



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE PLATAFORMAS ADICIONALES PARA EQUIPOS
COMPLEMENTARIOS DEL RADIOTELESCOPIO LCT**

POR

Néstor Antonio Carrasco Zambrano

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

Profesores Guías:
Dr. Emilio Dufeu Delarze
Dr. Cristian Canales Cárdenas

Octubre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Néstor Antonio Carrasco Zambrano

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

RESUMEN

La presente Memoria de Título busca contribuir significativamente al desarrollo del proyecto Leighton Chajnantor Telescope (LCT) que consiste en el traslado, modificación y puesta a punto de un radiotelescopio ubicado actualmente en la isla de Hawaii, para ser instalado finalmente en el Llano de Chajnantor, desierto de Atacama, Chile. Se busca optimizar el funcionamiento del telescopio, por lo que se realizarán varias modificaciones estructurales necesarias para albergar equipos complementarios tales como compresores, motores, equipos criogénicos, y aparatos para la observación radioastronómica.

El objetivo general de la presente Memoria de Título es diseñar y dimensionar un par de estructuras de plataformas adicionales nasmyt para la instalación de equipos complementarios en el radiotelescopio LCT, considerando solicitaciones externas y de funcionamiento. Estas estructuras deben ser ancladas de manera “colgante a la estructura preexistente”. Los objetivos específicos incluyen determinar restricciones mecánicas y de funcionamiento en la estructura del radiotelescopio LCT, dimensionar alternativas de diseño de plataformas adicionales considerando fabricación nacional, y evaluar mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) estructuras de plataformas que optimicen su desempeño mecánico.

Para el cumplimiento de los objetivos mencionados, se retoman y desarrollan los modelos CAD y de Elementos Finitos (EF) del radiotelescopio LCT elaborados mediante software SpaceClaim y Ansys Mechanical, durante etapas anteriores del Proyecto LCT. Se investigan las restricciones de diseño: operación del radiotelescopio, lista de equipos a instalar, perfiles de vigas disponibles en el mercado nacional, y la norma chilena de diseño estructural bajo cargas de viento. Conociendo la distribución de esfuerzos en los puntos críticos de la estructura preexistente, se determina el peso máximo admisible para las nuevas plataformas y para los equipos complementarios. Definidos los criterios de evaluación, se diseñan varias alternativas de plataformas adicionales. Estos diseño, modelado en elementos finitos de vigas, se optimizan iterativamente mediante Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo (MOGA), tarea que implica compensar objetivos en conflicto. Luego, se filtran los mejores candidatos de diseño y modelan en elementos de placas para alcanzar resultados más realistas, eligiendo un ganador.

Del análisis MOGA se seleccionan varios candidatos que luego son modelados en elementos de placas. Aplicando los criterios de diseño, principalmente el esfuerzo equivalente de Von Mises, se encuentra la estructura óptima de plataforma adicional (AX_Y) para el “lado compresor”, con un peso propio de 591 [kg]. Esta estructura, con un factor de seguridad igual a 2, admite una máxima carga de viento de aproximadamente 40 m/s (en direcciones lateral, frontal o posterior), combinada con un peso máximo de equipos complementarios igual a 900 [kg]. Para el “lado gabinete”, bajo las mismas condiciones de viento, se sugiere instalar la misma estructura de plataforma adicional, pero con un peso máximo de equipos complementarios igual a 600 [kg]. Las plataformas van ancladas de modo colgante, tienen forma de jaula, y sus perfiles estructurales son de aceros ASTM A36 y A270ES de alta soldabilidad, disponibles en catálogo chileno de Aceros Prodalam (vigente al año 2023).

Se concluye la factibilidad de diseño de plataformas nasmyt adicionales cuyas características, de acuerdo a los criterios de diseño, son adecuadas para soportar: las restricciones de operación del radiotelescopio, las condiciones ambientales de carga de viento presentes en el Llano de Chajnantor a 30 m/s, el peso de los equipos complementarios a instalar, y el límite de carga admisible. Estas estructuras son simétricas y optimizan el desempeño mecánico respecto a una larga lista de alternativas de diseño modeladas mediante el Método de Elementos Finitos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
GLOSARIO	x
CAPÍTULO 1	1
Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Estado del arte	1
1.2.1 Diseño general, instrumentación radioastronómica y equipos complementarios	1
1.2.2 Modificaciones del diseño y plataformas adicionales.....	3
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5 Desarrollo de la Hipótesis de trabajo	4
1.5.1 Antecedentes técnicos	4
1.5.2 Simulaciones de elementos finitos del LCT, OVRO y de otros radiotelescopios	5
1.5.3 Hipótesis.....	6
CAPITULO 2.....	7
Marco Teórico.....	7
2.1 Descripción general del proceso de diseño y optimización	7
2.2 Elaboración de la Muestra de Puntos de Diseño (LHS sampling y OSF).....	7
2.3 Análisis de Regresión Múltiple y generación de modelos sustitutos aproximativos	8
2.3.1 Bondad de ajuste	10
2.4 Algoritmo Genético de Optimización Multiobjetivo (MOGA) y generación de candidatos ...	11
2.4.1 Restricciones y espacio de decisión Ω	11
2.4.2 Optimización de múltiples objetivos conflictivos y óptimo de Pareto	11
2.4.3 Descripción general del algoritmo de optimización MOGA	11
2.4.4 Función agregada de costo Φ (función ponderada de aptitud) y ranking.....	12
2.4.5 Selección, Reproducción y Mutación elitista.....	13
2.4.6 Condiciones de inicio, de iteración y detención del MOGA	13

2.4.7	Evaluación de candidatos de la población final mediante FEA.....	13
CAPÍTULO 3.....		14
Metodología y estrategia de modelación		14
3.1	Definición de los criterios de resistencia mecánica.....	14
3.2	Metodología para determinar la máxima carga admisible para el diseño	15
3.3	Metodología para el diseño y optimización de plataformas adicionales.....	16
CAPITULO 4.....		23
Modelo geométrico y de elementos finitos		23
4.1	Descripción general del modelo CAD (estructura existente del LCT)	23
4.2	Modelo de elementos finitos, estructura LCT global	24
4.3	Determinación de masas del LCT (estructura existente).....	25
4.4	Modelo de elementos finitos, plataformas azimutales existentes.....	26
4.5	Modelo de elementos finitos en uniones apernadas críticas para el diseño	27
4.6	Modelo de plataformas adicionales: modelo CAD y de Elementos Finitos.....	30
4.6.1	Modelo CAD de plataformas adicionales	30
4.6.2	Modelo de elementos finitos: prediseño para optimización.....	30
4.6.3	Condiciones de borde y solicitaciones	31
CAPITULO 5.....		33
Análisis de resultados.....		33
5.1	Resultados en la estructura LCT existente	33
5.1.1	Caso 1: estado de esfuerzos en el modelo global, sólo peso propio.	33
5.1.2	Caso 2: estado de esfuerzos en puntos críticos para el diseño, agregando peso adicional	34
5.1.3	Puntos de anclaje para plataformas adicionales.....	39
5.1.4	Factor de seguridad, carga admisible y peso máximo de las plataformas adicionales	40
5.2	Resultados de la optimización de plataformas adicionales	40
5.2.1	Cálculo de la fuerza equivalente del viento	41
5.2.2	Bondad de ajuste, regresión polinomial multivariada.....	41
5.2.3	Análisis de Sensibilidad Local.....	42
5.2.4	Diagrama de Concesiones entre Objetivos de Diseño (Trade-off chart de candidatos) ...	42
5.2.5	Perfiles de los candidatos idealizados mediante método MOGA	44
5.2.6	Perfiles de catálogo nacional que aproximan dimensiones de los candidatos MOGA	44
5.3	Selección de mejores candidatos con perfiles estructurales de catálogo nacional	46
5.3.1	Selección candidatos finalistas y verificación de resultados en elementos de placas.....	46

5.3.2	Análisis de sensibilidad multivariado basado en dimensiones de catálogo. Modelado con elementos de placas.	46
5.3.3	Selección de finalistas: mejores alternativas de diseño en elementos de placas. Valores de catálogo nacional	47
5.4	Alternativa AX_(Y): solución ganadora de plataforma adicional.....	48
5.4.1	Evaluación de mejoras aplicadas sobre el diseño de alternativa ganadora AX	50
5.4.2	Análisis paramétrico del diseño final optimizado AX_(Y). Máximas cargas admisibles	54
5.4.3	Modos de vibrar del diseño final optimizado AX_(Y)	56
CAPÍTULO 6.....		58
Conclusiones y perspectivas		58
6.1	Conclusiones	58
6.2	Perspectivas	59
REFERENCIAS.....		60
ANEXOS		61
Anexo 1. Descripción técnica y dimensional de las piezas que forman el modelo CAD del LCT.....		61
Anexo 2. Planos de detalle de uniones apernadas críticas para el diseño		64
Anexo 3. Convergencia de la solución, contacto friccional en uniones apernadas.....		65
Anexo 4. Esquema de integración Gauss-Legendre, fase de postprocesamiento en EF de vigas.....		65
Anexo 5. Diagrama de Sensibilidad Local entre variables		66
Anexo 6. Diagramas de Concesión entre variables objetivos (trade-off).....		67
Anexo 7. Coeficientes de los polinomios de regresión múltiple que modelan algunos outputs		69
Anexo 8. Curvas de regresión múltiple, pares de variables		70
Anexo 9. Diagramas de flujo del proceso de optimización.....		74
Anexo 10. Preselección de alternativas con dimensiones de catálogo, sobre los entramados de arriostramientos 2, 7 y 11, modelados en elementos de vigas.		75
Anexo 11. Vista posterior del Radiotelescopio CCAT con plataformas nasmyt de 2 niveles		76
Anexo 12. Mallado del modelo AX con elementos finitos de placas		76
Anexo 13. Selección ganador AX_(Y). Mallado en elementos de placas		77
Anexo 14. Acoplamiento de plataformas adicionales al radiotelescopio LCT.		78
Anexo 15. Planos de Conjunto de la Estructura de Plataforma Adicional AX_(Y)		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Radiotelescopio CSO ubicado originalmente en Maunakea (Hawái), previo a su traslado.	2
Figura 2. Modelo CAD corregido del LCT (30°). A) Isométrico posterior. B) Perfil.....	3
Figura 3. Rodamiento axial SKF 29438 E de rodillos para soporte vertical-azimutal [3].....	4
Figura 4. Vista inferior de plataformas laterales y puntos de anclaje para las plataformas adicionales...	4
Figura 5. Esquema básico de una muestra LHS para 2 variables con tamaño de grilla n=10.	7
Figura 6. Esquema conceptual para la elaboración de una muestra OSF	8
Figura 7. Opciones de arriostramientos evaluadas para la plataforma adicional. Vista lateral.	21
Figura 8. Diagrama de flujo de trabajo, proyecto de MT.	22
Figura 9. Plataforma azimutal central (plomo) más extensión trasera (verde)	23
Figura 10. Plataformas azimutal laterales existentes. A) “lado gabinete”. B) “lado compresor”.....	23
Figura 11. Modelo de EF de todo el radiotelescopio.	25
Figura 12. Vista superior del mallado de plataformas azimutales existentes (conjunto central).....	26
Figura 13. Vista inferior isométrica de modelo de EF de plataformas azimut.	27
Figura 14. Malla, contacto virtual entre la cabeza del perno y el vástago mediante ecuaciones MPC ..	27
Figura 15. Malla refinada, contacto sólido-placa, unión apernada en “L” plataforma lateral-trasera	28
Figura 16. Estatus de contactos friccionales (paso 1), cada perno precargado con 15 [kN].....	29
Figura 17. Condiciones de borde para el análisis estático estructural (paso 2) con cargas verticales	29
Figura 18. Malla de la estructura prediseñada en elementos de vigas, para loop de optimización	31
Figura 19. Condiciones de borde del modelo FEM de plataformas adicionales en elementos de vigas	32
Figura 20. Parámetros de vigas HEA y de tubos rectos (columnas y arriostras).	32
Figura 21. Esfuerzo equivalente máximo en apoyos, debido a peso propio del radiotelescopio.....	33
Figura 22. Esfuerzo de corte máximo en el LCT, debido al peso propio del radiotelescopio.	34
Figura 23. Estatus de contactos friccionales (paso 2). Pretensión más carga externa de 1498 [kg]	34
Figura 24. Esfuerzos equivalentes en conjunto central, bajo carga de 1498 [kg] aplicada por lado	35

Figura 25. Desplazamientos totales en conjunto de plataformas azimutales, para carga de 1498 [kg] aplicada en cada lado de la estructura azimutal. Escala amplificada.	36
Figura 26. Esfuerzos de von mises promediados, unión apernada “en L” entre plataformas existentes lateral y trasera, bajo una carga vertical de 1498 [kg] por el lado de “plataforma compresor”.....	36
Figura 27. Esfuerzos de von mises, elemental mean gauss, unión apernada “en L” entre plataformas lateral y trasera, bajo una carga vertical de 1498 [kg] por el lado de “plataforma compresor”.....	37
Figura 28. Esfuerzos de von mises promediados, en detalle del flange, unión plataforma lateral con plataforma central, bajo una carga vertical de 1498 [kg] aplicada en la “plataforma compresor”.	37
Figura 29. Esfuerzos de von mises elemental mean, en detalle del flange que une plataforma lateral con la plataforma central, bajo una carga vertical de 1498 [kg] aplicada sobre la “plataforma compresor”.	38
Figura 30. Esfuerzos de von mises averaged, unión apernada entre plataformas central y trasera, bajo dos cargas de 1498 [kg] aplicadas sobre las plataformas en “lado compresor” y “lado gabinete”.....	38
Figura 31. Esfuerzos de von mises elemental mean, unión apernada entre plataformas central y trasera, bajo dos cargas de 1498 [kg] aplicadas sobre “plataforma compresor” y “plataforma gabinete”.	39
Figura 32. Posibles puntos de anclaje para las plataformas adicionales	39
Figura 33. Diagrama trade-off Primera Frecuencia Natural vs Masa Plataforma	43
Figura 34. Diagrama trade-off Esfuerzo Equivalente vs Primera frecuencia natural	43
Figura 35. Alternativa ganadora AX (inicial). Esfuerzos equivalentes bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N]	49
Figura 36. Diseño AX_(P) con modificación de puerta ancha. Esfuerzos equivalentes bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N]	50
Figura 37. Diseño AX_(S) con modificación de puerta ancha y atiesadores. Esfuerzos equivalentes combinando gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N] ...	51
Figura 38. Diseño AX_(J) con puerta ancha y columnas de perfil C. . Esfuerzos equivalentes combinando gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N] ...	51
Figura 39. Diseño AX_(Y) con puerta ancha, columnas perfil C y atiesadores. Esfuerzos bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) de 7300 [N]	52
Figura 40. Diseño AX_(Y) con puerta ancha, columnas perfil C y atiesadores. Esfuerzos bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento frontal (eje x, 30 m/s) de 3730 [N]	52
Figura 41. Mallado del diseño recomendado AX_(Y), con indicador de calidad “skewness”	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Detalle de equipos complementarios a montar en el radiotelescopio [2]	2
Tabla 2. Masa y momentos de inercia de área del OVRO (Wang y Woody [4])	5
Tabla 3. Modos de vibrar de radiotelescopio OVRO (Wang y Woody [4])	5
Tabla 4. Esfuerzos equivalentes de von Mises en radiotelescopio LCT (Retamal [11]).	6
Tabla 5. Modos de vibrar y frecuencias naturales del radiotelescopio LCT (Retamal [11]).	6
Tabla 6. Propiedades mecánicas de materiales estructurales del LCT, y para la plataforma adicional..	14
Tabla 7. Composición química de algunos aceros usados en el proyecto LCT	14
Tabla 8. Dominio de las variables input independientes, matriz de diseño [X]	18
Tabla 9. Relaciones restrictivas de diseño que acotan el espacio de decisión Ω	19
Tabla 10. Prioridad de los objetivos outputs para el diseño de plataformas adicionales	20
Tabla 11. Objetivos, límites e importancia de las variables outputs (peso relativo).....	20
Tabla 12. Geometría y tipos de elementos finitos utilizados	24
Tabla 13. Masas que componen las plataformas azimutales, calculadas con Ansys Mechanical	25
Tabla 14. Masa de los componentes del LCT, calculadas con Ansys Mechanical.....	26
Tabla 15. Configuración de los contactos involucrados en las uniones apernadas.....	30
Tabla 16. Esfuerzos máximos en punto crítico correspondiente al radio de filete de perfiles en L, unión apernada. Análisis paramétrico de cargas sobre la “plataforma lado compresor”.....	35
Tabla 17. Factor de seguridad, esfuerzo admisible y carga máxima admisible por lado sobre el LCT .	40
Tabla 18. Condiciones de inicio y detención de una ejecución exitosa del algoritmo genético MOGA	40
Tabla 19. Parámetros estimados para cálculo de la presión del viento, según norma NCh432-of210 ...	41
Tabla 20. Cálculo de la fuerza equivalente del viento, en 2 direcciones sobre la estructura de plataforma adicional, aplicando norma NCh432-of2010.	41
Tabla 21. Indicadores de bondad de ajuste del modelo de regresión para algunas variables objetivo ...	41
Tabla 22. Variables input más influyentes vs sensibilidad de variables output.....	42
Tabla 23. Perfiles de vigas de candidatos ideales MOGA.....	44

Tabla 24. Preselección de alternativas con dimensiones de catálogo, sobre arriostramientos 5, 9 y 12.	45
Tabla 25. Comparación de resultados de alternativas de diseño filtradas, aproximando a dimensiones de catálogo: modelado en vigas (V9) vs modelado en placas (P9)	46
Tabla 26. Análisis de sensibilidad, sobre arriostramiento P9, en elementos de placas	47
Tabla 27. Resultados de finalistas modelados en EF de placas. Sólo gravedad y peso extra	48
Tabla 28. Resultados de finalistas modelados en elementos finitos de placas. Cargas combinadas de gravedad, peso extra y fuerza equivalente de viento lateral	48
Tabla 29. Perfiles estructurales de la solución ganadora “plataforma adicional AX (inicial)”	49
Tabla 30. Evaluación de modificaciones al diseño ganador AX. Caso 1: cargas combinadas de viento lateral, gravedad y peso extra.....	53
Tabla 31. Evaluación de modificaciones al diseño ganador AX. Caso 2: cargas combinadas de viento frontal, gravedad y peso extra	53
Tabla 32. Perfiles estructurales del diseño final y modificado “AX_(Y)”	55
Tabla 33. Análisis paramétrico de cargas combinadas sobre estructura AX_(Y). Viento lateral.....	55
Tabla 34. Análisis paramétrico de cargas combinadas sobre estructura AX_(Y). Viento frontal.....	56
Tabla 35. Modos de vibrar relevantes en términos del factor de participación de masa efectiva.....	57

GLOSARIO

A_f : área proyectada de la plataforma adicional [m^2]

E : módulo de elasticidad de Young [GPa]

F : fuerza [N]

FKN: penalización, factor de rigidez del resorte de contacto en la dirección normal

FTOLN : tolerancia de penetración del contacto entre elementos finitos en la dirección normal

f_1 : primera frecuencia modal [Hz]

f_n : n-ésima frecuencia modal [Hz]

$f_j(\vec{x})$: j-ésima función escalar multivariable

$g_i(\vec{x}), h_i(\vec{x})$: restricciones para la optimización

G : módulo de corte [MPa]; factor de ráfaga

I : momento de inercia de área [mm^4]; factor de importancia.

I, C : perfiles estructurales de vigas, y perfil de canal, respectivamente

k : rigidez del resorte virtual [$N mm^{-1}$]; coeficientes para cálculo de fuerza del viento

K^* : rigidez equivalente de la estructura mecánica [$N mm^{-1}$]

m, d : tubos rectangulares de columnas, y de arriostras, respectivamente

M_{platf} : masa de la plataforma estructural diseñada [kg]

N_j, M_q : objetivos normalizados para los parámetros input y output

N_s : factor de seguridad

p5, p9, p12 : modelos de plataformas simulados mediante elementos de placas

Q : carga vertical total aplicada sobre alguna plataforma, o sobre el LCT [kg]

q : carga puntual o distribuida [kg]; presión del viento [$N m^{-2}$]

R^2 : coeficiente de determinación

$RECM$: raíz del error cuadrático medio

t : espesor del perfil, sección transversal [mm]

V : velocidad del viento [$m s^{-1}$]

v_5, v_9, v_{12} : modelos de plataformas simulados mediante elementos de vigas

W_1, W_3 : ancho y altura de la sección transversal del perfil estructural [mm], respectivamente

w_j, w_q : peso asignado a cada objetivo de optimización

x : valor observado mediante MEF en la variable input j-ésima en el punto n-ésimo.

x : penetración del elemento finito [mm]

x_n : variable independiente input en el punto n-ésimo

x_t, y_t : valor objetivo (target) mayor o menor respecto a valor de referencia, acotado al intervalo dado

x_u, x_l : límites superior e inferior para la variable input j-ésima

$[X]$: matriz de diseño, matriz de datos de las variables input j-ésimas generados mediante MEF considerando todos los puntos de diseño, espacio de diseño

\vec{x}_n^* : vector solución n-ésimo

y : valor observado mediante MEF en la variable output q-ésima en el punto n-ésimo

$\{y\}$: vector de datos de la variable output q-ésima, generado mediante MEF

\hat{y} : valor predicho de la variable output obtenida mediante el modelo sustituto

Z : altura [m]

Símbolos griegos

$\beta_j, \beta_k, \beta_{jj}, \beta_{jk}$: coeficientes incógnitas de los términos del polinomio de regresión, modelo sustituto

δ : variación pequeña; desplazamiento [mm]

Δ : diferencia

ε_n : error del modelo de regresión en el punto n-ésimo, para la variable output q-ésima

λ : multiplicador de Lagrange en la formulación de contacto

ρ : densidad del material [$kg\ m^{-3}$]

σ_0 : esfuerzo de fluencia [MPa]

σ_r : esfuerzo de ruptura [MPa]

$\bar{\sigma}$: esfuerzo equivalente de Von Mises [MPa]

σ_3 : mínimo esfuerzo principal [MPa]

$\tau_{m\acute{a}x}$: máximo esfuerzo de corte [MPa]

Φ : función global de costo con pesos ponderados, función de aptitud.

Ω : espacio de diseño sometido a restricciones, espacio de soluciones permisibles

Subíndices

adm : admisible

j, k : índices para las variables input

lat : lateral

LCT : referido a que actúa sobre la estructura existente del radiotelescopio

máx : máximo

min : mínimo

n : punto de diseño n-ésimo

N : total de puntos de la muestra

q : índices para las variables output

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La astronomía es una de las principales actividades científicas realizadas en nuestro país. Chile, por su geografía, posee locaciones con condiciones ideales de clima y cielo que permiten la observación astronómica, siendo un polo astronómico en estrecha colaboración con planteles académicos de nuestro país, levantando en conjunto proyectos de observación astronómica de altísima relevancia.

Una de estas locaciones corresponde al Desierto de Atacama, la cual destaca por su elevada altitud, bajísima humedad, cielos despejados, y prácticamente nula contaminación lumínica y de ondas de radio provenientes desde las ciudades. En este desierto, a 5100 metros de altura se encuentra el Llano de Chajnantor, lugar donde se ejecutan varios proyectos de suma relevancia. El más mediático por su tamaño y resultados corresponde a ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array). Otro proyecto importante es el APEX (Atacama Pathfinder Experiment). Y el que nos ocupa en el presente trabajo, el LCT (Leighton Chajnantor Telescope), proyecto de colaboración entre Caltech, la Universidad Normal de Shanghai y la Universidad de Concepción.

El presente trabajo de Memoria de Título se inserta en el marco del traslado del radiotelescopio CSO (Caltech Submillimeter Observatory) desde la isla de Hawaii hacia el Llano de Chajnantor, para su adaptación, montaje y operación. Su propósito será observar ondas de radio submilimétricas de 200 micras de amplitud incluyendo algunas ondas milimétricas. Este telescopio fue diseñado y operado por Caltech desde 1987 hasta 2015 en la isla de Hawaii.

1.2 Estado del arte

El interés inicial por proyectos como el LCT data desde los años 60 cuando ya se realizaba astronomía infrarroja y de ondas de radio submilimétricas [1]. Mediante estas técnicas se pudo comenzar a reconocer la importancia de objetos astronómicos tales como: estrellas, nubes interestelares, cúmulos globulares, pulsares, quasares, así como otros fenómenos de alta energía provenientes de los centros de galaxias. Este tipo de radioastronomía permite conocer una amplia variedad de fenómenos cósmicos.

1.2.1 Diseño general, instrumentación radioastronómica y equipos complementarios

En la figura 1 se muestra el emplazamiento original, en Hawaii, del radiotelescopio CSO dentro de su domo giratorio. En la figura 2 se muestra el modelo geométrico CAD del Leighton Chajnantor Telescope (LCT) con su antena a 30° de elevación. Siguiendo a [1], el diseño del LCT-CSO pertenece a la familia de radio telescopios Cassegrain, los que consisten de un reflector primario cóncavo-parabólico de gran tamaño que recibe las ondas de radio, las que son reflejadas hacia un reflector secundario convexo-hiperbólico relativamente pequeño, y finalmente reflejadas hacia su destino final, el Foco Cassegrain.



Figura 1. Radiotelescopio CSO ubicado originalmente en Maunakea (Hawái), previo a su traslado. [2]

Sobre las plataformas azimutales y cercano al foco cassegrain dentro de un gabinete, se montan los equipos de instrumentación para el procesamiento de las señales capturadas con longitudes de onda entre 2 mm y 350 μm : cámaras, bolómetro, espectrógrafos, receivers, interferómetro y radiómetro. Otro equipo fundamental es el sistema de control DSOS que ajusta por enfriamiento la elongación del BUS Honey-Combs. La lista de equipos complementarios [2] incluye chillers, compresores de helio y equipos criogénicos, los cuales son actuadores del sistema DSOS y cuyo volumen y masa representan cargas concentradas relevantes para la estructura. En la tabla 1 se muestra el catastro de equipos complementarios, sin embargo, esta lista está afecta a actualizaciones y reemplazos.

Tabla 1. Detalle de equipos complementarios a montar en el radiotelescopio [2]

Equipo	Cant.	Tipo	Dimensiones (fondo x ancho x alto) [cm]	Peso [kg]
Cryomech CP1000	3	Compresor criogénico de Helio (pulse tube)	61 x 58 x 91	238
Cryomech CP289C	1	Compresor criogénico de Helio (pulse tube)	48 x 46 x 56	153,5
CTI- Cryogenics HC4	2	Compresor criogénico de Helio (GM)	50 x 50 x 43	63,5
Rack DSOS	3	Sistema de control del BUS	Se estima 50 x 50 x 200	-
Chillers	4	Sistema de enfriamiento	Se estima 150 x 250 x 150	> 200
Suma Peso Equipos				> 1795

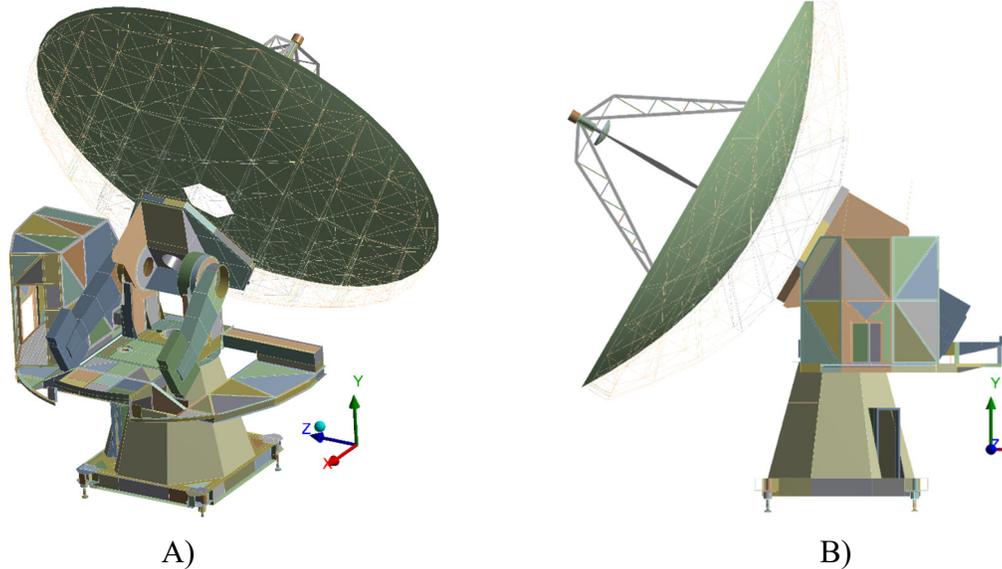


Figura 2. Modelo CAD corregido del LCT (30°). A) Isométrico posterior. B) Perfil

1.2.2 Modificaciones del diseño y plataformas adicionales

Uno de los aspectos técnicos relevantes del proyecto LCT consiste en eliminar el domo existente, con la finalidad de aumentar la velocidad de rotación en el eje azimutal, reducir la potencia requerida de los motores, disminuir el consumo de energía asociado y alcanzar tiempos de respuesta más breves para el posicionamiento del radiotelescopio y de su mecanismo de seguimiento de objetos. Esta modificación crea la necesidad de trasladar los equipos complementarios montados en las paredes del domo, hacia nuevas estructuras mecánicas donde irán anclados, denominadas “Plataformas Adicionales”.

Conocidos los motivos del proyecto y antecedentes generales respecto al LCT, a continuación se enuncian los objetivos generales y específicos del presente proyecto de memoria de título.

1.3 Objetivo general

Realizar diseño mecánico y dimensionamiento de plataformas adicionales para la instalación de equipos complementarios en radiotelescopio LCT, considerando cargas externas, peso propio y solicitaciones de funcionamiento.

1.4 Objetivos específicos

1. Determinar restricciones mecánicas y de funcionamiento en la estructura preexistente del radiotelescopio LCT.
2. Dimensionar alternativas para diseño de plataformas adicionales, considerando fabricación en territorio nacional.
3. Evaluar integridad estructural de las alternativas propuestas mediante análisis estático-estructural y modal utilizando el método de elementos finitos.

4. Seleccionar alternativa que optimice la estructura de plataformas en cuanto a: resistencia mecánica, peso propio, operación, carga admisible y factibilidad de construcción.

1.5 Desarrollo de la Hipótesis de trabajo

1.5.1 Antecedentes técnicos

La estructura que rota sobre el eje azimutal descansa sobre un único rodamiento axial SKF E-29438 de rodillos (figura 3). De acuerdo a Catálogo SKF [3], el rodamiento posee una capacidad de carga estática de 8000 [kN], una capacidad de carga dinámica de 2850 [kN], y un límite a la fatiga de 765 [kN]. Como el peso aproximado de la parte superior del LCT es de aprox. 23 [Ton] equivalente a una carga estática vertical de 225 [kN], el rodamiento axial tiene capacidad para aceptar 55 [Ton] de peso extra como carga estática, no siendo un obstáculo para el diseño de las nuevas estructuras.



Figura 3. Rodamiento axial SKF 29438 E de rodillos para soporte vertical-azimutal [3]

Se propone que las plataformas adicionales se conecten de forma colgante a la parte inferior de las plataformas laterales nasmyth preexistentes del radiotelescopio (figura 4). Como el LCT dispondrá de mayor espacio libre en esa zona (figura 2), es la propuesta más factible desde un punto de vista operacional (en el anexo 11 se muestra un radiotelescopio con plataformas nasmyt de dos niveles). En la figura 4 se muestran fotografías de la vista inferior de las plataformas laterales existentes, con sus vigas de perfil “C”. En cuadros rojos se destacan los posibles puntos de anclaje para las plataformas adicionales, suficientemente alejados de las uniones soldadas para evitar concentrar los esfuerzos.



a)



b)

Figura 4. Vista inferior de plataformas laterales y puntos de anclaje para las plataformas adicionales.

1.5.2 Simulaciones de elementos finitos del LCT, OVRO y de otros radiotelescopios

Wang y Woody [4] realizaron un análisis modal mediante elementos finitos del radiotelescopio OVRO usando Ansys APDL. El OVRO es un radiotelescopio cuyo diseño base es igual al LCT, pero con diferencias en algunas plataformas azimutales. Se simuló con acero estándar, módulo de Young de 211 GPa, coeficiente de poisson de 0,3 y densidad 7850 kg/m^3 . La masa del primario fue reemplazada por 99 masas puntuales de 20 kg. Sus resultados con el primario a 90° , se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Masa y momentos de inercia de área del OVRO (Wang y Woody [4])

Estructura	Masa [kg]	Ixx [mm^4]	Iyy [mm^4]	Izz [mm^4]
Reflector primario	1980	-	-	-
BUS entramado de barras	5743	37305	37305	67229
Partes rotatorias eje elevación	18036	110340	122810	85493
Partes rotatorias eje azimuth	24860	137530	152180	102900
Base y carpa TeePe	6270	10765	10766	12793
Modelo total	31130	219250	233830	115760

Tabla 3. Modos de vibrar de radiotelescopio OVRO (Wang y Woody [4])

Modo de vibrar	Frecuencia natural [Hz]
1	5,312
2	6,720
3	6,833
4	8,703
5	10,517
6	12,769
7	13,409
8	13,485
9	14,335
10	18,999
11	19,958

Respeto al LCT, se dispone del modelo desarrollado por Retamal [11]. Fue dibujado en SpaceClaim definiendo las superficies medias de las piezas que lo componen, además de otras piezas modeladas como cuerpos sólidos o cuerpos de líneas. El modelo de EF desarrollado en Ansys Mechanical, incluye variadas inclinaciones del reflector primario (30° , 45° , 60° , 90°). Las solicitaciones corresponden a gravedad, carga de nieve y presión del viento. Los resultados obtenidos por el autor se muestran en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Esfuerzos equivalentes de von Mises en radiotelescopio LCT (Retamal [11]).

Inclinación de la antena	Esfuerzos de von Mises [MPa]					
	Gravedad		Presión viento		Gravedad y Presión	
	Apoyos	Base	Apoyos	Base	Apoyos	Base
30°	326	128	764,2	61,8	998	132
45°	306,4	217	284	44,5	456	217
60°	461,5	192	148	85,5	498	189,7
90°	360,6	105,4	61,4	11,9	346	105

Tabla 5. Modos de vibrar y frecuencias naturales del radiotelescopio LCT (Retamal [11]).

Modo de vibrar	Frecuencias naturales [Hz]			
	30°	45°	60°	90°
1	3,5422	3,6885	3,5741	3,3024
2	3,922	3,9628	3,8936	3,6341
3	5,3717	4,5503	4,0284	3,7308
4	5,9281	4,8437	4,094	5,8091
5	5,9878	6,0515	4,2493	6,1032
6	8,3498	6,3773	5,0084	6,6363
7	10,578	7,2959	9,2416	10,207
8	10,795	7,5394	9,4726	10,42
9	10,897	8,3685	9,9233	10,498
10	10,953	9,8268	10,414	10,508
11	11,172	10,471	10,457	10,903

1.5.3 Hipótesis

Según los antecedentes ya mostrados, se espera que la estructura del radiotelescopio LCT permita anclar dos plataformas adicionales en proceso de diseño, conservando la integridad estructural de todos los componentes dentro de los límites establecidos en el presente proyecto, tal que se cumpla lo siguiente:

- Esfuerzos equivalentes inferiores al esfuerzo de fluencia $\sigma_0 = 250 [MPa]$, bajo la sollicitación combinada de fuerza lateral del viento a 30 m/s más el peso de los equipos complementarios.
- Una primera frecuencia modal de las plataformas adicionales, mayor a $f = 10 [Hz]$.
- Una carga admisible máxima de equipos complementarios igual a $M = 1,5 [Ton]$.
- Los esfuerzos máximos deberían producirse en las uniones apernadas que unen las plataformas azimutales laterales preexistentes con la plataforma central del LCT.

