



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA
MECÁNICA



**EVALUACIÓN DE LAS CARGAS AERODINÁMICAS
SOBRE ANTENA VERTEX RSI EN ESCENARIOS
CRÍTICOS DE OPERACIÓN**

POR

Nicolás Ortega

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción

Profesor Guía:
PhD. Pablo E. Cornejo Olivares
PhD. Cristian Alexis Canales Cárdenas

Octubre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Nicolás Marcelo Ortega García

© 2023 Nicolás Marcelo Ortega García

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

Agradecimientos

Al culminar este extenso y arduo proceso, tengo plena conciencia de que las páginas a mi disposición son insuficientes para agradecer a cada persona que me ha apoyado para llegar a este punto. A aquellos que no encuentren su nombre en este espacio, quiero que sepan que valoro profundamente su contribución; cada gesto y palabra ha sido fundamental no solo para este proyecto, sino para formarme como ser humano.

En primer lugar, mi agradecimiento más profundo es para mi padre y mi madre. Gracias por alimentar esa insaciable curiosidad que ha habitado en mí desde siempre. Su apoyo incondicional, incluso en los momentos donde ni yo mismo me entendía, ha sido la piedra angular que me ha permitido crecer y evolucionar al hombre que soy hoy. Mi amor por ustedes es infinito y trasciende cualquier palabra.

Mi gratitud se extiende también a don Iván López y a don Gerardo Gómez, así como al equipo de Safety de ALMA. Apostaron por mí sin necesidad de hacerlo, confiaron en mis habilidades y me brindaron la oportunidad de demostrarles diariamente que su fe no era infundada. Estoy eternamente agradecido por los momentos compartidos y los "*Coffee Breaks*" que, más allá del trabajo, me ofrecieron valiosas lecciones de vida que atesoraré siempre.

Quiero agradecer también a mis queridos amigos Felipe, Sergio, Jaime, Nico, Nacho, Javiera y muchos otros, quienes han sido mi apoyo y compañía durante estos años universitarios, enseñándome el valor de la amistad sincera, que nada busca y que siempre espera. Un agradecimiento especial a Sebastián Gallardo, cuya paciencia y guía académica durante la creación de esta memoria de título han sido fundamentales, y a Tomás Domínguez, que a pesar del *bullying* constante al que nos sometemos diariamente en casa, ha sido mi confidente en los momentos más difíciles, y me ha hecho compañía de formas que, aunque él piense trivial y cotidiana, muchas veces ha sido justo lo que necesitaba.

Debo mencionar al glorioso GIP y a todos sus miembros, que, a pesar de solicitar mi atención en momentos cruciales, me ha aportado la energía y la pasión necesarias para continuar adelante. Es y será un recuerdo viviente de porqué hago lo que hago, pues me permitió demostrarme a mí mismo de lo que soy capaz, y del poder que se consigue al mezclar disciplina, pasión y compañerismo.

Finalmente quiero agradecer a Tatiana, por absolutamente todo. Me gustaría la vida en palabras para explicarlo completamente; solo quiero decirle que agradezco inconmensurablemente su paciencia y fe ciega en nosotros y en lo que somos capaces, permitiéndome ser la mejor versión de mí mismo. Su compañía me hace recordar con afecto el pasado y me motiva a avanzar con ímpetu hacia el futuro. Ojalá todos tuvieran la fortuna de contar con alguien como tú en sus vidas. 1325.

Resumen

Los radiotelescopios han sido baluartes esenciales en la exploración astronómica, permitiendo avances significativos en nuestra comprensión del universo. Históricamente, estos instrumentos han desentrañado cuantiosos misterios del cosmos, marcando hitos en la ciencia astronómica. Chile, en particular, ha desempeñado un papel vital en la radioastronomía global, al ser anfitrión de proyectos emblemáticos, consolidando su estatura en la arena astronómica internacional.

Uno de estos proyectos es el ALMA en el Valle de Chajnantor. La singularidad de ALMA no sólo radica en su capacidad tecnológica, sino también en su ubicación estratégica. Para garantizar la recepción ininterrumpida y de alta calidad de las ondas de radio, es esencial minimizar las perturbaciones atmosféricas. Es por ello por lo que ALMA ha posicionado sus radiotelescopios a más de 5000 metros sobre el nivel del mar. Esta ubicación elevada, si bien ofrece datos astronómicos de una claridad excepcional, también somete a los radiotelescopios a condiciones climáticas extremas, especialmente cargas de viento significativas.

A pesar de que estas antenas están robustamente diseñadas con factores de seguridad adecuados, las cargas aerodinámicas no son trivialmente despreciables. Entender a fondo la naturaleza y magnitud de estas cargas es de suma importancia, no sólo para garantizar la integridad estructural de los radiotelescopios, sino también para optimizar su tiempo de operación, planificar adecuadamente el mantenimiento y establecer criterios claros de operación según las condiciones de viento.

Con este propósito en mente, el presente trabajo se sumerge en un estudio detallado de la dinámica de fluidos computacional (CFD), con el objetivo de modelar las cargas aerodinámicas que enfrenta el radiotelescopio VERTEX RSI en el observatorio ALMA. Se realiza un análisis exhaustivo de las condiciones de viento a las que este radiotelescopio se encuentra expuesto, enfocándose en escenarios operativos críticos dentro del observatorio ALMA. Los resultados obtenidos son meticulosamente comparados con estudios previos y literatura relevante, buscando asegurar la rigurosidad, exactitud y relevancia de las conclusiones presentadas.

Palabras clave: Radiotelescopio, ALMA, Cargas aerodinámicas, Dinámica de Fluidos Computacional, Escenarios de operación, Condiciones de viento.

Abstract

Radiotelescopes have been essential strongholds in astronomical exploration, enabling significant advancements in our understanding of the universe. Historically, these instruments have unraveled several mysteries of the cosmos, marking milestones in astronomical science. Chile, in particular, has played a pivotal role in global radioastronomy, hosting flagship projects and solidifying its stature in the international astronomical arena.

One such project is ALMA in the Chajnantor Valley. The uniqueness of ALMA lies not only in its technological capability but also in its strategic location. To ensure uninterrupted, high-quality reception of radio waves, it's essential to minimize atmospheric disturbances. For this reason, ALMA has positioned its radiotelescopes at over 5000 meters above sea level. This elevated location, while providing astronomical data of exceptional clarity, also subjects the radiotelescopes to extreme weather conditions, particularly significant wind loads.

Although these antennas are robustly designed with suitable safety factors, the aerodynamic loads are not trivially negligible. A thorough understanding of the nature and magnitude of these loads is of utmost importance, not only to ensure the structural integrity of the radiotelescopes but also to optimize their operational time, plan maintenance adequately, and establish clear operational criteria based on wind conditions.

With this purpose in mind, the present work delves into a detailed study of computational fluid dynamics (CFD), aiming to model the aerodynamic loads faced by the VERTEX RSI radiotelescope at the ALMA observatory. An exhaustive analysis of the wind conditions this radiotelescope is exposed to is conducted, focusing on critical operational scenarios within the ALMA observatory. The results obtained are meticulously compared with previous studies and relevant literature, aiming to ensure the rigor, accuracy, and relevance of the presented conclusions.

Keywords: Radiotelescope, ALMA, Aerodynamic loads, Computational Fluid Dynamics, Operational scenarios, Wind conditions.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	i
Lista de Tablas	ii
Lista de Figuras	iii
Glosario	vi
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodología.....	3
2 CAPÍTULO 2: Objeto de investigación	4
2.1 Radioastronomía y radiotelescopios	4
2.2 VERTEX RSI	6
3 CAPÍTULO 3: Estado del Arte	8
3.1 Viento en el valle de Chajnantor	8
3.2 Efectos del viento en radiotelescopios.....	13
3.3 Modelación CFD del viento alrededor de un radiotelescopio	15
4 CAPÍTULO 4: Escenarios críticos de operación	17
4.1 Cénit (mantenimiento).....	19
4.2 “Sideral Tracking”	20
5 CAPÍTULO 5: Modelo numérico	22
5.1 Condiciones climáticas	22
5.2 Modelo geométrico.....	24
5.3 Modelo CFD	27
6 CAPÍTULO 6: Resultados	33
6.1 Caso “Cénit”	33
6.2 Caso “Sideral Tracking”	49
7 CAPÍTULO 7: Discusión y propuestas futuras.....	67
7.1 Discusión	67
7.2 Propuestas futuras.....	69
Referencias	70
Anexo A: Condiciones de borde en el volumen de control.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1: Sitios de estaciones meteorológicas en el Valle de Chajnantor (Fuente: (Otarola et al., 2019))	9
Tabla 2: Dimensiones principales del radiotelescopio VERTEX RSI.....	24
Tabla 3: Dimensiones de volúmenes de control para análisis CFD en diversos estudios (se subrayan las dimensiones escogidas).....	25
Tabla 4: Promedio de las propiedades físicas de la atmósfera según el centro meteorológico APEX	28
Tabla 5: Condiciones de borde del modelo CFD	32
Tabla 6: Comparación de coeficientes de arrastre de reflectores entre distintos modelos CFD del flujo de aire alrededor de radiotelescopios para el caso “Cénit”	47
Tabla 7: Coeficiente de sustentación y arrastre calculados, y fuerzas de sustentación y arrastre para el caso de “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))	49
Tabla 8: Comparación de coeficientes de arrastre de reflectores entre distintos modelos CFD del flujo de aire alrededor de radiotelescopios para el caso “Sideral Tracking”	65
Tabla 9: Coeficiente de sustentación y arrastre calculados, y fuerzas de sustentación y arrastre para el caso de “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°))	67

Lista de Figuras

Figura 1: El Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) mirando hacia Sagitario A*, el agujero negro supermasivo que se ubica en el centro de la Vía Láctea. Fuente: (ESO, 2022).....	5
Figura 2: Componentes estructurales de la antena VERTEX RSI.....	6
Figura 3: Bosquejo del funcionamiento de un reflector Cassegrain (Fuente: (Fimin, 2017))	7
Figura 4: Modelo de elevación digital del área de Chajnantor. Los ejes horizontales corresponden a las coordenadas Norte-Este de la zona UTM 19 (Fuente:(Pablo Pérez Beaupuits et al., 2004)).....	9
Figura 5: Función de densidad acumulativa del viento obtenida en cada sitio a partir de promedios de 1 hora de mediciones de velocidad de viento. Interés exclusivo en las líneas correspondientes a APEX y CBI (Fuente: (Otarola et al., 2019))	10
Figura 6: Periodo de recurrencia para la velocidad de viento máxima en el Valle de Chajnantor, sitio CBI (Fuente:(Otarola et al., 2019))	11
Figura 7: Histograma circular de todos los datos de dirección de viento registrados entre el 2001 y el 2002 en el valle de Chajnantor. Cada trozo tiene un ancho de 22.5° (Fuente:(Pablo Pérez-Beaupuits et al., 2004))	12
Figura 8: Esquema del espectro de turbulencia del viento (Fuente: (Pablo Pérez Beaupuits et al., 2004))	14
Figura 9: Ecuaciones de transporte para modelo de turbulencia $k - \epsilon$ realizable.....	16
Figura 10: Ecuación de viscosidad turbulenta	17
Figura 11: Ejes de referencia en astronomía.....	18
Figura 12: Definición del ángulo de elevación α para el modelo geométrico del radiotelescopio VERTEX RSI, visto desde el plano ZX.....	18
Figura 13: Definición del ángulo de acimut γ para el modelo geométrico del radiotelescopio VERTEX RSI, visto desde el plano XY	19
Figura 14: Antena en posición cénit	20
Figura 15: Coeficiente de fuerza total en un radiotelescopio para distintas combinaciones de ángulos de elevación ($^\circ$) y acimut ($^\circ$) (Fuente: (Li et al., 2023)).....	21
Figura 16: Modulo de la velocidad del viento máxima promedio por día para cada mes durante el año 2018 (Navarro, 2020)	22
Figura 17: Modulo de la velocidad del viento máxima promedio por día para cada mes durante el año 2019 (Navarro, 2020)	23
Figura 18: Modelo geométrico del radiotelescopio VERTEX RSI (Visto de izquierda a derecha: Plano ZX, Plano ZY, Plano XY).....	24
Figura 19: Vista lateral (Plano ZX) del volumen de control	26
Figura 20: Vista en planta (Plano X-Y) del volumen de control	26
Figura 21: Fórmula del parámetro y_+	28
Figura 22: Representación de una función de pared basada en la subcapa logarítmica para la resolución de la capa límite alrededor de una superficie	29
Figura 23: Representación de la discretización del fluido alrededor del telescopio VERTEX RSI en el plano ZX del volumen de control.....	30

