3	366,4	801,8	1859
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	217,49	291,19	490,45	788,6
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-180700	-123440	-64859	-35202
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-90532	-64723	-39721	-24811
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-44314	-30091	-15953	-8468
Factor de seguridad mínimo	1,19	0,89	0,53	0,33

Tabla A.5.2: Resultados segunda iteración.

	Completamente Cerrada			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	184,4	351,7	1098	4081
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	77,4	115,1	236,0	454,2
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-80496	-53405	-28738	-12961
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-27178	-18248	-9399	-3941
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	7397	6368	7672	8783
Factor de seguridad mínimo	3,3	2,2	1,09	0,577
	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	137,4	335,7	1893,8	11977
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	628,1	1017,4	2009	4447,1
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-189960	-133000	-75742	-46456
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-109200	-77261	-43236	-33606
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-45904	-31906	-19127	-19637
Factor de seguridad mínimo	0,41	0,25	0,13	0,058
	Completamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	234,8	348,7	1029	6785
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	223,60	307,65	536,87	1309
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-183790	-126560	-68020	-38492
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-96834	-69687	-44939	-30620
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-51715	-38251	-25694	-20196

Factor de seguridad mínimo	1,16	0,84	0,48	0,20
----------------------------	------	------	------	------

Tabla A.5.3: Resultados tercera iteración.

	Completamente Cerrada			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	134,7	184,2	905,9	6730
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	76,78	98,02	155,1	559,16
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-92833	-69093	-51554	-54502
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-36865	-30497	-28158	-35162
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	24768	23804	18732	-21450
Factor de seguridad mínimo	3,4	2,6	1,67	0,46
	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	70,4	155,1	927,8	3824
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	58,92	79,18	168,6	499,7
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-192320	-136760	-80762	-51214
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-101930	-70130	-45234	-35578
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-42094	-32427	-25909	-25642
Factor de seguridad mínimo	4,40	3,27	1,54	0,52
	Completamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	30	20	10	5
Deformación máxima [mm]	231,82	440	2056	12661
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	229,20	320,63	609,15	2160
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-190660	-134020	-76621	-49080
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-93867	-68514	-43550	-29517
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-45761	-31063	-16189	-7127
Factor de seguridad mínimo	1,13	0,81	0,43	0,12

Tabla A.5.4: Resultados Cuarta iteración.

	Completamente Cerrada			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,92	5,99	9,73	32,58
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	47,43	52,77	135,39	119,32
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-3376	-3284	-3197	-3178
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1582	-1591	-1615	-1568

Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1256	1243	1268,2	1336
Factor de seguridad mínimo	5,27	4,73	1,85	2,09
	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,14	7,08	14,54	63,91
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	82,40	53,66	95,57	170,34
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-12677	-8250	-4437	-3960
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1612	-1236	-1122	-1070
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1384	1310	1273	1368
Factor de seguridad mínimo	2,62	2,31	1,15	0,44
	Completamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,16	6,47	9,53	27,69
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	146,83	125,6	97,57	546,69
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-2768	-1560	-1159	-933
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	797,8	597,4	437,2	487,5
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-440,6	-365,4	257,7	-221,1
Factor de seguridad mínimo	2,56	1,99	1,70	0,46

Tabla A.5.5: Resultados quinta iteración.

	Completamente Cerrada			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,30	2,81	4,78	21,14
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	78,33	67,47	128	80,75
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-3592	-4509	-3252	-3221
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1708	-1251	-1729	-1589
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1272	1228	1263	1337
Factor de seguridad mínimo	3,70	3,19	1,95	1,03
	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,46	6,47	12,32	39,39
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	94,17	187,66	749,84	759,99
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-6509	-4247	-2392	-1980
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1653	-2666	-1588	-1230
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1344	1810	1714	1415
Factor de seguridad mínimo	2,65	1,33	0,33	0,30

	Completamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	2,19	3,80	7,33	24,33
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	161,99	138,97	111,61	106,32
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-2714	-1505	-1223	-916
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	905	639	387	350
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	-394	-820	-203	458
Factor de seguridad mínimo	2,35	2,23	1,80	1,51

Tabla A.5.6: Resultados sexta iteración.