CAPITULO 2

Marco Teórico

2.1 Descripción general del proceso de diseño y optimización

Durante el diseño, optimización y selección de las alternativas de plataformas adicionales, se asume en la modelación un compromiso entre exactitud versus costo computacional. Se inicia con un modelo formado por elementos de vigas. A continuación, se generan modelos sustitutos de regresión múltiple que relacionen funcionalmente las variables input (dimensiones geométricas de los perfiles, masas aplicadas) con las variables output (esfuerzos, desplazamientos, frecuencias modales, peso de la estructura). Pasando a aplicar algoritmos genéticos sobre los modelos sustitutos, se optimizan valores ideales, los que son aproximados a valores reales presentes en catálogos nacionales. Por último, seleccionados los mejores candidatos con sus dimensiones de catálogo, se reevalúan mediante nuevos modelos de EF a base de elementos de placas, para precisar resultados.

2.2 Elaboración de la Muestra de Puntos de Diseño (LHS sampling y OSF)

Se escogen las variables de diseño inputs (independientes) y outputs (dependientes), generando una *Matriz de Diseño [X]*. Se tiene así una muestra donde cada punto corresponde a un estudio de caso a resolver mediante el método de elementos finitos, trabajando exclusivamente con elementos de vigas. Se realizan dos análisis: estático estructural y modal. Esta fase se denomina “Diseño de Experimentos” [9].

Para explicar cómo se realiza el muestreo, supongamos un hipotético universo compuesto de $p=2$ variables input (abscisa y ordenada, respectivamente) (ver figura 5), muestreado mediante el método LHS (“Latin Hypercube Sampling”) [9]. Como puede observarse, cada variable se divide en $n=10$ tramos, formándose una grilla de tamaño $n^p = 100$. Para cada variable, se asigna en cada tramo un único par-ordenado escogido de forma pseudoaleatoria, según la distribución estadística de los datos (Normal, Weibull, etc.); entonces la muestra queda con $N=10$ puntos. Ahora bien, si se tratase de $p=16$ variables input, se generaría una grilla de tamaño $n^p = 10^{16}$, pero con una muestra generada heterogéneamente distribuida y poco representativa.

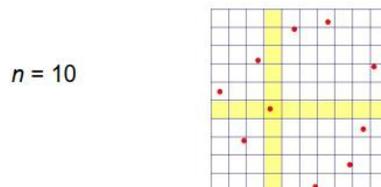


Figura 5. Esquema básico de una muestra LHS para 2 variables con tamaño de grilla $n=10$.

Para lograr un muestreo representativo y homogéneo, se realiza un “Optimal Space Filling” (OSF). Como muestra la figura 6, a partir del LHS se va agregando pseudoaleatoriamente puntos de diseño que llenen

los vacíos del espacio, de forma iterativa y maximizando las distancias mínimas entre los puntos [9]. Se logra un enorme ahorro de costo computacional al evitar un diseño de experimentos factorial (asignando a todas las casillas de la grilla un punto de diseño). Así, la muestra de diseño tiene un tamaño $N_{OSF} \ll N_{factorial}$, y mejora notablemente la bondad de ajuste de los próximos modelos sustitutos.

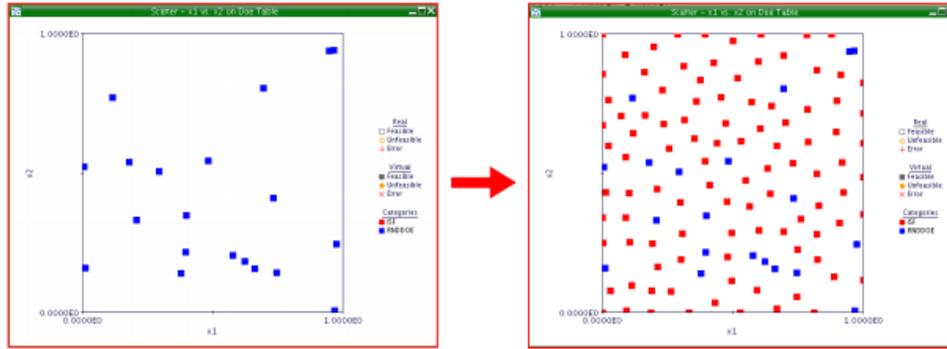


Figura 6. Esquema conceptual para la elaboración de una muestra OSF

2.3 Análisis de Regresión Múltiple y generación de modelos sustitutos aproximativos

Es virtualmente imposible, por costo computacional y tiempo, evaluar mediante elementos finitos miles de puntos de diseño que representen todas las posibilidades geométricas dentro la matriz de diseño $[X]$, hasta encontrar algunos puntos que cumplan los múltiples objetivos de optimización. Por esta razón, a partir de los datos muestrales generados en la anterior fase de Diseño de Experimentos (tamaño de la muestra $N = 289$), se realiza un análisis de regresión multivariado para construir modelos sustitutos que aproximen el comportamiento mecánico del prototipo de plataforma adicional, dentro de un dominio continuo y acotado. Los límites del dominio están definidos por el diseñador.

De forma general, el valor output predicho \hat{y} en el punto i -ésimo mediante un modelo de regresión polinomial simple de segundo grado corresponde a (1)

$$\hat{y} = f(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 \quad (1)$$

Siguiendo a [9], mediante el módulo “Ansys Surface Response”, para cada variable output q -ésima (y_q) se realiza un análisis de regresión múltiple, relacionando cada vector de datos $\{y\}_q$ como función de la matriz de datos $[X]$, es decir, como función de todos los vectores de datos input $\{x_j\}$. Se asumen modelos polinomiales full-cuadráticos que contengan términos constantes (β_0), lineales ($\beta_j x_j$), cuadráticos puros ($\beta_{jj} x_j^2$), y cuadráticos cruzados ($\beta_{jk} x_j x_k$). Se genera un modelo sustituto $y_q = f_q(\vec{x}) + \varepsilon$, función de múltiples variables independientes \vec{x} , con error ε . Por ejemplo, el valor en el punto i -ésimo predicho para la primera frecuencia modal (\hat{f}_1) se calcula mediante (2):

$$\hat{f}_1 = \beta_0 + \sum_j \beta_j x_j + \sum_{j,k} \beta_{jk} x_j x_k + \sum_j \beta_{jj} x_j^2 \quad (2)$$

El valor obtenido mediante MEF en el punto i -ésimo para la primera frecuencia modal estaría dado por $f_1 = \hat{f}_1 + \varepsilon$, donde ε corresponde al error aleatorio del modelo sustituto con respecto al modelo de elementos finitos.

Así se dispone de una muestra de N puntos de diseño n -ésimos con sus respectivos valores output e input más los puntos de refinamiento, con p variables independientes, donde j, k designan a variables input linealmente independientes. Por cada variable output q -ésima se tienen como incógnitas m coeficientes β_j que acompañan a los términos del polinomio de regresión buscado, donde $N \geq m$, $N \geq 2p$. Luego, como plantea [9], para cada variable output q -ésima, su modelo de regresión polinomial se determina resolviendo un sistema de N ecuaciones matricial de la forma $y_n = f(\vec{x}_i) + \varepsilon_i$ para las m incógnitas β_j , como expresa la ecuación (3)

$$\{y\} = \{f(\vec{x})\} + \{\varepsilon\} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,j} & \cdots & x_{1,j}^2 & \cdots & x_{1,j}x_{1,k} \\ 1 & x_{2,j} & \cdots & x_{2,j}^2 & \cdots & x_{2,j}x_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,j} & \cdots & x_{n,j}^2 & \cdots & x_{n,j}x_{n,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{N,j} & \cdots & x_{N,j}^2 & \cdots & x_{N,j}x_{N,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_j \\ \vdots \\ \beta_{jj} \\ \vdots \\ \beta_{jk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

Empleando notación abreviada:

$$\{y\} = [\mathbf{X}^{**}] \{\beta\} + \{\varepsilon\} \quad (4)$$

El problema en esta etapa consiste en encontrar el vector de coeficientes $\{\beta\}$ que entregue una buena aproximación de los valores $\{y\}$ en función de la matriz de datos input $[\mathbf{X}]$, tal que se cumpla (5) y (6)

$$\{y\} \approx \{\hat{y}\} = \{f(\vec{x})\} \quad (5)$$

$$\{\varepsilon\} = \{y\} - \{\hat{y}\} \approx 0 \quad (6)$$

Como se explica en [9], por cada variable $\{y\}$ se busca minimizar la Suma de los Cuadrados de los Errores (SSE) de la expresión (7) considerando el total de puntos de la muestra (ε_n), lo que se expresa la ecuación (8). Para lograrlo, hay que determinar los coeficientes β_j que minimizan el SSE, resolviendo la derivada expresada en (9).

$$SSE = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_n)^2 = \sum_{i=1}^N (y_n - f(\mathbf{x}_n, \boldsymbol{\beta}))^2 \quad (7)$$

$$\text{Min}(SSE) = \min \left[\sum_{i=1}^N (y_n - f(\mathbf{x}_n, \boldsymbol{\beta}))^2 \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial SSE}{\partial \beta_j} = -2 \sum_{n=1}^N \left[(y_n - f(\mathbf{x}_n, \boldsymbol{\beta})) * \frac{\partial}{\partial \beta_j} f(\mathbf{x}_n, \boldsymbol{\beta}) \right] = 0 \quad , \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

Al resolver (9), el vector de coeficientes de regresión β_j se obtiene resolviendo la ecuación (10):

$$\{\beta\} = ([\mathbf{X}]^T [\mathbf{X}])^{-1} [\mathbf{X}]^T \{y\} \quad (10)$$

De esta forma, se obtiene para cada variable output y_q un polinomio multivariable que es función del vector de variables input de diseño \vec{x} en el punto i , y que minimiza el error ε .

2.3.1 Bondad de ajuste

Los modelos sustitutos obtenidos tienen como propósito realizar interpolaciones válidas entre los puntos de diseño de la muestra, para la fase siguiente de optimización multiobjetivo. Mediante indicadores de *bondad de ajuste* se verifica la calidad de los modelos sustitutos para aproximar las relaciones inputs-outputs dentro de todo el espacio de diseño. Algunos de estos indicadores usados por Ansys [9] son: el Coeficiente de Determinación R^2 (ecuación (11)) y el Error Absoluto Medio Relativo (RAAE, ecuación (12)). Donde el mejor valor de R^2 es 1 y el mejor valor del RAAE es 0%. Notar que la validez de estos modelos sustitutos está acotada al problema en particular, no son extrapolables a otras geometrías o rangos fuera del presente estudio.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_n^N (y_n - \hat{y}_n)^2}{\sum_n^N (y_n - \bar{y}_n)^2} \quad (11)$$

$$RAAE = \frac{1}{N \sigma_y} \sum_n^N |y_n - \hat{y}_n| \quad (12)$$

2.4 Algoritmo Genético de Optimización Multiobjetivo (MOGA) y generación de candidatos

2.4.1 Restricciones y espacio de decisión Ω

Para orientar el proceso de optimización hacia resultados concordantes con los objetivos de diseño, se deben imponer un conjunto de restricciones a las variables input, circunscribiendo así las soluciones \vec{x}^* dentro de un *Espacio de Decisión* Ω acotado y definido por algunas relaciones entre las variables input.

2.4.2 Optimización de múltiples objetivos conflictivos y óptimo de Pareto

Los problemas de optimización multivariable tienden a presentar conflictos entre las variables objetivo, es decir, cuando se maximiza el desempeño en alguna variable output, empeora otra variable. Por ejemplo, al minimizar el peso propio de una estructura cualquiera, si se disminuye el área resistente de sus perfiles estructurales, se puede debilitar la resistencia mecánica de la misma.

En consecuencia, no existe una única solución dominante que optimice todos los objetivos de manera ideal, sino que existe un conjunto de soluciones compensadas entre sí, denominadas *Pareto Óptimas*. Una solución \vec{x}_n^* es *Pareto Óptima* cuando no existe otra solución \vec{x}_m^* factible que mejore un objetivo y_q sin simultáneamente empeorar otro objetivo y_r . Este tipo de soluciones \vec{x}^* no-dominantes conforman el *Frente de Pareto*. Luego, utilizando el módulo “Surface Response Optimization” de Ansys [9], el problema de optimización multiobjetivo consiste en encontrar un conjunto final de vectores solución \vec{x}^* compensados, donde $\vec{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]$, $\vec{x}^* \in \Omega$, $\Omega \in \mathbf{X}$, tal que minimicen la función vectorial $\mathbf{F}(\vec{x})$, según la ecuación (13):

$$\min(\mathbf{F}(\vec{x}), \vec{x}^* \in \Omega) = [f_1(\vec{x}^*), f_2(\vec{x}^*), \dots, f_k(\vec{x}^*)] \quad (13)$$

sujeto a las restricciones: $g_i(\vec{x}^*) \leq 0, i = \{1, \dots, m\}$, $h_j(\vec{x}^*) = 0, j = \{1, \dots, p\}$, $x_l \leq x^* \leq x_u$

donde Ω es el espacio de decisión de las variables input (ver tabla 14), \vec{x}^* es un vector de decisión formado por las n-variables input x_j relevantes por cada polinomio multivariable, f_k es la k-ésima función objetivo (modelos sustitutos), con $m + p$ restricciones. La lista de candidatos que optimizan pares de objetivos conflictivos es representada gráficamente en el *Diagrama de Pareto*, y es en última instancia tarea del diseñador elegir estos candidatos atendiendo a la prioridad de los objetivos de diseño.

2.4.3 Descripción general del algoritmo de optimización MOGA

Para llevar a cabo el proceso de optimización de Pareto, se utiliza el Algoritmo Genético Multi-Objetivo (MOGA), disponible dentro del módulo Ansys “Surface Response Optimization” [9]. Los algoritmos genéticos están basados en el proceso de selección natural y ocupan herramientas tales como selección elitista, reproducción cruzada, herencia y mutación, haciendo evolucionar una muestra inicial de puntos de diseño a través de varias generaciones de puntos solución, hasta alcanzar los objetivos de optimización.

Seguendo a [9], el MOGA comienza con una población inicial aleatoria de puntos de diseño, llamados “individuos”, cuyos outputs se calculan mediante los Modelos Sustitutos de Regresión Múltiple. Luego, mediante una función de costo Φ la cual asigna un peso relativo a cada criterio de optimización según la prioridad definida por el diseñador, se evalúa y rankea a todos los “individuos” de la generación de acuerdo a su aptitud. Así se realiza una *selección elitista* para que solo se reproduzcan los mejores puntos de diseño, aplicando dos operadores genéticos para engendrar a la nueva generación: entrecruzamiento reproductivo, y mutación aleatoria individual. Este proceso anterior de ranqueo, selección elitista y reproducción, se repite iterativamente durante varias generaciones, hasta alcanzar, según *Eficiencia de Pareto*, óptimos globales que alcancen los múltiples objetivos de optimización. Este conjunto de soluciones se denomina *Fronteras de Pareto*. En caso de fracaso, el algoritmo finaliza al cumplirse determinadas condiciones de detención.

2.4.4 Función agregada de costo Φ (función ponderada de aptitud) y ranking

La función agregada de costo Φ , ecuación (14), evalúa a los puntos de diseño de cada generación, combinando las variables objetivos outputs considerando sus respectivos niveles de importancia asignados, junto a las restricciones inputs [9]:

$$\Phi = \sum_{q=1}^m w_q M_q + \sum_{j=1}^n w_j N_j \quad (14)$$

donde M_q, N_j corresponden a los objetivos y restricciones normalizados para las variables outputs (y) e inputs (x), respectivamente. Desarrollando, se obtiene ecuación (15)

$$\Phi = \sum_{q=1}^m w_q \left(\frac{|y_t - y|}{y_{max} - y_{min}} \right)_q + \sum_{j=1}^n w_j \left(\frac{|x_t - x|}{x_u - x_l} \right)_j \quad (15)$$

Según [9], los pesos w_q, w_j asignados por el diseñador, ponderan cada objetivo y restricción normalizados, de acuerdo a los siguientes valores:

$$w_q = w_j = \begin{cases} 1.00 & : \text{mayor importancia} \\ 0.66 & : \text{importancia intermedia (por defecto)} \\ 0.33 & : \text{menor importancia} \end{cases}$$

Dado los valores normalizados de M_q, N_j , se observa que a menor valor de la función de costo Φ , más se acercan las características del individuo a los valores objetivo, es decir, mejor resulta ser el punto de diseño. Los individuos de cada población se ordenan en un *ranking* donde los primeros lugares son seleccionados de forma elitista. Estos individuos seleccionados serán los padres que se reproducirán y/o mutarán para generar su población descendiente.

2.4.5 Selección, Reproducción y Mutación elitista

Como plantea [9], la evolución de la muestra ocurre mediante el operador de entrecruzamiento que combina linealmente un par de cromosomas de una selección de padres en cada atributo, mediante las proporciones " a " y " $(1 - a)$ ", y que es heredado a los hijos, según las expresiones (16) y (17). La mutación, aplicando una pequeña variación δ de la distribución polinomial, se obtiene de (18).

$$Hijo1 = a \cdot Padre1 + (1 - a) \cdot Madre1 \quad (16)$$

$$Hijo2 = (1 - a) \cdot Padre1 + a \cdot Madre1 \quad (17)$$

$$Hijo3 = Padre1 + (\text{limite superior} - \text{limite inferior}) \cdot \delta \quad (18)$$

2.4.6 Condiciones de inicio, de iteración y detención del MOGA

El diseñador introduce condiciones de partida MOGA, que son el tamaño de la población inicial, el dominio y recorrido de cada variable, y las relaciones restrictivas entre las variables input.

Así mismo, el diseñador define condiciones de iteración y de detención. Estas son: el número máximo de iteraciones, el tamaño de población en cada iteración, y el máximo porcentaje de Pareto permitido (por ejemplo, la conocida "regla 80/20"). También el diseñador cuantifica los objetivos de optimización para cada variable dependiente.

2.4.7 Evaluación de candidatos de la población final mediante FEA

De la población final, el algoritmo MOGA ofrece al diseñador una selección de los mejores individuos (puntos de diseño), que pertenecen a la primera y segunda frontera de Pareto. Aplicando análisis estático estructural y modal modelándolos en EF de vigas, se comprueba y evalúa el desempeño mecánico de estos candidatos. A partir de acá, es tarea del diseñador escoger los puntos de diseño finalistas, priorizando algunas de las variables output. Además, resulta prudente verificar estos puntos de diseño finalistas modelándolos en elementos finitos de placas para obtener resultados más confiables.

CAPÍTULO 3

Metodología y estrategia de modelación

En la figura 8 se muestra un diagrama de flujo del trabajo a realizar. A continuación, se describen los pasos de la metodología, para alcanzar los objetivos planteados al final del capítulo 1.

3.1 Definición de los criterios de resistencia mecánica

1. Definición de criterios para la evaluación de los esfuerzos

El LCT está construido en acero estructural ASTM A36. El reflector primario y el gabinete están contruidos en aleación de aluminio 6061. Los pernos son de acero ASTM A325. La estructura de plataformas adicionales se proyecta en acero estructural A36 y A270ES, este último material definido según [10] bajo la Norma NCh203-Of2006. En la tabla 6 se detallan las propiedades de estos materiales.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de materiales estructurales del LCT, y para la plataforma adicional

Material	σ_0 [MPa]	σ_r [MPa]	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν
Acero ASTM A36	250	460	200	7850	0,3
Aluminio 6061 T-6	270	310	69	2770	0,33
Acero A325	634	827	200	7850	0,3
Acero A270ES	270	410 a 510	200	7850	0,3

La composición química de los aceros A36 y A270ES se compara en la tabla 7. La designación ES indica que el acero es para uso estructural (E), y que es de soldabilidad garantizada (S), según [10].

Tabla 7. Composición química de algunos aceros usados en el proyecto LCT

Grado del Acero	C	Mn	P, máx	S, máx	Si	%C _{eq}
ASTM A36	≤ 0,26	≤ 1,45	0,040	0,050	-	0,52
A270ES	≤ 0,23	≤ 1,25	0,040	0,050		0,48

Se fija un factor de seguridad N_s igual a 2 que englobe los aspectos no considerados durante el presente diseño que pudiesen disminuir la resistencia mecánica del diseño. Así, el esfuerzo admisible normal σ_{adm} y el esfuerzo admisible en corte τ_{adm} quedan definidos mediante las expresiones (19) y (20).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_0}{N_s} = 125 [MPa] \quad (19)$$

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_0}{N_s} = \frac{\sigma_0}{2 N_s} = 62,5 [MPa] \quad (20)$$

Los criterios de falla a aplicar son la energía de distorsión máxima definida por el esfuerzo equivalente de Von Mises, y el esfuerzo cortante máximo, que en término de los esfuerzos principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, se expresan en las inecuaciones (21) y (22):

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \sigma_{adm} \quad (21)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \tau_{adm} \quad (22)$$

Las cargas permisibles se debiesen ajustar a las normas chilenas NCh432 de carga de viento, NCh3171 estructural y NCh2369 antisísmica. En el presente estudio sólo se incorpora la NCh432.

3.2 Metodología para determinar la máxima carga admisible para el diseño

2. Revisión de la literatura y del modelo CAD preexistente

Se revisa el modelo de cuerpos sólidos del radiotelescopio OVRO provisto por Caltech, que es la base para elaborar el modelo CAD y de EF desarrollado previamente por Retamal, M. [11]. Este último modelo se incorpora para el presente trabajo de diseño de plataformas adicionales.

3. Dibujo de geometrías faltantes

Se inspeccionan los planos de detalle CSO [8] de las plataformas laterales, central y trasera, y de otras piezas asociadas. Estas piezas, que se muestran en las figuras 9 y 10, se dibujan en software *SpaceClaim* mediante las superficies medias de las vigas y planchas que las componen.

4. Ensamblaje de componentes del LCT y análisis estático-estructural mediante elementos finitos

El preprocesamiento se realiza mediante los softwares *Ansys Workbench* y *Mechanical*. El modelo resultante corresponde al desarrollado por Retamal [11] más las actualizaciones de componentes y de mallas alcanzadas en el presente trabajo. Se define la estrategia de mallado más adecuada, considerando:

- a) Refinado en regiones pequeñas y de esfuerzos críticos. Mallado grueso de componentes que experimentan bajos esfuerzos y sólo ejercen carga de peso.
- b) Tipos de EF: elementos de placas y cáscaras, elementos sólidos, elementos de vigas.

Respecto al Procesamiento, mediante Ansys Mechanical se realizan los análisis *estático estructural* y *modal*, sometiendo al modelo global LCT existente a las siguientes solicitaciones:

- Peso propio de la estructura existente, incluyendo el componente gabinete.
- Peso de las plataformas adicionales simulado como fuerza distribuida (variable discreta).
- Peso de los equipos complementarios como masas puntuales y distribuidas (variables discretas).

Conocida la distribución de esfuerzos, se encuentran los puntos críticos de máximos esfuerzos equivalentes y de máximo corte en la estructura existente del LCT, determinando así las máximas cargas admisibles por los lados izquierdo y derecho del radiotelescopio, esto se expresa en (23) y (24):

$$M_{plataforma\ adicional} + M_{equipos\ complem\ 1} \leq Q_{adm\ lado\ compresor} \quad (23)$$

$$M_{plataforma\ adicional} + M_{equipos\ complem\ 2} + M_{gabinete} \leq Q_{adm\ lado\ gabinete} \quad (24)$$

A partir del catastro de equipos (tabla 1) se estima en primera instancia que $M_{equipos\ complem} \approx 1800$ [kg].

La condición (23) se aplica para el diseño en el “lado de compresores”. La condición (24) se aplica para el diseño en el “lado del gabinete”. El gabinete tiene un peso estimado de 300 [kg]. Además, se buscan las regiones de bajos esfuerzos que sirvan como puntos de anclaje para las plataformas adicionales.

3.3 Metodología para el diseño y optimización de plataformas adicionales

5. Aplicación de fuerza equivalente de viento sobre plataformas adicionales

Siguiendo la Norma NCh432-Of2010, capítulo “Diseño bajo cargas de viento en otras estructuras” [5], la fuerza horizontal equivalente F_V que ejerce el viento sobre la estructura en proceso de diseño está determinada por: la velocidad del viento; las condiciones topográficas en el Llano de Chajnantor; y la geometría de la plataforma adicional. Esta fuerza se calcula mediante las expresiones (25), (26) y (27):

$$F_V = q_z \cdot G \cdot C_f \cdot A_f \quad [N] \quad (25)$$

$$q_z = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I \quad [N/m^2] \quad (26)$$

$$K_z = 2,01 \cdot \left(\frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (27)$$

donde: z es la altura de la estructura medida desde el nivel del suelo; z_g es la altura nominal de la capa límite atmosférica; α es el exponente de la ley de potencia de la velocidad de ráfaga; q_z es la presión del viento a la altura z ; G es el factor de ráfaga; C_f es un coeficiente de fuerza; A_f es el área proyectada de la estructura; V es la velocidad media básica del viento; I es el factor de importancia de la estructura; K_z es el coeficiente de exposición al viento a una altura z ; K_{zt} es el factor topográfico; y K_d es el factor de direccionalidad del viento.

6. Prediseño de las plataformas adicionales

Se requiere que las plataformas adicionales se ubiquen justo por debajo de las plataformas laterales preexistentes (ver figuras 4, 10, 13 y anexo 14), colgadas y unidas rígidamente mediante pernos a las aletas inferiores de las vigas perimetrales (ver figura 4). El conjunto debe rotar solidariamente al eje azimutal, procurando un huelgo suficiente respecto al componente *teepe* para evitar colisión entre componentes (ver anexos 1 y 14). El diseño está limitado por los esfuerzos admisibles ubicados en las zonas críticas para el diseño, por consiguiente, la masa de la nueva estructura y de los equipos complementarios a agregar debe satisfacer las condiciones ya expresadas en (23) y (24).

Por razones teórico-prácticas abordadas en el capítulo 2, el modelo CAD inicial de plataformas adicionales se prediseña usando cuerpos de líneas. Para la estructura nueva, se definen ocho entramados de arriostramientos (ver figura 7), evaluando cuales de estos son más adecuadas para alcanzar los objetivos establecidos. En fases posteriores de diseño se incorpora el modelo CAD en placas.

7. Optimización multiobjetivo MOGA de la estructura diseñada de plataformas adicionales

Un esquema del proceso de optimización se muestra en el Anexo 9. Se inicia construyendo una *Muestra de Puntos de Diseño* constituida por variaciones dimensionales de los perfiles de vigas que conforman el prediseño de plataformas adicionales, tal que represente el universo de combinaciones posibles. Cada *punto de diseño* se simula con elementos finitos de vigas aplicándosele análisis estático estructural y modal, sometido a carga lateral y vertical. Con estos resultados, vía *Análisis de Regresión Múltiple*, se elaboran *Modelos Sustitutos* que relacionen los valores input y output de la muestra, aplicando a continuación *Algoritmos Genéticos* hasta encontrar un grupo de candidatos que cumpla con los objetivos de diseño según Eficiencia de Pareto. Las etapas del proceso de optimización son:

- I. Elaboración de la Muestra LHS (OSF) o Matriz de Puntos de Diseño [**X**] para su simulación en elementos finitos de vigas (módulo Ansys Design of Experiments).
- II. Análisis de regresión múltiple y generación de modelos sustitutos aproximativos (módulo Ansys Response Surface).
- III. Aplicación de Algoritmo Genético de Optimización Multiobjetivo (MOGA) para determinar candidatos ideales (módulo Ansys Response Surface Optimization). Exportación de planilla *.csv

Los parámetros o variables independientes (inputs) durante el proceso de optimización son:

- Dimensiones de las vigas perimetrales y de carga: espesores, ancho de aletas, altura de almas.

- Dimensiones de la sección transversal de columnas y arriostras: anchos y espesores.
- Número y orientación de los arriostramientos (en diagonal, cruzados en “X”, en “V”).
- Peso de los equipos complementarios, aplicado como cargas puntuales y distribuida.
- Fuerza de viento equivalente, calculado según la norma NCh432-Of2010 (valor constante).

La muestra o Matriz de Diseño **[X]** contiene $N=289$ puntos de diseño, a partir de $p=16$ inputs correspondientes a las dimensiones geométricas de los perfiles estructurales usados por cada modelo (ver figura 19), más las cargas aplicadas. El dominio de las variables input se indica en la tabla 8.

Tabla 8. Dominio de las variables input independientes, matriz de diseño **[X]**

Categoría/perfil	Variable Input	Código Ansys	Límite inferior	Límite superior
Carga	puntual excéntrica [kg]	-	40	450
	distribuida uniforme [kg]	-	500	2800
Viga perimetral I (H)	ancho aleta [mm]	I_W1	50	250
	altura alma [mm]	I_W3	70	250
	espesor aleta [mm]	I_t1	3	20
	espesor alma [mm]	I_t3	3	20
Columna Tubo rectangular	ancho1 [mm]	m_TR_W1	30	150
	ancho2 [mm]	m_TR_W2	30	150
	espesor [mm]	m_TR_t	1	15
Viga de carga I (H)	ancho aleta [mm]	I2_W1	50	250
	altura alma [mm]	I2_W3	50	250
	espesor aleta [mm]	I2_t1	3	20
	espesor alma [mm]	I2_t3	3	20
Arriostra Tubo rectangular	ancho1 [mm]	d_TR_W1	20	150
	ancho2 [mm]	d_TR_W2	20	150
	espesor [mm]	d_TR_t	1	10

En la tabla 9 se muestran las restricciones entre las variables inputs que configuran el espacio de decisión Ω , subconjunto de la Matriz **[X]**. En general, todas las dimensiones de los perfiles estructurales deben guardar relaciones de proporcionalidad cercanas a los perfiles reales disponibles en los catálogos nacionales. Por ejemplo, a los disponibles en el Catálogo de Aceros Prodalum (Beckaert) [14].

Tabla 9. Relaciones restrictivas de diseño que acotan el espacio de decisión Ω

Viga perimetral, ancho de aleta	\leq	Viga perimetral, altura del alma
Viga perimetral, espesor de aleta	\geq	Viga perimetral, espesor de alma
Columna tubo recto, ancho1	\leq	Columna tubo recto, ancho2
Viga de carga, espesor de aleta	\geq	Viga de carga, espesor de alma
Viga perimetral, ancho de aleta	\geq	Columna tubo recto, ancho2
Viga perimetral, altura del alma	\geq	Viga de carga, altura de alma
Viga perimetral, ancho de aleta	\geq	Arriestra tubo recto, ancho2
Columna tubo recto, ancho2	\geq	Arriestra tubo recto, ancho2
Columna tubo recto, ancho1	\geq	Arriestra tubo recto, ancho1
Arriestra tubo recto, ancho1	\leq	Arriestra tubo recto, ancho2
Carga distribuida	\geq	1000 [kg]
Carga puntual excéntrica	\geq	80 [kg]
Total carga aplicada	\leq	3000 [kg]

Las variables outputs escogidas para la estructura de plataforma adicional son:

- Máximo esfuerzo equivalente de von Mises ($\bar{\sigma}_{max}$)
- Mínimo esfuerzo principal mínimo ($\sigma_{3,min}$)
- Primera Frecuencia Modal (f_1)
- Suma de cargas aplicadas por lado sobre el LCT ($Q_{lat,LCT}$)
- Peso propio de la Plataforma Adicional (M_{platf})
- Desplazamiento total (δ_T)
- Desplazamiento lateral en la dirección Z (δ_z)

Los objetivos de optimización (outputs) para la estructura de plataformas adicionales son:

- a) Minimizar M_{platf}
- b) Maximizar peso disponible para los equipos complementarios.
- c) Minimizar $\bar{\sigma}_{max}$. Al menos cumplir que: $\bar{\sigma}_{max} < \sigma_{adm}$ bajo las solicitaciones ya señaladas.
- d) Conservar un margen de resistencia mecánica para soportar eventuales cargas horizontales por efecto de la rotación del telescopio, y de movimientos sísmicos.
- e) Minimizar δ_z
- f) Obtener una f_1 de las plataformas, incorporando la masa de los equipos complementarios, que sea significativamente mayor a la f_1 del LCT = 3,57 [Hz], según indican [7] y [11].

El problema de optimización de la estructura de plataforma adicional consiste de múltiples variables objetivo. Sin embargo, se observa que varios de estos objetivos presentan conflictos entre sí:

- De acuerdo a la definición de frecuencia natural $f_1 = \sqrt{K^*/M^*}$, resulta evidente que al aumentar el peso de equipos complementarios, disminuye la frecuencia modal de la estructura.
- Para *Minimizar el peso propio* se requiere disminuir la cantidad de material utilizado en la estructura diseñada, lo cual puede *disminuir la resistencia* de la plataforma adicional.
- *Maximizar carga aplicada versus minimizar esfuerzos*.

Por lo tanto, según se indica en la tabla 10, se priorizan algunos de los objetivos de diseño. En la tabla 11 se muestran los principales objetivos de optimización definidos para el algoritmo genético MOGA, junto a los valores límites, y los pesos w_q asignados según prioridad, dentro de la función de costo Φ .

Tabla 10. Prioridad de los objetivos outputs para el diseño de plataformas adicionales

Prioridad	Objetivos outputs para plataformas adicionales
1°	Maximizar primera frecuencia modal
2°	Minimizar peso propio
3°	Minimizar esfuerzo equivalente máximo
4°	Maximizar carga aplicada
5°	Minimizar desplazamiento lateral

Tabla 11. Objetivos, límites e importancia de las variables outputs (peso relativo)

Output	Objetivo	Límite inferior	Límite superior	Peso importancia
$\bar{\sigma}_{max}$	Minimizar	0	100	Mayor (1,00)
Masa de arriostras	-	-	200	intermedio (0,66)
Masa de columnas	-	-	130	intermedio (0,66)
Masa vigas de carga	Minimizar	-	110	intermedio (0,66)
Masa vigas perimetrales	-	-	260	intermedio (0,66)
M_{platf}	Minimizar	-	550	Mayor (1,00)
$Q_{lat,LCT}$	-	0	3000	intermedio (0,66)
f_1	Maximizar	12	-	Mayor (1,00)

8. Selección de perfiles estructurales reales desde catálogos nacionales

Se elabora un código Matlab para buscar, dentro de catálogos de fabricantes nacionales, perfiles de vigas que aproximen los valores ideales de los candidatos MOGA obtenidos. Se elige el **Catálogo de Aceros Prodalam (Beckaert)** por su amplia variedad de perfiles [14]. Las etapas de este proceso son:

- IV. Procesamiento en MATLAB de planilla *.csv con los candidatos MOGA. Elaboración de Código Matlab que compara las dimensiones ideales con planilla de catálogo nacional *Prodalam*, localizando y seleccionando los perfiles comerciales que mejor aproximan los candidatos MOGA. Exportación de la selección a planilla *dp1.xlsx (Matlab + Excel).
- V. Importación de planilla *dp1.xlsx hacia Ansys Workbench. Las dimensiones de los perfiles comerciales seleccionados, se introducen sobre 8 alternativas de arriostramientos, estas se muestran en la figura 7. A las combinaciones se les aplica un Análisis Estático-Estructural y Modal mediante elementos de vigas. Exportación de planilla *dp2.xlsx (Workbench)
- VI. Importación de planilla *dp2.xlsx a Excel con los resultados del análisis estático estructural y modal. Elaboración de ranking de las alternativas en base a criterios objetivos. Filtrado y selección de las mejores alternativas de diseño con valores de catálogo (Excel).