Figura 24: Acercamiento de la discretización del fluido alrededor del telescopio VERTEX RSI en el plano ZX del volumen de control.....	30
Figura 25: Discretización en el borde superior del reflector, según el plano ZX del flujo.....	31
Figura 26: Discretización entre el contrapeso y la base del radiotelescopio, según el plano ZX del flujo	31
Figura 27: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZX.....	33
Figura 28: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZX.....	33
Figura 29: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZY	34
Figura 30: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZY	34
Figura 31: Distribución de presión dinámica en la superficie principal del reflector primario para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)).....	35
Figura 32: Contorno de fuerza de arrastre en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)).....	37
Figura 33: Contorno de fuerza de arrastre en sección lateral para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))	38
Figura 34: Contorno de fuerza de arrastre en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)).....	39
Figura 35: Contorno de fuerza lateral en secciones laterales izquierda y derecha respectivamente para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)).....	40
Figura 36: Contorno de fuerza lateral en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))	40
Figura 37: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)).....	41
Figura 38: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie anterior al flujo para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) vista en perspectiva	42
Figura 39: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie posterior al flujo para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) vista en perspectiva	43
Figura 40: Contorno de fuerza total de la sección anterior (izquierda) y posterior (derecha) al flujo para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))	44
Figura 41: Fórmula del coeficiente de arrastre del radiotelescopio	44
Figura 42: Fórmula del coeficiente de sustentación del radiotelescopio	44
Figura 43: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)), con respecto al coeficiente de arrastre del reflector	45
Figura 44: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)), con respecto al coeficiente de sustentación del reflector	46
Figura 45: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZX.....	49

Figura 46: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZX	51
Figura 47: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZY	51
Figura 48: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZY	52
Figura 49: Distribución de presión dinámica en la superficie principal del reflector primario para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	53
Figura 50: Contorno de fuerza de arrastre en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	53
Figura 51: Contorno de fuerza de arrastre en secciones laterales izquierda y derecha respectivamente para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	55
Figura 52: Contorno de fuerza de arrastre en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	56
Figura 53: Contorno de fuerza lateral en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	57
Figura 54: Contorno de fuerza lateral en secciones laterales izquierda y derecha respectivamente para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)).....	57
Figura 55: Contorno de fuerza lateral en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	58
Figura 56: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	59
Figura 57: Contorno de fuerza de sustentación en secciones laterales derecha (arriba) e izquierda (abajo) para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)), con sustentación positiva en a) y c), y sustentación negativa en b) y d).....	60
Figura 58: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie anterior al flujo para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) vista en perspectiva	61
Figura 59: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie posterior al flujo para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) vista en perspectiva	61
Figura 60: Contorno de fuerza total de la sección anterior (izquierda) y posterior (derecha) al flujo para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)).....	62
Figura 61: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)), con respecto al coeficiente de arrastre del reflector	63
Figura 62: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)), con respecto al coeficiente de sustentación del reflector	64

Glosario

AOS	<i>Antena Operations Array</i>
ALMA	<i>Atacama Large Millimeter/submillimeter Array</i>
APEX	<i>Atacama Pathfinder Experiment</i>
ASTE	<i>Atacama Submillimeter Telescope Experiment</i>
AZ	<i>Acimut</i>
BUS	<i>Backup Structure</i>
CBI	<i>Cosmic Background Imager</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EI	<i>Elevación</i>
ESO	<i>European Southern Observatory</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FOU	<i>First-Order-Upwind</i>
N-S	<i>Navier-Stokes</i>
NAOJ	<i>National Astronomical Observatory of Japan</i>
NRAO	<i>National Radio Astronomy Observatory</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
SOU	<i>Second-Order-Upwind</i>

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

La investigación que se propone tiene como objetivo evaluar las cargas aerodinámicas sobre la antena principal del radiotelescopio VERTEX RSI en escenarios críticos de operación. Para entender mejor el contexto de esta investigación, es importante conocer el observatorio ALMA, donde se encuentran los radiotelescopios VERTEX RSI.

El *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) es un observatorio astronómico internacional ubicado en el norte de Chile, en el llano de Chajnantor, a una altitud de 5000 metros sobre el nivel del mar. ALMA es el telescopio más grande y complejo de su tipo en el mundo, compuesto por 66 antenas de alta precisión, que trabajan en conjunto para observar longitudes de onda milimétricas y submilimétricas, permitiendo explorar algunos de los objetos más distantes del universo.

En cuanto a las condiciones climáticas del observatorio ALMA, se puede decir que son extremadamente secas, con una precipitación anual promedio de sólo 1.5 [mm]. Además, las temperaturas pueden variar de -20 [°C] a 20 [°C], dependiendo de la época del año. Por otro lado, el viento es un factor clave que afecta las operaciones del observatorio. En el Valle de Chajnantor, donde se ubica ALMA, el viento puede superar los 200 [km/h] en algunas épocas del año, especialmente durante el invierno altiplánico.

Las ráfagas de viento en el Valle de Chajnantor son un desafío importante para la operación de los radiotelescopios en el observatorio ALMA. Estas ráfagas pueden ser muy intensas, y representan una amenaza para la estabilidad y la precisión de las antenas. El efecto del viento sobre las antenas puede generar deformaciones en las estructuras, lo que puede comprometer la calidad de las mediciones.

En este contexto, es importante destacar que las antenas de ALMA son particulares. Son grandes en comparación con antenas de su época, y altamente precisas, cada una de ellas pudiendo pesar hasta 115 toneladas. Además, estas antenas tienen una gran flexibilidad, lo que les permite apuntar hacia diferentes áreas del cielo. En particular, la antena VERTEX RSI es una de las antenas más grandes de ALMA, con un diámetro de 12 metros. Esta antena es especialmente importante para la observación de objetos que requieren alta resolución, como planetas y estrellas jóvenes.

Es posible modelar el efecto del viento en las deformaciones de la antena VERTEX RSI y evaluar su impacto en una posible falla mecánica. Esto permitiría determinar las velocidades de viento que podrían poner en peligro la antena en diferentes condiciones de operación. Para ello, se utilizará un modelo CFD (Dinámica de fluidos computacional) que estará alimentado por los datos de velocidad y dirección del viento que proporciona el observatorio ALMA.

En cuanto a las deformaciones en un radiotelescopio, es importante mencionar que estas son normales, y pueden ser causadas por una variedad de factores, incluyendo cargas de viento, deformaciones térmicas, cargas gravitatorias y vibraciones mecánicas. Estas deflexiones y deformaciones pueden generar diferentes problemas en la operación de un radiotelescopio. Por ejemplo, pueden afectar la precisión de las mediciones, lo que a su vez puede limitar la capacidad del telescopio para explorar el universo, o pueden generar fluencia en algún componente en casos críticos.

En el caso de la antena VERTEX RSI, es importante evaluar las cargas aerodinámicas que actúan sobre la estructura en diferentes escenarios críticos de operación. Esto permitirá determinar si la antena es capaz de soportar las cargas esperadas y si es necesario tomar medidas para asegurar su operación nominal.

Para llevar a cabo la investigación propuesta, se realizarán simulaciones numéricas utilizando un modelo CFD que tenga en cuenta las características aerodinámicas de la antena y las condiciones climáticas del observatorio ALMA. Se considerarán diferentes escenarios de operación de acuerdo con los requerimientos del observatorio y los escenarios más relevantes según la literatura, y se evaluarán las cargas aerodinámicas en diferentes direcciones del viento.

Finalmente, los resultados de esta memoria de título permitirán determinar las velocidades de viento que podrían poner en peligro la antena en diferentes condiciones de operación. También se podrán identificar las áreas críticas de la estructura y se podrán proponer soluciones para aumentar su estabilidad en caso de que se requieran.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Obtener las cargas aerodinámicas en antena principal de radio telescopio VERTEX RSI, del observatorio ALMA.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar un modelo computacional CFD de la antena VERTEX RSI.
- Determinar escenarios críticos de operación.
- Simular los escenarios definidos como críticos y determinar las cargas aerodinámicas en tales escenarios de operación.
- Validar los resultados obtenidos de acuerdo con la literatura.
- Validar los resultados obtenidos comparando diversos modelos de turbulencia y realizando un análisis de sensibilidad de mallado.

1.3 Metodología

En primer lugar, se llevará a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte, analizando investigaciones en modelado de flujo de aire y cargas inducidas por el viento alrededor de radiotelescopios, comparando los distintos modelos de turbulencia utilizados y criterios para la determinación de sus volúmenes de control. En paralelo, la información técnica proporcionada por ALMA sobre la composición estructural y la operación nominal de la antena a estudiar será revisada detalladamente.

A continuación, se determinarán los escenarios críticos de operación del radiotelescopio, utilizando la información proporcionada por ALMA y los testimonios técnicos pertinentes. Luego, se implementarán modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando el software *ANSYS FLUENT*, para cada caso crítico. Este modelo se basará en el modelo geométrico de la antena proporcionado por ALMA y las especificaciones estructurales obtenidas durante la revisión de los informes técnicos del observatorio.

A continuación, se simularán los escenarios de operación definidos como críticos en el modelo CFD seleccionado, con el fin de evaluar el comportamiento de la antena frente a las cargas aerodinámicas correspondientes. Para cada caso de operación, se realizará un post-procesamiento de los resultados de la simulación, analizando los contornos de velocidad y presión dinámica en cada caso, así como las distribuciones de fuerzas de arrastre, sustentación y laterales, con el objetivo de obtener información detallada sobre el comportamiento de la antena ante las cargas aerodinámicas simuladas. Luego, se realizará un análisis de sensibilidad de las cargas aerodinámicas respecto al modelo de turbulencia elegido, y un análisis de independencia de la malla para probar la fidelidad y estabilidad de los resultados obtenidos.