	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	5	3	2	1
Deformación máxima [mm]	1,77	5,81	12,77	41,67
Deformación mínima [mm]	0	0	0	0
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	68,45	41,42	71,44	186,87
Esfuerzo equivalente mínimo [Mpa]	0	0	0	0
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-3288	-1457	-1362	-1404
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-890	-1011	-1069	-1184
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1238	1048	1065	1095
Factor de seguridad mínimo	3,02	2,81	2,58	2,34

Tabla A.5.7: Resultados relevantes séptima iteración.

	Medianamente Abierta			
Espesor planchas [mm]	2	1	0,8	0,6
Deformación máxima [mm]	7,62	8,44	30,2	54,30
Esfuerzo equivalente máximo [Mpa]	407,08	186,11	256,06	376,95
Fuerza axial máxima pistones inferiores [N]	-1683	-1492	-1545	-1672
Fuerza axial máxima pistones intermedios [N]	-1374	-1354	-1350	-1341
Fuerza axial máxima pistones superiores [N]	1209	1248	1264	1269
Factor de seguridad mínimo	2,35	1,77	1,74	1,21

A.6 Entramados propuestos

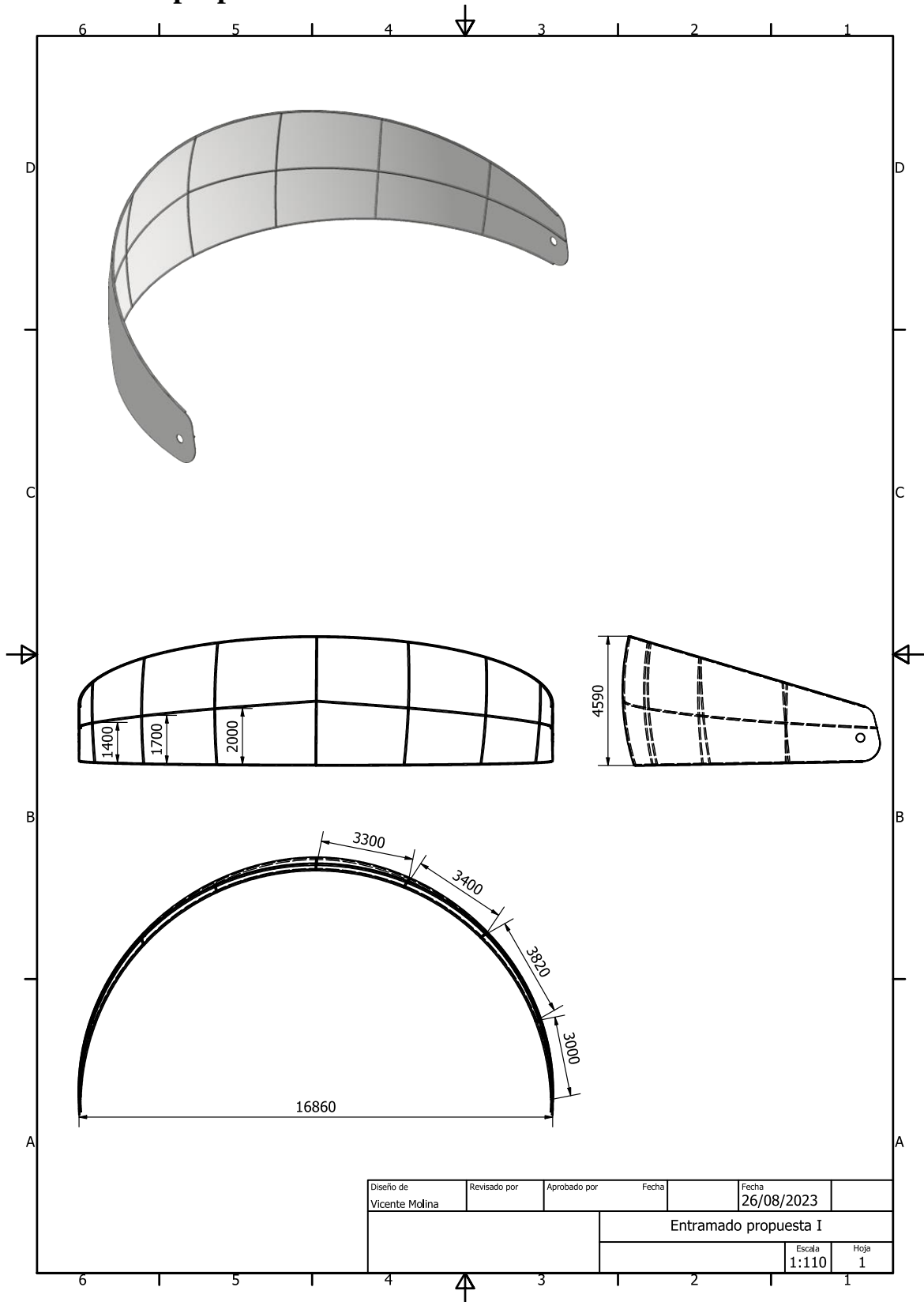


Figura A.6.1: Primera propuesta de entramado

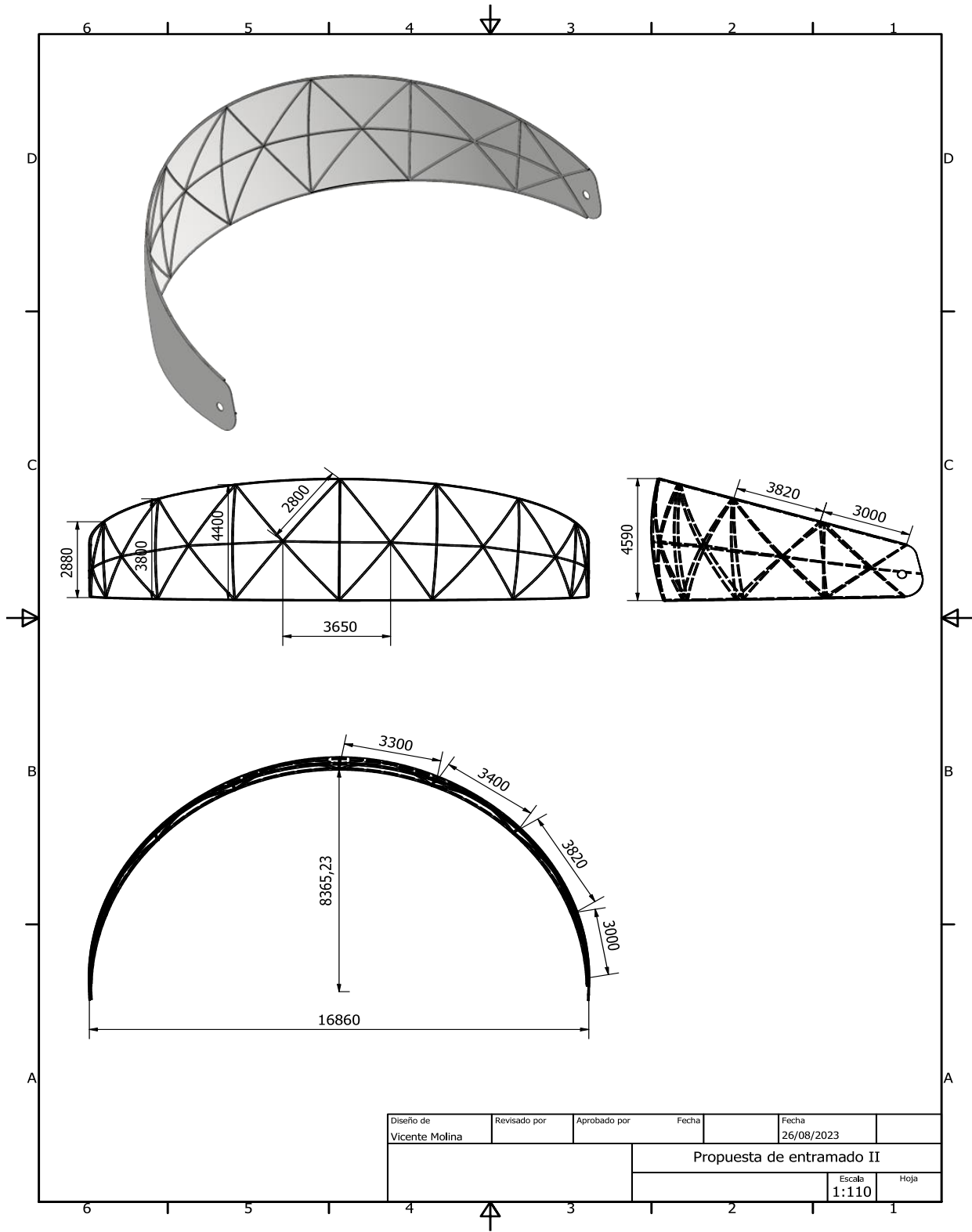


Figura A.6.2: Segunda propuesta de entramado

A.7 Cotizaciones



RUT: 77.660.960.9