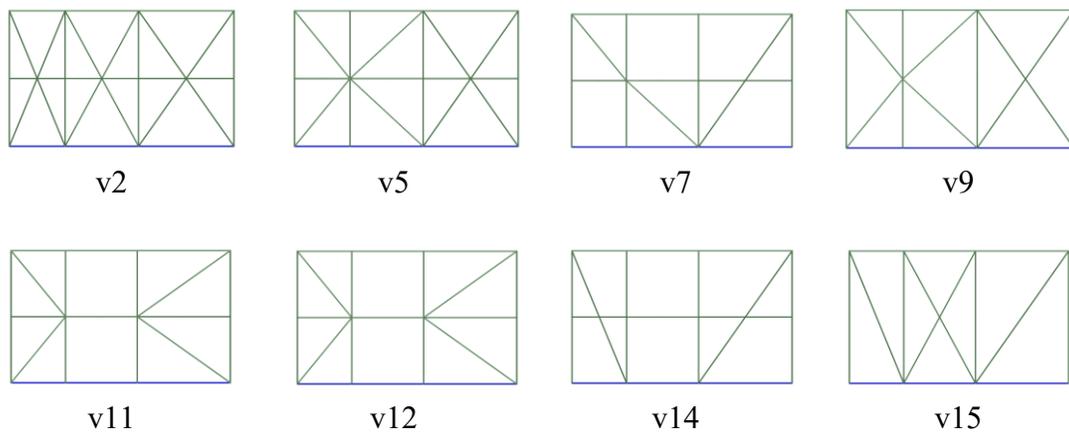


Figura 7. Opciones de arriostramientos evaluadas para la plataforma adicional. Vista lateral.

9. Verificación de alternativas ganadoras modelandolas en elementos de placas y perfeccionamiento

- VII. A partir de los resultados previos, se elige el entramado de arriostramiento con mejor desempeño mecánico. Sobre ese entramado, y usando elementos de placas, se modelan las mejores alternativas de perfiles de catálogo, realizándose análisis estático-estructural y modal, para así obtener resultados más exactos en los puntos críticos de la estructura diseñada.
- VIII. En caso de no cumplir con los objetivos, se realiza un análisis de sensibilidad variando los espesores de estas alternativas reales y/o intercambiando los perfiles de los candidatos anteriores.
- IX. Selección de los finalistas, en base a analisis estático-estructural y modal en elementos de placas.
- X. Elección de plataforma adicional ganadora y modificaciones para elevar su resistencia mecánica.
- XI. A la alternativa ganadora de plataforma adicional, se le aplica un análisis modal, evaluando sus 20 primeros modos de vibrar. Se identifican los modos relevantes en términos de masa efectiva.

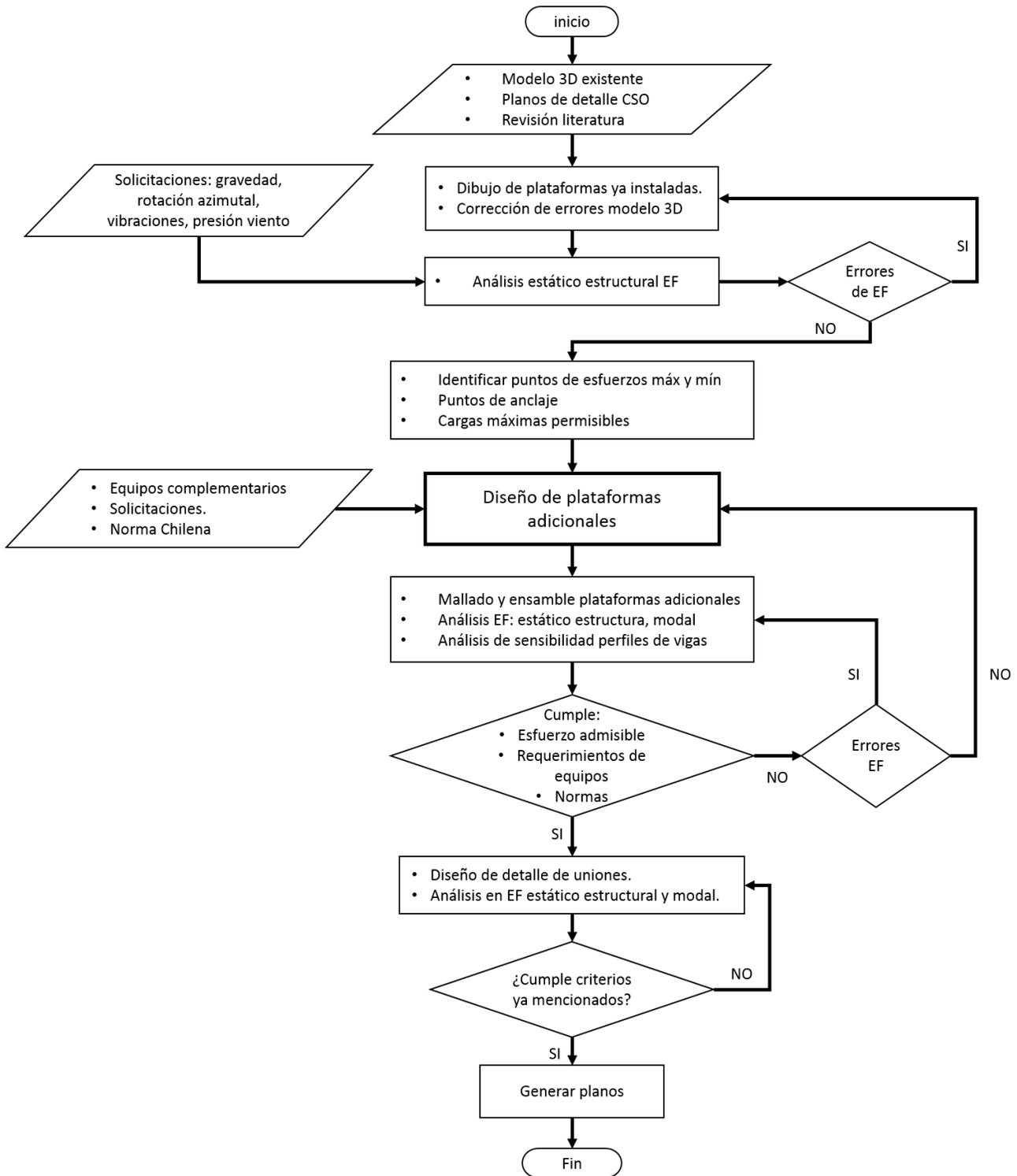


Figura 8. Diagrama de flujo de trabajo, proyecto de MT.

CAPITULO 4

Modelo geométrico y de elementos finitos

4.1 Descripción general del modelo CAD (estructura existente del LCT)

Básicamente, el LCT está formado por tres conjuntos de componentes estructurales:

- Conjunto superior: reflectores, feedlegs, barras para soporte y curvatura del reflector (standoffs y DSOS), eje de elevación, rodamientos, plataforma de elevación, brazos y contrapesos
- Conjunto central: plataforma central azimuthal y su extensión trasera, plataformas nasmyth laterales, gabinete, anillos de soporte; plataformas adicionales (a diseñar).
- Conjunto inferior: estructura base y sus apoyos, rodamiento axial, eje cónico azimuthal y su engranaje, soporte radial- lateral *teepe*.

En las figuras 9 y 10 se muestran algunos componentes del conjunto central que fueron dibujadas durante el presente proyecto. Una descripción técnica extensa de los componentes se incluye en el Anexo 1.

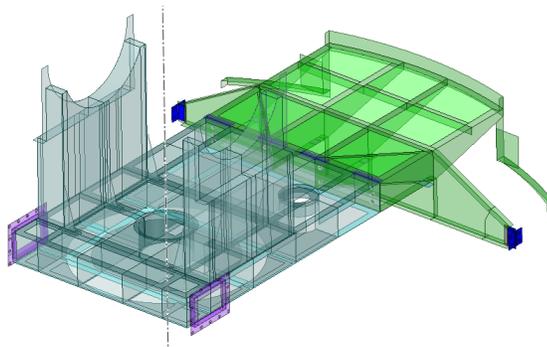


Figura 9. Plataforma azimuthal central (plomo) más extensión trasera (verde)

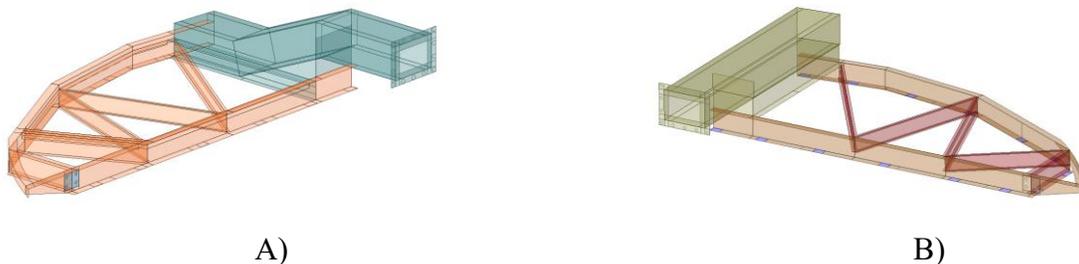


Figura 10. Plataformas azimuthal laterales existentes. A) "lado gabinete". B) "lado compresor".

En la mayoría de casos simulados en este estudio, los modelos de elementos finitos (FEM) son generados a partir de los componentes estructurales mallados separadamente, principalmente con elementos de placas y cáscaras. Algunos componentes incluyen elementos de vigas o de volumen. El detalle de los elementos utilizados por pieza se muestra en la tabla 12. Las conexiones entre mallas se realizan usando la herramienta *contactos bonded* de Ansys Mechanical, formando mallas no-conformes en las interfaces entre piezas. Esa estrategia no se utiliza en las uniones apernadas críticas para el diseño.

En un contacto *bonded* las regiones unidas no permiten ni separación ni deslizamiento, generándose una solución lineal en la interface. La formulación utilizada es *MPC (Multi Point Constriction)*, vale decir, ecuaciones que restringen el desplazamiento entre los elementos conectados [12].

Tabla 12. Geometría y tipos de elementos finitos utilizados

Pieza	Tipo de elemento
Conjunto de plataformas azimutales	placas cuadrangulares (2D)
Unión apernada entre plataformas	vigas(3D); placas ; hexaedros(3D)
Anillos, rodamientos, apoyos, contrapesos	hexaedros (3D)
BUS, rodillos, engrane azimut	vigas (3D)
Tee-pe, eje cónico, Dish, LNB	cáscaras: triangulares y cuadrangulares (2D)
Plataforma elevación, brazos contrapesos	placas: cuadrangulares (2D)

4.2 Modelo de elementos finitos, estructura LCT global

Primero, se simula la estructura existente del LCT, sólo sometido a gravedad. Las condiciones de borde del LCT son cuatro apoyos fijados rígidamente al suelo. Se genera una malla gruesa en el conjunto superior del radiotelescopio dado que sólo interesa transmitir su peso propio sobre la estructura; para el reflector primario se utilizó elementos de arista entre {150-1100} [mm]. Para el resto de la estructura central e inferior, se genera una malla con EF de arista entre {50-29} [mm]. Se reduce así el número de EF desde 388014 a 111829, acortando el análisis estático-estructural del modelo global LCT hasta $t=2,5$ minutos. En la figura 11 se muestra el modelo completo de mallas ensambladas del LCT, correspondiente a la estructura existente e instalada (dentro del domo en Hawaii) sin innovaciones de diseño. Respecto a la calidad de los elementos finitos, se aplica el indicador *Skewness* el cual mide en una escala de 0 a 1 la distorsión de los EF respecto al elemento ideal. Donde 0 corresponde al elemento ideal y que entrega resultados altamente confiables. Elementos con skewness por sobre los 0,85 introducen errores y resultados menos confiables. La gran mayoría de elementos presenta un valor menor a 0,1.

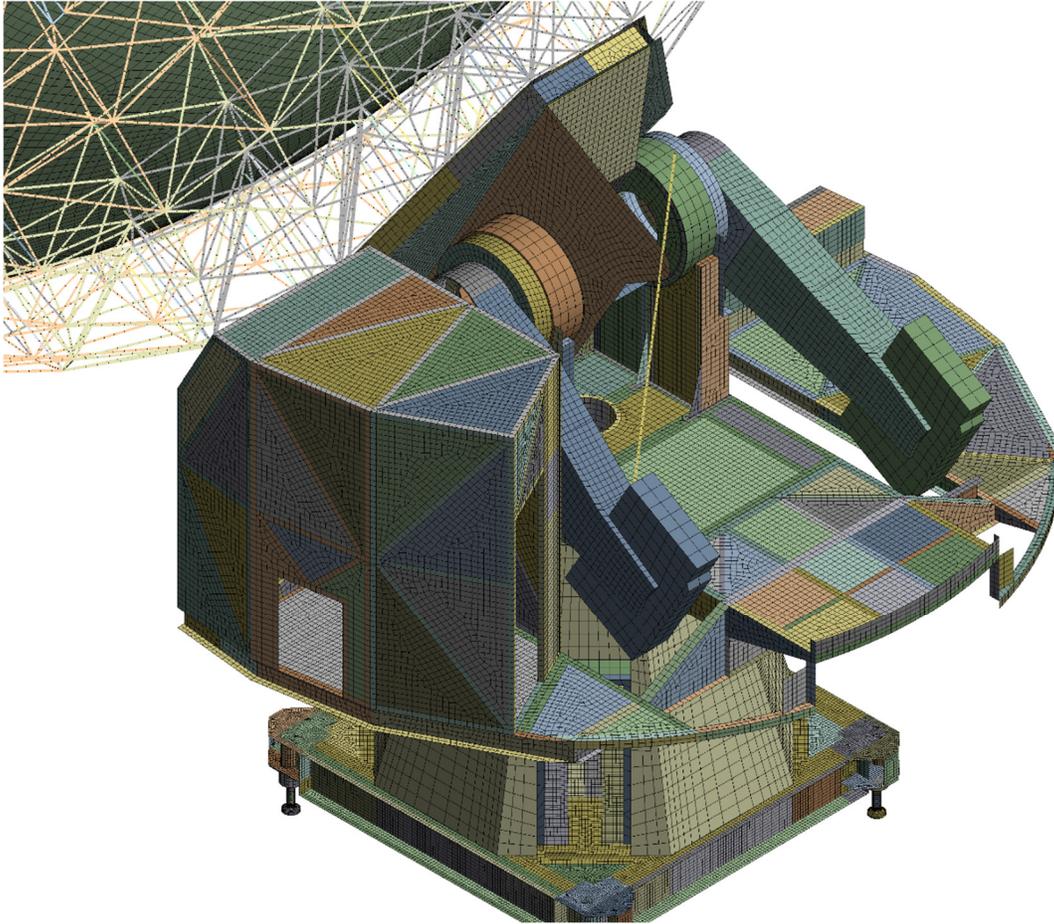


Figura 11. Modelo de EF de todo el radiotelescopio.

4.3 Determinación de masas del LCT (estructura existente)

Mediante Ansys Mechanical se determinan las masas de las distintas piezas (tablas 13 y 14), los valores obtenidos son similares a los señalados por Wang y Woody [4] al modelar el OVRO con Ansys APDL.

Tabla 13. Masas que componen las plataformas azimutales, calculadas con Ansys Mechanical

Plataforma	Masa [kg]
Azimutal central	2916
Extensión trasera	619
Plataforma para compresores	738
Plataforma para gabinete Rec Room	806
Gabinete Rec Room	294
Total plataformas azimut	5374

Tabla 14. Masa de los componentes del LCT, calculadas con Ansys Mechanical.

Estructura	Masa [kg]
Reflector primario (dish)	1373
Reflector secundario	225
BUS	3058
Plataforma elevación	2840
Brazos de contrapesos y rodamientos	2736
Contrapesos	5192
Tornillo elevación	82
Plataformas azimutales	5374
Eje cónico azimutal	1722
TeePe	3363
Base y apoyos	4077
TOTAL	31020

4.4 Modelo de elementos finitos, plataformas azimutales existentes

La malla del conjunto central del LCT se genera usando elementos de placas y cáscaras. Las plataformas laterales se ensamblan mediante *uniones apertadas no lineales*. En las figuras 12 y 13 se muestra este mallado. En la mayoría de estas mallas el elemento finito tiene un tamaño de arista entre {50-29} [mm]. En las regiones críticas se refina la malla hasta tener elementos con un tamaño de arista entre {5-1} [mm].

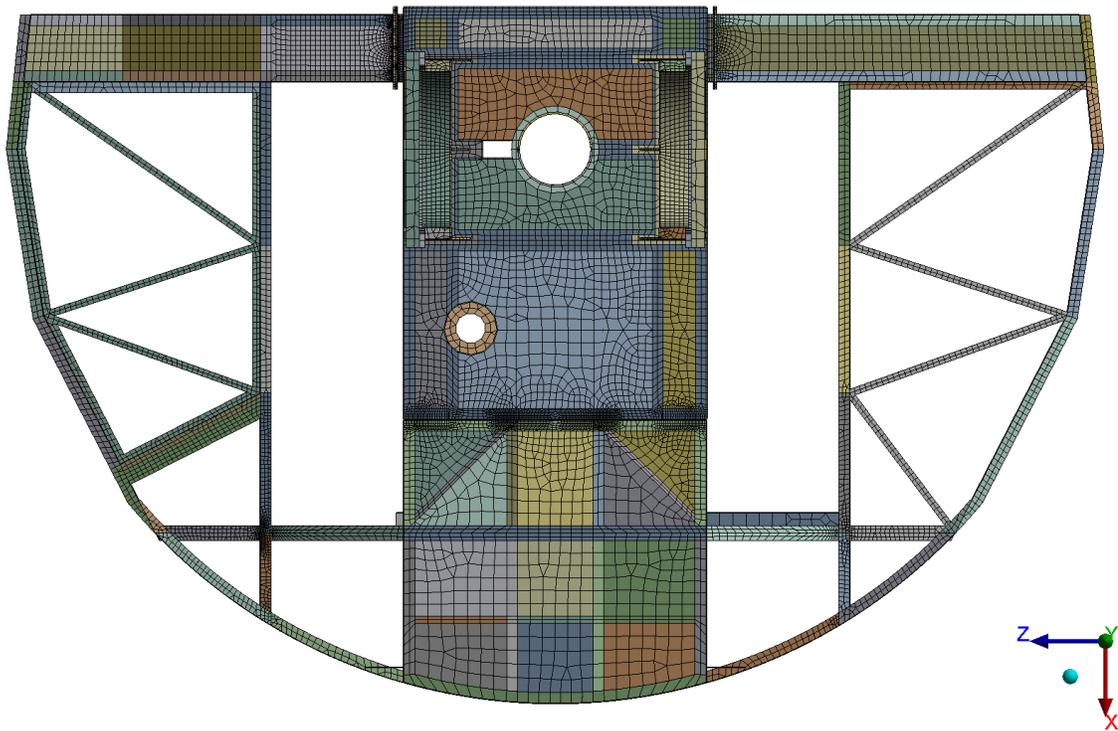


Figura 12. Vista superior del mallado de plataformas azimutales existentes (conjunto central).

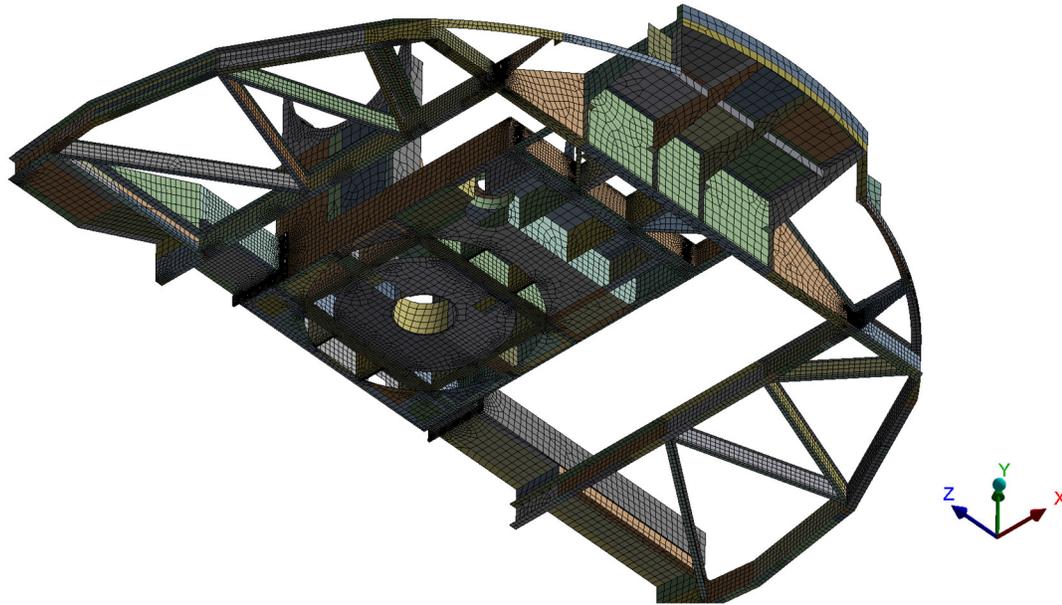


Figura 13. Vista inferior isométrica de modelo de EF de plataformas azimut.

4.5 Modelo de elementos finitos en uniones apernadas críticas para el diseño

Las uniones apernadas críticas consisten de pernos de $\frac{3}{4}$ pulgadas de acero A325 de alta resistencia, cuyos planos de detalle se adjuntan en el Anexo 2. En las partes a unir se refina el mallado para mejorar la exactitud de los resultados, hasta un tamaño de arista del elemento entre $\{1-3\}$ [mm]. En el modelo CAD los pernos en su vástago se dibujan como líneas y luego son malladas como vigas. Las zonas de la cabeza y tuerca no son dibujadas; sino que se imprime sobre las partes a unir un área de contacto igual al área de la cabeza del perno. Las mallas del vástago y de las partes a unir son conectadas mediante formulación de ecuaciones MPC generando contactos tipo bonded. El modelo de elementos finitos de la unión apernada se muestra en las figuras 14 y 15. Nótese las líneas rojas que representan ecuaciones MPC entre el elemento de viga (vástago del perno) y los elementos solidos o de placas (partes a unir).

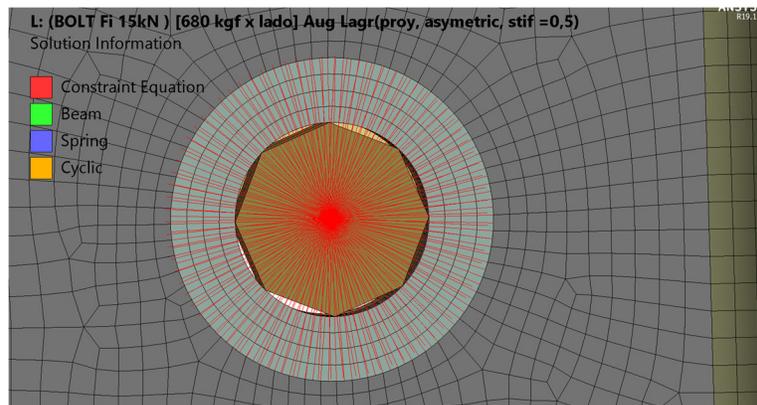


Figura 14. Malla, contacto virtual entre la cabeza del perno y el vástago mediante ecuaciones MPC

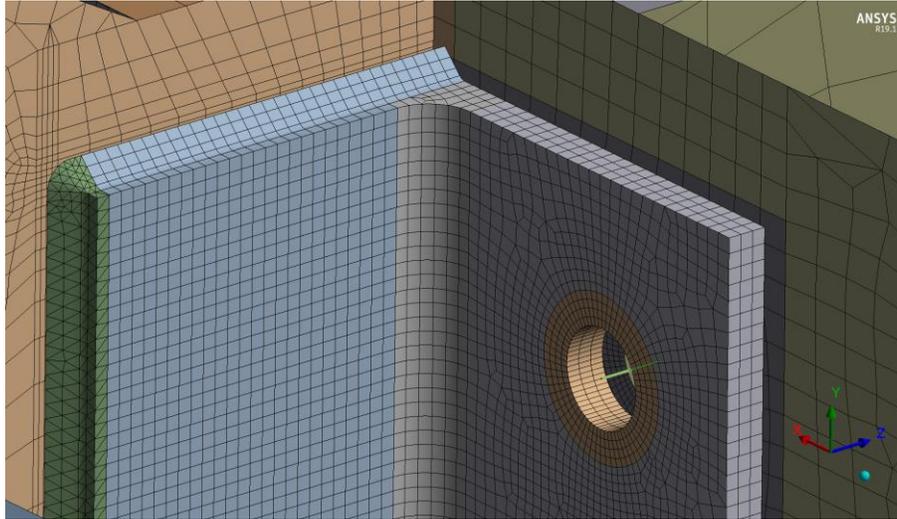


Figura 15. Malla refinada, contacto sólido-placa, unión apernada en “L” plataforma lateral-trasera

Dada la configuración en voladizo de las plataformas laterales existentes más las adicionales sobre la estructura global de LCT, se evalúa la precarga necesaria para mantener las uniones apernadas con una presión y fricción suficientes tal que se evite o al menos disminuyan las cargas de flexión y corte sobre los pernos. Se determina que aplicar una precarga de 15 [kN] sobre cada perno es adecuada para conseguir ese resultado. En total son 28 pernos. Se configura un *contacto friccional* entre las interfaces sólido-placa (4 pernos en la unión plataforma lateral-trasera), y placa-placa (14 pernos en flange de unión plataforma lateral-central; más 10 pernos en la unión trasera-central), con un coeficiente de roce del acero igual a 0,2. Este tipo de contacto debe resolverse necesariamente aplicando métodos no lineales en 2 pasos. Un primer paso exclusivamente para la precarga del perno, sin aceleración de gravedad. Y un segundo paso manteniendo la pretensión del perno más todas las cargas externas. Ambos pasos se resuelven mediante una formulación *Augmented-Lagrange* [12], definida por las ecuaciones (28) y (29):

$$F_{normal} = k_{normal} \cdot x_{penetración} + \lambda \quad (28)$$

$$F_{tangencial} = k_{tangencial} \cdot x_{deslizamiento} \quad (29)$$

En la figura 16 se muestra el estatus de contacto friccional de cada unión apernada, una vez alcanzada la pretensión de 15 [kN]. Se comporta de forma realista, generándose fricción estática en los conos de influencia de las 28 uniones apernadas (representadas en color rojo). Notar además el refinamiento de la malla en el cono de influencia. En la tabla 15 se muestra la configuración de estos contactos: el parámetro de penalización FKN, referido a la rigidez del resorte restaurador cuando ocurre penetración entre los elementos finitos en la dirección normal; y el parámetro FTOLN de tolerancia de penetración entre elementos. Un factor FTOLN=0,1 equivale a una penetración máxima igual al 10% de la arista del elemento en contacto en la dirección normal. En el anexo 3 se muestra la convergencia de la simulación.

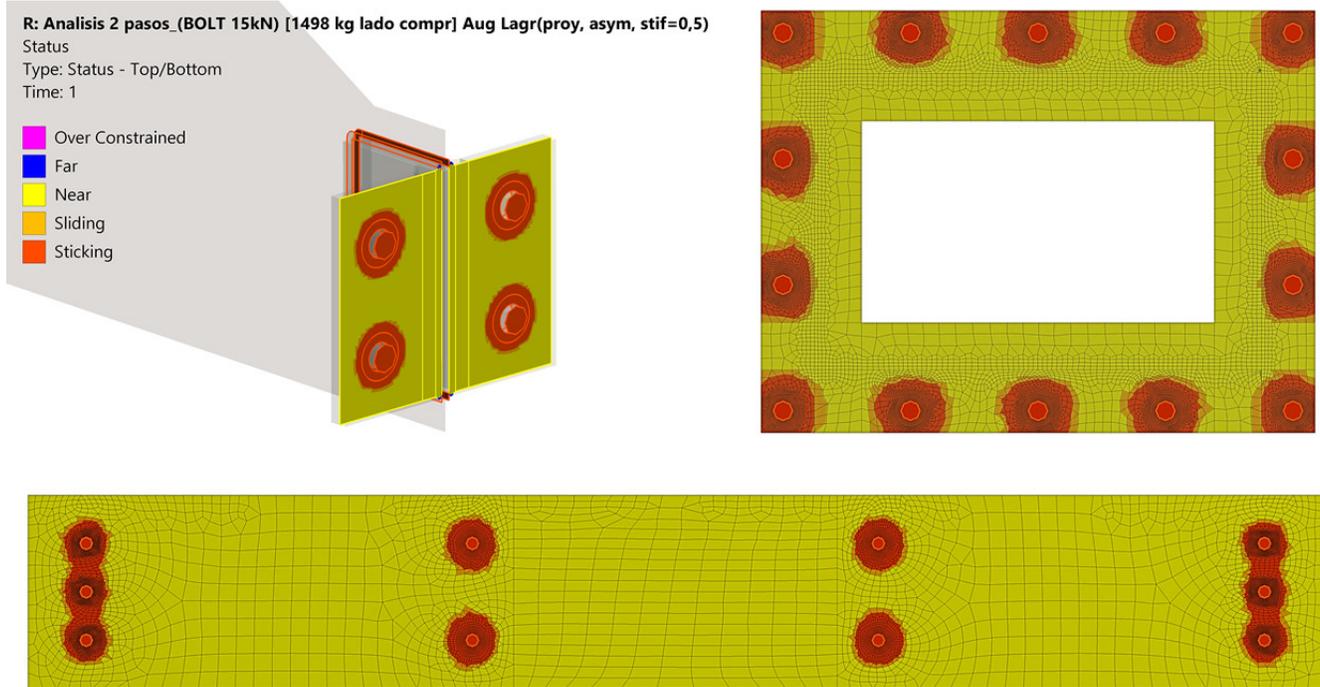


Figura 16. Estatus de contactos friccionales (paso 1), cada perno precargado con 15 [kN]

En la figura 17 se muestran las condiciones de borde del análisis estático estructural mediante FEM al inicio del paso 2, una vez lograda la convergencia (lock) del contacto friccional en las uniones apernadas en el paso anterior.

R: Analisis 2 pasos_(BOLT 15kN) [1498 kg lado compr] Aug Lagr(proj, asym, stif=0,5)
 Static Structural
 Time: 2, s
 Items: 10 of 35 indicated

- A Fixed Support
- B Bolt Pretension L RR: Lock
- C Bolt Pretension Flange RR: Lock
- D Bolt Pretension tras-centr: Lock
- E Peso CAB: 2920, N
- F Peso Conjunto superior 1: 80000 N
- G Peso Conjunto superior 2: 80000 N
- H RR ADIC PLATF + EQUIPOS: 11770 N
- I IZQ ADIC PLATF + EQUIP: 14690 N
- J Bolt Pretension L RR 2: Lock
- Acceleracion de Gravedad, 2 pasos: 9807, mm/s²
 Components: 0,-9807,0, mm/s²

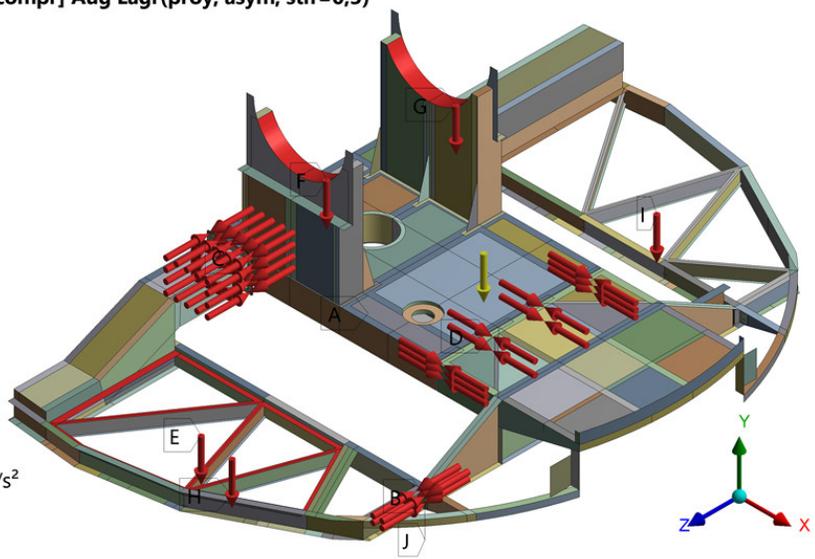


Figura 17. Condiciones de borde para el análisis estático estructural (paso 2) con cargas verticales

Tabla 15. Configuración de los contactos involucrados en las uniones apernadas.

Unión	Tipo de contacto	Elementos unidos	Formulación	Restricción	FKN	FTOLN
Cabeza de los Pernos	Bonded	vértice-placa	Multi Point Constriction	Distribuida dentro del radio	10	-
Piezas a unir	Friccional	sólido-placa; placa-placa	Augmented Lagrange	Coef. de fricción 0,2	0,5	0,1

4.6 Modelo de plataformas adicionales: modelo CAD y de Elementos Finitos

Las plataformas nuevas deben cumplir un conjunto de requisitos en cuanto a resistencia mecánica, desplazamientos máximos, frecuencias modales, espacio y masa disponible para los equipos complementarios, y disposición de arriostramientos que provean suficiente rigidez en múltiples direcciones. Además, debe incluir un espacio adecuado para que el personal de trabajo pueda realizar labores de operación y mantenimiento sobre estas plataformas adicionales.

4.6.1 Modelo CAD de plataformas adicionales

El modelo general de plataformas adicionales consiste de una estructura colgante con forma de jaula, compuesta de un entramado de perfiles estructurales unidos rígidamente en sus nudos (ver figuras 18 y 19). Esta estructura es simétrica para ambas plataformas adicionales, y presenta 5 tipos de miembros: a) vigas perimetrales, b) vigas de carga, c) columnas, d) arriostras, e) canal de anclaje. Dispone de una altura de $h = 2 [m]$ aproximadamente entre el piso de la nueva plataforma y las plataformas existentes. Entre la plataforma adicional y el componente Teepe se genera una distancia lateral mínima de 230 [mm] (ver acoplamiento en el anexo 14). Durante la mayor parte del proceso de diseño, se evalúa una variedad de dimensiones de perfiles sobre una estructura tipo con una única disposición de diagonales-arriostras, como la mostrada en la figura 18. En etapas finales se compara el comportamiento mecánico entre las distintas formas de arriostramientos mostradas en la figura 7. Esta estructura es modelada primero mediante elementos de vigas. En etapas posteriores, es modelada mediante elementos de placas.

4.6.2 Modelo de elementos finitos: prediseño para optimización

En la fase de prediseño y optimización MOGA, la estructura de plataforma adicional consiste únicamente de cuerpos de líneas. Se genera una malla de elementos de viga BEAM188, estos elementos ocupan la teoría de vigas de Timoshenko. Los BEAM188 poseen dos nodos y 6 grados de libertad por cada nodo: tres traslaciones (UX, UY, UZ) y tres rotaciones (ROTX, ROTY, ROTZ). El material asignado corresponde a acero estructural A36, cuyo módulo de Young es el mismo que el del acero A270ES.