Finalmente, los coeficientes de arrastre obtenidos para cada caso de operación serán comparados con casos similares de la literatura para su validación. Se analizarán y discutirán los resultados obtenidos en detalle, presentando una discusión pertinente en cuanto a la evaluación de las cargas aerodinámicas en el radiotelescopio VERTEX RSI, y se indicarán propuestas para el seguimiento de esta investigación.

CAPÍTULO 2: Objeto de investigación

2.1 Radioastronomía y radiotelescopios

Un radiotelescopio es un instrumento utilizado en astronomía para recibir y analizar radiación electromagnética de diferentes frecuencias, usualmente de las denominadas ondas de radio, las cuales corresponden a las ondas que se encuentran entre los 500 [kHz] y los 1000 [kHz] (Pain, 2005). Estas ondas, que son de longitudes milimétricas y submilimétricas, son emitidas por objetos en el universo con temperaturas cercanas al 0 absoluto, como nubes moleculares, polvo interestelar y planetas en formación. Muchos de estos cuerpos celestes se caracterizan por ser oscuros y estar en penumbra en el espectro de luz visible, sin embargo, emiten con gran intensidad radiación en el espectro de las ondas milimétricas y submilimétricas, atravesando el polvo y gas que se encuentran en el medio interestelar, lo que permite a los astrónomos estudiar la estructura y composición de estos objetos, y así entender la formación y evolución de las galaxias, estrellas y planetas en el universo, así como la química y física del entorno interestelar.

El primer radiotelescopio fue construido en 1931 por el astrónomo estadounidense Karl Jansky, quien mientras buscaba interferencias de radio en los sistemas de comunicación transatlántica descubrió señales de radio provenientes del centro de la Vía Láctea. Estas señales resultaron ser causadas por tormentas solares, pero Jansky se dio cuenta del potencial de usar la radiación de radio para estudiar el universo. Ese fue el punto de partida para el desarrollo de los radiotelescopios; en la década de 1940 aumentaron su tamaño y sofisticación, como la antena de 76 m de diámetro en Jodrell Bank, Inglaterra, y en los años 60 se formaron interferómetros para obtener imágenes más detalladas. En décadas posteriores se desarrollaron nuevos métodos para procesar y analizar los datos recopilados y modelos de telescopio que podían funcionar en múltiples frecuencias al mismo tiempo, lo que permitió a los astrónomos estudiar diferentes aspectos del universo (El mundo bachiller, 2022). La tecnología de los radiotelescopios ha seguido evolucionando hasta la actualidad, con proyectos de colaboración internacional como es el Observatorio ALMA.

En el caso del observatorio ALMA, las ondas medidas por sus radiotelescopios se encuentran en el rango de frecuencia de entre 30 y 950 GHz, lo que corresponde a una longitud de onda de entre 0,3 y 10 milímetros (Mangum et al., 2006). Este observatorio ha hecho importantes y numerosas contribuciones a la astronomía y a la comunidad científica, dentro de las cuales destacan obtener la imagen más detallada de un disco protoplanetario hasta el año 2014, el descubrimiento de la galaxia más lejana de la tierra en el 2015, y la primera fotografía directa de un agujero negro en la historia, el cual corresponde a Sagitario A*, hito científico reconocido por los medios a nivel mundial.

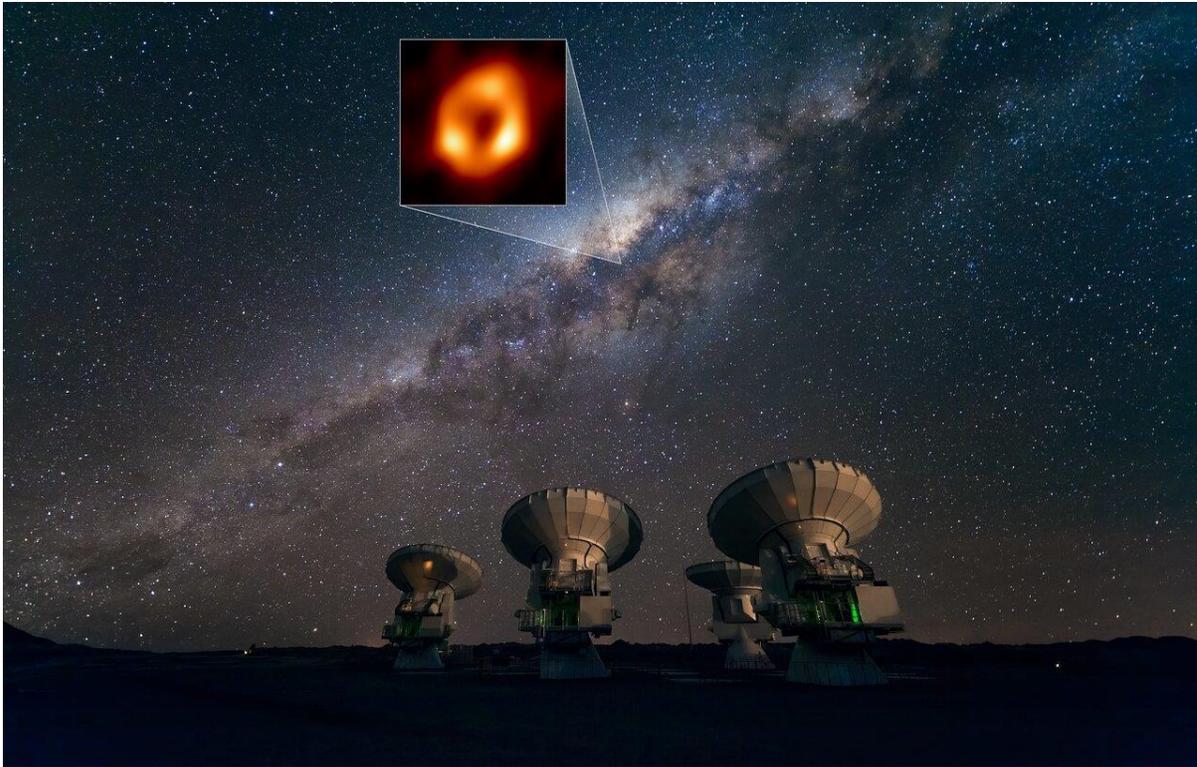


Figura 1: El Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) mirando hacia Sagitario A*, el agujero negro supermasivo que se ubica en el centro de la Vía Láctea. Fuente: (ESO, 2022)

Desde una perspectiva mecánica, un radiotelescopio es una estructura compleja y delicada que requiere de un diseño y construcción meticulosa para poder cumplir con su función. Se trata de una estructura mecánica especialmente diseñada para captar y procesar señales de radio provenientes del espacio. Estas antenas gigantes están construidas con materiales resistentes y livianos, como el aluminio o la fibra de carbono, que les permiten soportar su propio peso y resistir las fuerzas del viento. La forma y tamaño de un radiotelescopio varían dependiendo de su objetivo y frecuencia de operación, pero generalmente consisten en una gran parábola reflectora que concentra las ondas de radio en un receptor ubicado en su foco. Para garantizar una alta precisión y estabilidad en la apuntación, los radiotelescopios cuentan con sistemas de seguimiento y control sofisticados que ajustan la posición y orientación de la antena. Además, se implementan sistemas de aislamiento y amortiguación de vibraciones para minimizar las interferencias y mejorar la sensibilidad del telescopio.

La parte principal de un radiotelescopio es la antena (también llamado reflector primario), que recoge las ondas de radio y las canaliza hacia el receptor, que amplifica y convierte las señales de radio en señales eléctricas que se pueden procesar y analizar. La antena es típicamente una estructura parabólica con un diámetro que varía desde unos pocos metros hasta cientos de metros, dependiendo del propósito del telescopio. El material de estas antenas suele ser de metal o de fibra de vidrio, y su forma parabólica permite reflejar las ondas de radio hacia el receptor en el foco.

2.2 VERTEX RSI

La antena parabólica VERTEX RSI, o DRD-36, de la empresa alemana *Vertex Antennentechnik GmbH*, es un componente fundamental del observatorio ALMA, formando parte de las 66 antenas de alta precisión del radiotelescopio en el desierto de Atacama.

Un radiotelescopio consta normalmente de los siguientes elementos estructurales:

- **Reflector principal:** se encarga de concentrar las ondas electromagnéticas en el subreflector o reflector secundario.
- **Support Cone:** Base sobre la cual se monta el resto de la estructura, y sobre la cual el *yoke* rota en acimut.
- **Yoke:** Estructura encargada de sostener el reflector principal, y la cual rota para cambiar el acimut de apuntamiento.
- **Contrapeso:** estructura encargada de soportar el reflector principal.

Las partes estructurales de la antena en cuestión se ilustran en la Figura 2.

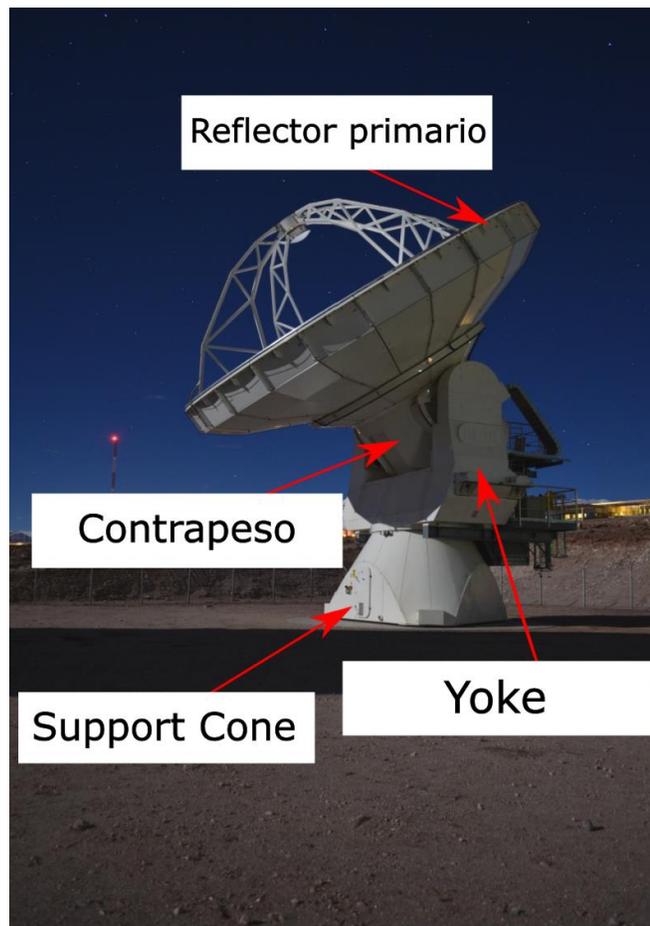


Figura 2: Componentes estructurales de la antena VERTEX RSI

A continuación, se discutirán los aspectos característicos de la antena VERTEX RSI de ALMA:

Esta antena cuenta con un reflector principal de 12.226 [m], diseñado para medir señales electromagnéticas en longitudes de onda de 0.3 a 9.6 milímetros con una precisión de seguimiento de 0.6 segundos de arco, y es capaz de observar hasta 4 longitudes de onda diferentes simultáneamente. Para lograr estas precisiones, el contrapeso de la antena se fabricó en plástico reforzado con fibra de carbono, lo que le otorga la rigidez necesaria para soportar el reflector primario y evitar las deformaciones térmicas del acero o aluminio. Además, la estructura es hueca, lo que evita la necesidad de diseñar y fabricar uniones en una estructura de marco con vigas, como ocurre en otros telescopios, como el contrapeso del *Caltech Submillimeter Observatory Radiotelescope*.