 RAZON SOCIAL: ACENOR ACEROS DEL NORTE
 ANTONIO ESCOBAR WILLIAMS 205; CERRILLOS

Teléfono: +56 2 2925 9200
 ventas@acenorchile.com
 www.acenorchile.com
 miércoles, 5 de julio de 2023

Nro de oferta: ACE-964795
 Cliente: CLIENTE FRECUENTE
 RUT: 66666666-6
 Almacen: TALCAHUANO

METODOS DE PAGO										
Pago Id	Param Id	Metodo de pago	Condicion de pago	Monto	Nro Doc	Fecha	Rut titular	Nombre titular		
100	V00	EFFECTIVO	CONTADO	415.875		05-07-2023				
PRODUCTOS										
Items	Cantidad	Código Producto	Descripción Producto	Und	Peso	Precio unitario	Total Venta	Total kilos Nrg.		
1	1	PLC10300030	PLANCHA L/C A36 3.0x1000x3000 MM	u	72	76.647	76.647	72		
2	1	PLC10300040	PLANCHA L/C A36 4.0x1000x3000 MM	u	96	102.196	102.196	96		
3	1	PLC10300050	PLANCHA L/C A36 5.0x1000x3000 MM	u	120	127.745	127.745	120		
4	1	PILAR151580340	PILAR 15X15X3.40 8.0MM	u	6,55	15.070	15.070	7		
5	1	CADENA153092450	CADENA 15X30X4.50 9.2MM	u	12,09	27.816	27.816	12		
(1) TOTAL							349.474	307		
Esta cotización es valido solo por 1 dia							349.474 Total Neto	66.400 IVA	415.874 Total IVA Incluido	

VENDEDOR CARLOS DURAND MONASTERIOS

SUCURSALES:

SERENA - VILLA ALEMANA - SANTIAGO - RANCAGUA - CURICO - TALCA - CONCEPCION
 LOS ANGELES - VALDIVIA - PUERTO MONT - OSORNO

METODOS DE PAGO										