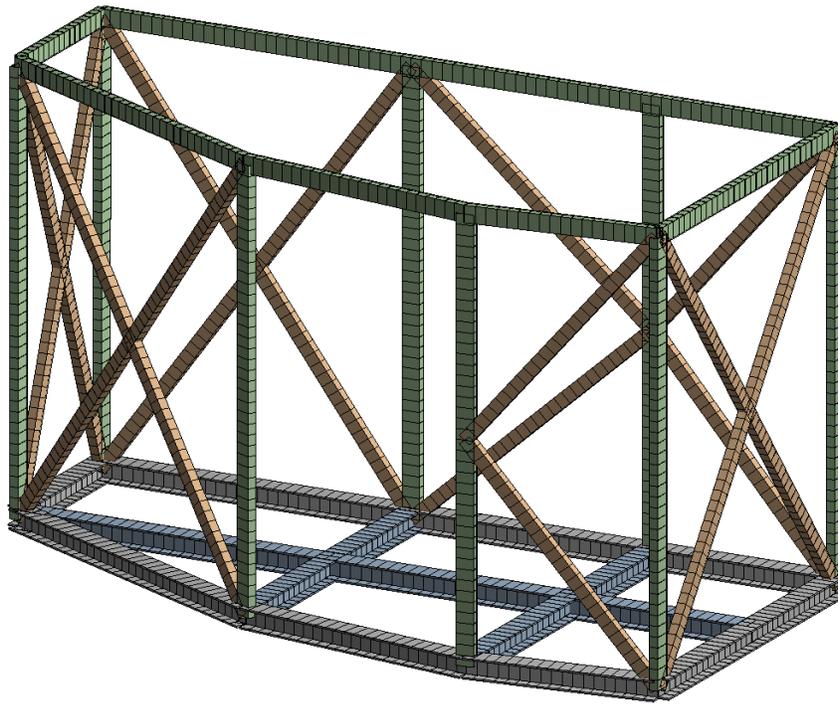


Figura 18. Malla de la estructura prediseñada en elementos de vigas, para loop de optimización

4.6.3 Condiciones de borde y solicitaciones

En la figura 19 se muestran las condiciones de borde y solicitaciones del modelo FEM de plataforma adicional formulado en elementos de vigas, sobre el que se aplican las fases de diseño muestral, análisis de regresión múltiple y el algoritmo de optimización MOGA. Las solicitaciones son:

- Aceleración de gravedad [m/s^2]
- Soportes empotrados en los nudos de las vigas superiores
- Variable acotada de valores continuos: carga distribuida sobre vigas de carga [kg]
- Variable acotada de valores continuos: masas puntuales remotas aplicadas sobre las vigas [kg]
- Fuerza de viento lateral, en dirección (+) Z, igual a 7302 [N], aplicada sobre uno de los lados externos de la plataforma adicional donde se ubica el acceso al interior de la estructura.

C: Static Structural_ Plataforma Inicial_ elementos devigas

Static Structural

Time: 1, s

- A** Distributed Mass
- B** Point Mass
- C** Point Mass 2
- D** Point Mass 3
- E** Point Mass 4
- F** Point Mass 5
- G** Point Mass 6
- H** Fixed Support
- I** Standard Earth Gravity: 9,8066 m/s²
- J** Viento lateral 30 m/s: 7302, N

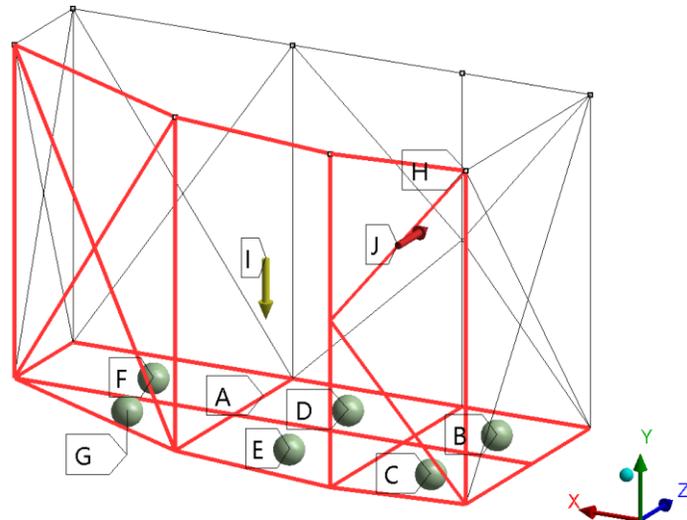


Figura 19. Condiciones de borde del modelo FEM de plataformas adicionales en elementos de vigas

En la fase de postprocesamiento, se integran las secciones transversales mediante puntos de Gauss-Legendre (ver Anexo 4), obteniendo el campo de desplazamientos y de esfuerzos en la estructura. En la figura 20 se muestran los parámetros geométricos que definen las secciones transversales. Cabe destacar, que durante el proceso de Optimización del Diseño, serán estas dimensiones geométricas las variables input (independientes) que se recorrerán, para encontrar mediante algoritmos genéticos, los perfiles estructurales que mejor combinan con el entramado de plataforma, para cumplir los objetivos de diseño.

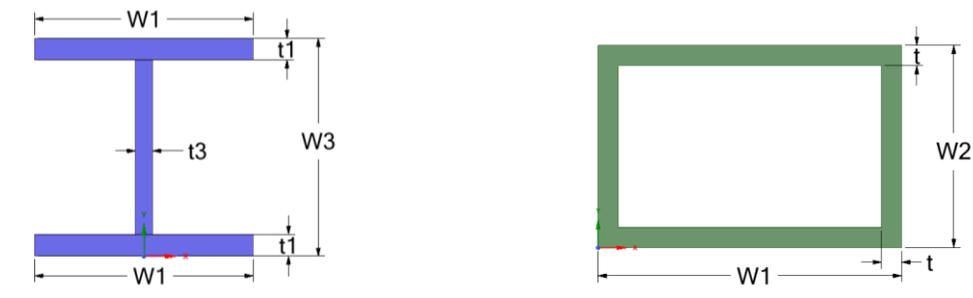


Figura 20. Parámetros de vigas HEA y de tubos rectos (columnas y arriostras).

CAPITULO 5

Análisis de resultados

5.1 Resultados en la estructura LCT existente

5.1.1 Caso 1: estado de esfuerzos en el modelo global, sólo peso propio.

A continuación, se muestra el estado de esfuerzos debido al peso propio del radiotelescopio, sin cargas externas, y sin considerar el modelo de uniones apernadas. Estos puntos críticos se localizan en las plataformas azimutales y la parte central-inferior de la estructura. El máximo esfuerzo equivalente se produce en los apoyos, alcanzado un valor de 265 [MPa], superando el punto de fluencia (figura 20). Dado que la calidad del mallado en los apoyos es alta según el parámetro *skewness*, se descarta error en estos resultados. Por lo tanto, todos los diseños y mejoras propuestas en el presente informe se realizan asumiendo un futuro rediseño de los apoyos. Respecto a otros puntos críticos, en las uniones entre plataformas laterales y central, se obtienen esfuerzos equivalentes cercanos a los 20 [MPa] (ver figura 21). Por otra parte, como se muestra en la figura 22, el máximo esfuerzo de corte se obtiene en la unión simulada entre el eje cónico y el engranaje azimutal, con un valor de 15,2 [MPa].

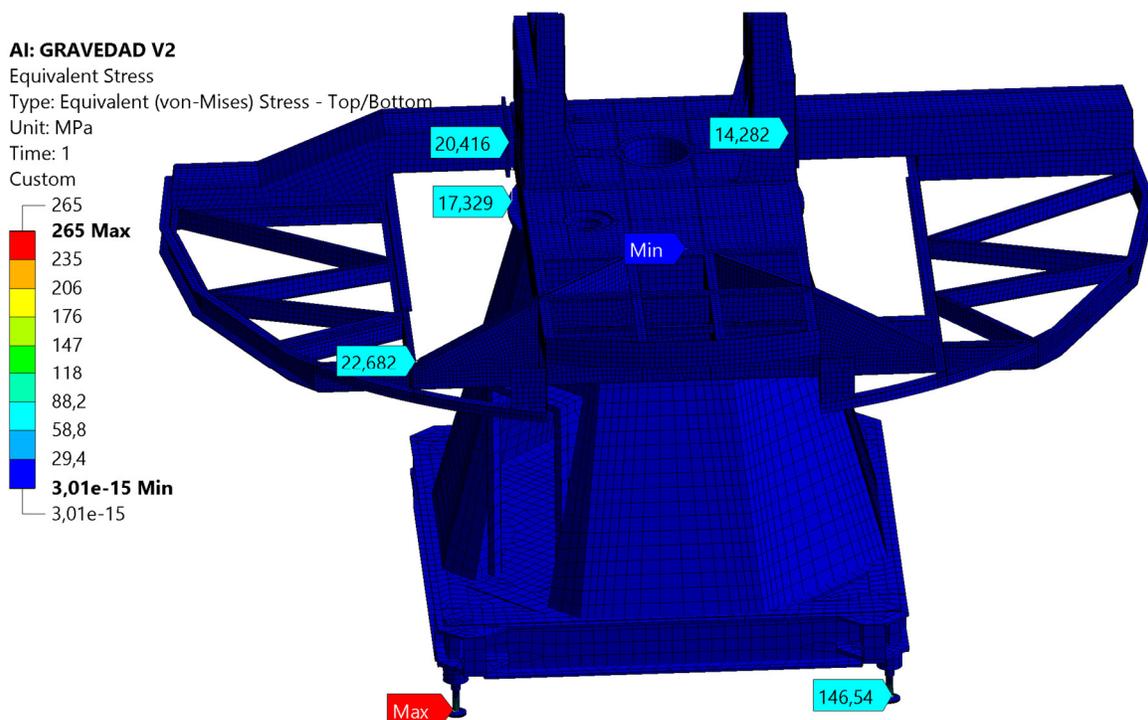


Figura 21. Esfuerzo equivalente máximo en apoyos, debido a peso propio del radiotelescopio.

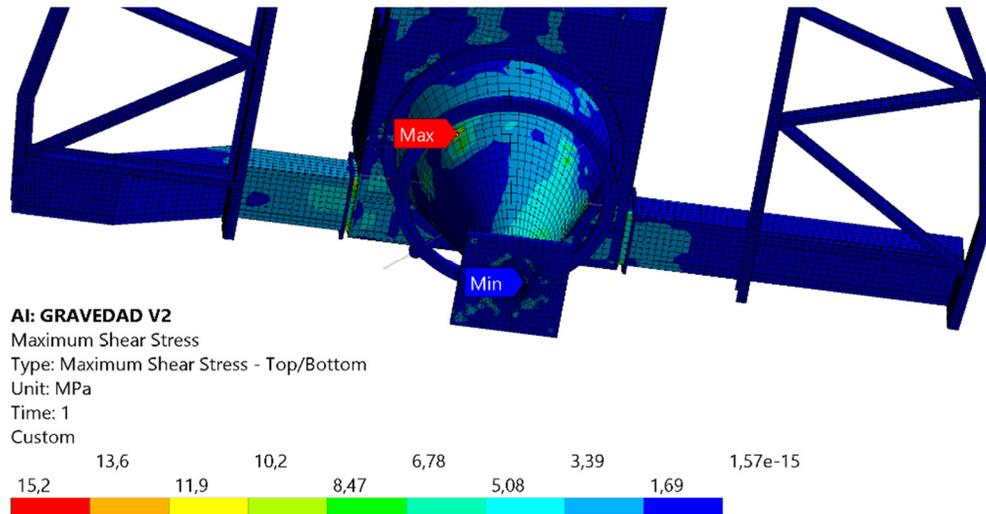


Figura 22. Esfuerzo de corte máximo en el LCT, debido al peso propio del radiotelescopio.

5.1.2 Caso 2: estado de esfuerzos en puntos críticos para el diseño, agregando peso adicional

Todo el peso adicional irá anclado a las plataformas laterales y trasera, estas plataformas existentes están unidas en voladizo al resto del LCT, mediante pernos orientados horizontalmente. Para evaluar el efecto del peso adicional sobre el LCT, se realiza un análisis estático-estructural en dos pasos: un primer paso de pretensión de los pernos; y un segundo paso aplicando las cargas externas, manteniendo la pretensión. En la figura 23 se muestra el estatus de contacto friccional de cada unión apernada, al finalizar el paso 2. Observar cómo los *conos de influencia* (en color rojo) se distorsionan, las zonas de fricción estática se desplazan y disminuyen en tamaño. Estas uniones apernadas se comportan según lo esperado.

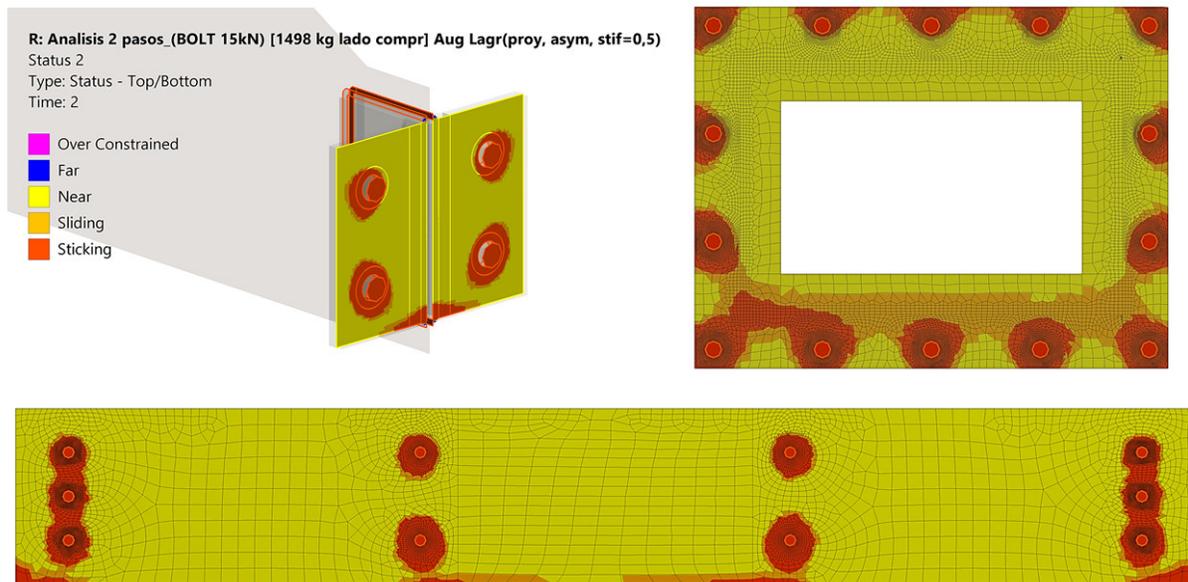


Figura 23. Estatus de contactos friccionales (paso 2). Pretensión más carga externa de 1498 [kg]

Debido a la configuración de trabajo en voladizo sobre pernos orientados horizontalmente, los puntos críticos debiesen encontrarse en dichas uniones apernadas. Por lo tanto, es necesario ejercer una alta pretensión en los pernos para evitar que estos trabajen a flexión y corte. Sin embargo, una elevada pretensión de los pernos produce altos esfuerzos de aplastamiento entre la cabeza del perno, las partes a unir y la tuerca (observar figuras 26 a 30). Recordando el principio de Saint-Venant: “los esfuerzos generados localmente en la región de aplicación de la carga, permanecen locales, y no perturban las regiones lejanas a la carga”. Como estos esfuerzos de aplastamiento son localizados y no inducen a falla, se omiten como puntos críticos. Así, los puntos críticos de esfuerzos más relevantes se localizan en el radio de filete de los perfiles en L que participan de la unión apernada (ver figuras 26 y 27). Los resultados del análisis paramétrico de cargas en ese punto crítico se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Esfuerzos máximos en punto crítico correspondiente al radio de filete de perfiles en L, unión apernada. Análisis paramétrico de cargas sobre la “plataforma lado compresor”.

$Q_{\text{lado compresor}}$ [kg]	$\bar{\sigma}_{\text{max averaged}}$ [MPa]	$\tau_{\text{max averaged}}$ [MPa]	$\bar{\sigma}_{\text{max elemental mean}}$ [MPa]	$\tau_{\text{max elemental mean}}$ [MPa]
2620	252	127	182	93
@ 1926	174	87,5	@ 125	@ 64
1498*	125*	62,7*	89,6	45,8
742	41,5	20,9	---	

A través de las figuras 24 a 31 se muestran los resultados de esfuerzo equivalente de Von Mises en el conjunto central del LCT, como efecto de: la carga máxima admisible igual a 1498 [kg] aplicada sobre cada lado, más el peso propio de estas estructuras, más la pretensión de 15 [kN] en cada perno.

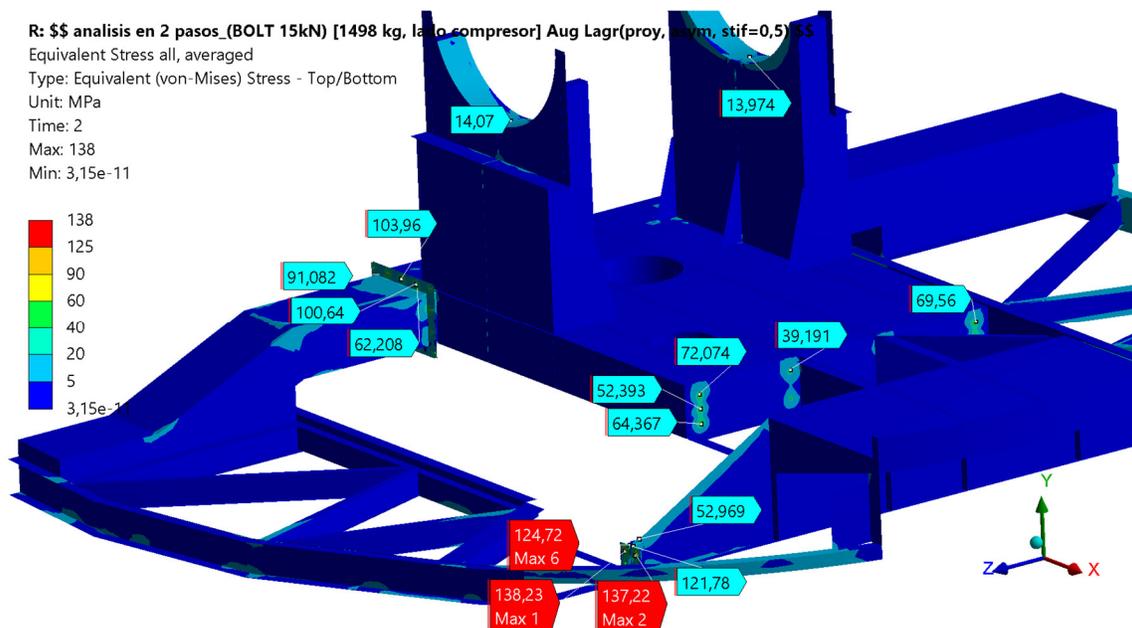


Figura 24. Esfuerzos equivalentes en conjunto central, bajo carga de 1498 [kg] aplicada por lado

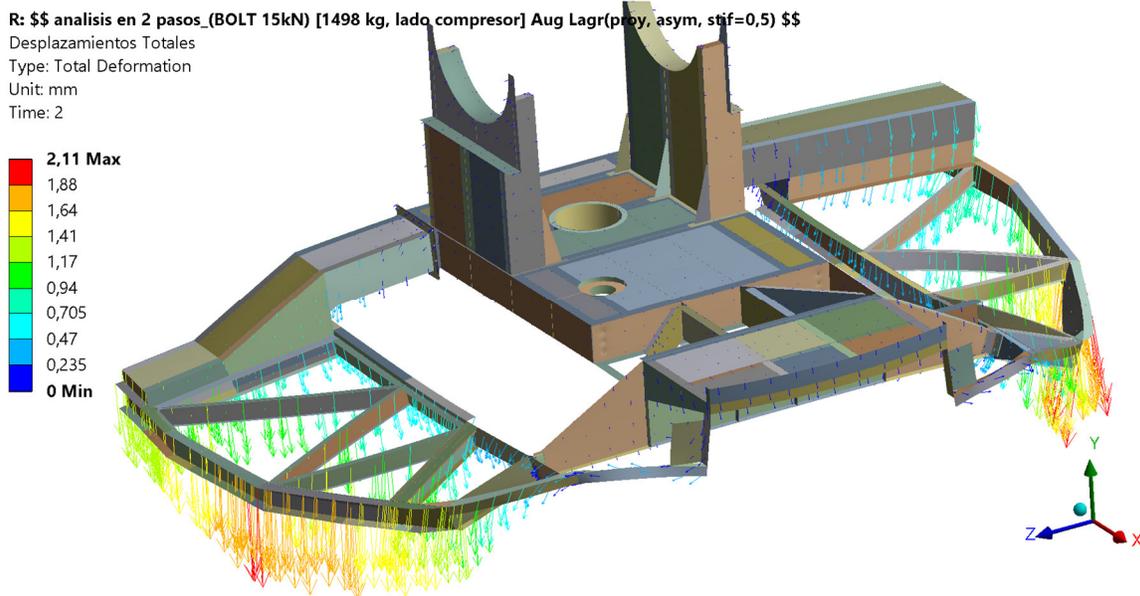


Figura 25. Desplazamientos totales en conjunto de plataformas azimutales, para carga de 1498 [kg] aplicada en cada lado de la estructura azimutal. Escala ampliificada.

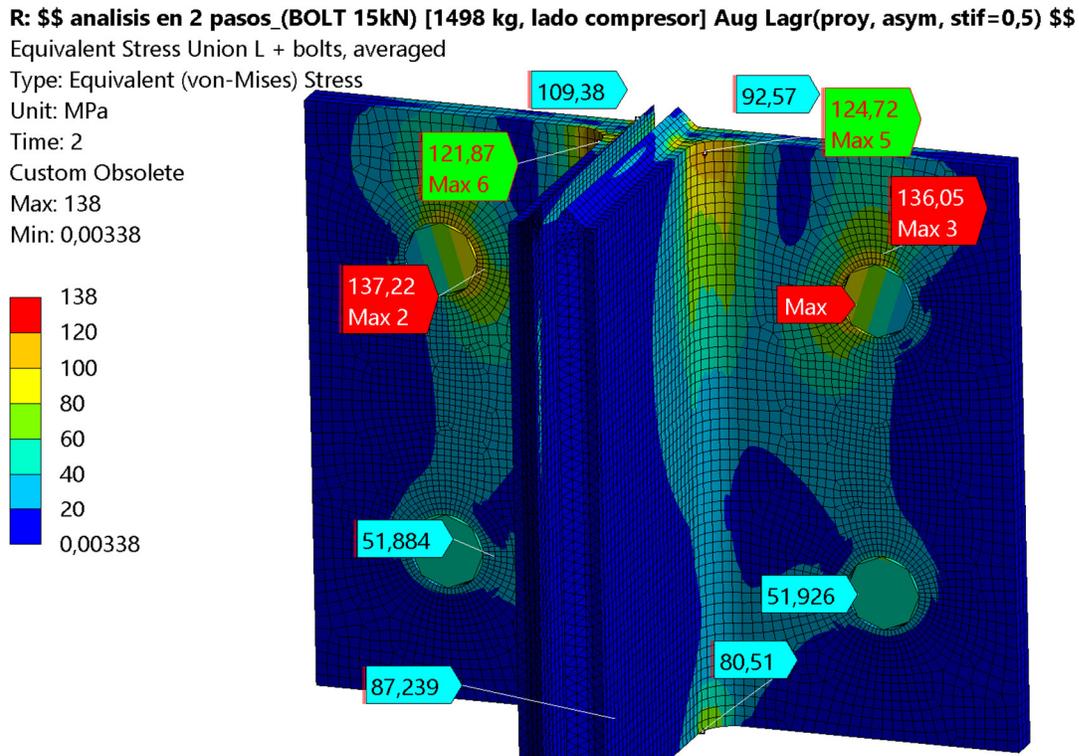


Figura 26. Esfuerzos de von mises promediados, unión apernada “en L” entre plataformas existentes lateral y trasera, bajo una carga vertical de 1498 [kg] por el lado de “plataforma compresor”.

R: \$\$ analisis en 2 pasos_(BOLT 15kN) [1498 kg, lado compresor] Aug Lagr(proy, asym, stif=0,5) \$\$

Equivalent Stress Union L + bolts, elem mean

Type: Equivalent (von-Mises) Stress (Elemental Mean)

Unit: MPa

Time: 2

Custom

Max: 103

Min: 0,0026

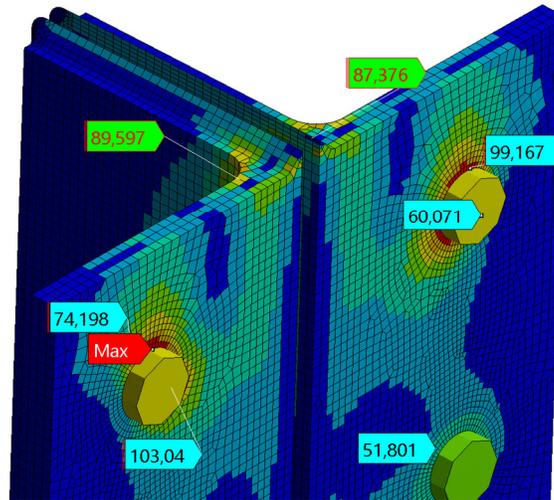
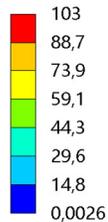


Figura 27. Esfuerzos de von mises, elemental mean gauss, unión apernada “en L” entre plataformas lateral y trasera, bajo una carga vertical de 1498 [kg] por el lado de “plataforma compresor”.

Como puede observarse en la figura 24 y figuras 28 a 31, existen otros puntos críticos ubicados en los flanges y en la unión plataforma central-trasera (excluyendo los puntos de aplastamiento entre pernos y partes a unir, siguiendo el criterio de Saint-Venant). Nótese que estos puntos críticos o son de menor magnitud, o bien ocurren en un punto de singularidad geométrica, tal como es la esquina del flange.

R: \$\$ analisis en 2 pasos_(BOLT 15kN) [1498 kg, lado compresor] Aug Lagr(proy, asym, stif=0,5) \$\$

Equivalent Stress UNION Flange + bolts

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 2

Custom

Max: 124

Min: 0,105

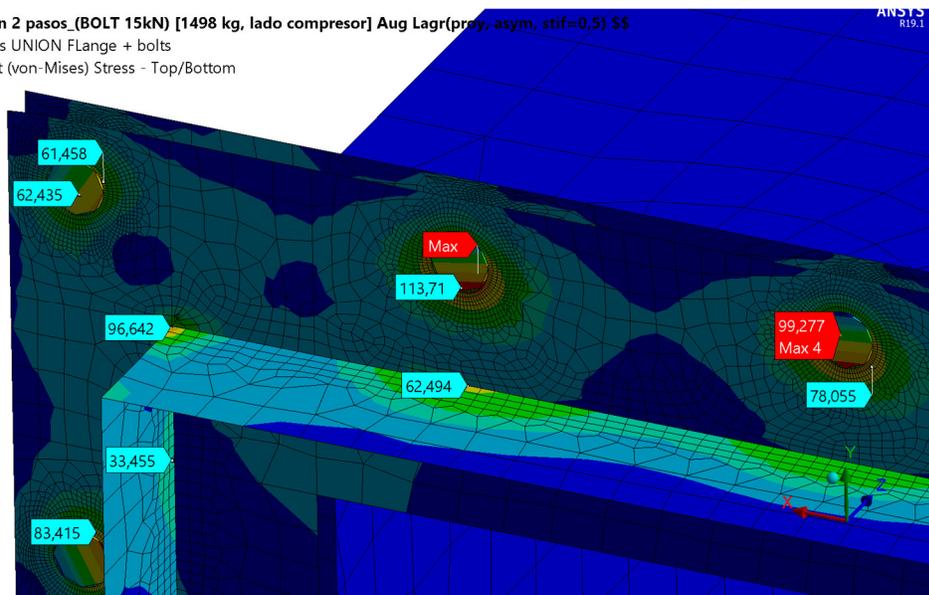
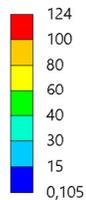


Figura 28. Esfuerzos de von mises promediados, en detalle del flange, unión plataforma lateral con plataforma central, bajo una carga vertical de 1498 [kg] aplicada en la “plataforma compresor”.

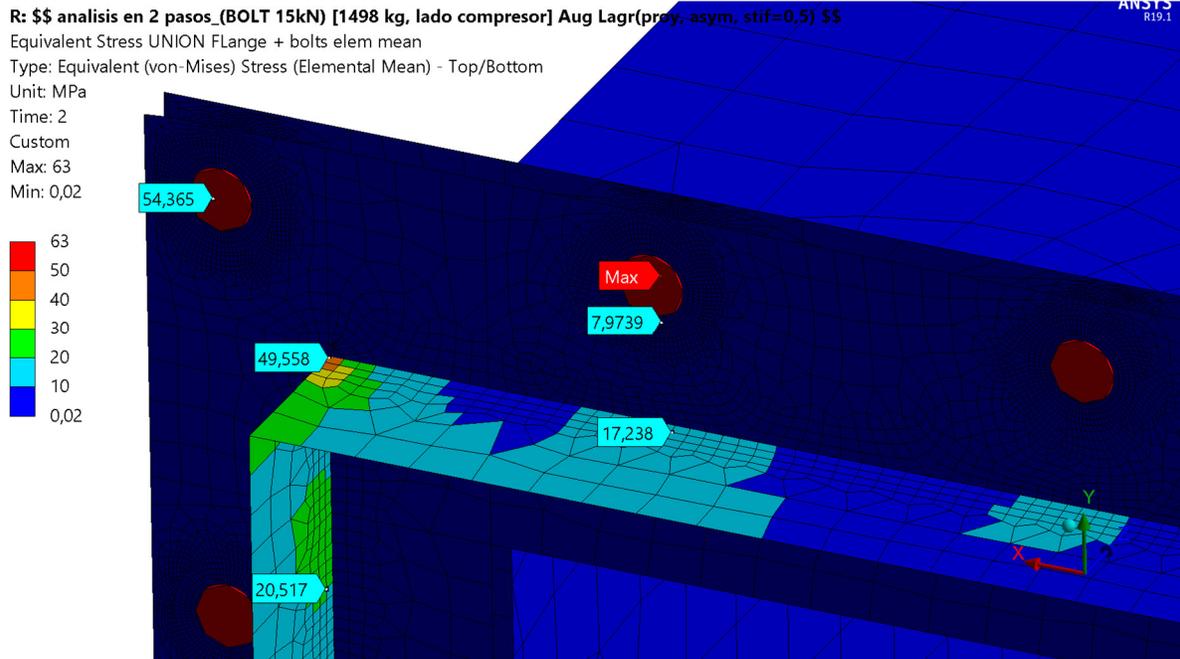


Figura 29. Esfuerzos de von mises elemental mean, en detalle del flange que une plataforma lateral con la plataforma central, bajo una carga vertical de 1498 [kg] aplicada sobre la “plataforma compresor”.

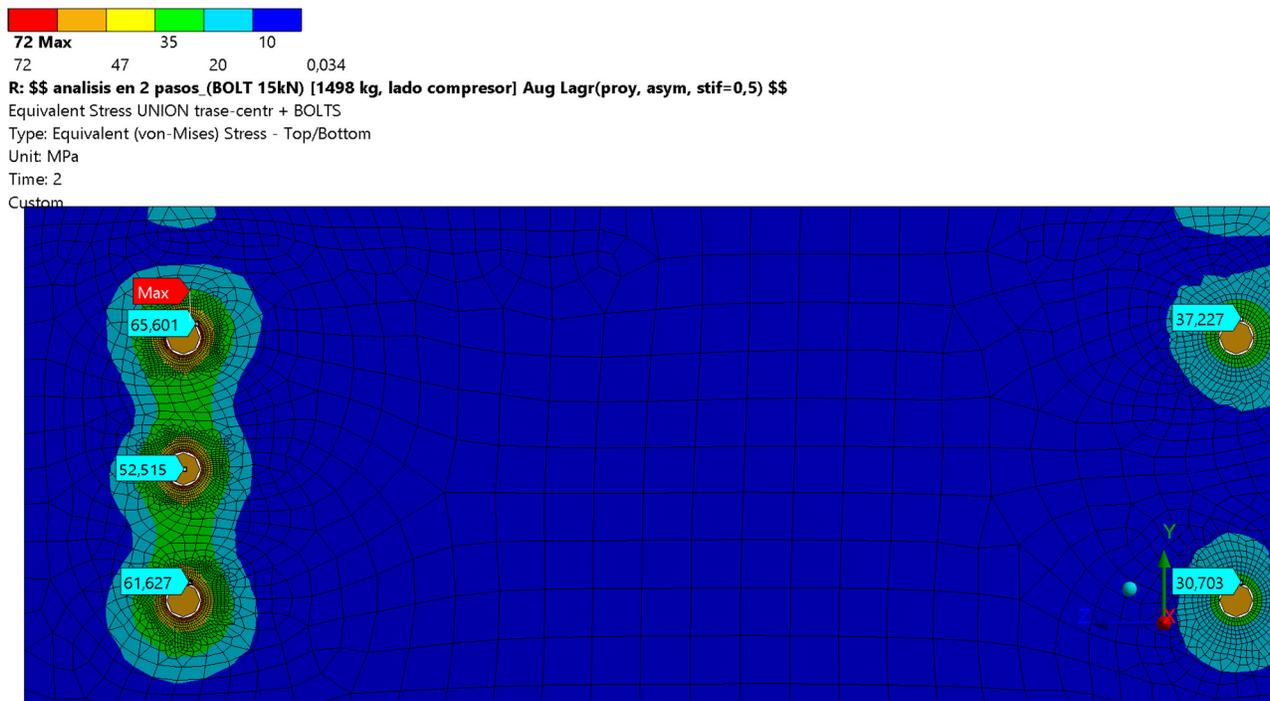


Figura 30. Esfuerzos de von mises averaged, unión apertada entre plataformas central y trasera, bajo dos cargas de 1498 [kg] aplicadas sobre las plataformas en “lado compresor” y “lado gabinete”.

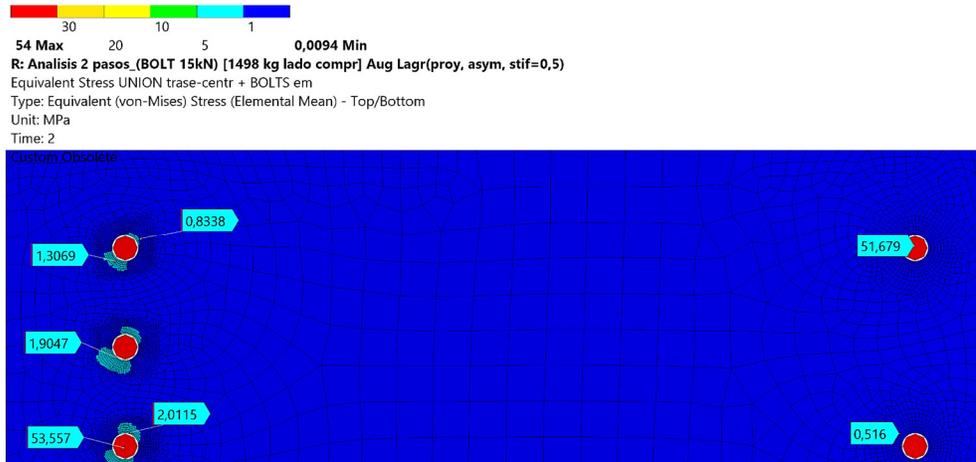


Figura 31. Esfuerzos de von mises elemental mean, unión apernada entre plataformas central y trasera, bajo dos cargas de 1498 [kg] aplicadas sobre “plataforma compresor” y “plataforma gabinete”.

5.1.3 Puntos de anclaje para plataformas adicionales

En la figura 32 se observa una vista inferior del conjunto central del LCT. Se muestra el estado de esfuerzos de von Mises averaged, al aplicar la carga vertical de 2620 [kg] que lleva a la falla por fluencia. Ubicados debajo de las aletas de las vigas perimetrales, se etiquetan los puntos de anclaje recomendados, los cuales reaccionan con bajos valores de esfuerzo (media de 17 MPa, máximo de 35 MPa).