El principio de funcionamiento del telescopio es el de un "*Cassegrain reflector*", que consta de un reflector primario parabólico y un reflector secundario hiperbólico, que a su vez concentra la recepción de ondas electromagnéticas en un foco que cae directamente sobre el receptor, como se ilustra en la Figura 3. Uno de los principales beneficios de este tipo de telescopio es la creación de un punto focal mucho más largo para la longitud mecánica del sistema, optimizando así las dimensiones de este.

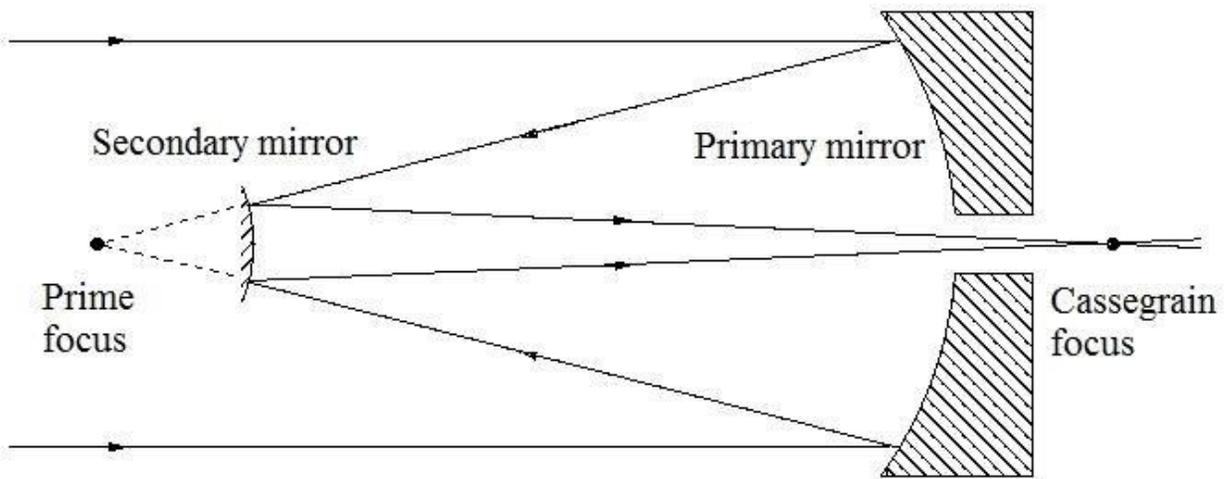


Figura 3: Bosquejo del funcionamiento de un reflector *Cassegrain* (Fuente: (Fimin, 2017))

El reflector principal está formado por 262 paneles de diferentes dimensiones, fabricados en aluminio maquinado con tratamientos químicos para lograr la correcta disipación del calor absorbido por la radiación solar. Además, cuenta con 5 soportes axiales y 3 soportes laterales ajustables para obtener la máxima precisión y ajustes posibles. Como se mencionó anteriormente, la antena VERTEX tiene una gran sensibilidad al realizar observaciones astronómicas debido a su tecnología de vanguardia en óptica adaptativa, lo que le permite compensar las distorsiones atmosféricas.

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

El presente estado del arte discute los estudios realizados sobre las deflexiones y cargas inducidas por el viento en radiotelescopios. A su vez, aborda investigaciones sobre la caracterización del viento en el Valle de Chajnantor y el desarrollo de modelos CFD para la simulación del flujo de aire alrededor de radiotelescopios. Este estado del arte fue desarrollado en conjunto con Jaime Moraga, autor de “Evaluación de deformaciones en antena principal del telescopio ALMA en escenarios críticos de operación”, proyecto complementario de esta memoria de título.

3.1 Viento en el valle de Chajnantor

Desde 1995, Chajnantor ha sido objeto de monitoreo por parte de NRAO y desde 1998 por ESO, durante el proceso de selección del sitio donde instalar el observatorio ALMA. Las observaciones iniciales indicaron que el valle de Chajnantor, lugar donde actualmente se sitúa el observatorio, es una ubicación excepcional para la astronomía de milímetros y submilímetros, con transparencias a 225 GHz que se encuentran entre las mejores jamás registradas, comparables solo con las mediciones obtenidas en el Polo Sur (Radford & Holdaway, 1998). Sin embargo, incluso antes de que ALMA entrara en operaciones los datos recopilados dieron a entrever que, a pesar de que el valle pasa por largos periodos de tiempo con un clima muy propicio para las mediciones de las antenas, este tiende a cambiar frecuentemente a condiciones que impiden la operación nominal de los telescopios, tales como tormentas eléctricas o nevazones. Esta naturaleza cambiante del clima en Chajnantor, sumado a la falta de datos disponibles en la época, significó un desafío en cuanto a la predicción del clima en el sitio, teniendo que utilizar la información disponible de estaciones meteorológicas a distancias considerables para poder hacer una estimación (Radford & Holdaway, 1998). Esto llevó a los observatorios asociados al proyecto, es decir, La NRAO (*National Radio Astronomy Observatory*), la ESO (*European Southern Observatory*) y la NAOJ (*National Astronomical Observatory of Japan*), a colocar estaciones meteorológicas en el propio valle de Chajnantor, a fin de no pasar por este predicamento en el futuro. Actualmente, el *Array Operations Site* (AOS) dispone de 9 estaciones meteorológicas, las cuales miden, entre otras variables atmosféricas, la velocidad y dirección del viento.

El sitio en donde están montadas las estaciones meteorológicas de ALMA corresponde al área de Chajnantor, 60 [km] al noreste de San Pedro de Atacama, en la Región de Antofagasta, Chile, a 5050 [m] sobre el nivel del mar. La geomorfología del sitio es mayormente plana, rodeada por colinas, montañas y depresiones. La superficie abarca alrededor de 25.000 [ha] y está compuesta principalmente por arena y rocas, sin una cobertura vegetal significativa. Durante parte de la temporada de invierno local, el área se encuentra casi completamente cubierta de nieve. La Figura 4 muestra un modelo digital de elevación de la zona de Chajnantor de aproximadamente 25 [km²].

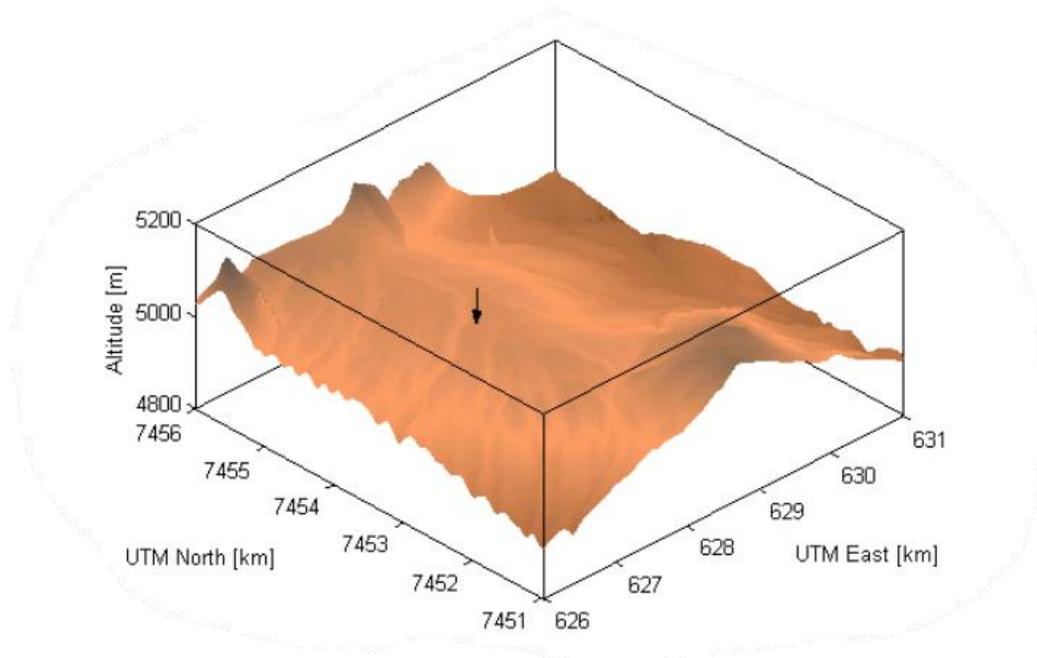


Figura 4: Modelo de elevación digital del área de Chajnantor. Los ejes horizontales corresponden a las coordenadas Norte-Este de la zona UTM 19 (Fuente:(Pablo Pérez Beaupuits et al., 2004))

Dentro de las mediciones más recientes del comportamiento del viento en Chajnantor se encuentra el trabajo de (Otarola et al., 2019), que utilizando los datos de diferentes estaciones meteorológicas en la zona caracterizó el comportamiento del viento en el valle. Su investigación utiliza datos de estaciones de medición ubicadas en sitios de interés potencial para proyectos radioastronómicos, más el presente trabajo solo detallará lo correspondiente a las estaciones en el valle de Chajnantor, es decir, la estación en el *Cosmic Background Imager* (CBI), y en el *Atacama Pathfinder Experiment* (APEX), indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1: Sitios de estaciones meteorológicas en el Valle de Chajnantor (Fuente: (Otarola et al., 2019))

Sitio	Latitud Longitud (°)	Altitud (m.s.n.m)	Periodo de medición	Resolución temporal (min)	Número de días con observación	% de cobertura en periodo de medición
Valle de Chajnantor (CBI)	-23.0333 -67.7667	5080	1999/11/06 2008/06/06	5	2416 de 3135 totales	77.0%
Valle de Chajnantor (APEX)	-23.0058 -67.7592	5150	2006/01/01 2018/09/13	1	4512 de 4638 total	97.0%

De acuerdo con las mediciones realizadas en ambos sitios, se pueden observar tendencias similares en cuanto a las magnitudes de velocidad de viento más comunes. De acuerdo con la Figura 5, casi el 90% de las velocidades de viento registradas en APEX es menor o igual a 10 [m/s], mientras que en el CBI solo el 80% de las mediciones están por debajo o igualadas a esta magnitud. Siguiendo el análisis del mismo gráfico, solo alrededor del 5% de los datos medidos en APEX corresponden a velocidades de viento iguales o superiores a los 12.5 [m/s], mientras que para los datos del CBI estos corresponden a un 10% de las mediciones. De todas formas, los valores de velocidad incrementan menos de un 2%, en cada caso, a partir de los 20 m/s, que resulta ser el límite de velocidad en el que se pueden operar las antenas en el observatorio ALMA.