Pago Id	Param Id	Metodo de pago	Condicion de pago	Monto	Nro Doc	Fecha	Rut titular	Nombre titular		
100	V00	EFFECTIVO	CONTADO	350.897		19-08-2023				
PRODUCTOS										
Items	Cantidad	Código Producto	Descripción Producto	Und	Peso	Precio unitario	Total Venta	Total kilos Nrg.		
1	1	ERE2003	TUB RED NEG 2 x 3.0 MM	u	21,24	23.409	23.409	21		
2	1	ERE2002	TUB RED NEG 2 x 2.0 MM	u	14,46	15.936	15.936	14		
3	1	EGCU602	TUB CUAD GA INM 60 x 2.0 MM	u	21,36	36.653	36.653	21		
4	1	EGCU502	TUB CUAD GA INM 50 x 2.0 MM	u	17,58	30.167	30.167	18		
5	1	PGUM12230050	PL LIS ALUZINC 0.5 x1220x3000 mm	u	14,3106	20.945	20.945	14		
6	1	PGUM12230060	PL LIS ALUZINC 0.6 x1220x3000 mm	u	17,1654	24.947	24.947	17		
7	1	PEUGAL15005002	CANAL GA INM 150 x 50 x 2.0 MM	u	22,92	35.718	35.718	23		
8	1	PEUGAL10005002	CANAL GA INM 100 x 50 x 2.0 MM	u	18,24	28.425	28.425	18		
9	1	PLF10300060	PLANCHA L/FRIO 0.6x1000x3000 MM	u	14,4	19.385	19.385	14		
10	1	PLF10300040	PLANCHA L/FRIO 0.4x1000x3000 MM	u	9,6	12.301	12.301	10		
11	1	PLF10300080	PLANCHA L/FRIO 0.8x1000x3000 MM	u	19,2	20.883	20.883	19		
12	1	PLF10300100	PLANCHA L/FRIO 1.0x1000x3000 MM	u	24	26.102	26.102	24		
(1) TOTAL							294.873	214		
Esta cotización es valido solo por 1 dia							294.871 Total Neto	56.025 IVA	350.896 Total IVA Incluido	