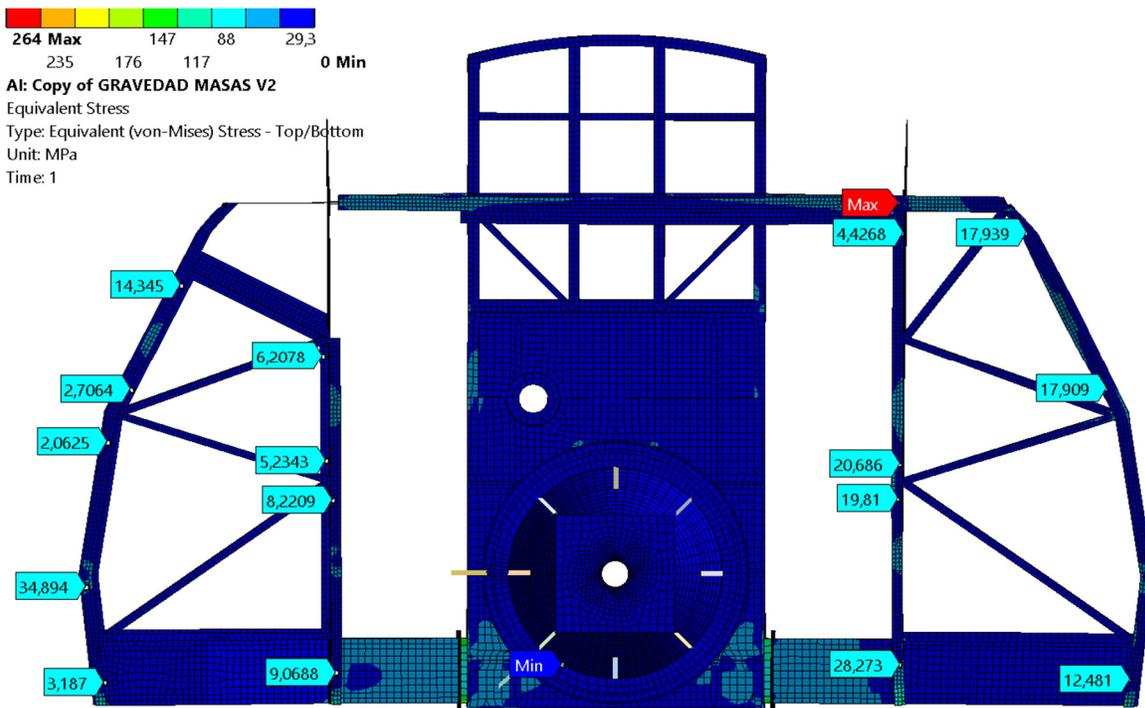


Figura 32. Posibles puntos de anclaje para las plataformas adicionales

5.1.4 Factor de seguridad, carga admisible y peso máximo de las plataformas adicionales

De los resultados de esfuerzos en uniones críticas bajo las cargas parametrizadas (tabla 16), y fijando un factor de seguridad $N_s = 2$, se determina la carga máxima admisible Q_{adm} que puede ser agregada a la estructura existente del LCT, aplicada sobre cada plataforma lateral existente. Ver tabla 17.

Tabla 17. Factor de seguridad, esfuerzo admisible y carga máxima admisible por lado sobre el LCT

	N_s	σ_{adm} [MPa]	τ_{adm} [MPa]	Q_{adm} [kg]
“lado compresor”	2	125	64	1500
“lado gabinete”	2	125	64	1210

De los datos de la tabla 1, se necesita instalar una masa de equipos complementarios cercana a 1800 [kg]. Dividiendo la carga, y evaluando Q_{adm} , lado compresor, en la ecuación (23), se obtiene que:

$$M_{plataforma\ adicional} \leq (1500 - 1800/2) = 600 \text{ [kg]}$$

Bajo estas consideraciones señaladas, se requiere que la plataforma adicional a diseñar tenga un peso propio menor o igual a 600 [kg], para garantizar la integridad estructural con una seguridad de $N_s = 2$.

5.2 Resultados de la optimización de plataformas adicionales

A continuación, se presentan los resultados del proceso de optimización MOGA para el diseño de las plataformas adicionales, obtenido con las herramientas descritas en los capítulos 2, 3 y 4. Se incluyen además los resultados de los análisis de regresión múltiple. Todo este proceso se realizó bajo las cargas combinadas de gravedad, peso extra y un valor fijo de fuerza equivalente del viento. En la tabla 18 se muestran las condiciones de inicio y detención para una ejecución exitosa del algoritmo MOGA.

Tabla 18. Condiciones de inicio y detención de una ejecución exitosa del algoritmo genético MOGA

	Condiciones	Resultado
Criterios objetivos output de diseño	Múltiples y conflictivas	Convergencia
Tamaño población inicial	100	100
Tamaño de población en cada iteración	100	100
Número de iteraciones	20 máx	8
Numero de evaluaciones	-	657
Máximo porcentaje de Pareto permitido	70% máx	38%
Número de candidatos finales	30 máx	30

5.2.1 Cálculo de la fuerza equivalente del viento

Con una velocidad básica del viento igual a 30 m/s en el Llano de Chajnantor [11], y aplicando la norma NCh432-Of2010, se estiman los parámetros y luego calculan los resultados de fuerza equivalente del viento, aplicada en dos direcciones sobre la plataforma adicional. Estos valores se muestran en las tablas 19 y 20. Todos los puntos de diseño de plataformas adicionales, modelados en elementos de vigas o bien en elementos de placas, fueron sometidos a los siguientes valores de fuerza de viento lateral en el eje Z, combinado con peso propio y el peso de los equipos complementarios. Las alternativas finalistas fueron además sometidas a fuerza de viento en el eje X.

Tabla 19. Parámetros estimados para cálculo de la presión del viento, según norma NCh432-of210

K_{zt}	K_d	I	Z [m/s]	Z_g [m/s]	α	K_z	V [m/s]	q_z [$N\ m^{-2}$]
1	1	1	4,6	213,36	11,5	1,031	30	569

Tabla 20. Cálculo de la fuerza equivalente del viento, en 2 direcciones sobre la estructura de plataforma adicional, aplicando norma NCh432-of2010.

Dirección	q_z [$N\ m^{-2}$]	G	C_f	A_{proy} [m^2]	$F_{v@30\ m/s}$ [N]
Eje Z, lateral	569	0,85	2	7,549	7302
Eje X, frontal	569	0,85	2	3,859	3733
Eje X, posterior	569	0,85	2	3,859	3733

5.2.2 Bondad de ajuste, regresión polinomial multivariada

Los polinomios multivariable que aproximan el comportamiento mecánico de la estructura de plataforma diseñada, se muestran en los Anexos 7 y 8. En la tabla 21 se muestran los indicadores de bondad de ajuste de estos polinomios: coeficiente de determinación y el error absoluto medio relativo. Estos polinomios presentan un error de hasta un 30% respecto al cálculo en elementos finitos de vigas.

Tabla 21. Indicadores de bondad de ajuste del modelo de regresión para algunas variables objetivo

	R^2	RAAE	
	Puntos de aprendizaje	Puntos de aprendizaje	Puntos de verificación
$\bar{\sigma}_{max}$	0,987	8%	15%
$\sigma_{3,min}$	0,990	7%	18%
δ_T	0,995	5%	14%
δ_z	0,987	8%	31%
f_1	0,976	11%	30%
M_{platf}	1	0%	3,6%

5.2.3 Análisis de Sensibilidad Local

Se procede a realizar un análisis de sensibilidad local para detectar los parámetros más influyentes sobre las variables output y así afinar el proceso de optimización. El *Diagrama de Sensibilidad Local* del anexo 5 muestra la magnitud de las relaciones positivas o negativas entre cada variable output con respecto a las variables input, en determinado punto de aprendizaje al recorrer los polinomios multivariable $y_q = f(\vec{x})$. Cada barra representa al valor normalizado de la derivada parcial en la correspondiente variable output, respecto a la variable input especificada, manteniendo constantes el resto de inputs. Se ocupa este diagrama en particular para detectar y priorizar las variables de diseño que mayor impacto tienen sobre los objetivos outputs (sobre otros puntos de aprendizaje el análisis de sensibilidad arroja resultados similares). En la tabla 22 se destacan los parámetros input más influyentes.

Tabla 22. Variables input más influyentes vs sensibilidad de variables output.

Variable	Parámetros input									
	I2_w3	I2_w1	I2_t1	m_w	m_t1	I_w1	I_t1	d_t1	d_w	Otros
$\bar{\sigma}_{max}$	-100%	-50%	-43%		-43%					-5%
$\sigma_{3,min}$	-100%	-54%	-45%		-9%					-7%
f_1		+90%		+47%	+38%	+87%	+31%	+98%	+60%	+15%
M_{platf}				+47%	+100%	+40%	+41%	+70%	+38%	+20%

Nota: la nomenclatura y descripción de los parámetros input se detalla en la Tabla 8, capítulo 3, apartado 3.3

5.2.4 Diagrama de Concesiones entre Objetivos de Diseño (Trade-off chart de candidatos)

Como resultado del algoritmo evolutivo MOGA, a continuación en las figuras 33 y 34 se muestra un par de Diagramas de Concesiones entre Objetivos o *trade-off* con los mejores candidatos que conforman las primeras 4 *Fronteras de Pareto*. Una Frontera de Pareto corresponde a todos aquellos puntos de diseño que son soluciones factibles y no dominantes entre sí, que obtuvieron puntajes similares en la función de aptitud Φ . Los puntos en azul pertenecen a la primera frontera de Pareto, es decir, los candidatos mejor rankeados. Los puntos en verde pertenecen a la segunda frontera de Pareto, también aceptables.

En amarillo se muestran los puntos de la tercera frontera. Los puntos en rojo pertenecen a la cuarta frontera de Pareto, ubicados en los últimos lugares del ranking de la función Φ ; sin embargo también se incluyen en el análisis ya que pudiesen ofrecer alguna ventaja excepcionalmente elevada en determinado output sacrificando mayor calidad en otro, siempre cuando ambos outputs se mantengan dentro de los límites de diseño establecidos. En síntesis, es tarea del diseñador seleccionar el(los) candidatos finales que favorezcan en mayor o menor medida a algunas de las variables objetivo. Para ver Diagramas de Concesiones confrontando otras variables, consulte Anexo 6.

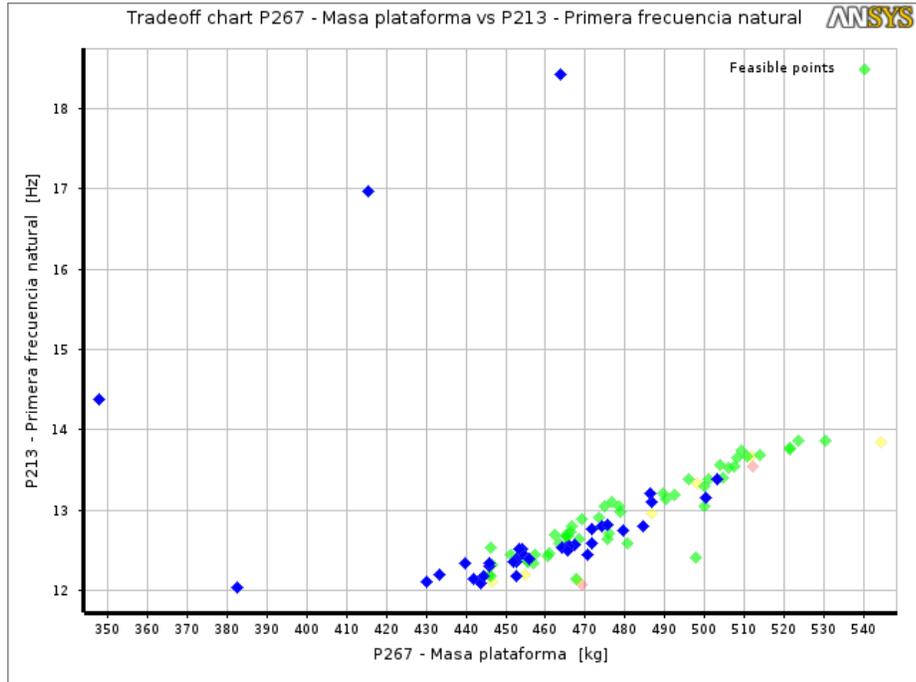


Figura 33. Diagrama trade-off Primera Frecuencia Natural vs Masa Plataforma

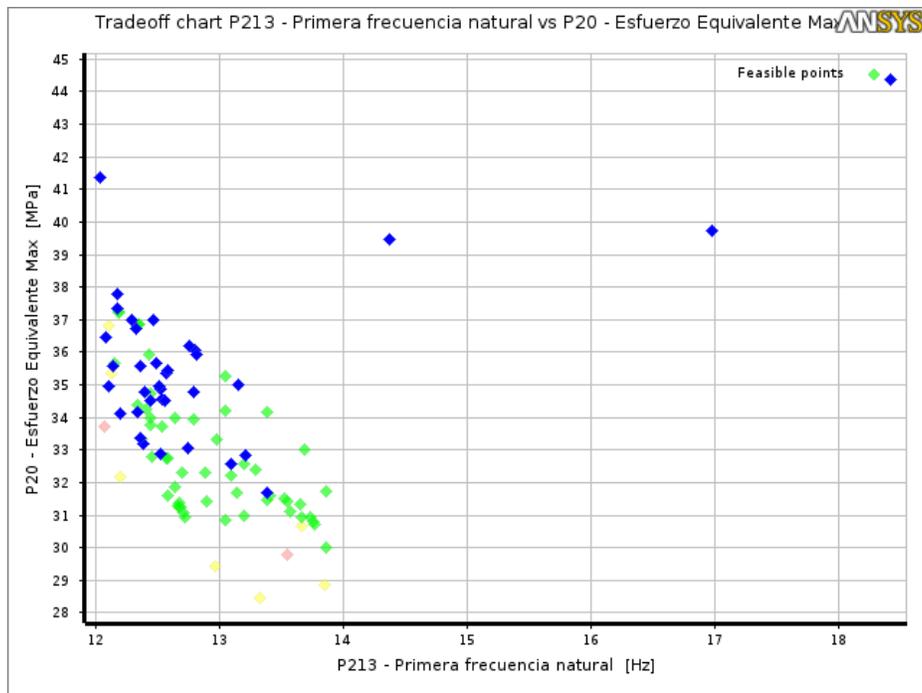


Figura 34. Diagrama trade-off Esfuerzo Equivalente vs Primera frecuencia natural

5.2.5 Perfiles de los candidatos idealizados mediante método MOGA

A continuación, en la tabla 23 se presentan los resultados de los candidatos con sus valores ideales obtenidos del algoritmo de optimización MOGA, sobre la estructura de arriostramiento tipo v9. Estos resultados se muestran en una escala de colores, donde verde oscuro representa un valor deseable, en cambio valores inaceptables se destacan en rojo. Los valores intermedios están en amarillo o naranja.

Tabla 23. Perfiles de vigas de candidatos ideales MOGA

	Puntos de diseño ideales obtenidos desde análisis MOGA											
	cp1	cp2	cp3	cp7	cp11	cp13	cp18	cp22	cp23	cp24	cp25	cp26
Q_{punt} [kg]	91	91	123	120	129	130	126	130	126	129	130	127
Q_{distr} [kg]	1182	1010	1047	1010	1007	1052	1053	1019	1051	1007	1063	1060
F_V lateral [N]	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302
I_W1 (mm)	187,1	187,1	104,7	130,9	114,5	116,5	112,1	114,5	110,7	114,5	134,0	113,9
I_W3 (mm)	218,2	218,2	148,9	140,2	127,1	126,6	127,0	127,0	127,6	127,0	137,4	127,0
I_t1 (mm)	4,1	4,1	7,6	8,2	7,6	7,5	7,1	7,6	7,7	7,6	7,6	7,6
I_t3 (mm)	3,3	3,3	3,4	4,7	4,5	4,4	4,7	4,7	4,4	4,7	4,7	4,7
columna_W1 (mm)	52,4	52,4	46,8	49,7	46,9	55,0	50,3	50,2	49,3	49,7	48,2	49,0
columna_W2 (mm)	85,7	85,7	57,0	59,5	58,2	60,1	61,9	58,2	57,2	61,6	57,3	61,2
columna_t1 (mm)	1,3	1,3	1,3	2,0	2,5	2,3	2,3	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
I2_W1 (mm)	214,7	214,7	106,1	95,6	98,6	104,3	93,3	100,3	100,4	100,4	100,4	100,4
I2_W3 (mm)	56,5	57,8	82,4	82,8	74,9	80,9	76,4	79,7	79,8	79,7	79,8	79,8
I2_t1 (mm)	4,21	3,88	4,79	8,06	7,81	7,34	7,33	7,81	7,26	8,00	8,01	7,34
I2_t3 (mm)	3,42	3,38	4,78	4,53	3,89	4,34	4,33	3,91	4,34	3,92	4,29	4,40
arriostra_W1 (mm)	23,2	23,1	21,2	34,9	33,1	36,9	35,0	35,0	35,0	35,0	33,1	33,6
arriostra_W2 (mm)	25,9	25,9	40,8	40,7	44,0	44,2	40,6	44,0	41,7	43,8	41,1	42,5
arriostra_t1 (mm)	9,1	4,7	4,5	4,1	4,4	4,2	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	80	94	74	41	39	35	39	36	38	36	40	39
f_1 [Hz]	17,04	15,91	12,94	14,33	14,09	14,35	13,49	14,23	13,97	14,32	14,44	14,02
M_{platf} [kg]	593	551	424	512	507	516	488	517	506	520	530	513
$Q_{tot,platf}$ [kg]	1728	1556	1785	1730	1781	1832	1809	1799	1807	1781	1843	1822
$Q_{lat,LCT}$ [kg]	2321	2107	2209	2242	2288	2348	2297	2316	2313	2301	2373	2321

5.2.6 Perfiles de catálogo nacional que aproximan dimensiones de los candidatos MOGA

En la tabla 24 y usando la misma escala de colores, se muestra una preselección de *puntos de diseño* en elementos de vigas, cuyas dimensiones están ajustadas a valores de catálogos de aceros fabricados en

Chile [13] [14], y que aproximan bien las dimensiones ideales MOGA ya presentados en la tabla 23, eligiendo las mejores combinaciones sobre los tipos de arriostramientos v5, v9 y v12. Para conocer la preselección de puntos de diseño ajustados a catálogo sobre entramados v2, v7 y v11, ver anexo 10.

Tabla 24. Preselección de alternativas con dimensiones de catálogo, sobre arriostramientos 5, 9 y 12.

VARIABLES	Alternativas de diseño reales bajo idénticas cargas									
	A8	A10	A11	A12	A13	A15	B2	B4	B6	
	dp124	dp110	dp125	dp108	dp115	dp126	dp109	dp111	dp113	
viga I_W1 [mm]	120	100	120	100	120	120	140	100	120	
viga I_W3 [mm]	114	96	114	96	114	114	133	96	114	
viga I_t1 [mm]	8	8	8	8	8	8	8,5	8	8	
viga I_t3 [mm]	5	5	5	5	5	5	5,5	5	5	
columna_W1 [mm]	50	30	50	50	60	40	60	40	50	
columna_W2 [mm]	50	50	50	50	60	60	60	80	50	
columna_t1 [mm]	3	2	3	2	2	2	2	3	3	
viga I2_W1 [mm]	100	100	100	100	120	100	100	100	100	
viga I2_W3 [mm]	100	96	96	96	114	96	100	96	96	
viga I2_t1 [mm]	10	8	8	8	8	8	10	8	8	
viga I2_t3 [mm]	6	5	5	5	5	5	6	5	5	
arriostra W1 [mm]	30	30	30	40	30	30	30	40	40	
arriostra W2 [mm]	50	50	50	40	50	50	50	40	40	
arriostra t1 [mm]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
q_{distr} [kg]	800	800	800	800	800	800	800	800	800	
q_{punt} [kg]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
$Q_{tot,platf}$ [kg]	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
$F_{V, lateral}$ [N]	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	
v5	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	35	64	36	44	36	47	36	31	34
	f_1 [Hz]	13,53	12,15	13,26	12,42	13,91	12,95	13,92	12,86	13,28
	M_{platf} [kg]	559	433	534	455	528	485	577	536	534
	$Q_{lat,LCT}$ [kg]	2559	2433	2534	2455	2528	2485	2577	2536	2534
v9	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	50	69	51	48	50	52	50	43	43
	f_1 [Hz]	13,43	12,10	13,17	12,34	13,79	12,86	13,56	12,73	13,19
	M_{platf} [kg]	522	414	497	430	498	460	523	491	497
	$Q_{lat,LCT}$ [kg]	2522	2414	2497	2430	2498	2460	2523	2491	2497
v12	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	50	106	51	68	51	73	52	44	51
	f_1 [Hz]	12,94	11,54	12,72	11,84	13,18	12,31	13,20	12,36	12,73
	M_{platf} [kg]	517	402	492	420	491	451	539	490	492
	$Q_{lat,LCT}$ [kg]	2517	2402	2492	2420	2491	2451	2539	2490	2492

5.3 Selección de mejores candidatos con perfiles estructurales de catálogo nacional

5.3.1 Selección candidatos finalistas y verificación de resultados en elementos de placas

Continuando con el proceso de selección de alternativas realistas, se vuelven a filtrar los candidatos mostrados en las tablas anteriores. Se elije el entramado n°9, el cual presenta, relativamente, un mejor desempeño mecánico junto a un menor peso propio. En la tabla 25 se muestra esta selección, comparando los resultados output obtenidos mediante FEM en elementos de vigas (*v9*) vs elementos de placa (*p9*) calculando sus diferencias porcentuales. Se encuentran diferencias excesivamente grandes, entre un 70% y 360%, en los valores de los esfuerzos. Se observa que el modelo de vigas erra los resultados a lo largo del canal de anclaje (en particular, en los vértices ocupados como soportes empotrados).

Tabla 25. Comparación de resultados de alternativas de diseño filtradas, aproximando a dimensiones de catálogo: modelado en vigas (V9) vs modelado en placas (P9)

		Comprobación de resultados de las alternativas, valores de catalogo									
		A5	A8	A10	A11	A12	A13	A15	B2	B4	B6
V9	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	48	50	69	51	48	50	52	50	43	43
	τ_{max} [MPa]	24	25	34	25	24	25	26	25	22	22
	f_1 [Hz]	12,54	13,43	12,10	13,17	12,34	13,79	12,86	13,56	12,73	13,19
	M_{platf} [kg]	596	522	414	497	430	498	460	523	491	497
P9	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	83	137	172	119	194	100	145	96	135	133
	τ_{max} [MPa]	46	75	93	65	112	52	78	49	77	76
	f_1 [Hz]	11,67	12,25	11,32	12,11	11,88	12,69	12,12	12,11	12,22	12,68
	M_{platf} [kg]	592	546	452	520	463	520	496	575	499	521
$\Delta\%$	$\Delta\bar{\sigma}_{max}/\bar{\sigma}_{max}$	74%	173%	150%	134%	306%	101%	179%	91%	214%	209%
	$\Delta\tau_{max}/\tau_{max}$	92%	200%	174%	160%	367%	108%	200%	96%	250%	245%
	$\Delta f_1/f_1$	-7%	-9%	-6%	-8%	-4%	-8%	-6%	-11%	-4%	-4%
	$\Delta M_{platf}/M_{platf}$	-1%	5%	9%	5%	8%	4%	8%	10%	2%	5%

En vista de los resultados, considerando que el LCT estará sometido no solo al efecto de gravedad sino también a rotaciones, carga de viento y movimiento sísmico, se decide buscar nuevas combinaciones de perfiles pero modelándolos esta vez en elementos de placas para así alcanzar diseños más confiables, que entreguen un mayor margen de seguridad para soportar las cargas combinadas mencionadas.

5.3.2 Análisis de sensibilidad multivariado basado en dimensiones de catálogo. Modelado con elementos de placas.

Se desea aumentar el margen de resistencia para que la estructura mantenga su integridad estructural sometida a cargas combinadas de peso propio, peso de equipos y fuerza lateral del viento. Para cumplir lo anterior, se decide volver a modelar en elementos de placas variaciones geométricas sobre el

entramado P9 en base a las dimensiones de los mejores candidatos encontrados de las tablas 24 y 25, los cuales son: A11, A13, B2, B4 y B6. Se parametrizan en forma discreta los espesores y anchuras de cada perfil estructural, realizando combinaciones entre estas dimensiones. Los parámetros a evaluar se priorizan en base a los resultados del *análisis de sensibilidad MOGA* mostrados en la tabla 22.

En la tabla 26 se muestran las alternativas de diseño en elementos de placas elaboradas a partir del análisis de sensibilidad, bajo cargas combinadas de gravedad, peso extra y fuerza lateral del viento.

Tabla 26. Análisis de sensibilidad, sobre arriostramiento P9, en elementos de placas

	ALTERNATIVAS DE DISEÑO P9 [medidas en mm] M: columnas D: arriostras C: canal de anclaje	q_{plaf} [kg]	Fuerza Viento [N]	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	τ_{max} [MPa]	f_1 [Hz]	M_{plaf} [kg]
AU	D(40x60x3) M(40x80x3) (vigas chicas) C(100x75x5)	2000	7302	105	60	13,13	540
AL	D(40x60x4) M(40x80x2) (vigas chicas) C(100x75x5)	2000	7302	97	54	13,43	550
BJ	D(40x60x4) M(40x80x3) (vigas chicas) C(100x75x4)	2000	7302	102	52	13,48	560
BY	D(40x60x3) M(40x80x4) (vigas chicas) C(100x75x5)	2000	7302	102	52	13,31	568
AX	D(40x60x4) M(40x80x3) (vigas chicas) C(100x75x5)	2000	7302	92	48	13,74	578
BA	D(40x60x3) M(40x80x3) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	107	54	14,09	586
CQ	D(40x60x4) M(40x60x4) (vigas chicas) C(100x75x5)	2000	7302	98	54	13,78	586
BP	D(40x60x4) M(40x80x2) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	98	56	14,49	596
CB	D(40x60x4) M(40x80x4) (vigas chicas) C(100x75x5)	2000	7302	90	46	13,93	606
BG	D(40x60x4) M(40x80x3) (viga2=viga1) C(100x75x4)	2000	7302	103	52	14,58	606
CW	D(40x60x4) M(40x60x3) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	103	53	14,75	610
BV	D(40x60x3) M(40x80x4) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	101	52	14,33	615
BD	D(40x60x4) M(40x80x3) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	95	48	14,89	624
CT	D(40x60x4) M(40x60x4) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	100	51	15,00	634
CN	D(40x60x4) M(40x80x4) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	90	54	15,15	652
BS	D(40x60x2) M(40x80x4) (viga2=viga1) C(100x75x5)	2000	7302	117	59	13,05	577
BR	D(40x60x3) M(40x80x4) (vigas chicas) C(100x75x4)	2000	7302	96	49	13,08	550

Nota: las dimensiones de la “viga grande son”: 120 x 8 x 114 x 5; y de la “viga chica” son: 100 x 8 x 96 x 5

5.3.3 Selección de finalistas: mejores alternativas de diseño en elementos de placas. Valores de catálogo nacional

En las tablas 27 y 28 se muestran los mejores candidatos obtenidos de la parametrización y modelación en *elementos de placa*. En la tabla 27 sometidos sólo a gravedad y peso extra, mientras que en la tabla 28 sometido además a carga lateral de viento (eje Z). Estos candidatos se escogen manualmente dado su mejor desempeño mecánico en las variables output.

Tabla 27. Resultados de finalistas modelados en EF de placas. Sólo gravedad y peso extra

	PUNTOS DE DISEÑO FINALISTAS [medidas en mm]				
	BR	BY	AX	CB	CN
Vigas 1 y 2	100 x 8 x 96 x 5	100 x 8 x 96 x 5	100 x 8 x 96 x 5	100 x 8 x 96 x 5	120 x 8 x 114 x 5
Columna	40 x 80 x 4	40 x 80 x 4	40 x 80 x 3	40 x 80 x 4	40 x 80 x 4
Arriostro	40 x 60 x 3	40 x 60 x 3	40 x 60 x 4	40 x 60 x 4	40 x 60 x 4
Canal	100 x 75 x 4	100 x 75 x 5			
$Q_{tot,platf}$ [kg]	2000	2000	2000	2000	2000
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	42	34	37	32	31
$\sigma_{3,min}$ [MPa]	-31	-27	-28	-26	-21
f_1 [Hz]	13,08	13,31	13,74	13,93	15,15
M_{platf} [kg]	550	568	578	606	652

Tabla 28. Resultados de finalistas modelados en elementos finitos de placas. Cargas combinadas de gravedad, peso extra y fuerza equivalente de viento lateral

	PUNTOS DE DISEÑO FINALISTAS [medidas en mm]				
	BR	BY	AX	CB	CN
Vigas 1 y 2	100 x 8 x 96 x 5	100 x 8 x 96 x 5	100 x 8 x 96 x 5	100 x 8 x 96 x 5	120 x 8 x 114 x 5
Columna	40 x 80 x 4	40 x 80 x 4	40 x 80 x 3	40 x 80 x 4	40 x 80 x 4
Arriostro	40 x 60 x 3	40 x 60 x 3	40 x 60 x 4	40 x 60 x 4	40 x 60 x 4
Canal	100 x 75 x 4	100 x 75 x 5			
$Q_{tot,platf}$ [kg]	2000	2000	2000	2000	2000
$F_{viento,z}$ [N]	7302	7302	7302	7302	7302
$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	96	102	92	90	90
τ_{max} [MPa]	49	52	48	46	54
$\sigma_{3,min}$ [MPa]	-62	-61	-58	-55	-56
f_1 [Hz]	13,08	13,31	13,74	13,93	15,15
M_{platf} [kg]	550	568	578	606	652

5.4 Alternativa AX_(Y): solución ganadora de plataforma adicional

La alternativa de diseño ganadora corresponde al diseño **AX**. Sus perfiles estructurales se indican en la tabla 29. Nótese que, al aumentar la calidad del mallado según el indicador *skewness* (cuyo peor elemento mejora desde una distorsión = 1, hacia una distorsión = 0,7), el esfuerzo equivalente máximo ($\bar{\sigma}_{max}$) en la alternativa **AX** disminuye hasta los 87 [MPa]. En la figura 35 se muestra la distribución de esfuerzos equivalentes "averaged", observándose que los mayores esfuerzos ocurren en los nudos superiores de esta estructura (puntos que unen el canal de anclaje con columnas y arriostros). Este diseño aún es perfectible, por lo que se decide incorporar algunas mejoras.

A: AX original_Static Struct, F_LATERAL=7300 [N] + 900[kg] _MALLA 2

%% Equivalent Stress averag %

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

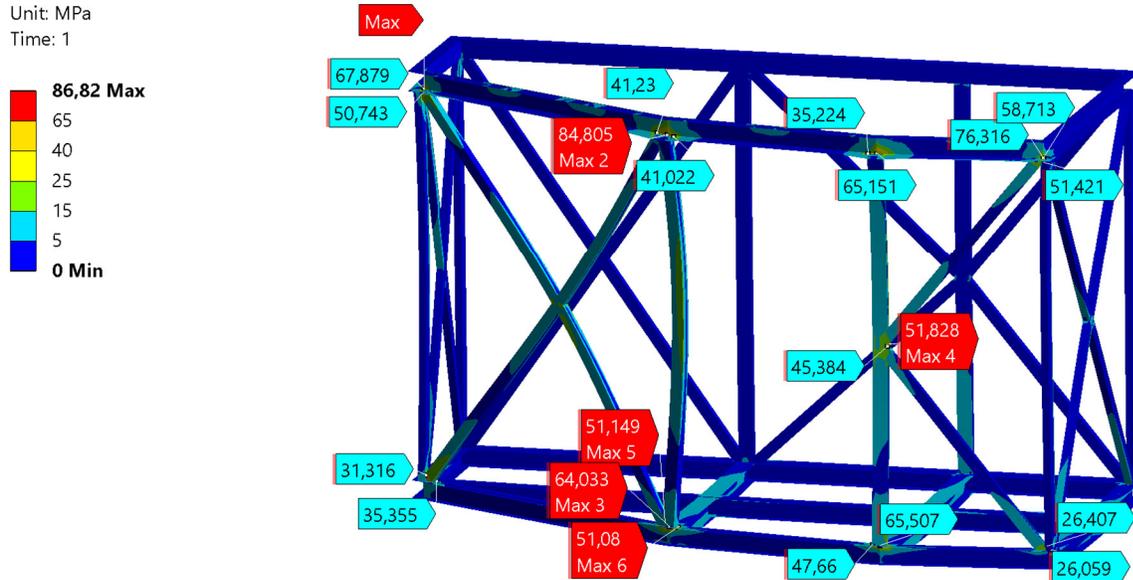


Figura 35. Alternativa ganadora AX (inicial). Esfuerzos equivalentes bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N]

Tabla 29. Perfiles estructurales de la solución ganadora “plataforma adicional AX (inicial)”

Perfil estructural	Dimensión	Descripción	medidas [mm]
Viga HEA perimetral	I W1	ancho aleta (b)	100
	I t1	espesor aleta (e)	8
	I W3	altura alma (h)	96
	I t3	espesor alma (t)	5
Columna tubo rectangular	m TR W1	ancho1 (a)	40
	m TR W2	ancho2 (b)	80
	m TR t	espesor (e)	3
Viga HEA de carga	I2 W1	ancho aleta (b)	100
	I2 t1	espesor aleta (e)	8
	I2 W3	altura alma (h)	96
	I2 t3	espesor alma (t)	5
Arriostra tubo rectangular	d TR W1	ancho1 (a)	40
	d TR W2	ancho2 (b)	60
	d TR t	espesor (t)	4
Canal de anclaje perfil C	C W1	ancho aleta (b)	75
	C W3	altura alma (a)	100
	C t	espesor (e)	5

5.4.1 Evaluación de mejoras aplicadas sobre el diseño de alternativa ganadora AX

A continuación, se procede a realizar algunas mejoras en el diseño de la estructura ganadora AX, para disminuir los esfuerzos. Estas modificaciones se evalúan bajo cargas combinadas de viento lateral, gravedad y 900 [kg] de peso extra. Los resultados de estas mejoras se muestran en las figuras 36 a 39 como esfuerzos de von Mises (en la variante averaged de Ansys). En todos los casos, los puntos críticos se ubican en los nudos del canal de anclaje. En primer lugar (ver figura 36), se ensancha el acceso (puerta) con tal de eliminar algunos concentradores de esfuerzo. En segundo lugar, al diseño de puerta ensanchada se agregan atiesadores para rigidizar las aletas del perfil canal de anclaje, como se aprecia en la figura 37. Estos atiesadores son pletinas de 90x70x5 [mm], espaciados aproximadamente cada 250 [mm]. En tercer lugar (figura 38), para las columnas se estima conveniente reemplazar los perfiles tubulares por perfiles tipo C, los cuales presentan una mejor relación entre momento de inercia/peso. En cuarto lugar (figura 39), al diseño de puerta ensanchada y columnas de perfil C, se agregan los atiesadores espaciados cada 250 [mm]. Los resultados de estas variaciones de diseño se sintetizan en la tabla 30. En las variables de salida evaluadas, a mayor color verde, mejor desempeño, a más rojo, peor desempeño.

Las mismas modificaciones al diseño AX se evalúan esta vez bajo condiciones de carga de viento frontal, gravedad y 900 [kg] de peso extra. En las variables de salida, a mayor verde, mejor desempeño. Los resultados de estas variaciones de diseño se sintetizan en la tabla 31.