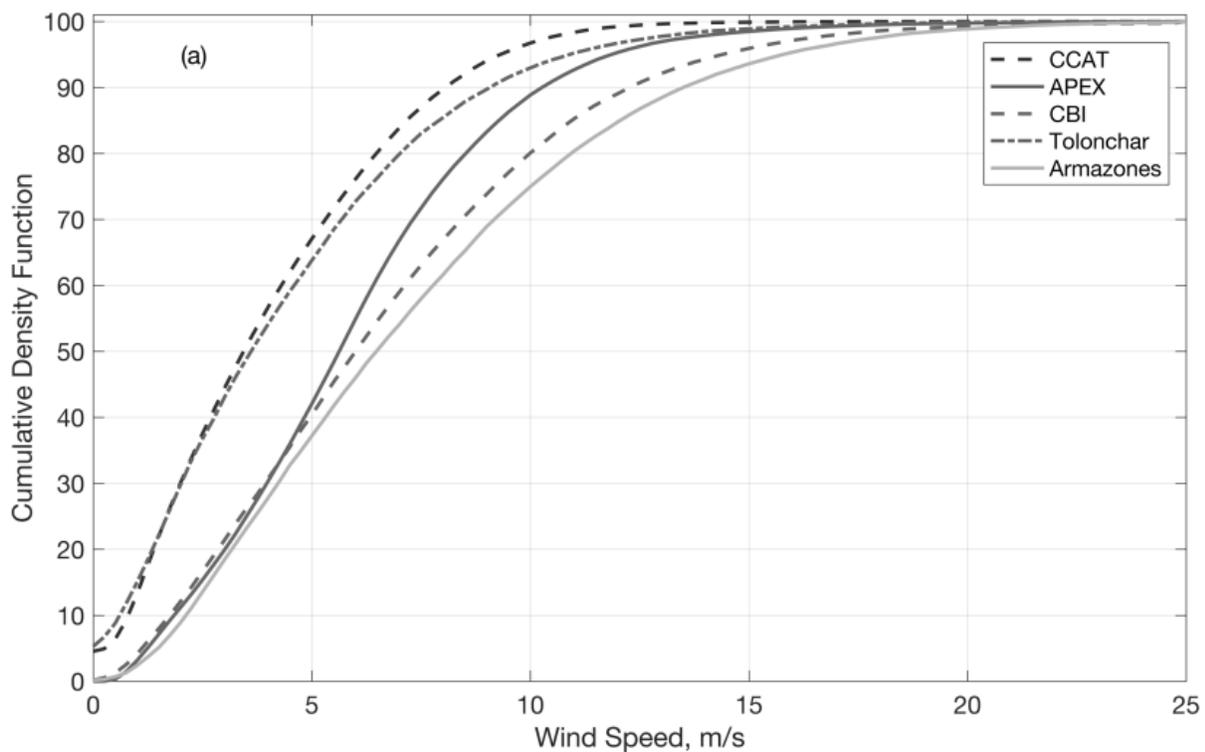


Figura 5: Función de densidad acumulativa del viento obtenida en cada sitio a partir de promedios de 1 hora de mediciones de velocidad de viento. Interés exclusivo en las líneas correspondientes a APEX y CBI (Fuente: (Otarola et al., 2019))

Con respecto a la estimación de velocidades de viento máxima esperadas en la vida útil del observatorio ALMA, que según (Otarola et al., 2019) correspondería a 50 años aproximadamente, esta se genera a partir de datos de la estación en el CBI, debido a sus mediciones instantáneas promediadas cada 5 minutos, como indica la Tabla 1, lo que permite estimar las mayores magnitudes de viento a esperar en durante toda la operación del observatorio, permitiendo registrar las ráfagas de viento. Cuantificar la magnitud de estos fenómenos es relevante para determinar las deflexiones a las que se verán sometidas las antenas, y así poder asegurar su supervivencia.

La Figura 6 ilustra lo indicado respecto a las ráfagas de viento, pues toma las velocidades de viento máximas de cada día de medición y los asocia a distintos periodos de recurrencia, interpretándose que, a menor periodo de recurrencia, más probable es que se vuelva a registrar esa velocidad de viento. Los puntos rojos corresponden a datos medidos en el CBI, mientras que las rectas café y celeste son extrapolaciones de los datos medidos que sugieren, respectivamente, una máxima de velocidad de viento de 50.6 [m/s] o 45.7 [m/s] en 50 años de operación del observatorio ALMA. A su vez, en esta figura se puede apreciar claramente que la mayoría de las magnitudes de velocidad de viento registradas dentro de un año no superan los 30 [m/s].

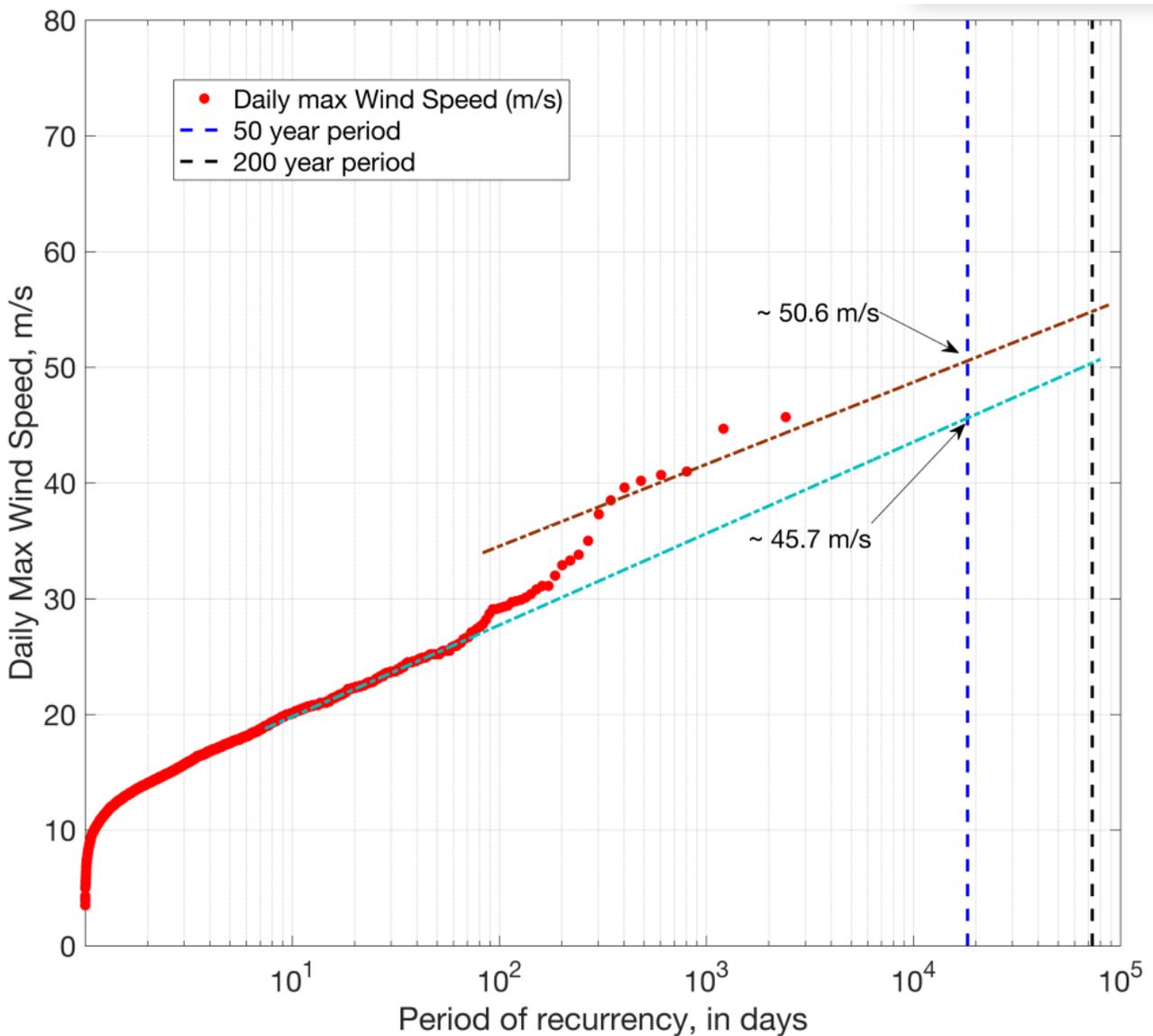


Figura 6: Periodo de recurrencia para la velocidad de viento máxima en el Valle de Chajnantor, sitio CBI (Fuente:(Otarola et al., 2019))

En cuanto a la dirección del viento, según las mediciones en Chajnantor de (Pablo Pérez-Beaupuits et al., 2004), en las zonas más altas de la vertiente oeste de los Andes, donde se encuentra este valle, la dirección predominante del viento es en dirección noroeste, que correspondería a la dirección en que predominantemente se situaría la parte convexa de la antena ante un eventual periodo de velocidad de viento superior a los 20 m/s, llamado “modo seguro” según el equipo de seguridad de ALMA. De acuerdo con la Figura 7, estas direcciones oscilan entre los 326.5° y los 213.75° en un día común de mediciones. Una excepción tiene lugar durante el verano local, pues en esta época, bajo la influencia del llamado "invierno boliviano" se produce una inversión del viento, con un componente dominante proveniente del este.

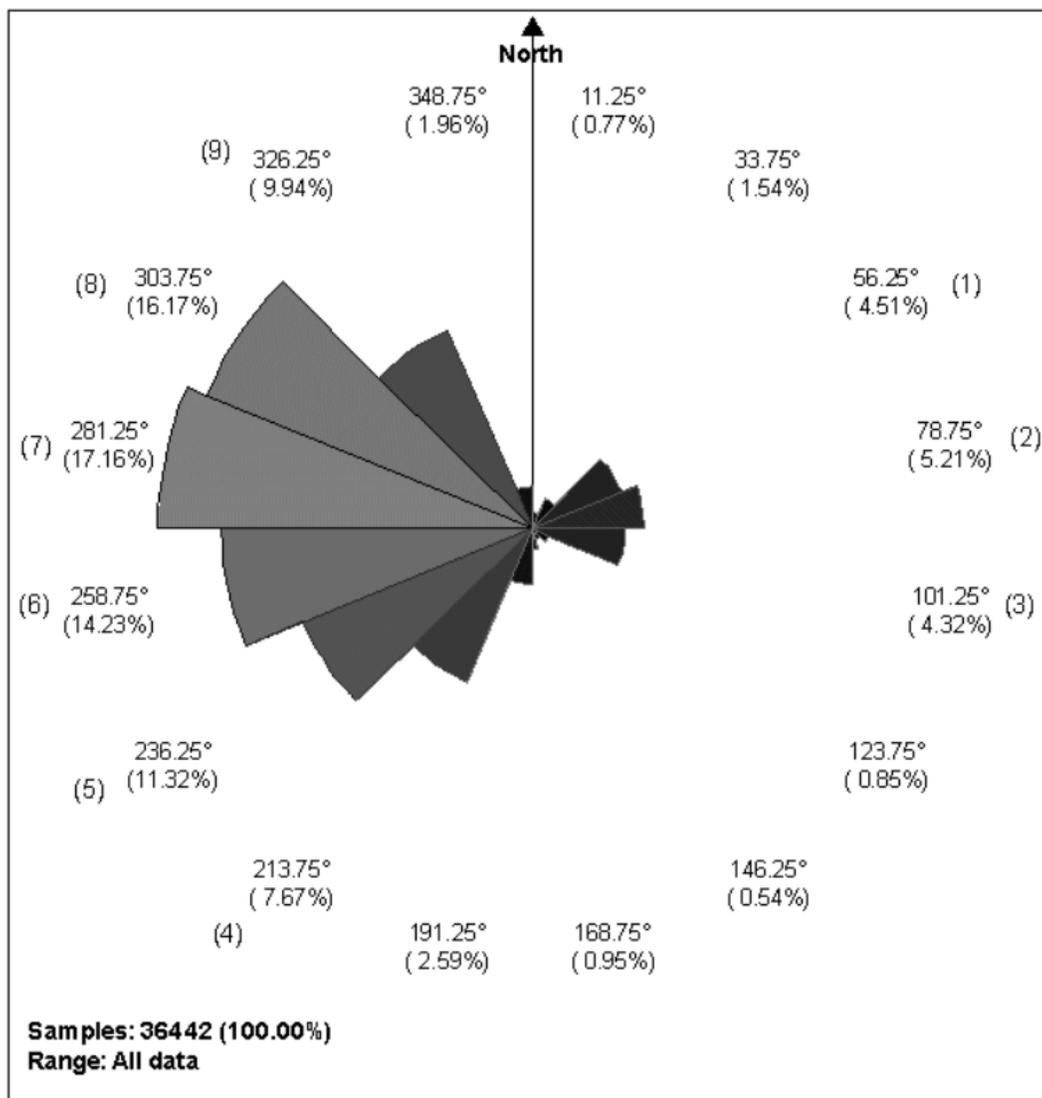


Figura 7: Histograma circular de todos los datos de dirección de viento registrados entre el 2001 y el 2002 en el valle de Chajnantor. Cada trozo tiene un ancho de 22.5° (Fuente:(Pablo Pérez-Beaupuits et al., 2004))