Figura A.7.1: Cotización ACENOR

MARIO CASTILLO GARCES E HIJOS SPA
RUT: 79.507.240-3

DISTRIBUIDORA DE REPUESTOS DE MAQUINARIA DE CONSTRUCCION INMOBILIARIA
 CASA MATRIZ: PADRE TADEO 4671 - QUINTA NORMAL
 TELEFONOS: (56-2) 2775 2011 / 2773 7765 / 27728685 - manuel@castilloehijos.cl
 SUCURSAL: JUAN GLASINOVIC 480 GALPON 36 - ANTOFAGASTA
 TELEFONOS: (55) 2232650 - ventas.antofagasta@castilloehijos.cl



Cotización **234892**

Estado Pendiente
 Fecha 28/08/2023

Nombre: MARIO CASTILLO GARCES E HIJOS SPA **R.U.T.:** 79.507.240-3
Dirección: PADRE TADEO 4671
Ciudad: Santiago **Comuna:** Quinta Normal
Contacto: Manuel Duran **Fax:**
Teléfono: 227752011
Glosa: Vicente Antonio Molina Donoso <vmolina2017@udec.cl>

Cantidad	U. Med.	Codigo	Descripción	Valor Un/ MT	Subtotal	Dcto	Total
1.000	UNID	MF12933245	CILINDRO TELESCOPICO 03 ETAPAS 129-3-3245	1,125,000	1,125,000		1,125,000
1.000	UNID	MF16944294	CILINDRO TELESCOPICO 04 ETAPAS 169-4-4294	1,800,000	1,800,000		1,800,000
1.000	UNID	MF19155351	CILINDRO TELESCOPICO 05 ETAPAS 191-5-5351	2,200,000	2,200,000		2,200,000

Vendedor : MANUEL DURAN

Forma de pago : TRANSFERENCIA ELECTR

Validez Cotización : 10 días

Sub Total	5,125,000
Descuento	0
SubTotal	5,125,000
Iva	973,750
Total	6,098,750

Vendedor	Cliente
-----------------	----------------

ESTIMADOS CLIENTES: POR RAZONES DE FUERZA MAYOR (ROBO DE CABLES TELEFONICOS) SOLICITAMOS A UDS. QUE SE CONTACTEN Y SOLICITEN SUS PRODUCTOS POR LOS SIGUIENTES CANALES DE ATENCION:	
Área Aceros •CELULARES N° 932445322 - 950552335 •manuel@castilloehijos.cl •ventas@castilloehijos.cl •ventas2@castilloehijos.cl	Área Sellos •CELULARES N° 934266739 - 933408172 •sellos@castilloehijos.cl •Levantamientosellos@castilloehijos.cl •sellos2@castilloehijos.cl
Suc Antofagasta (clientes zona norte) •CELULARES N° 940430391 •ventas.antofagasta@castilloehijos.cl	

Observaciones
 - Stock sujeto venta previa
 - No se aceptarán devoluciones pasados ocho días de su facturación

Figura A.7.3: Cotización componentes hidráulicos



6061 T6 T651 de la placa de aluminio laminado en caliente de la superficie con acabado pulido

Precio FOB de Referencia ¹

[Conseguir Precio Último >](#)

US\$ 1.000,00 / Tonelada | 3 Montones (Pedido Mínimo)

Acabado de superficie:	Mill Finish
Certificación:	CE, ISO
lugar de origen:	zhengzhou china (continental)
marca:	aluminio signi
tipo:	placa
embalajes:	palets de madera, papel blanco impermeable,

Figura A.7.4: Precio referencial planchas aluminio 6061 T6