P: AX original_puerta ancha_SIN atiesadores_ F LATERAL= 7302 [N] + 900 [kg] B)_Static Struct_ MALLA 2

%% Equivalent Stress averag %%

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

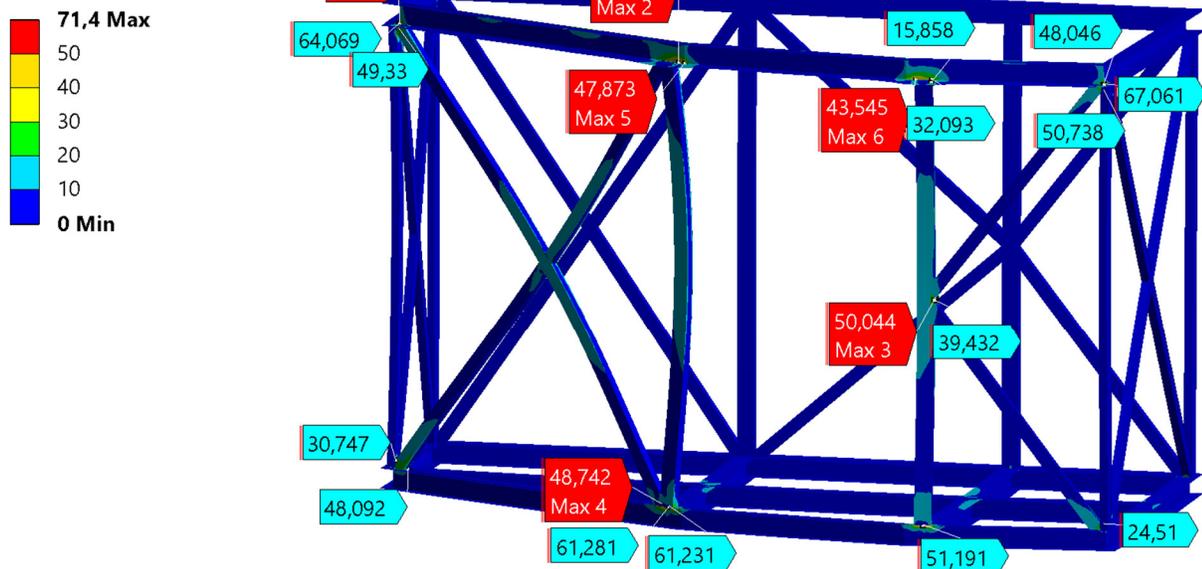


Figura 36. Diseño AX_(P) con modificación de puerta ancha. Esfuerzos equivalentes bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N]

S: AX_puerta ancha_ATIEZADORES v3_ F LATERAL=7302 [N] + 900 [kg]_Static Struct_MALLA 2

%% Equivalent Stress averag %%

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

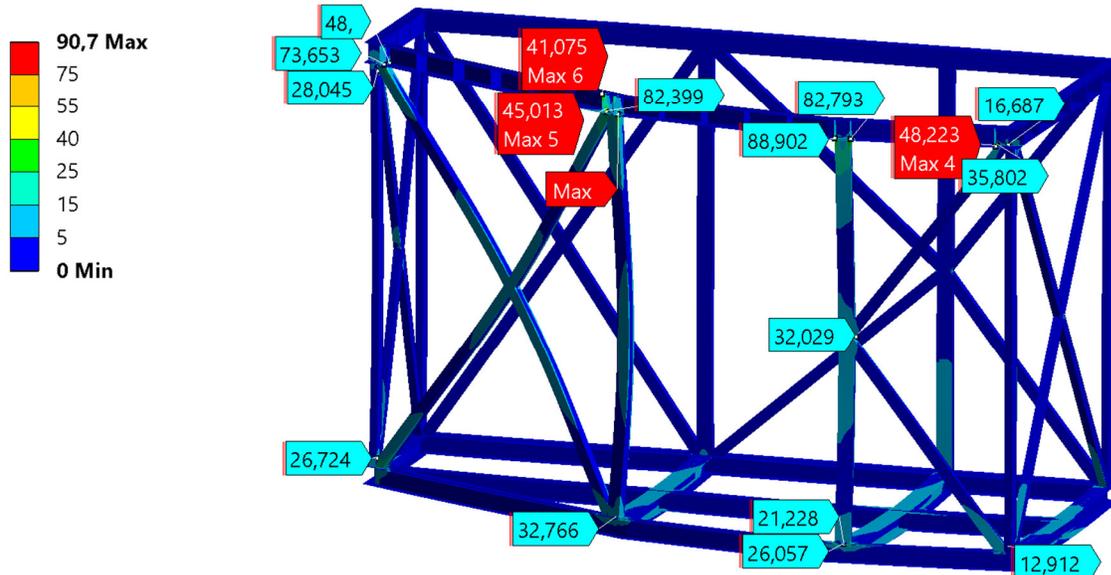


Figura 37. Diseño AX_(S) con modificación de puerta ancha y atiesadores. Esfuerzos equivalentes combinando gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N]

J: AX v2 COLUMNAS C_puerta ancha_SIN atiezadores_ F LATERAL=7302 [N] + 900 [kg]_Static Struct_Automallado

%% Equivalent Stress averag %%

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

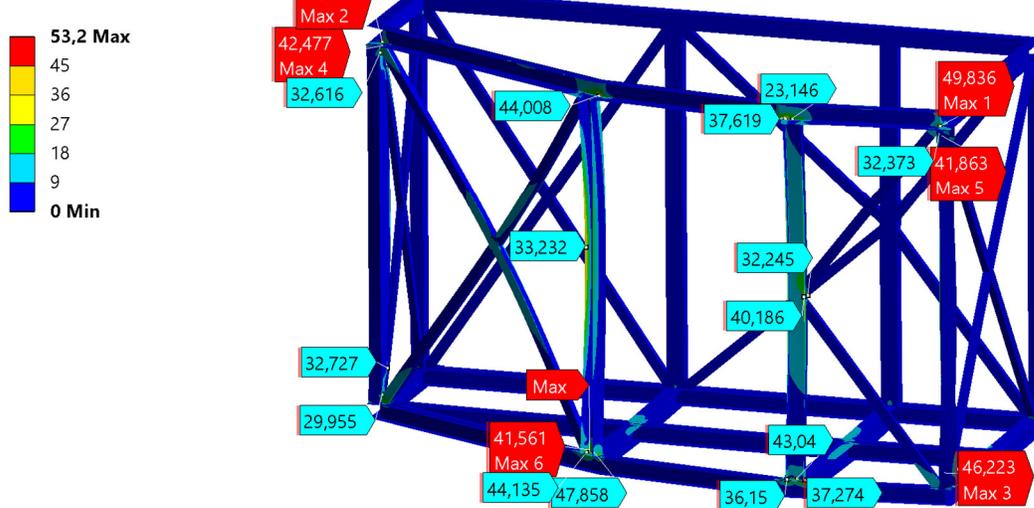


Figura 38. Diseño AX_(J) con puerta ancha y columnas de perfil C. . Esfuerzos equivalentes combinando gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) igual a 7300 [N]

Y: AX v2 COLUMNAS C_puerta ancha_ATIEZADORES_ F LATERAL=7302 [N] + 900 [kg]_ Static Struct_MALLA 2

%% Equivalent Stress averag %%

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

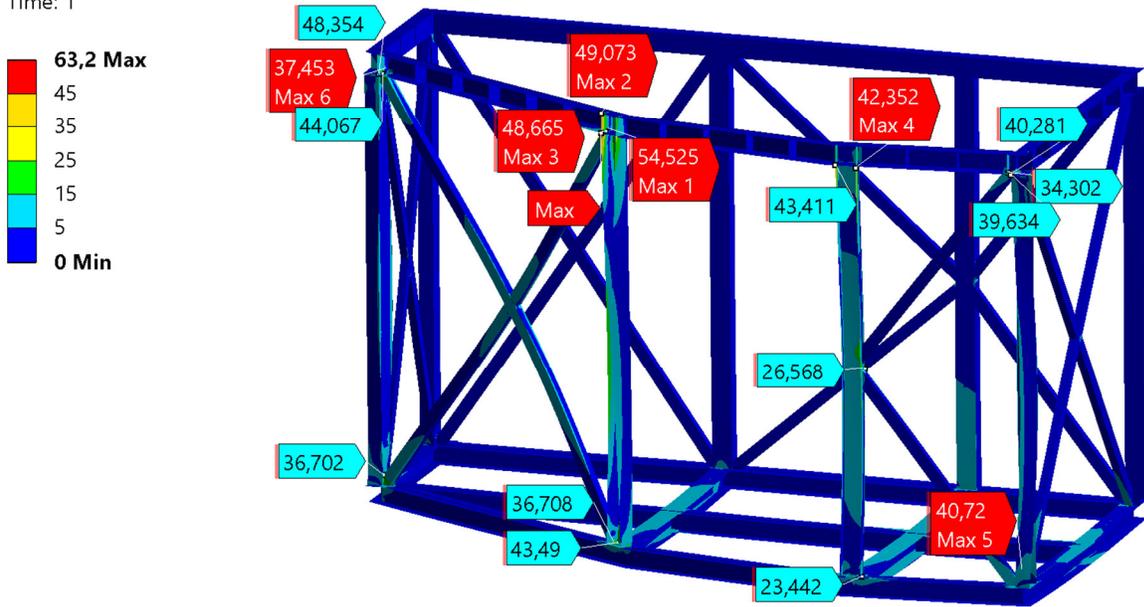


Figura 39. Diseño AX_(Y) con puerta ancha, columnas perfil C y atiesadores. Esfuerzos bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento lateral (eje z, 30 m/s) de 7300 [N]

Z: AX v2 COLUMNAS C_puerta ancha_ATIEZADORES_ F FRONTAL=3733 [N] + 900[kg]_ Static Struct_MALLA 2

%% Equivalent Stress averag %%

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1

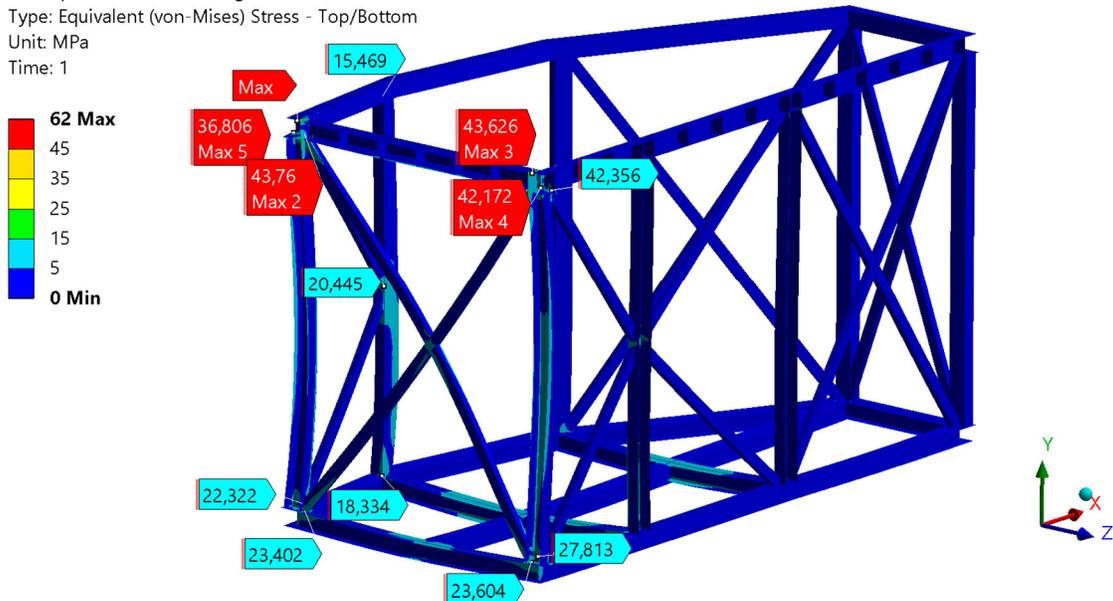


Figura 40. Diseño AX_(Y) con puerta ancha, columnas perfil C y atiesadores. Esfuerzos bajo cargas combinadas de gravedad, carga de 900 [kg] y fuerza de viento frontal (eje x, 30 m/s) de 3730 [N]

A continuación, en las tablas 30 y 31 se comparan los esfuerzos obtenidos bajo cargas combinadas, entre las diferentes modificaciones realizadas sobre la plataforma ganadora AX, considerando las variantes “averaged” y “elemental mean”. Para los casos con viento lateral y viento frontal.

Tabla 30. Evaluación de modificaciones al diseño ganador AX. Caso 1: cargas combinadas de viento lateral, gravedad y peso extra

Diseño	q_{tot} [kg]	F_{viento} lateral 30 m/s [N]	$\bar{\sigma}_{max, averaged}$ [MPa]	$\bar{\sigma}_{max, elemental mean}$ [MPa]	$\sigma_{3, min, averaged}$ [MPa]	$\tau_{max, averaged}$ [MPa]	$\delta_{lat, z}$ [mm]	M_{platf} [kg]
AX_original (A)	900	7302	87	56	-65	45	1,79	576
AX_(P) puerta ancha	900	7302	71	55	-70	37	1,74	576
AX_(S) puerta ancha + atiesador	900	7302	91	62	-54	45	1,08	587
AX_(J) puerta ancha column C	900	7302	53	41	-57	28	1,92	580
AX_(Y) puerta ancha column C + atiesadores	900	7302	63	51	-59	34	1,19	591

Tabla 31. Evaluación de modificaciones al diseño ganador AX. Caso 2: cargas combinadas de viento frontal, gravedad y peso extra

Diseño	q_{tot} [kg]	F_{viento} frontal 30 m/s [N]	$\bar{\sigma}_{max, averaged}$ [MPa]	$\bar{\sigma}_{max, elemental mean}$ [MPa]	$\sigma_{3, min, averaged}$ [MPa]	$\tau_{max, averaged}$ [MPa]	$\delta_{front x}$ [mm]	$f_1 @ 900kg$ [Hz]
AX_original (A)	900	3733	62	25	-70	35	0,98	19,44
AX_(P) puerta ancha	900	3733	62	23	-69	34	0,97	19,68
AX_(S) puerta ancha + atiesador	900	3733	78	33	-79	44	0,71	21,84
AX_(J) puerta ancha column C	900	3733	36	18	-39	20	0,86	19,89
AX_(Y) puerta ancha column C + atiesadores	900	3733	62	22	-69	35	0,66	21,93

Para el caso 1 con viento en dirección lateral (eje Z), los resultados en la tabla 30 muestran que las mejores modificaciones corresponden a (J) e (Y). Además, como las aletas del canal de anclaje tienden a abrirse por efecto de las cargas, es deseable en todos los casos instalar atiesadores para rigidizarlas. Para el caso 2 con viento en dirección frontal (eje x), los resultados en la tabla 31 muestran que (J) sería la mejor modificación, sin embargo habría que descartarla al no incorporar atiesadores. Notar que la incorporación de algunos atiesadores, al enfrentar de forma normal la fuerza del viento, tenderían a generar un efecto de desgarramiento sobre las superficies contiguas, específicamente con viento actuando en el eje x. En la figura 40 se muestra la distribución de esfuerzos de von Mises (averaged) bajo cargas combinadas con fuerza de viento frontal sobre el modelo AX_(Y).

5.4.2 Análisis paramétrico del diseño final optimizado AX_(Y). Máximas cargas admisibles

En síntesis, considerando ambos casos de dirección del viento, *finalmente se propone al diseño AX_(Y) con sus mejoras como Estructura de Plataforma Adicional*. La cual reemplaza las columnas por perfiles tipo C, ensancha el acceso a la plataforma y agrega atiesadores de 5 [mm] de espesor. Se recomienda que AX_(Y) sea el diseño base de ahora en adelante para el avance del proyecto LCT de plataformas adicionales. En la figura 41 se muestra el mallado en MEF junto con el indicador *skewness*, observándose que la gran mayoría de elementos en los puntos críticos tiene una distorsión inferior a 0,5, lo cual contribuye a la exactitud de los resultados (para más detalles revisar Anexo 13). En el Anexo 14 se muestra el acoplamiento del diseño final AX_(Y) a la estructura existente del radiotelescopio LCT. En la tabla 32 se indican las dimensiones de los perfiles estructurales del diseño final AX_(Y).

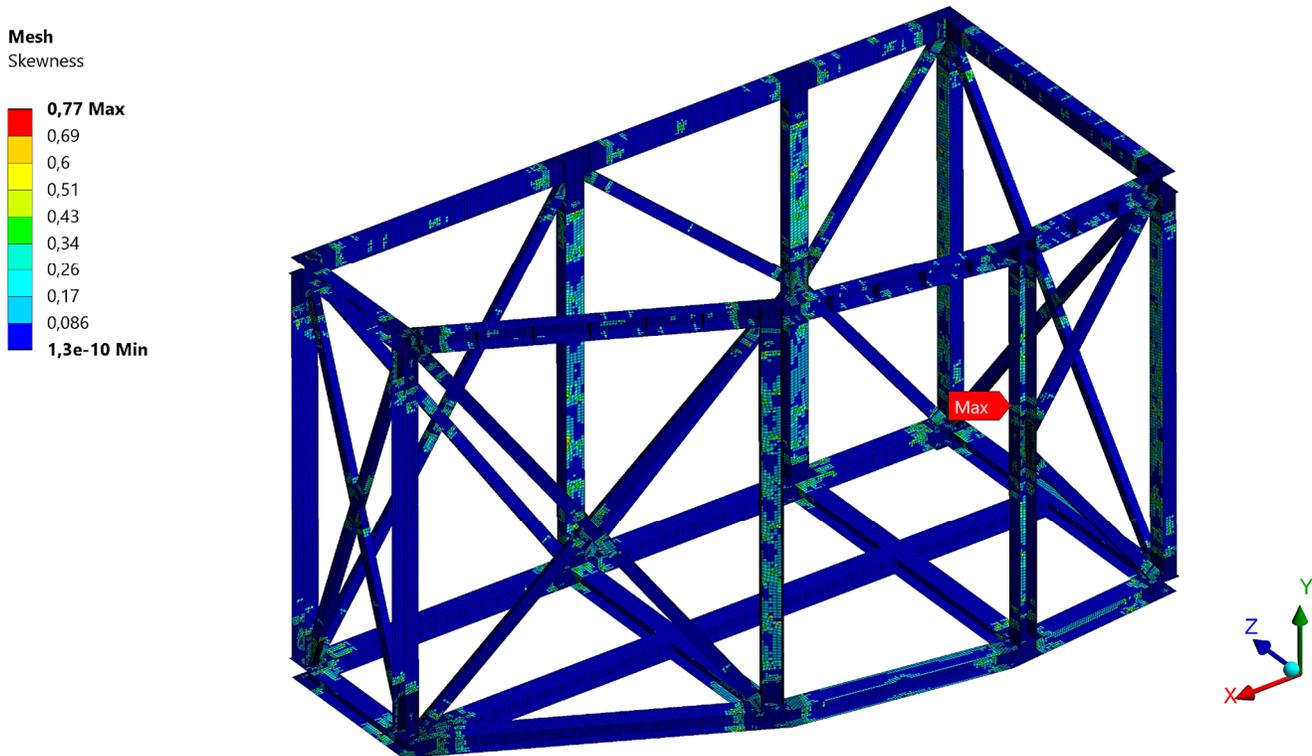


Figura 41. Mallado del diseño recomendado AX_(Y), con indicador de calidad “skewness”

Tabla 32. Perfiles estructurales del diseño final y modificado “AX_(Y)”

Perfil estructural	Material	Dimensión	medidas [mm]
Viga HEA perimetral & Viga HEA de carga	ASTM A36	ancho aleta (b)	100
		espesor aleta (e)	8
		altura alma (h)	96
		espesor alma (t)	5
Columna de perfil canal	A270ES	ancho aleta (a)	75
		ancho alma (b)	100
		espesor (e)	3
Arriostra tubo rectangular	A270ES	ancho1 (a)	40
		ancho2 (b)	60
		espesor (t)	4
Canal de anclaje perfil C	A270ES	ancho aleta (b)	75
		altura alma (a)	100
		espesor (e)	5
Pletinas atiesadores	ASTM A36	espesor (t)	5
		ancho (a)	70
		alto (b)	90

Los Planos de Conjunto de la Estructura de Plataforma Adicional AX_(Y) se muestra en el Anexo 15, incluyendo su lista de piezas. El fabricante de los perfiles corresponde a Prodalam Beckaert. Para no saturar la imagen, este plano se dibujó como las superficies medias de los perfiles estructurales. Las cotas horizontales de las vigas HEA se miden desde las superficie medias de las almas. En cambio, las cotas de los perfiles de canal, de los tubos, y las aletas de las vigas se miden todas desde sus superficies externas. Todas las cotas indicadas consideran los espesores de todos los perfiles estructurales.

A continuación, corresponde determinar la máxima carga admisible de la estructura de plataforma adicional ganadora AX_(Y). Para lo cual se realiza un breve análisis paramétrico de cargas combinadas de peso extra más cargas equivalentes de viento en direcciones lateral y frontal. Los resultados se muestran en las tablas 33 y 34.

Tabla 33. Análisis paramétrico de cargas combinadas sobre estructura AX_(Y). Viento lateral

V_{viento} [m s ⁻¹]	F_{viento} lateral [N]	q_{tot} [kg]	$\bar{\sigma}_{max}$ averaged [MPa]	τ_{max} averaged [MPa]	$\sigma_{3,min}$ averaged [MPa]	$\bar{\sigma}_{max}$ elemental mean [MPa]	τ_{max} elemental mean [MPa]	$\sigma_{3,min}$ elemental mean [MPa]
30	7302	900	63	34	-59	52	27	-29
30	7302	2000	66	36	-60	54	28	-30
42,5	14650*	900*	123	67	-120	100	52	-59
42,5	14650	2000	126	68	-121	103	54	-59

Tabla 34. Análisis paramétrico de cargas combinadas sobre estructura AX_(Y). Viento frontal

V_{viento} [m s ⁻¹]	F_{viento} frontal [N]	q_{tot} [kg]	$\bar{\sigma}_{max}$ averaged [MPa]	τ_{max} averaged [MPa]	$\sigma_{3,min}$ averaged [MPa]	$\bar{\sigma}_{max}$ elemental mean [MPa]	τ_{max} elemental mean [MPa]	$\sigma_{3,min}$ elemental mean [MPa]
30	3733	900	62	35	-70	22	12	-25
30	3733	2000	71	40	-80	32	17	-26
42,5	7490	900	109	61	-123	41	24	-48
42,5	7490*	2000*	119	67	-133	42	24	-49

De los resultados mostrados en las tablas 33 y 34, se observa que la plataforma adicional es mucho más vulnerable a las cargas horizontales que a las cargas de peso externo. Al duplicar la fuerza lateral o la fuerza frontal equivalente de viento, prácticamente se duplican los esfuerzos en todas sus variantes, sean de von Mises, de corte, en compresión, calculados como averaged o como elemental mean gauss. En cambio, cuando se duplica el peso externo, los esfuerzos apenas aumentan levemente.

Si se contrastan los criterios de falla con los esfuerzos calculados de la forma más severa, es decir, con la variante “averaged”, se obtiene que la estructura es capaz de soportar sin problemas la carga de viento equivalente a la velocidad promedio del viento en Chajnantor igual a 30 m/s (108 km/hr), junto a un peso externo de 2 [ton] pudiendo incluso aumentar ese peso. En cambio, si se contrastan los criterios de falla con los esfuerzos calculados en la variante tradicional “elemental mean”, se obtiene que la estructura sería capaz de soportar solicitaciones aún más exigentes, es decir, vientos que superan los 43 m/s (155 km/hr), junto a un peso externo de 2 [ton].

Adoptando el cálculo por defecto de Ansys “averaged”, se encuentra que la plataforma adicional falla bajo una fuerza lateral igual a 14650 [N] producto de vientos a 42,5 m/s, experimentando esfuerzos que superan tanto al esfuerzo admisible normal (σ_{adm}) como al esfuerzo admisible en corte (τ_{adm}). Obsérvese que, bajo la variante “averaged”, la estructura falla primero por corte que por esfuerzo normal. La estructura también falla en corte, sometida al viento a 42,5 m/s en dirección frontal.

Los esfuerzos calculados como “elemental mean gauss” presentan grandes diferencias según la dirección del viento. En el caso de viento lateral a 42,5 m/s, los esfuerzos equivalentes alcanzan los 100 MPa, mientras que en el caso de viento frontal apenas alcanzan los 41 MPa. Algo similar ocurre con el máximo esfuerzo de corte, en el caso lateral supera los 50 MPa, mientras que en el caso frontal apenas alcanza los 24 MPa. Desde esta perspectiva, el caso más desfavorable también corresponde a la estructura de plataforma adicional sometida a carga de viento lateral.

El caso más favorable para la plataforma adicional, es el de carga de viento en dirección trasera. Bajo una carga de viento a 30 m/s, y 900 [kg] de peso extra, se obtiene un máximo esfuerzo de von mises “averaged” igual a 32 [MPa]. El resto de valores son inferiores en idénticas condiciones.

5.4.3 Modos de vibrar del diseño final optimizado AX_(Y)

A continuación, se recogen los resultados del análisis modal de la mejor alternativa de diseño AX_(Y) mejorada: puerta ancha, columnas C y atiesadores. En la tabla 35 se muestran las primeras 20 frecuencias

modales y sus modos de vibrar más relevantes en término de masa efectiva (factor de participación modal) considerando una carga de equipos complementarios igual a 900[kg]. La razón de masa efectiva está separada por direcciones de traslación y rotación.

Tabla 35. Modos de vibrar relevantes en términos del factor de participación de masa efectiva.

modo de vibrar	$f_n@900kg$ [Hz]	Razón de masa efectiva que vibra vs masa total plataforma					
		eje X	eje Y	eje Z	rot X	rot Y	rot Z
1	21,93	4,6%	0,0%	73,5%	5,1%	0%	0,0%
2	33,09	36,2%	0,3%	8,0%	0%	14,7%	7,5%
3	37,71	11,7%	6,2%	0%	4,8%	21,4%	4,0%
4	39,58	1,1%	45,0%	0%	37,5%	1,6%	0%
5	40,62	26,9%	0,2%	0%	0%	37,8%	2,8%
6	41,73	0,7%	4,3%	0%	5,8%	0%	0%
7	44,53	2,8%	0,0%	1,1%	2,8%	2,9%	1,3%
8	51,39	0,0%	1,5%	0%	0%	0%	0%
9	51,72	0,0%	0,2%	0%	0%	0%	0%
10	52,35	0,0%	0,5%	0%	0%	0%	0%
11	52,94	0,0%	1,0%	0%	0%	0%	0%
12	56,46	0,0%	0,0%	0%	0%	0%	1,5%
13	57,18	0%	0,0%	0%	0%	0%	1,6%
14	58,01	0	4,0%	0%	2,5%	0%	13,0%
15	59,68	0,0%	0,0%	0%	0%	0%	0%
16	61,83	0,0%	0,0%	0%	0%	0%	3,5%
17	63,61	0,1%	0,0%	1,2%	1,1%	1,2%	0%
18	66,01	0,3%	0,0%	1,7%	0%	2,8%	0%
19	73,68	0,4%	0,0%	0%	0%	0%	0%
20	77,13	0,0%	0,0%	0%	0%	0%	1,8%

Puede observarse que, bajo la condición de carga de 900 [kg], sólo los modos de vibrar del 1° al 6° más el 14° son relevantes, presentando estos una masa vibratoria superior al 10% de la plataforma adicional, para considerar sus efectos de inercia y resonancia durante la puesta en marcha de los equipos complementarios y en la operación del LCT. Estos modos se destacan en amarillo. El resto de modos de vibrar son irrelevantes dada la prácticamente nula participación de masa vibratoria que involucran.

El modo de vibrar más relevante es el número 1, este modo tiene un movimiento pendular en el plano vertical ZY, su mayor componente oscilatorio es el desplazamiento en el eje lateral Z.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y perspectivas

6.1 Conclusiones

Se concluye que la estructura preexistente del LCT, excluyendo al componente llamado “apoyos”, es capaz de mantener su integridad estructural sometiéndola a un peso total máximo de 2700 [kg], carga a distribuir de forma asimétrica entre las plataformas azimutales nasmyt existentes. Por el lado de la plataforma lateral de compresores, se admite una carga máxima de 1500 [kg]. En cambio, por el lado de la plataforma lateral del gabinete, se admite sólo una carga máxima de 1200 [kg]. Estos límites de carga vertical admisible se calculan con un factor de seguridad igual a 2, y están determinados por las uniones apernadas en voladizo que unen las plataformas laterales preexistentes con la plataforma azimutal central y trasera. Los máximos esfuerzos ocurren en el ángulo recto redondeado de los perfiles “en L” de la plataforma trasera, que soportan el peso de las plataformas laterales.

Asumiendo que la lista de equipos está actualizada, el peso total de los equipos complementarios a instalar equivale aproximadamente a 1800 [kg], carga que debe ser distribuida asimétricamente entre ambos lados de la estructura final ensamblada del LCT. Dado que ya está instalado el componente “gabinete” cuyo peso se estima en 300 [kg], hay que instalar más carga sobre el “lado compresor”. Los equipos complementarios deberán ser instalados sobre los siguientes componentes: sobre las plataformas adicionales en fase de diseño, en las plataformas laterales preexistentes y en la plataforma trasera.

Respecto al diseño de plataformas adicionales, mediante un algoritmo de optimización multivariable MOGA se encontró una propuesta de diseño que cumple los objetivos propuestos en el presente proyecto, siendo capaz de resistir cargas de viento equivalente a 30 m/s, pero sólo para el caso límite de 1500 [kg] de peso (ubicada en “el lado compresor”) que impone la estructura preexistente. Este diseño, denominado “AX”, optimiza el desempeño mecánico en cuanto a resistencia, frecuencias modales, y peso propio, considerando un factor de seguridad igual a 2. Este diseño se perfecciona, obteniendo la estructura de plataformas adicionales final “AX_(Y)” que incorpora atiesadores y reemplaza las columnas tubulares por columnas con perfil de canal. Los materiales de los perfiles usados en las plataformas adicionales son los acero A270ES y A36, cuyo fabricante nacional sería la empresa Prodalam Beckaert (Inchalam). El AX_(Y) pesa 591 [kg], logra disminuir los esfuerzos en toda la estructura hasta en un 31%, elevando la resistencia mecánica para soportar cargas de viento cercanas a los 42 m/s, y tiene una primera frecuencia modal de 21,93 [Hz] acoplándole una masa de equipos complementarios igual a 900 [kg], valor bastante alejado de la primera frecuencia modal del LCT igual a 3,57 [Hz].

Sin embargo, para el caso límite de 1200 [kg] de peso (correspondiente al lado de la “plataforma gabinete”), no fue posible encontrar una propuesta de diseño que cumpla todos los objetivos de este proyecto. Para superar esta dificultad, se propone también instalar en ese lado el diseño de plataforma adicional AX_(Y), pero con la condición de someterla sólo a una carga máxima de equipos complementarios igual a 600 [kg] sumado a cargas de viento cercanas a los 42 m/s. El peso restante de equipos complementarios e igual a 300 [kg], puede instalarse sobre la plataforma azimutal trasera, de

esta forma no se viola el límite de carga total máxima igual a 2700 [kg] y así se lograría instalar la lista de equipos complementarios con un peso total de 1800 [kg].

Por lo tanto, se concluye la factibilidad de diseño de plataformas nasmyt adicionales cuyas características de desempeño mecánico, de acuerdo a los criterios de diseño fijados, son adecuadas para soportar las restricciones de operación del radiotelescopio, las condiciones ambientales de carga de viento presentes en el Llano de Chajnantor, el peso de los equipos complementarios a instalar, y el límite de carga admisible. Sin embargo, no se cumplió la hipótesis de admisibilidad de diseño bajo un hipotético peso de equipos complementarios de 1,5 toneladas.

6.2 Perspectivas

Cabe señalar que aún no está cerrada la lista de equipos complementarios. Si se actualizan o agregan equipos, cambiaría la carga total requerida a instalar sobre las plataformas adicionales, afectando la evaluación respecto a la capacidad de las estructuras para soportar la combinación de carga vertical más viento. Como los valores de fuerza de viento son una aproximación analítica, se recomienda replicar el análisis bajo simulación de viento en CFD, para decidir si se acepta o rechaza la estructura diseñada bajo las cargas combinadas. Además, por falta de información, no se consideró durante este estudio el volumen de los equipos. Si faltase espacio dentro de la estructura AX_(Y), se sugiere agregar una tercera estructura colgante de plataforma adicional, anclada por debajo de la plataforma trasera del LCT.

Durante el presente proyecto de memoria de título, las uniones apernadas se simplificaron empleando elementos de viga para simular los pernos, mientras que las partes críticas a unir (perfiles y flanges) se simularon usando elementos sólidos o elementos de placas. A futuro se recomienda, como ingeniería de detalle, modelar todas las uniones apernadas mediante elementos finitos sólidos, considerando concentradores de esfuerzo, uniones por soldadura y esfuerzos residuales. Incorporando movimiento sísmico, simulación de viento CFD, aceleraciones por rotación del radiotelescopio, y la carga de equipos complementarios. Así, se pudiese determinar con mayor exactitud la carga máxima que soportan la variedad de uniones apernadas que conectan las plataformas laterales con la plataforma central azimutal, sometidas a la combinación de cargas más adversa. Todos estos detalles, en suma, debiesen disminuir la capacidad de carga admisible, requiriendo un nuevo loop iterativo de rediseño de las plataformas.

La optimización de plataformas adicionales usando elementos de vigas subestimó entre un 70% a 360% los esfuerzos en los nudos de la estructura, estos modelos sirvieron para filtrar los peores candidatos. Para una adecuada selección de candidatos se vuelve necesario modelar en elementos de placas. Futuros modelos en elementos sólidos permiten la ventaja de agregar radios de entalla que relajen los esfuerzos.

Simultáneamente, para aumentar la carga admisible a instalar en las plataformas adicionales, se recomienda rediseñar algunas uniones apernadas en la estructura preexistente de plataformas laterales, específicamente, la unión apernada del perfil en L que une a la plataforma trasera. Por ejemplo, elegir un perfil en L de mayor espesor, mayor tamaño o mayor radio de entalla, y aumentando a 6 u 8 pernos por unión. Para la unión soldada de esa pieza (no evaluada durante este estudio), se recomienda aumentar el tamaño de garganta o bien reemplazar la soldadura por un diseño de uniones apernadas. De realizarse estas modificaciones al LCT, se pueden acoplar las plataformas AX_(Y) con un peso de equipos complementarios incluso superior a las 2 toneladas sin comprometer la integridad estructural del conjunto.

REFERENCIAS

- [1] Leighton, R. (1977). A 10 meter telescope for millimetric and submillimetric astronomy. Final technical report for National Science Foundation. CALTECH
- [2] CALTECH. Instruments and overview at the CSO. Recuperado de CSO Wiki. <http://www.cso.caltech.edu/wiki/cso/instruments/instruments>
- [3] SKF. Catálogo de rodamientos.
- [4] Wang, H., Woody, D. (2016). Mode Analysis Reports of CST. FEA Servo Análisis Leighton Telescope
- [5] INN (2010). NORMA CHILENA OFICIAL NCH432 Of 2010, capítulo 7.15: “Diseño bajo cargas de viento en otras estructuras”
- [6] Sarawit, A., Kan, F. (2014). Finite Element Analyses of CCAT Preliminary Design SPIE Vol. 9145 -17. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 03/18/2016
- [7] Canales, C., Vial, J. (2019). Reporte de mediciones vibratorias del radiotelescopio CSO. Departamento de Ingeniería Mecánica. UdeC.
- [8] CSO Telescope Drawings (1973). Planos de detalle de piezas del CSO. CALTECH.
- [9] DesignXplorer Theory. Online Ansys Workbench Help. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/wb2_help/wb2h_de_sxplere.html
- [10] Aceros AZA [2020]. Catálogo Técnico de Productos 2020. <https://www.aza.cl/wp-content/uploads/2020/07/Catalogo-Tecnico-2020-Web.pdf>
- [11] Retamal, M. (2019). Análisis estructural de telescopio submilimétrico LCT bajo condiciones de viento y operación en Llano de Chajnantor, región de Antofagasta. Memoria de Título Ingeniería Civil Mecánica, UdeC.
- [12] ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide, R18.2 (2017). Obtenido de: https://www.academia.edu/38866112/ANSYS_Mechanical_APDL_Contact_Technology_Guide
- [13] Aceros Reseller (2019). Catálogo en línea de perfiles de vigas <https://www.acerosreseller.cl/canales.php>
- [14] Prodalam (2023). Catálogo de aceros y productos industriales. https://www3.prodalam.cl/wp-content/uploads/2019/01/catalogo_aceros.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Descripción técnica y dimensional de las piezas que forman el modelo CAD del LCT.