3.2 Efectos del viento en radiotelescopios

El flujo de viento es uno de los parámetros críticos que influyen en el rendimiento e integridad estructural de los radiotelescopios de gran tamaño. Varios investigadores han realizado estudios para comprender la plena extensión del fenómeno y los posibles problemas, pero en general concluyen que sus consecuencias pueden ser más dramáticas para las futuras propuestas de telescopios, que tienen una tendencia a contar con reflectores principales de diámetros mayores a los de los radiotelescopios actuales (Vogiatzis et al., 2004).

Dentro de los efectos más relevantes, las cargas inducidas por el viento son el aspecto más evidente del flujo de aire alrededor de un radiotelescopio, correspondiendo a uno de los aspectos más relevantes a considerar a nivel estructural, pues generan deflexiones que pueden conducir a errores de superficie y de apuntamiento; en casos extremos incluso pueden conducir a fallas mecánicas por fluencia o fatiga, en especial si la selección de materiales y estimación de factores de seguridad en el proceso de diseño de la antena no se realiza apropiadamente. Sin embargo, de acuerdo con (Feng et al., 2017), el aporte del viento a las deflexiones totales a las que se ve sometida un radiotelescopio es bajo en comparación con cargas inducidas por el propio peso de la antena, que varían según su geometría y la elevación del reflector principal.

Por otro lado, según (Pablo Pérez Beaupuits et al., 2004), uno de los aspectos más importantes del flujo de aire alrededor de una antena es la turbulencia del flujo, especialmente el espectro de turbulencia del viento paralelo al eje de medición. Con condiciones atmosféricas horizontalmente homogéneas y neutras en estratificación, los vórtices más grandes en el extremo de baja frecuencia del espectro (rango de producción) son constantemente generados por el movimiento relativo entre el flujo de gradiente de la corriente libre y el aire estacionario cerca del suelo, lo que alimenta de energía a la turbulencia. En el otro extremo del espectro, las tensiones de corte viscosas se vuelven significativas cuando los vórtices se han reducido a un tamaño suficientemente pequeño (aproximadamente 1 [cm]), lo que permite que la energía turbulenta sea disipada. Entre estos dos extremos, la energía se transfiere continuamente de vórtices más grandes a vórtices más pequeños a medida que los vórtices más grandes son progresivamente descompuestos.

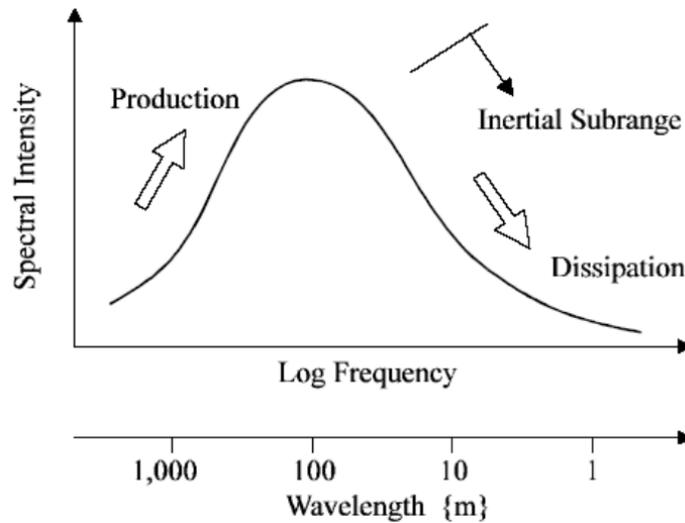


Figura 8: Esquema del espectro de turbulencia del viento (Fuente: (Pablo Pérez Beaupuits et al., 2004))

Según (Ryan Po, Chao Wang BAsC, 2012), la turbulencia puede ser causada por varios factores, incluyendo, pero no limitándose, a características locales de la topografía y el flujo de aire a través de las aberturas en las estructuras del telescopio y las aberturas de ventilación. También indica que este flujo alrededor de las antenas genera diferencias de presión dinámica, causadas por la interacción entre el flujo de aire y la estructura del telescopio, en lugar de la turbulencia en el viento entrante, que tiene un aporte menor en el fenómeno. (Yan et al., 2015) investigó el patrón de distribución del coeficiente de presión promedio del viento en el reflector principal de una antena, encontrando que, para la mayoría de los ángulos de inclinación y diferentes ángulos de viento, el flujo entrante generalmente produce una separación clara en el borde de la superficie reflectante, por lo que la presión negativa máxima en la superficie reflectante generalmente aparece en el borde. Esta conclusión fue validada mediante la toma de datos de un modelo a escala 1/100 en un túnel de viento, que presentó concordancias significativas con una modelación CFD del flujo realizada posteriormente.

A su vez, (Hashimoto et al., 2020) midieron la respuesta del radiotelescopio *Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE)*, de 10 m de diámetro, bajo cargas inducidas por el viento utilizando acelerómetros, a fin de medir sus efectos y los vórtices alrededor de esta antena. Descubrieron que el viento causa vibraciones de baja frecuencia en todo el reflector principal, lo que indujo un movimiento torsional alrededor del brazo del *yoke*. Esto contribuyó principalmente a errores de apuntamiento de la antena que se suman a los errores esperables inducidos por el movimiento de cabeceo de estas antenas. A su vez, el viento en dirección frontal indujo a complicaciones en el control del movimiento de este instrumento en el plano acimutal.

3.3 Modelación CFD del viento alrededor de un radiotelescopio

Aunque se han llevado a cabo investigaciones y análisis previos del flujo de aire para evaluar el perfil de turbulencia y las cargas resultante en las estructuras de telescopios, según (Ryan Po, Chao Wang BAsC, 2012) debe tenerse en cuenta que las dificultades relacionadas a modelar estos fenómenos mediante CFD en estructuras grandes no son de ignorarse, en especial si no se cuenta con una validación experimental, teniendo en cuenta, por un lado, la ley cuadrado-cúbica, que indica que la escala directa de diseños existentes puede llevar a resultados erróneos debido al aumento de masa por un factor de escala al cubo, mientras el área de superficie aumenta solo por el cuadrado, lo que puede llevar a incongruencias al simular flujos alrededor de antenas escaladas respecto de otros diseños de menor tamaño. También el autor recalca la importancia de las simplificaciones que se tengan en los modelos geométricos a fin de agilizar las simulaciones.

Dentro de las consideraciones a tener al armar un modelo CFD para la descripción del flujo de aire alrededor de un radiotelescopio, es importante validar el mallado en cuanto al tamaño y número de elementos. (Upnere & Jekabsons, 2011) hacen una comparación de velocidades a una altura determinada para diferentes calidades de mallado, hasta llegar a una variación mínima entre las diferentes curvas generadas, cosa de no aumentar innecesariamente el tiempo de simulación y su costo energético asociado al sobrecargar de elementos el mallado.

Con respecto a observaciones a considerar de otros modelos CFD de flujos alrededor de antenas, (Navarro, 2022), quien en su investigación estudia el efecto de las cargas del viento en las aberraciones de medición del radiotelescopio *Caltech Submillimeter Observatory*, menciona que para diferentes acimuts de estos telescopios el comportamiento del fluido cambia drásticamente por el cambio de posición, lo que genera zonas de recirculación que reducen el tamaño de la capa límite hasta valores menores de los deseados, dependiendo del modelo de turbulencia elegido.

3.3.1 Modelos de turbulencia

Para modelar con precisión el flujo de aire alrededor de un radiotelescopio, es necesario utilizar un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) que incluya un modelo de turbulencia apropiado para capturar adecuadamente las variables espaciales del campo de flujo y contenga una resolución capaz de describir la compleja interacción del viento con la estructura del radiotelescopio. De esta manera, se pueden predecir con precisión las cargas inducidas por el viento sobre la antena.

La elección del modelo de turbulencia es esencial para tener en cuenta los diferentes grados de velocidad, presión y turbulencia asociados con el flujo de aire alrededor de un radiotelescopio. Para aproximar estos efectos, se utilizan ecuaciones de *Navier-Stokes* (N-S) y modelos de turbulencia basados en un grupo de ecuaciones *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) (por ejemplo, $k - \epsilon$, $k - \epsilon$ realizable, $k - \omega$ SST, entre otros), pues permiten una descripción adecuada de la compleja interacción del viento con la estructura estudiada de manera estadística y, por lo tanto, permiten predecir con precisión las cargas inducidas por el viento sobre ella. Esta selección está validada por (Upnere & Jekabsons, 2011) y (F. L. He et al., 2020) que seleccionan distintos modelos RANS para la modelación del flujo alrededor de radiotelescopios, por su relación calidad/costo y su precisión al describir grandes desprendimientos de fluido, fenómenos esperables para el flujo de aire alrededor de radiotelescopios, de acuerdo con las investigaciones citadas previamente.

En cuanto al modelo $k - \epsilon$ realizable, (Navarro, 2022) elige este modelo de turbulencia, además de por las ventajas comunes de los modelos RANS descritas previamente, por permitir describir el fenómeno de recirculación de flujo de forma acertada, el cual se da en su investigación. A su vez, (F. L. He et al., 2020) defienden el uso de este modelo de turbulencia para el estudio las cargas aerodinámicas sobre radiotelescopios, por su precisión en la representación de flujos de alta intensidad y por ser el modelo más moderno. (Upnere & Jekabsons, 2011) también utiliza este modelo y da indicaciones para entender el cálculo del valor k y ϵ para este modelo de turbulencia al modelar el flujo alrededor de un radiotelescopio.

3.3.2 Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones de transporte para k y ϵ para el modelo $k - \epsilon$ realizable son las siguientes:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + \rho C_1 - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon$$

Figura 9: Ecuaciones de transporte para modelo de turbulencia $k - \epsilon$ realizable

Donde $C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$.

En la Figura 9, se puede observar que G_k representa la generación de energía cinética turbulenta por los gradientes de velocidad media, mientras que G_b representa la generación de energía turbulenta por flotabilidad. Y_M se relaciona con la contribución de dilatación fluctuante a la turbulencia compresible respecto a la tasa global de disipación, y C_2 y $C_{1\epsilon}$ son constantes, seteadas por defecto por ANSYS al seleccionar este tipo de modelo de turbulencia. σ_k y σ_ϵ representan los números turbulentos de Prandtl para k y ϵ , respectivamente. Además, S_ϵ y S_k son términos que deben ser definidos según cada problema (ANSYS, 2013). De igual forma, se define la viscosidad turbulenta μ_t como:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\epsilon}$$

Figura 10: Ecuación de viscosidad turbulenta

Siendo C_μ un valor dependiente del tipo de modelo de turbulencia $k - \epsilon$, el cual es constante para las versiones Estándar y RNG, pero en su versión Realizable es una función de la tasa de deformación media y las velocidades de rotación, la velocidad angular de la rotación del sistema y los campos de turbulencia (ANSYS Inc., 2009).

Para el uso de este modelo de turbulencia en el estudio del flujo alrededor de radiotelescopios, (Upnere & Jekabsons, 2011) considera los efectos térmicos del viento como despreciables.

CAPÍTULO 4: Escenarios críticos de operación

Un radiotelescopio es un instrumento de precisión altamente sensible, donde pequeñas perturbaciones pueden afectar significativamente su rendimiento. Este hecho se tuvo en cuenta durante su diseño, con la implementación de refuerzos estructurales y el uso de materiales con propiedades resistentes que garantizan su correcto funcionamiento. Sin embargo, existen posiciones críticas para la medición que deben ser analizadas por razones de seguridad y operatividad, como la posibilidad de generar una deformación en régimen de fluencia, una falla por fatiga, etc. Estas posiciones, las que determinan los casos críticos de operación de esta investigación, vienen dadas por los ejes de referencia utilizados en la astronomía, detallados en la Figura 11. Para la geometría del radiotelescopio a estudiar, los ángulos de elevación α y acimut γ quedan definidos, respectivamente, por las Figuras 12 y 13.

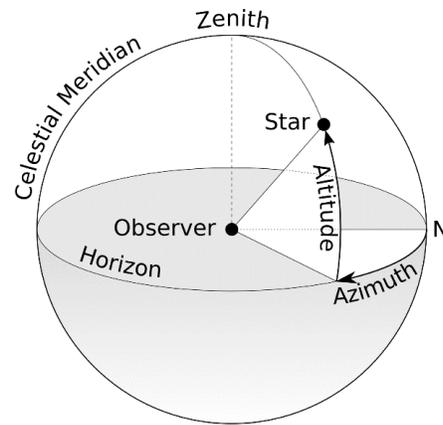


Figura 11: Ejes de referencia en astronomía

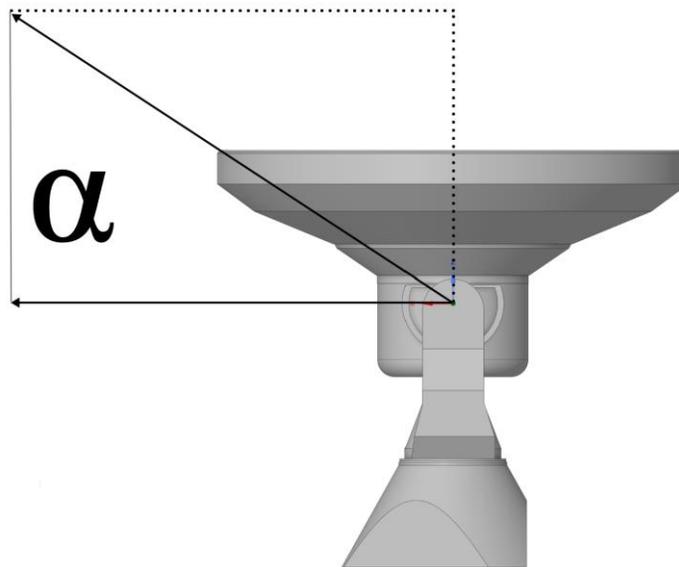


Figura 12: Definición del ángulo de elevación α para el modelo geométrico del radiotelescopio VERTEX RSI, visto desde el plano ZX

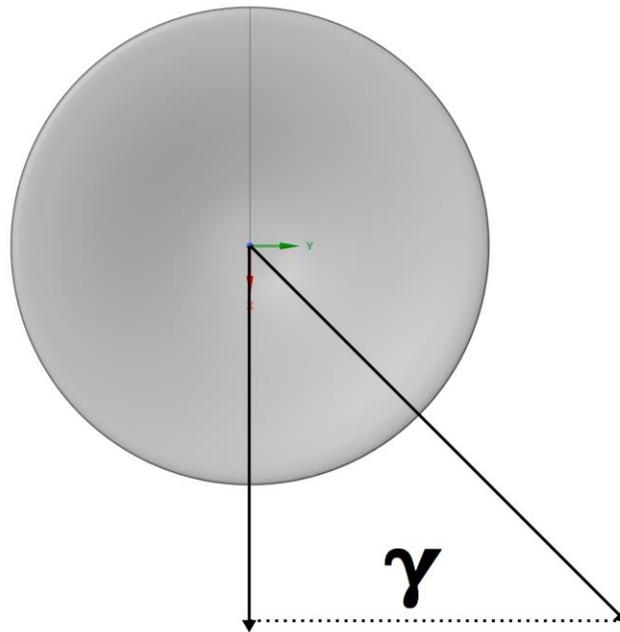


Figura 13: Definición del ángulo de acimut γ para el modelo geométrico del radiotelescopio VERTEX RSI, visto desde el plano XY

4.1 Cénit (mantenimiento)

De acuerdo con los requerimientos del departamento de seguridad de ALMA, según el testimonio de nuestro supervisor en el observatorio, se determinó que la posición cenital de la antena, donde está apuntando hacia el cielo en un ángulo de 90° con respecto a su plano horizontal, es uno de los casos de operación más importantes a ser analizados. Esta posición suscita interés pues facilita las tareas de mantenimiento, permitiendo el acceso al interior de la antena. Durante estas operaciones de mantención de la antena, las cuales se dan con cierta periodicidad, se activa el *maintenance mode*, que bloquea todo movimiento de la antena, lo que elimina cualquier riesgo para el personal. Sin embargo, ha habido varios casos en los que ráfagas de viento superan el umbral crítico de velocidad definido por el observatorio, mientras se realizan las tareas de mantenimiento, impidiendo que la antena salga del modo de mantenimiento y entre en modo de supervivencia, lo que la expone a los efectos del viento. Esta posición queda ilustrada por la Figura 14.



Figura 14: Antena en posición cénit

El caso de operación elegido, en coordenadas angulares, queda definido como $(El, AZ) = (90^\circ, 0^\circ)$.

4.2 “Sideral Tracking”

El segundo caso crítico que afecta la operación del radiotelescopio es el seguimiento sideral de la antena. Este caso se produce cuando se enfoca en un objeto celeste en particular, como una estrella, mientras la Tierra continúa rotando. Este caso es complejo, porque si la antena es impactada por el viento, puede generar momentos sobre el eje de rotación acimutal y de elevación en el reflector principal, lo que afecta su rendimiento y puede provocar ruido en las mediciones. Estos ejes quedan ilustrados en referencia al seguimiento de un cuerpo celeste, de acuerdo con el modelo geométrico a estudiar expuesto en las Figuras 12 y 13.

Teniendo en cuenta que durante la operación nominal de los radiotelescopios de ALMA las antenas pasan por diversas combinaciones de elevación y acimut, y en función del tiempo disponible para la realización de este estudio, se toma la decisión de elegir una combinación de estos ángulos que sea representativa de una situación de riesgo durante una maniobra de “*Sideral Tracking*”. De acuerdo con (Li et al., 2023), existen ciertas combinaciones de elevación y acimut para los cuales el flujo de viento alrededor de un radiotelescopio genera un mayor coeficiente de fuerzas totales, compuestas por fuerzas de arrastre, fuerzas de sustentación y fuerzas laterales en cada caso. Si bien cada fuerza tiene sus respectivos ángulos críticos donde estas se maximizan, se utiliza un gráfico donde se ilustra un análisis paramétrico de la combinación de todas estas fuerzas para cada combinación de ángulos con tal de seleccionar el caso crítico de operación en “*Sideral Tracking*”, ilustrado en la Figura 15.

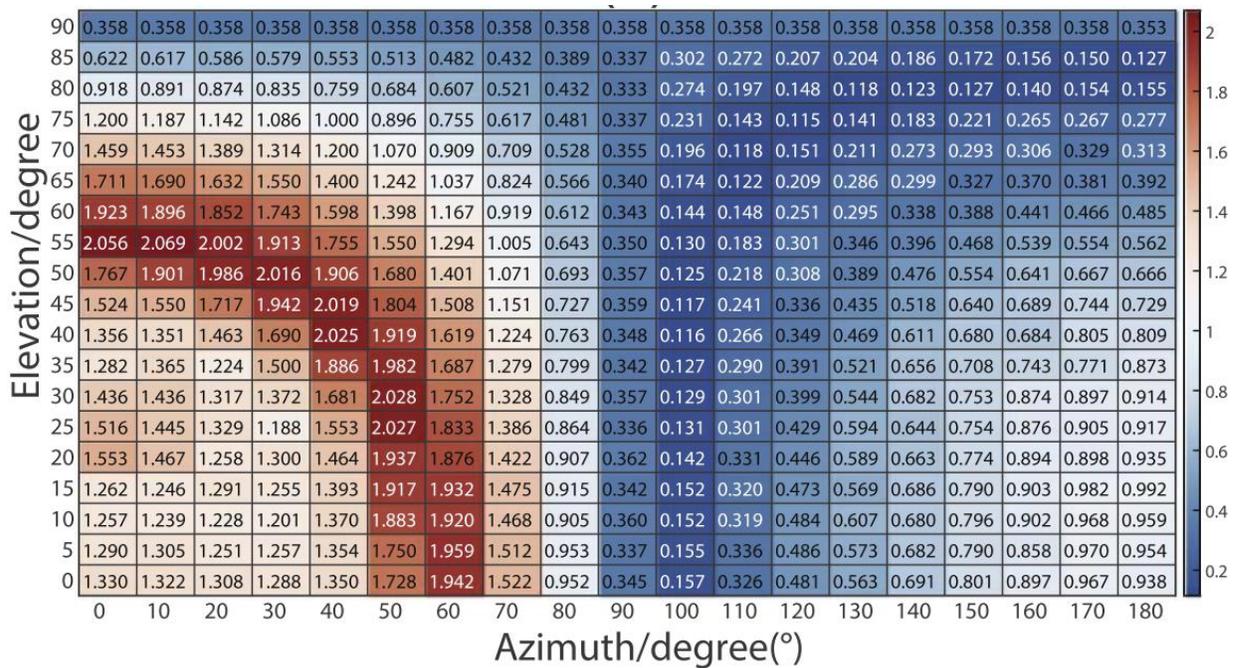


Figura 15: Coeficiente de fuerza total en un radiotelescopio para distintas combinaciones de ángulos de elevación (°) y acimut (°) (Fuente: (Li et al., 2023))

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se elige la combinación de (EL, AZ) = (55°,10°) como segundo caso crítico, representativo de la condición de “*Sideral Tracking*”.