Parte inferior: la base donde se monta todo el telescopio (ver figura 42) es un marco cuadrado de 3,25m x 3,25 m, construido con vigas tipo H de 19,3 mm de espesor y descansa sobre cuatro apoyos modelados como cuerpos sólidos. Sobre la base va el rodamiento axial SKF 29438-E modelado como sólido, el que a su vez soporta al eje azimutal invertido cónico de 2,25 m de altura. Entre el eje y la plataforma azimutal se encuentra un apilamiento de anillos sólidos en compresión, de espesor 4,75". El movimiento lateral-radial del telescopio, es restringido por un sistema de ocho rodillos (modelados con cuerpos de líneas) que conectan horizontalmente a los anillos con el Teepe. El Teepe es una estructura piramidal hexagonal truncada que va unida a la base cuadrada ya descrita.

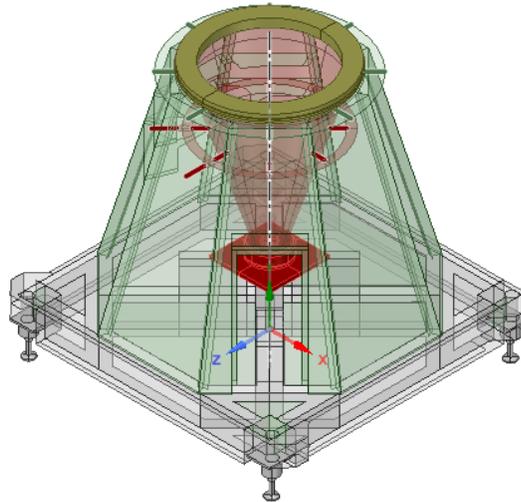


Figura 42. Conjunto parte inferior: apoyos y base (plomo), Teepe (verde), eje cónico (rojo), anillo de soporte (marrón), rodillos (líneas radiales verdes). Engranaje azimutal (líneas radiales rojas)

Parte central: en la figura 43 se muestra el conjunto de plataforma central, trasera, y laterales. Fue modelada sólo con superficies medias. Este conjunto mide 7,4[m] x 2[m] y está formado por múltiples vigas, refuerzos y planchas de acero A-36 soldadas. El despiece de este conjunto se muestra en las figuras 44, 45 y 46. La figura 44 muestra la plataforma central más su extensión trasera, que sostienen la parte superior del LCT mediante dos rodamientos radiales. Esta estructura mide 2[m] x 4,7[m], $h = 1[m]$, y descansa sobre el eje cónico azimutal invertido.

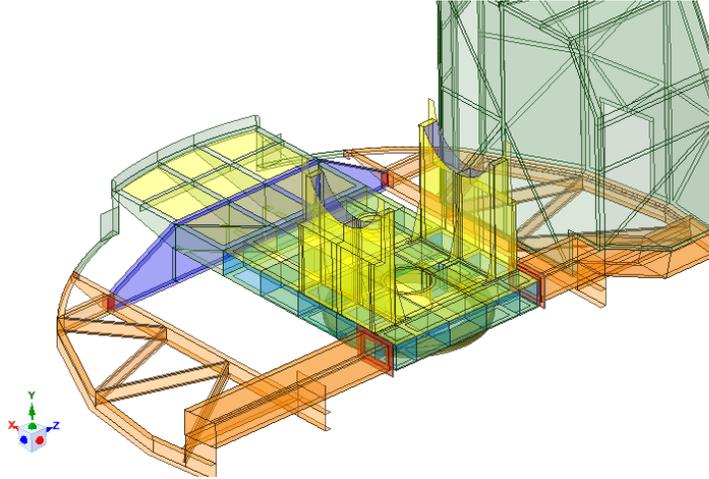


Figura 43. Conjunto parte central del LCT (plataformas azimutales existentes): plataforma central y trasera (amarillo/verde), plataformas laterales (naranja), gabinete para instrumentos (verde).

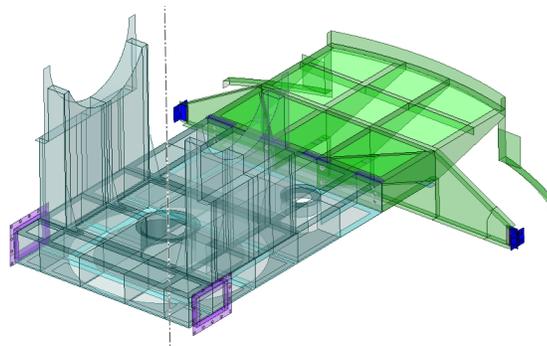


Figura 44. Plataforma azimutal central más extensión trasera

En la figura 45 se muestra la plataforma lateral que albergaba compresores. En la figura 46 se muestra la plataforma que soporta el gabinete con instrumentación astronómica. Estas plataformas son casi simétricas. Sus dimensiones son $1,8[m] \times 4,1[m]$, con un piso igual de $4[m^2]$, evidentemente es necesario ampliar el espacio disponible mediante las plataformas adicionales colgantes. El gabinete es una jaula de perfiles de aluminio y sus paredes son de espuma y enchapados de madera.

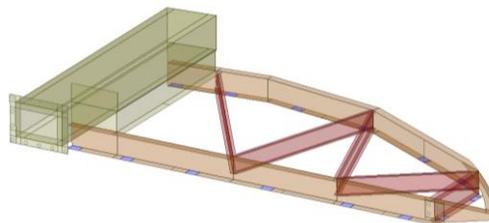


Figura 45. Plataforma azimutal lateral para compresores.

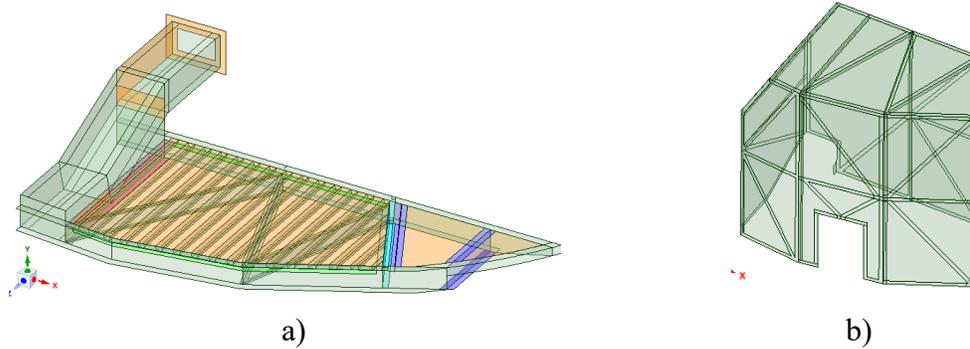


Figura 46. a) Plataforma lateral que alberga gabinete b) Gabinete para instrumentos

La figura 47 muestra un ensamblaje esquemático, del conjunto inferior y central, más algunos componentes superiores como son los brazos, contrapesos y rodamientos de elevación. Se tiene una altura de 3,3 metros desde el suelo hasta el piso de las plataformas laterales instaladas. El LCT completo, según la inclinación de la antena, puede alcanzar una altura entre 9,1 y 11,75 metros.

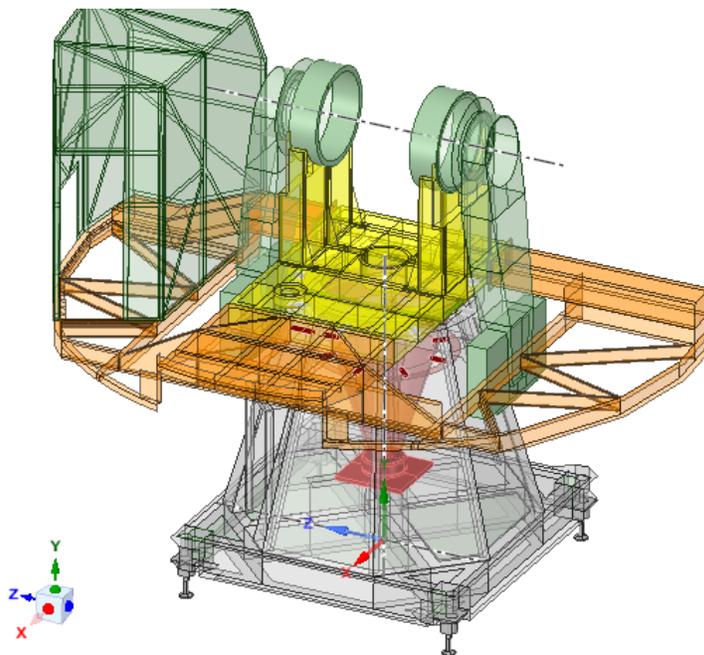
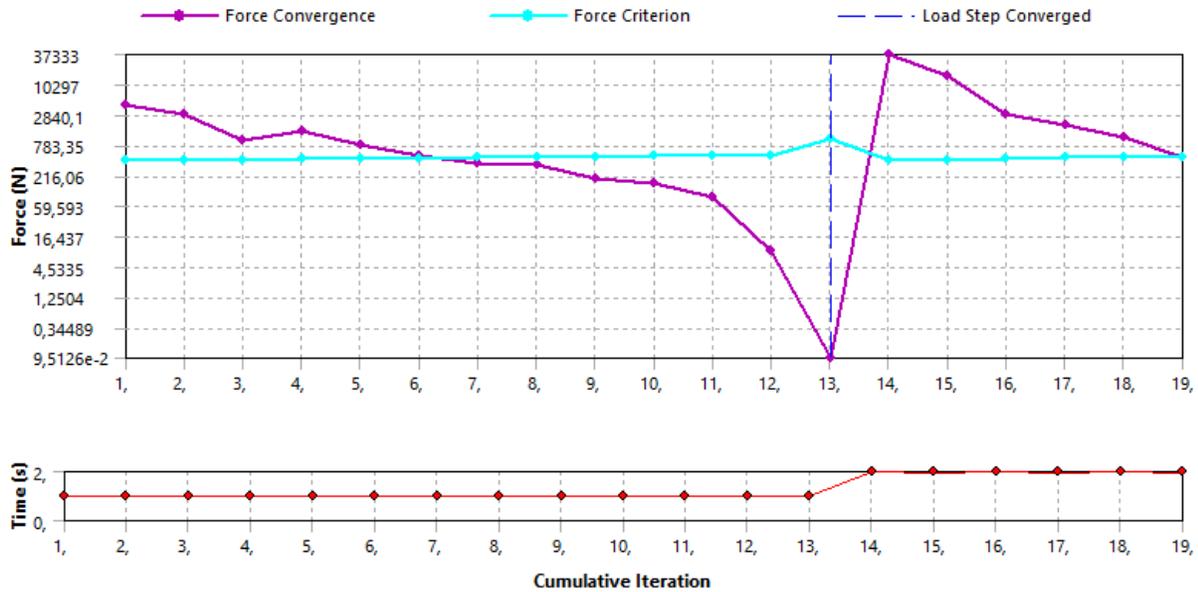


Figura 47. Ensamble parcial de los conjuntos inferior y central del LCT. Desde abajo hacia arriba: apoyos, base, TeePe, rodamiento axial azimutal, eje cónico azimutal, plataformas azimut central y laterales, gabinete, rodamientos radiales elevación, brazos y contrapesos.

Anexo 3. Convergencia de la solución, contacto friccional en uniones apernadas



Anexo 4. Esquema de integración Gauss-Legendre, fase de postprocesamiento en EF de vigas

En la figura 50 se muestra un ejemplo del esquema de integración con puntos de Gauss-Legendre a través de los perfiles dos elementos de viga beam188. Las secciones transversales de cada elemento son divididas en un conjunto de celdas. Cada celda queda definida por 4 vértices (en plomo), 4 nodos de sección (en negro) y 4 puntos de integración (cruces). El cálculo del campo de esfuerzos y desplazamientos se realiza exclusivamente en los puntos de integración (cruces), luego esos resultados son extrapolados a los nodos de sección y vértices de celda.

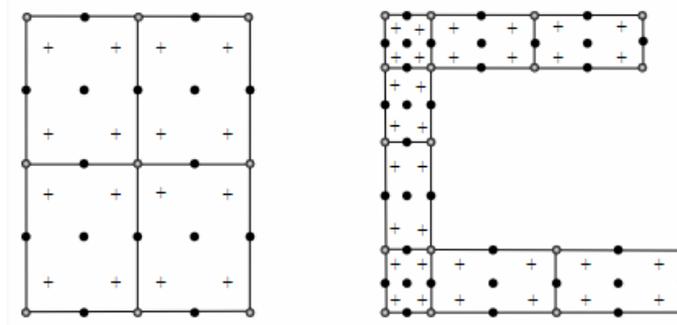
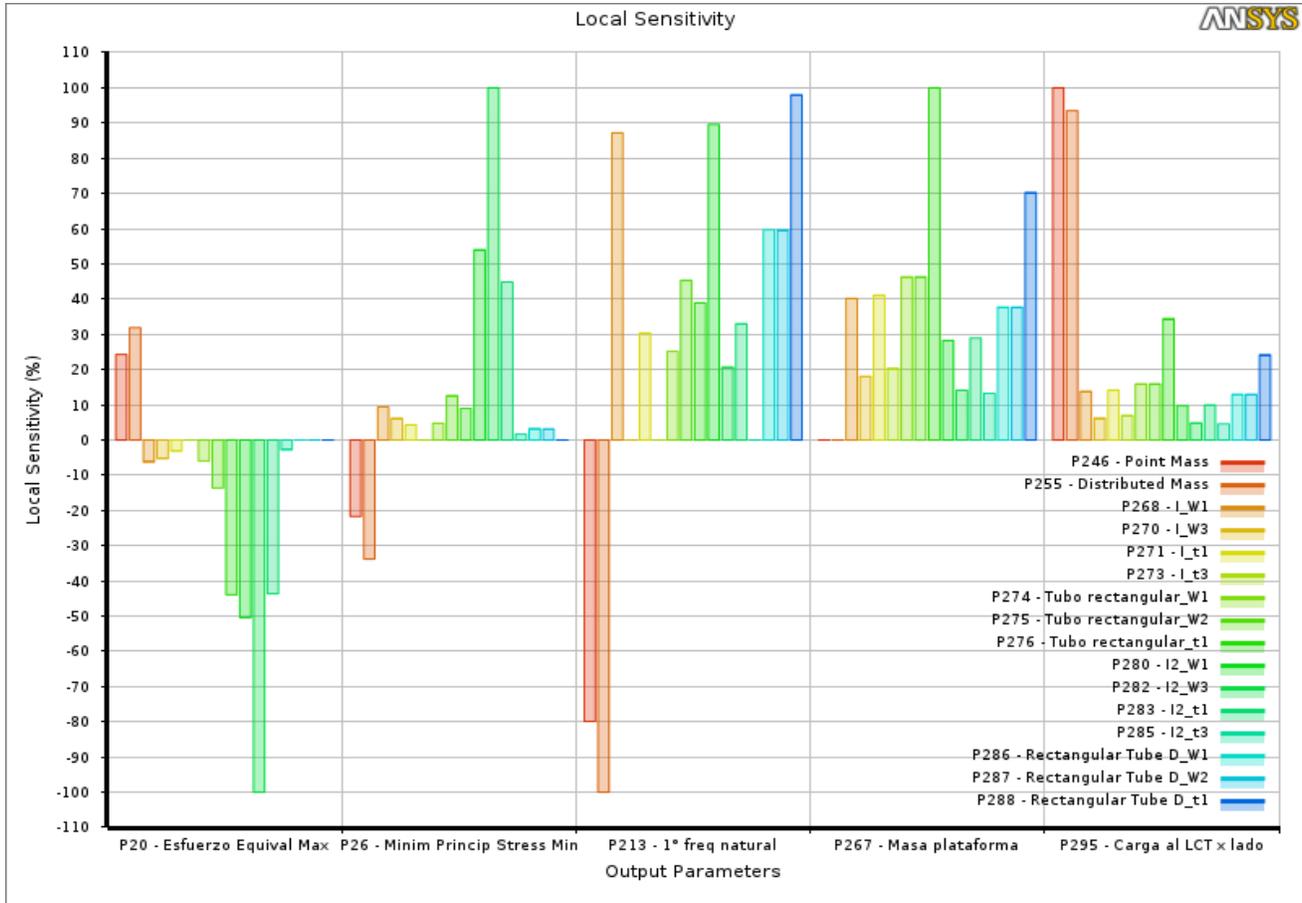


Figura 50. Esquema de integración de gauss-legendre para el cálculo a través de las secciones transversales en elementos finitos de vigas [9]

Anexo 5. Diagrama de Sensibilidad Local entre variables



Análisis de sensibilidad local para las variables output objetivo, realizado en Ansys

Anexo 6. Diagramas de Concesión entre variables objetivos (trade-off)

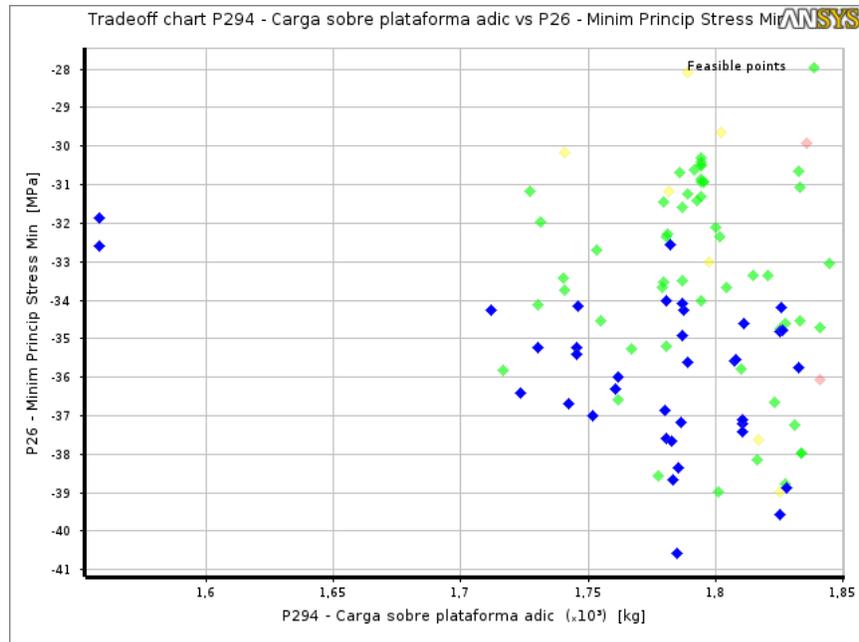


Figura 51. Diagrama trade-off Esfuerzo de compresión mínimo vs Carga Aplicada

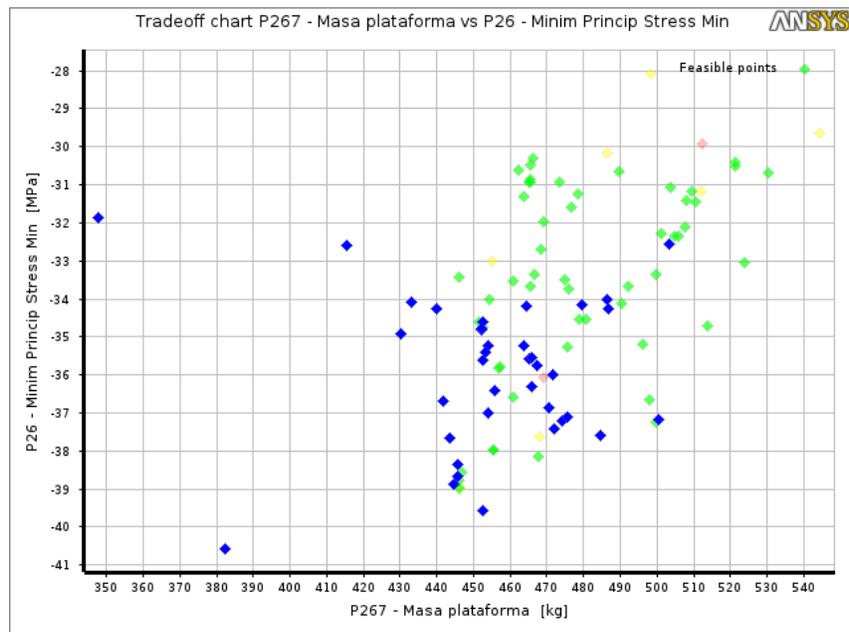


Figura 52. Diagrama trade-off Esfuerzo de compresión mínimo vs Masa plataforma

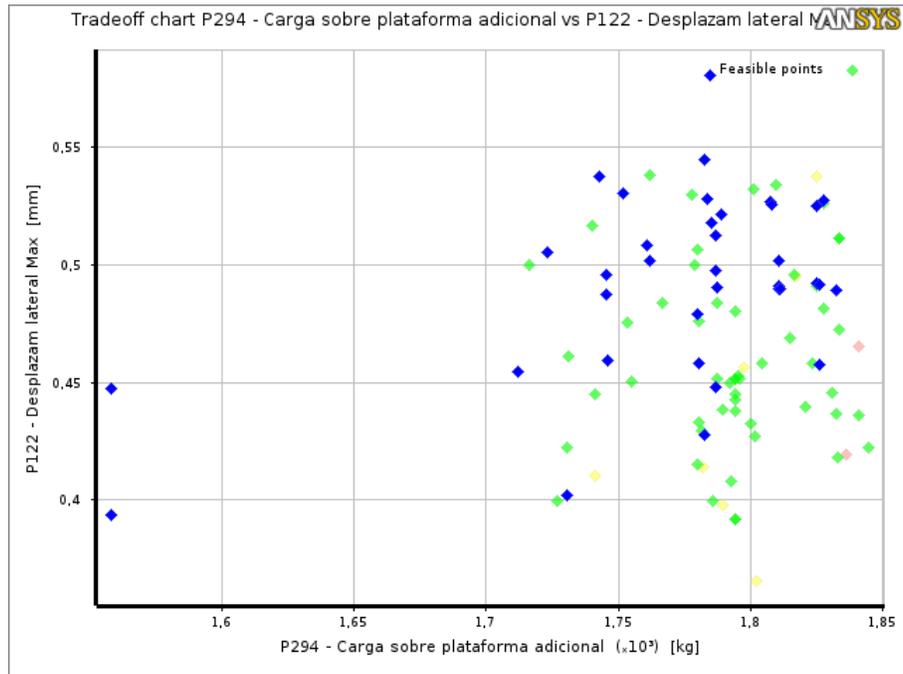


Figura 53. Diagrama trade-off Desplazamiento lateral máximo vs Carga Aplicada

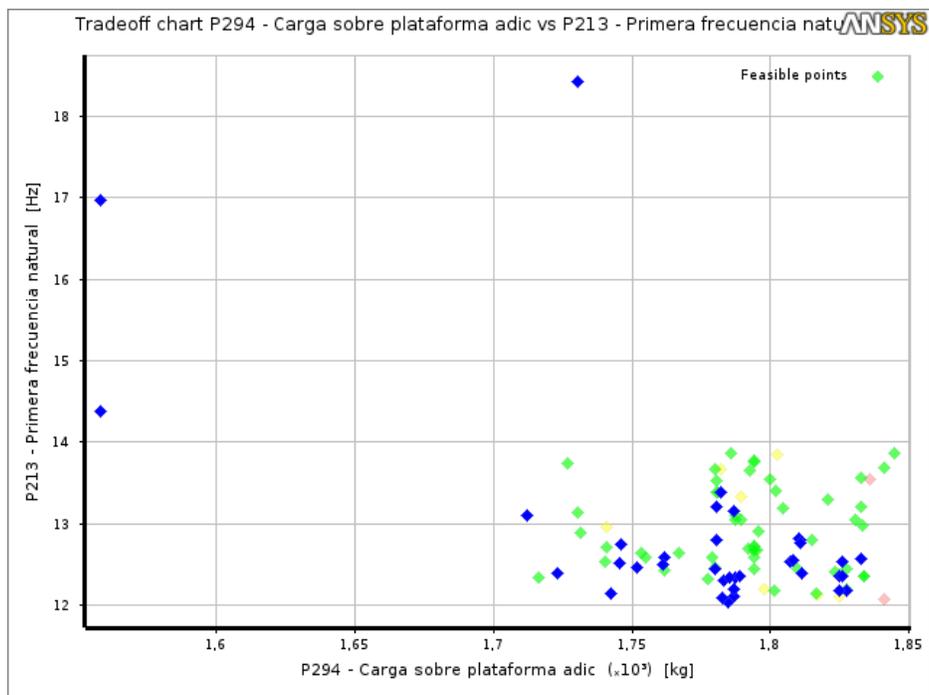


Figura 54. Diagrama trade-off Primera Frecuencia Natural vs Carga Aplicada

Anexo 7. Coeficientes de los polinomios de regresión múltiple que modelan algunos outputs

Esfuerzo equivalente Max		Masa plataforma		Primera Frecuencia Natural	
Término	Coefficiente	Término	Coefficiente	Término	Coefficiente
Cte	2,68E+00	Cte	1,98E+01	Cte	3,96E+00
X0_trns	2,03E-01	X2_trns	1,26E+00	X0_trns	-1,20E-01
X1_trns	2,78E-01	X3_trns	5,65E-01	X1_trns	-1,46E-01
X2_trns	-4,88E-02	X4_trns	1,29E+00	X2_trns	1,39E-01
X3_trns	-4,41E-02	X5_trns	6,35E-01	X4_trns	4,50E-02
X4_trns	-2,66E-02	X6_trns	1,45E+00	X6_trns	3,86E-02
X6_trns	-3,92E-02	X7_trns	1,45E+00	X7_trns	6,84E-02
X7_trns	-9,25E-02	X8_trns	3,12E+00	X8_trns	5,25E-02
X8_trns	-4,32E-02	X9_trns	8,82E-01	X9_trns	1,43E-01
X9_trns	-2,90E-01	X10_trns	4,41E-01	X10_trns	1,46E-02
X10_trns	-4,36E-01	X11_trns	9,03E-01	X11_trns	5,09E-02
X11_trns	-1,98E-01	X12_trns	4,14E-01	X13_trns	9,33E-02
X12_trns	-1,40E-02	X13_trns	1,18E+00	X14_trns	9,29E-02
X1_trns * X1_trns	1,15E-02	X14_trns	1,18E+00	X15_trns	1,56E-01
X6_trns * X6_trns	2,99E-02	X15_trns	2,19E+00	X1_trns * X1_trns	1,85E-02
X7_trns * X7_trns	1,20E-02	X8_trns * X8_trns	-1,71E-01	X2_trns * X2_trns	-3,43E-02
X8_trns * X8_trns	9,30E-03	X15_trns * X15_trns	-7,72E-02	X4_trns * X4_trns	-2,05E-02
X9_trns * X9_trns	3,62E-02	X2_trns * X4_trns	5,37E-01	X6_trns * X6_trns	-1,04E-02
X10_trns * X10_trns	6,27E-02	X2_trns * X13_trns	-6,67E-15	X8_trns * X8_trns	-3,46E-02
X11_trns * X11_trns	3,25E-02	X3_trns * X5_trns	2,41E-01	X9_trns * X9_trns	-3,83E-02
X0_trns * X1_trns	-3,85E-02	X4_trns * X5_trns	-4,56E-02	X10_trns * X10_trns	-2,82E-02
X1_trns * X9_trns	-2,92E-02	X6_trns * X8_trns	7,32E-01	X11_trns * X11_trns	-1,39E-02
X1_trns * X10_trns	-2,86E-02	X7_trns * X8_trns	7,32E-01	X13_trns * X13_trns	-2,30E-02
X1_trns * X11_trns	-2,43E-02	X9_trns * X11_trns	3,77E-01	X14_trns * X14_trns	-2,07E-02
X2_trns * X7_trns	1,75E-02	X10_trns * X12_trns	1,89E-01	X15_trns * X15_trns	-7,18E-02
X2_trns * X8_trns	-4,43E-03	X11_trns * X12_trns	-3,21E-02	X0_trns * X1_trns	2,08E-02
X2_trns * X9_trns	-1,45E-02	X13_trns * X15_trns	5,57E-01	X0_trns * X2_trns	-9,98E-03
X2_trns * X10_trns	-2,16E-02	X14_trns * X15_trns	5,57E-01	X0_trns * X12_trns	8,93E-03
X2_trns * X13_trns	-1,99E-03			X2_trns * X7_trns	-9,46E-03
X4_trns * X10_trns	5,12E-03			X2_trns * X9_trns	-1,30E-02
X6_trns * X8_trns	1,33E-02			X2_trns * X15_trns	1,27E-02
X6_trns * X10_trns	2,49E-02			X3_trns * X4_trns	-1,14E-02
X6_trns * X14_trns	-9,35E-03			X4_trns * X9_trns	-1,26E-02
X7_trns * X8_trns	-1,11E-02			X5_trns * X13_trns	9,99E-03
X8_trns * X9_trns	-2,64E-02			X6_trns * X14_trns	1,06E-02
X8_trns * X11_trns	-2,09E-02			X7_trns * X8_trns	1,29E-02
X8_trns * X14_trns	-6,91E-03			X7_trns * X9_trns	-9,51E-03
X8_trns * X15_trns	-2,68E-03			X7_trns * X15_trns	-9,37E-03
X9_trns * X10_trns	6,42E-02			X9_trns * X15_trns	1,80E-02
X9_trns * X11_trns	1,47E-02			X10_trns * X13_trns	1,35E-02
X9_trns * X12_trns	1,98E-02			X10_trns * X14_trns	2,03E-02
X10_trns * X11_trns	1,85E-02			X11_trns * X15_trns	9,24E-03
X10_trns * X12_trns	-7,28E-03			X12_trns * X13_trns	1,02E-02
X11_trns * X12_trns	2,02E-02			X12_trns * X15_trns	9,12E-03
X13_trns * X14_trns	7,14E-03			X13_trns * X14_trns	-2,20E-02
				X14_trns * X15_trns	-1,26E-02

Anexo 8. Curvas de regresión múltiple, pares de variables

A continuación se muestran algunas de las curvas de regresión agrupando pares ordenados output versus input. En cada curva se mantiene constantes al resto de variables input.

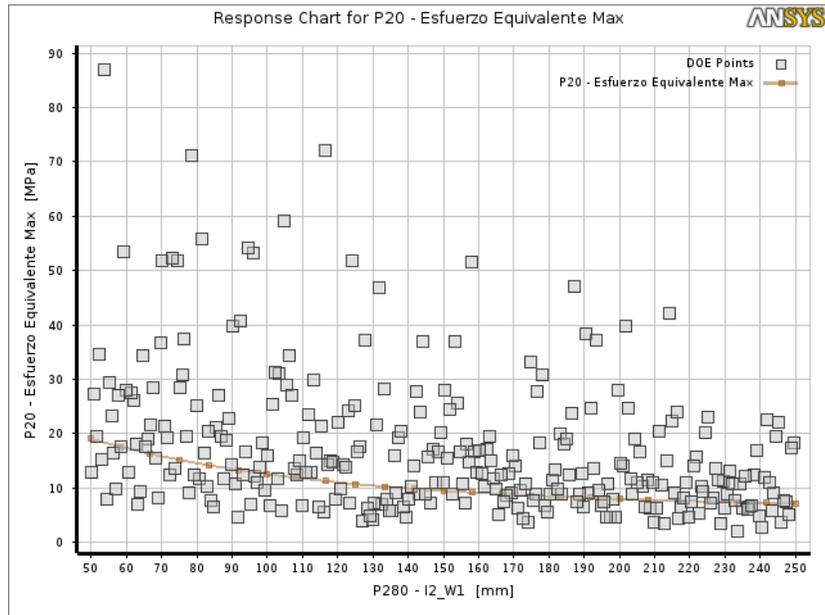


Figura 55. Curva de regresión de Esfuerzo Equivalente vs I2_W1 (ancho de aleta viga de carga)

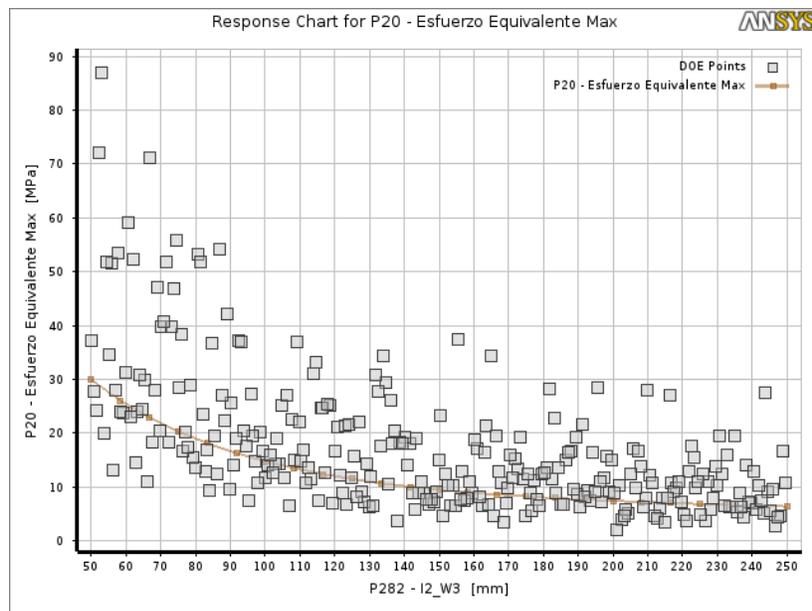


Figura 56. Curva de regresión de Esfuerzo Equivalente vs I2_W3 (ancho de alma viga de carga)

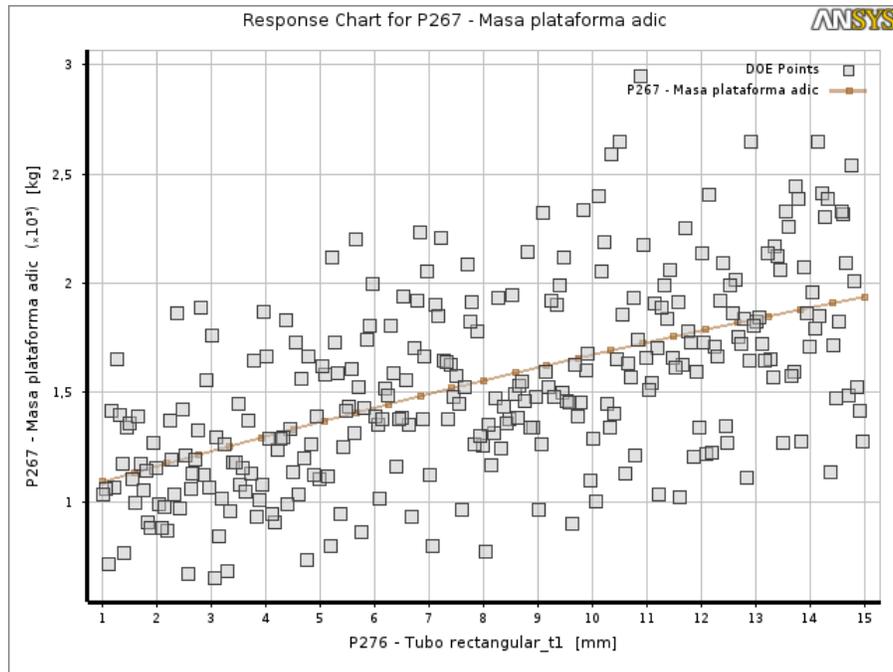


Figura 57. Curva de regresión de Masa de plataforma adicional vs espesor de Columnas

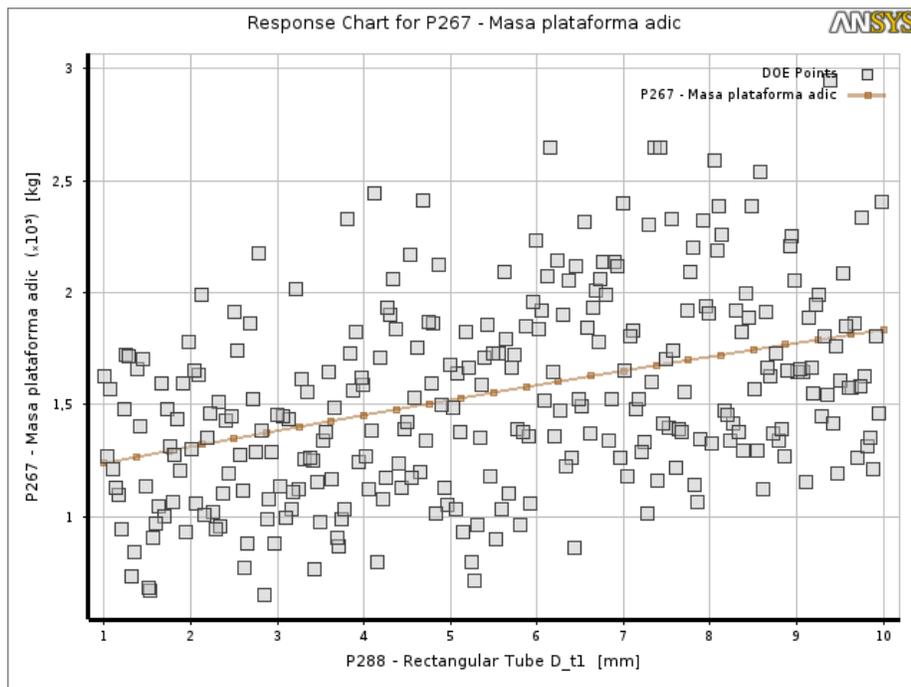


Figura 58. Curva de regresión de Masa de plataforma adicional vs Espesor de arriostras (D_t)

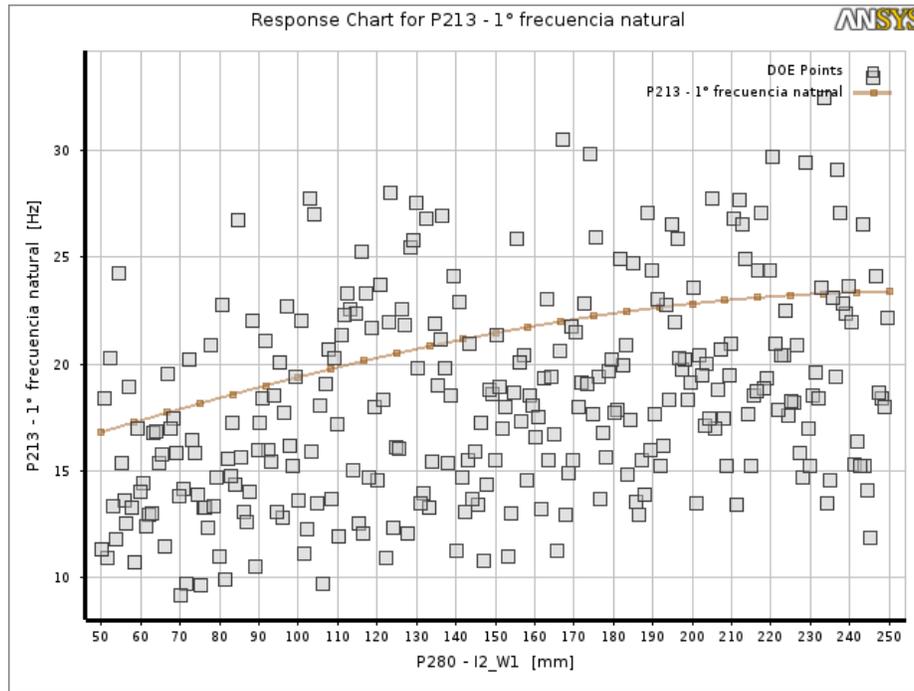


Figura 59. Primera frecuencia natural vs I2_W1 (ancho de aleta viga de carga)

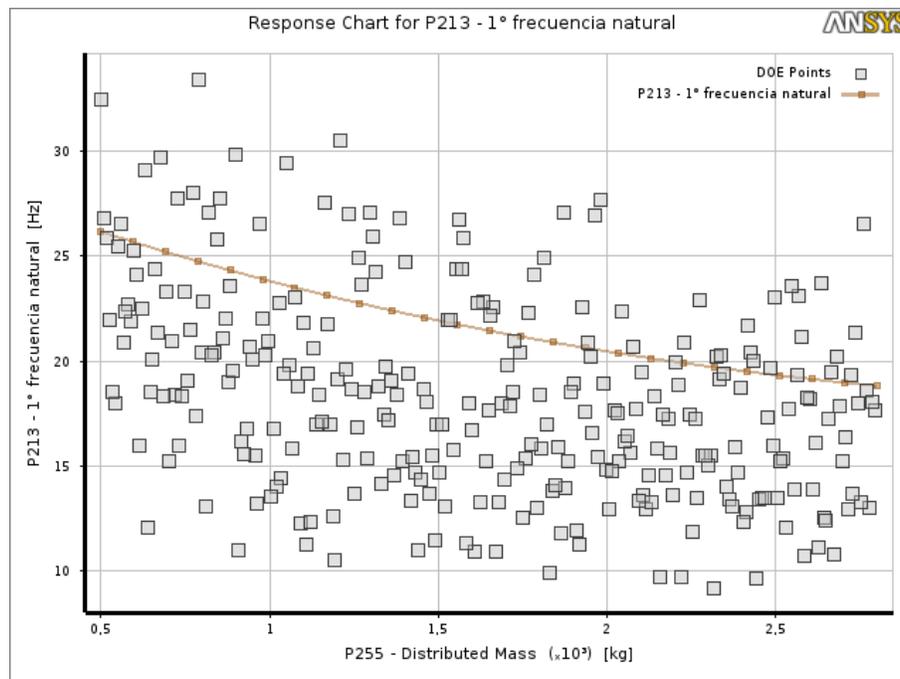


Figura 60. Primera frecuencia natural vs Carga distribuida

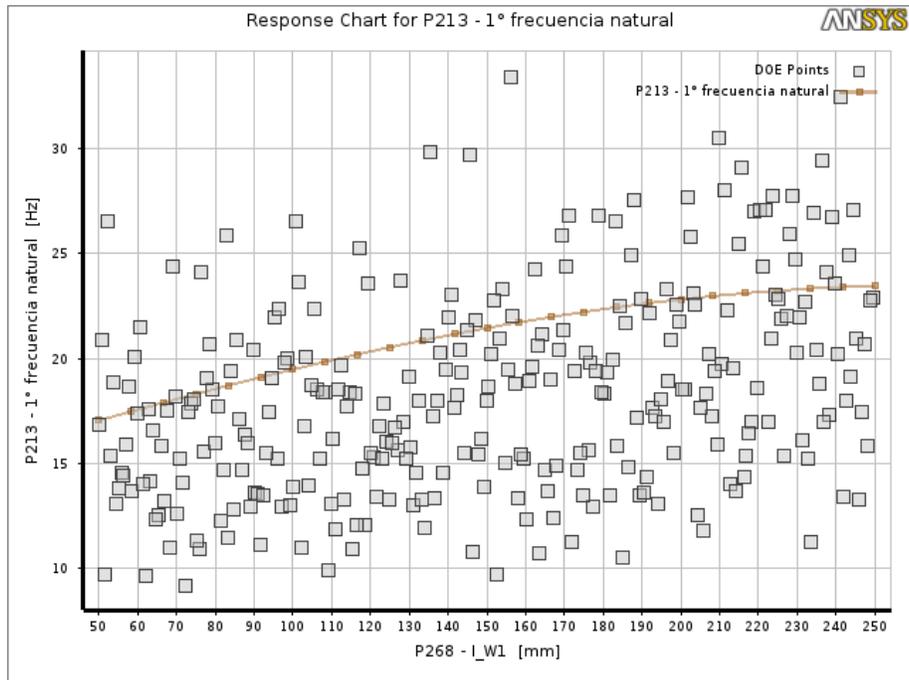


Figura 61. Primera frecuencia natural vs I_W1 (ancho de aleta viga perimetral)

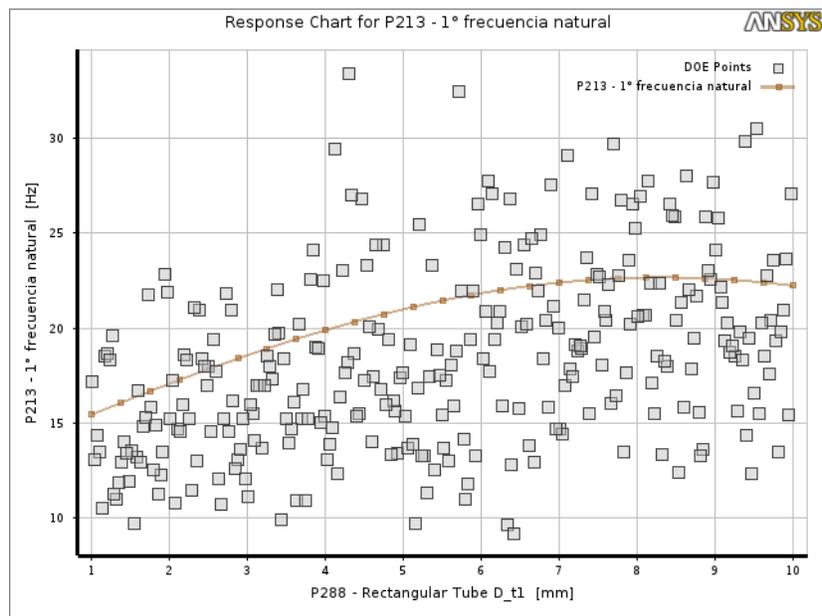
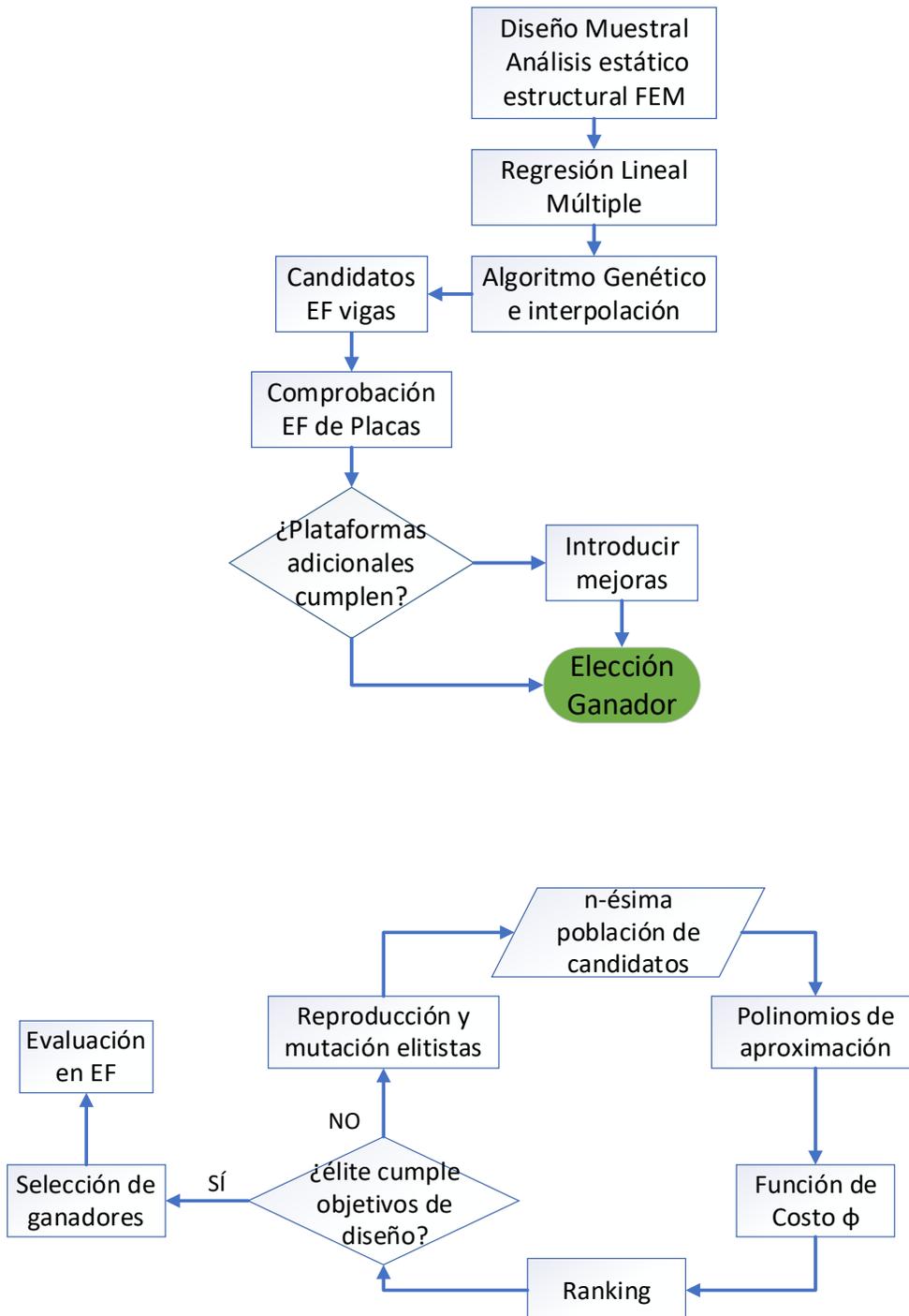


Figura 62. Primera frecuencia natural vs Espesor arriostra (D_t)

Anexo 9. Diagramas de flujo del proceso de optimización



Anexo 10. Preselección de alternativas con dimensiones de catálogo, sobre los entramados de arriostramientos 2, 7 y 11, modelados en elementos de vigas.

VARIABLES	Alternativas de diseño reales bajo idénticas cargas									
	A5	A8	A10	A11	A12	A13	A15	B4	B6	
	dp142	dp143	dp144	dp145	dp146	dp147	dp149	dp151	dp152	
viga I_W1 [mm]	100	120	100	120	100	120	120	100	120	
viga I_W3 [mm]	200	114	96	114	96	114	114	96	114	
viga I_t1 [mm]	8,5	8	8	8	8	8	8	8	8	
viga I_t3 [mm]	5,6	5	5	5	5	5	5	5	5	
columna_W1 [mm]	50	50	30	50	50	60	40	40	50	
columna_W2 [mm]	100	50	50	50	50	60	60	80	50	
columna_t [mm]	3	3	2	3	2	2	2	3	3	
viga I2_W1 [mm]	91	100	100	100	100	120	100	100	100	
viga I2_W3 [mm]	180	100	96	96	96	114	96	96	96	
viga I2_t1 [mm]	8	10	8	8	8	8	8	8	8	
viga I2_t3 [mm]	5,3	6	5	5	5	5	5	5	5	
arriostra_W1 [mm]	30	30	30	30	40	30	30	40	40	
arriostra_W2 [mm]	50	50	50	50	40	50	50	40	40	
arriostra_t [mm]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
q_{distr} [kg]	800	800	800	800	800	800	800	800	800	
q_{punt} [kg]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
$q_{tot,platf}$ [kg]	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
$F_{V, lateral}$ [N]	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	7302	
v2	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	22	33	58	34	42	34	44	29	33
	f_1 [Hz]	12,86	13,71	12,48	13,44	12,68	14,15	13,22	13,00	13,46
	M_{platf} [kg]	673	577	452	552	473	547	504	554	552
	$q_{lat,LCT}$ [kg]	2673	2577	2452	2552	2473	2547	2504	2554	2552
v7	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	50	59	123	59	77	61	84	51	59
	f_1 [Hz]	11,09	11,23	9,54	11,10	10,05	11,28	10,50	10,86	11,10
	M_{platf} [kg]	499	516	395	491	415	487	446	491	491
	$q_{lat,LCT}$ [kg]	2499	2516	2395	2491	2415	2487	2446	2491	2491
v11	$\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	32	48	102	49	65	48	70	42	48
	f_1 [Hz]	12,46	13,02	11,57	12,80	11,90	13,27	12,38	12,46	12,80
	M_{platf} [kg]	634	538	413	513	434	508	465	515	513
	$q_{lat,LCT}$ [kg]	2634	2538	2413	2513	2434	2508	2465	2515	2513

Anexo 11. Vista posterior del Radiotelescopio CCAT con plataformas nasmyth de 2 niveles

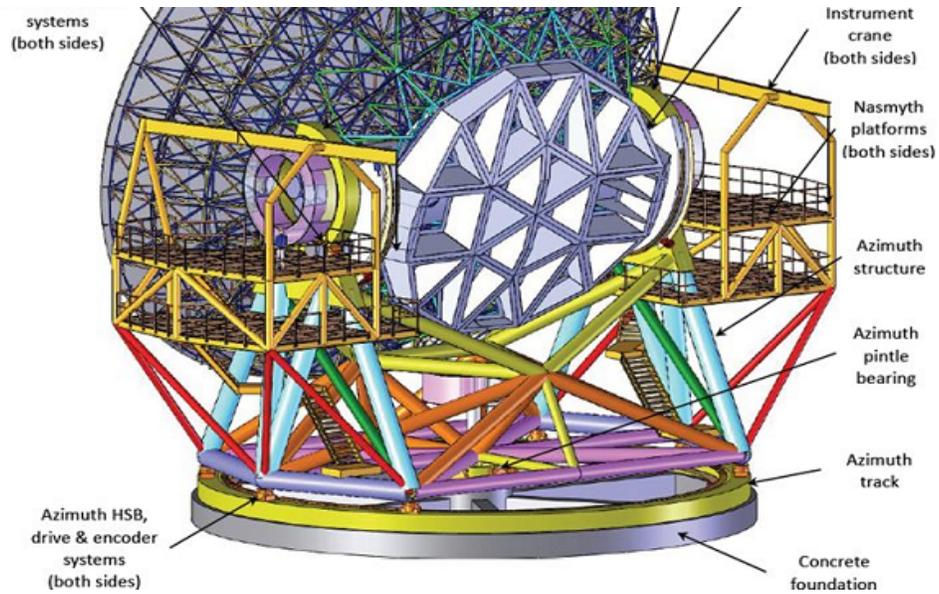


Figura 63. Ejemplo de plataformas Nasmyth de dos niveles en radiotelescopio CCAT [6]

Anexo 12. Mallado del modelo AX con elementos finitos de placas

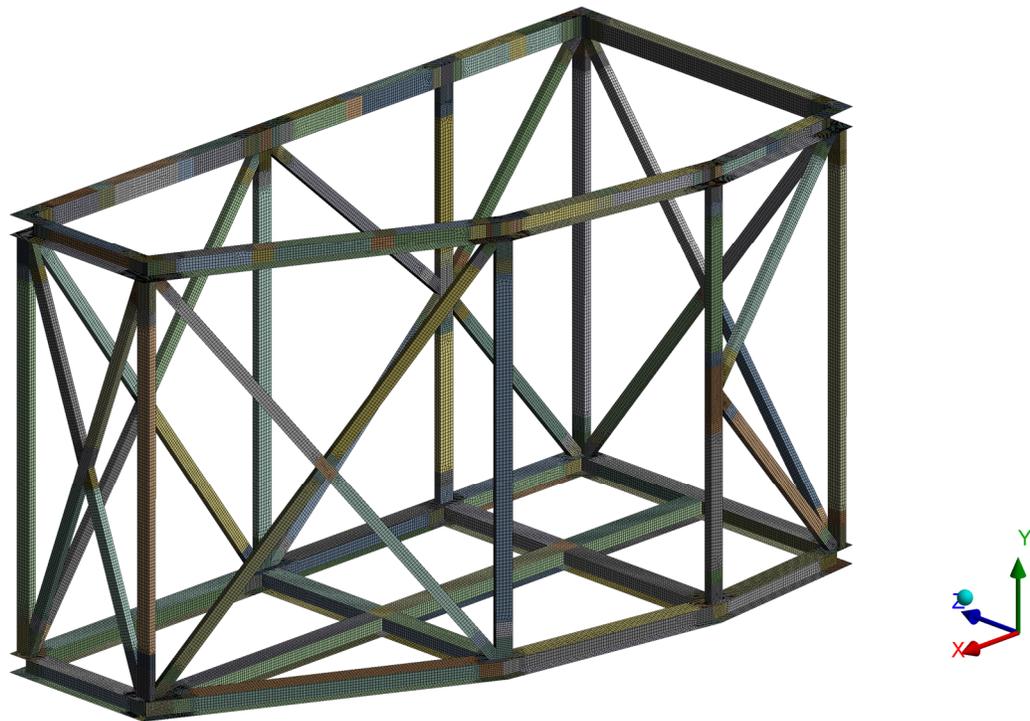


Figura 64. “Isométrico” y mallado de alternativa AX sin modificaciones.

Anexo 13. Selección ganador AX_(Y). Mallado en elementos de placas

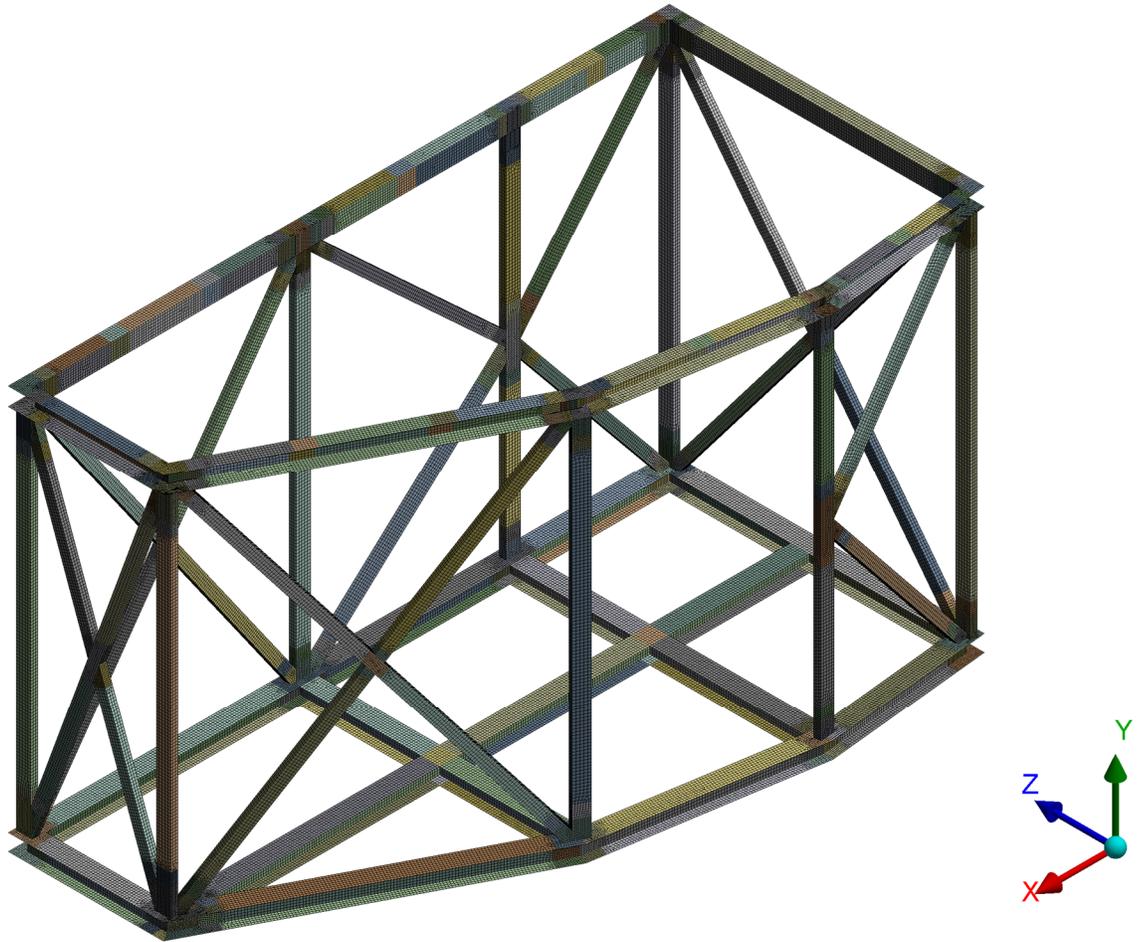


Figura 65. Isométrico y mallado de selección ganadora AX_(Y) con modificaciones.

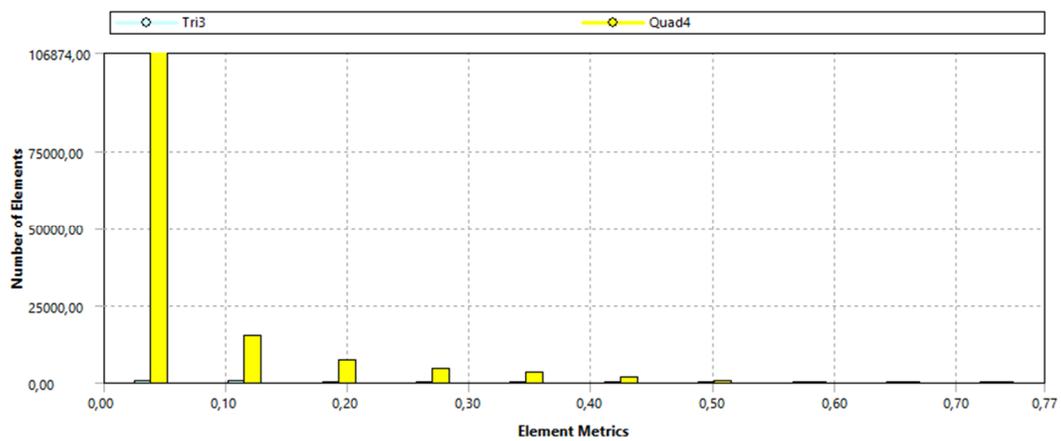


Figura 66. Indicador “skewness”: calidad de la malla FEM para el modelo AX_(Y)

Anexo 14. Acoplamiento de plataformas adicionales al radiotelescopio LCT.

Para facilitar la visualización, se excluyó el reflector primario. En rojo se señalan los puntos críticos del LCT.

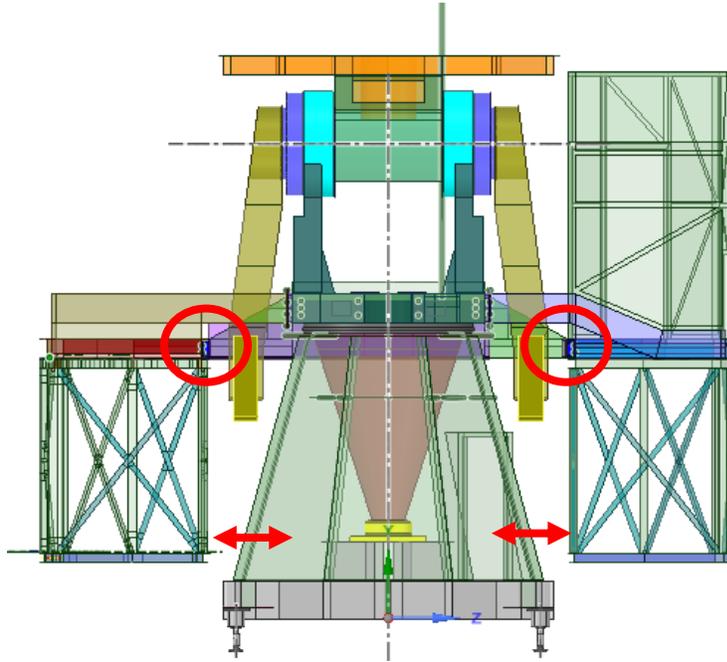


Figura 67. Acoplamiento de plataformas adicionales al radiotelescopio LCT. Vista frontal

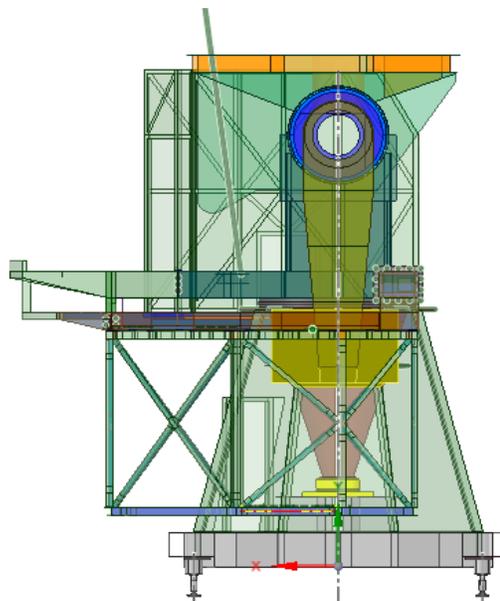
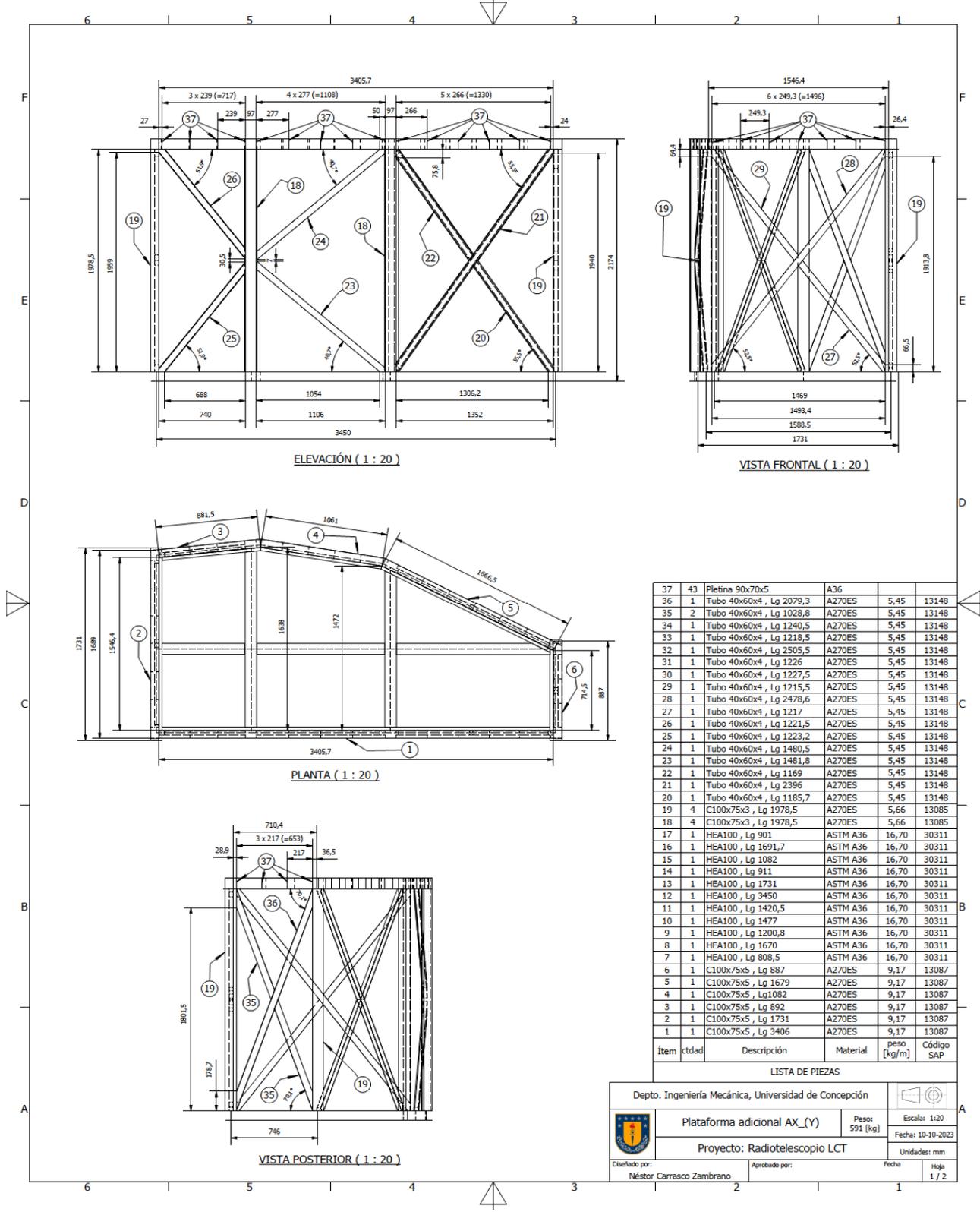


Figura 68. Vista lateral, acoplamiento de plataformas adicionales al radiotelescopio LCT

Anexo 15. Planos de Conjunto de la Estructura de Plataforma Adicional AX_(Y)



37	43	Pletina 90x70x5	A36		
36	1	Tubo 40x60x4, Lg 2079,3	A270ES	5,45	13148
35	2	Tubo 40x60x4, Lg 1028,8	A270ES	5,45	13148
34	1	Tubo 40x60x4, Lg 1240,5	A270ES	5,45	13148
33	1	Tubo 40x60x4, Lg 1218,5	A270ES	5,45	13148
32	1	Tubo 40x60x4, Lg 2505,5	A270ES	5,45	13148
31	1	Tubo 40x60x4, Lg 1226	A270ES	5,45	13148
30	1	Tubo 40x60x4, Lg 1227,5	A270ES	5,45	13148
29	1	Tubo 40x60x4, Lg 1215,5	A270ES	5,45	13148
28	1	Tubo 40x60x4, Lg 2478,6	A270ES	5,45	13148
27	1	Tubo 40x60x4, Lg 1217	A270ES	5,45	13148
26	1	Tubo 40x60x4, Lg 1221,5	A270ES	5,45	13148
25	1	Tubo 40x60x4, Lg 1223,2	A270ES	5,45	13148
24	1	Tubo 40x60x4, Lg 1480,5	A270ES	5,45	13148
23	1	Tubo 40x60x4, Lg 1481,8	A270ES	5,45	13148
22	1	Tubo 40x60x4, Lg 1169	A270ES	5,45	13148
21	1	Tubo 40x60x4, Lg 2396	A270ES	5,45	13148
20	1	Tubo 40x60x4, Lg 1185,7	A270ES	5,45	13148
19	4	C100x75x3, Lg 1978,5	A270ES	5,66	13085
18	4	C100x75x3, Lg 1978,5	A270ES	5,66	13085
17	1	HEA100, Lg 901	ASTM A36	16,70	30311
16	1	HEA100, Lg 1691,7	ASTM A36	16,70	30311
15	1	HEA100, Lg 1082	ASTM A36	16,70	30311
14	1	HEA100, Lg 911	ASTM A36	16,70	30311
13	1	HEA100, Lg 1731	ASTM A36	16,70	30311
12	1	HEA100, Lg 3450	ASTM A36	16,70	30311
11	1	HEA100, Lg 1420,5	ASTM A36	16,70	30311
10	1	HEA100, Lg 1477	ASTM A36	16,70	30311
9	1	HEA100, Lg 1200,8	ASTM A36	16,70	30311
8	1	HEA100, Lg 1670	ASTM A36	16,70	30311
7	1	HEA100, Lg 808,5	ASTM A36	16,70	30311
6	1	C100x75x5, Lg 887	A270ES	9,17	13087
5	1	C100x75x5, Lg 1679	A270ES	9,17	13087
4	1	C100x75x5, Lg1082	A270ES	9,17	13087
3	1	C100x75x5, Lg 892	A270ES	9,17	13087
2	1	C100x75x5, Lg 1731	A270ES	9,17	13087
1	1	C100x75x5, Lg 3406	A270ES	9,17	13087

LISTA DE PIEZAS

Depto. Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción		Escala: 1:20	
Plataforma adicional AX_(Y)		Peso: 591 [kg]	Fecha: 10-10-2023
Proyecto: Radiotelescopio LCT			
Unidades: mm		Hoja 1 / 2	
Diseñado por:	Aprobado por:	Fecha:	Hoja:
Néstor Carrasco Zambrano			1 / 2