CAPÍTULO 5: Modelo numérico

En el siguiente capítulo se presenta el modelo CFD para los análisis de cargas aerodinámicas correspondientes a los casos de operación detallados en el capítulo 4. Se presentan a continuación los modelos geométricos, las discretizaciones utilizadas para cada escenario y las condiciones de borde utilizadas.

5.1 Condiciones climáticas

Uno de los efectos más críticos en el llano de Chajnantor son las altas magnitudes de la velocidad del viento que se dan en este sitio. (Navarro, 2020) extrae información meteorológica medida por el observatorio APEX desde el 01/01/2018 hasta el 03/11/2019 en el llano de Chajnantor. En dicho estudio se recopilan en dos gráficos distintos, para cada año de mediciones, las máximas velocidades promedio para cada día del mes, teniendo 12 curvas por gráfico representativas de un mes. Estos gráficos de velocidades máximas para los años 2018 y 2019 corresponden, respectivamente, a las Figuras 16 y 17.

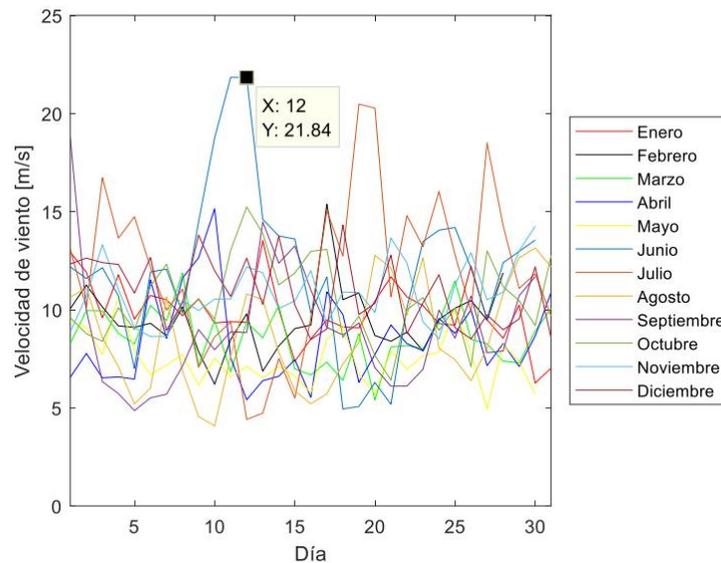


Figura 16: Módulo de la velocidad del viento máxima promedio por día para cada mes durante el año 2018 (Navarro, 2020)

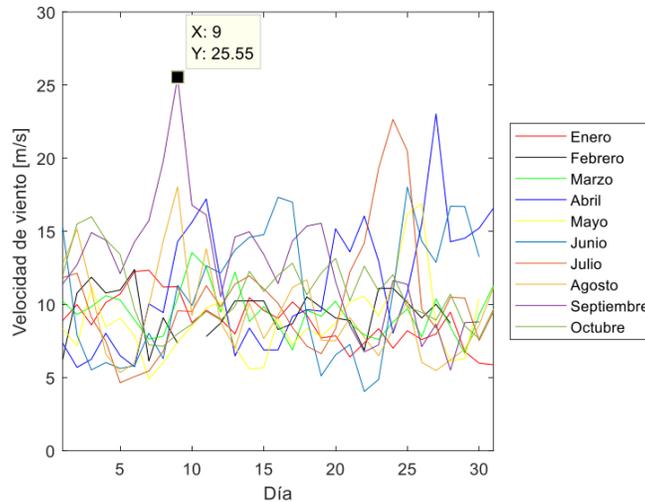


Figura 17: Modulo de la velocidad del viento máxima promedio por día para cada mes durante el año 2019 (Navarro, 2020)

De los gráficos anteriores se da a entender que el caso de velocidades promedio máximas que podrían someter a la antena VERTEX RSI a más cargas superaría los 20 m/s en cada año de mediciones. Sin embargo, a pesar de que ambos gráficos indican velocidades superiores a 20 m/s, se elige este valor de velocidad para los análisis CFD a realizar, debido a que esta corresponde a la velocidad de viento máxima con la que se pueden realizar operaciones con las antenas antes de que estas entren en modo de supervivencia, que es cuando la antena baja su reflector primario y posiciona la parte convexa del reflector primario hacia el viento, protegiendo su estructura. Esto fue discutido con el departamento de Safety en el observatorio ALMA, y validado con las figuras de velocidades máximas presentadas previamente. Debido a la magnitud de la velocidad de viento, y por el interés de estudiar un caso simplificado, se estudia el flujo de aire como incompresible, y se deja como constante la velocidad de viento en el *inlet*, especificado en el capítulo 5.3.3.

Además de la velocidad de aire, se debe considerar la intensidad turbulenta del viento alrededor de los radiotelescopios en el valle de Chajnantor. De acuerdo con (Pablo Pérez Beaupuits et al., 2004), la intensidad turbulenta del flujo varía dependiendo de la hora y de la estación del año, encontrando los mayores valores durante las épocas sin nieve en horario diurno. De acuerdo con los datos recopilados en este estudio, para velocidades de viento cercanas a los 20 [m/s], la intensidad turbulenta promedio oscila alrededor del 23.36%, con un margen de error de $\pm 4.82\%$. Ya que esta condición representa la operación mayoritaria de la antena VERTEX RSI de acuerdo con ALMA, se elige un valor de intensidad turbulenta de 25%, que será aplicado en las condiciones de borde del *inlet*, detalladas a posteriori en el capítulo 5.3.3.

Para el posterior análisis CFD, se considerará este flujo de aire alrededor de una versión simplificada de la geometría de la antena en estudio, que considera su reflector primario, contrapeso, *yoke* y *support cone*, el cual es simplificado para disminuir la cantidad de elementos en la simulación. Los componentes estructurales principales del radiotelescopio VERTEX RSI se ilustraron previamente en la Figura 2.

5.2 Modelo geométrico

El modelo geométrico es generado a partir de modelos 3D de las diferentes secciones del radiotelescopio VERTEX RSI utilizados en un anterior análisis de elementos finitos, extraídos de la base de datos del observatorio ALMA y revisado por el equipo de *Safety* de este. Los archivos son transformados para generar un modelo completamente sólido, apropiado para las futuras simulaciones, utilizando el software de modelado 3D *Fusion 360* y *Ansys Spaceclaim 2022 R2*. El cuerpo resultante es presentado en la Figura 18. Cabe recalcar que se incluyen todas las partes de la antena mencionadas en la Figura 2, excluyendo el reflector secundario, a fin de simplificar los modelos CFD presentados, y teniendo en cuenta el despreciable aporte en área opuesta al flujo de aire en comparación con las otras partes del radiotelescopio.

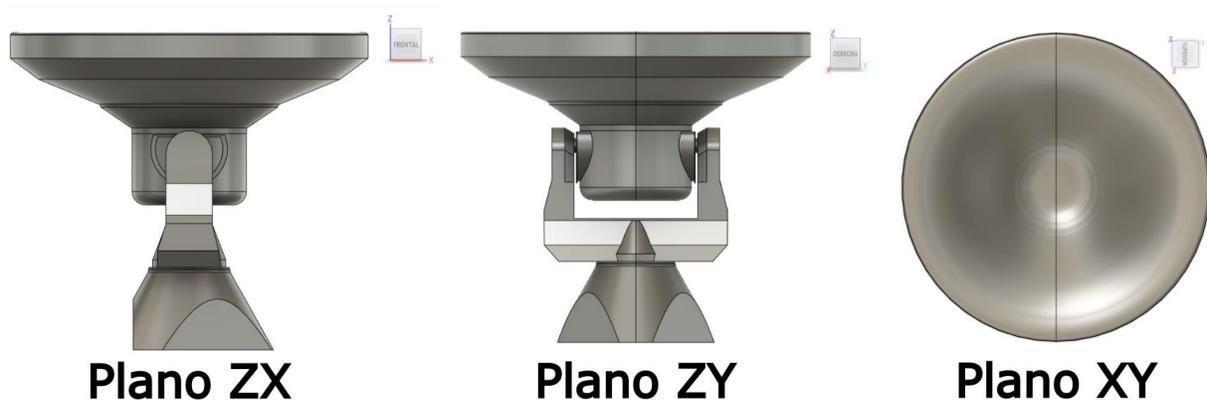


Figura 18: Modelo geométrico del radiotelescopio VERTEX RSI (Visto de izquierda a derecha: Plano ZX, Plano ZY, Plano XY)

Las dimensiones más relevantes de esta antena, en cuanto al volumen de control del modelo CFD descrito más adelante, están descritos en la Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones principales del radiotelescopio VERTEX RSI

Radiotelescopio VERTEX RSI	Altura [m]	Diámetro reflector [m]	Área proyectada reflector [m ²]
Dimensiones	10.848	12.226	117.397
Símbolo	h	D	A

Las dimensiones del volumen de control se seleccionan teniendo en cuenta las referencias proporcionadas por (Navarro, 2020), (Li et al., 2023) y (Upnere et al., 2012), donde se analizan flujos de aire alrededor de radiotelescopios de diferentes diámetros. En cada uno de estos análisis, se determinan las dimensiones del volumen de control en función de la altura y los diámetros de cada radiotelescopio, los cuales son indicados en la Tabla 3, siendo “**D**” el diámetro del radiotelescopio modelado, “**h**” su altura con respecto al suelo, y “**A**” el área proyectada de la sección transversal del reflector primario, medidas entregadas en la tabla anterior.

Tabla 3: Dimensiones de volúmenes de control para análisis CFD en diversos estudios (se subrayan las dimensiones escogidas).

Paper	<i>Inlet-Antena</i>	<i>Antena-outlet</i>	Alto	Ancho
Upnere 2012 (16m Diámetro)	5.5D	5.5D	6D	7D
Lee 2023 (300 m Diámetro)	8D	20D	6D	9D
<u>Navarro 2022</u> <u>(10.6 m</u> <u>Diámetro)</u>	<u>3D</u>	<u>3D</u>	<u>3D+h</u>	<u>3D</u>
Upnere 2012 (32m Diámetro)	2D	8D	4h	5D

Es de gran importancia destacar que las dimensiones adoptadas poseen un carácter estrictamente referencial, en virtud de las diferencias significativas que existen entre los radiotelescopios objeto de análisis y el VERTEX RSI, especialmente en lo que respecta a sus bases de soporte y sus diámetros del reflector primario. Teniendo lo anterior en consideración, se toman las dimensiones del volumen de control de (Navarro, 2020), pues este utiliza las dimensiones de Upnere como referencia para la suya propia, pero modificándolas en función de su diámetro de reflector primario más reducido, el cual es el más similar al del radiotelescopio estudiado. Se elige entonces un volumen de dimensiones suficientemente amplias con el propósito de evitar influencias de los efectos de borde, buscando que sea lo suficientemente extenso como para representar con precisión el espacio libre donde se tiene previsto instalar el radiotelescopio. Las dimensiones seleccionadas se generan en el programa ANSYS *Spaceclaim 2022 R2*, generándose a partir de la superficie del modelo geométrico de la antena, y son ilustradas en las Figuras 19 y 20.

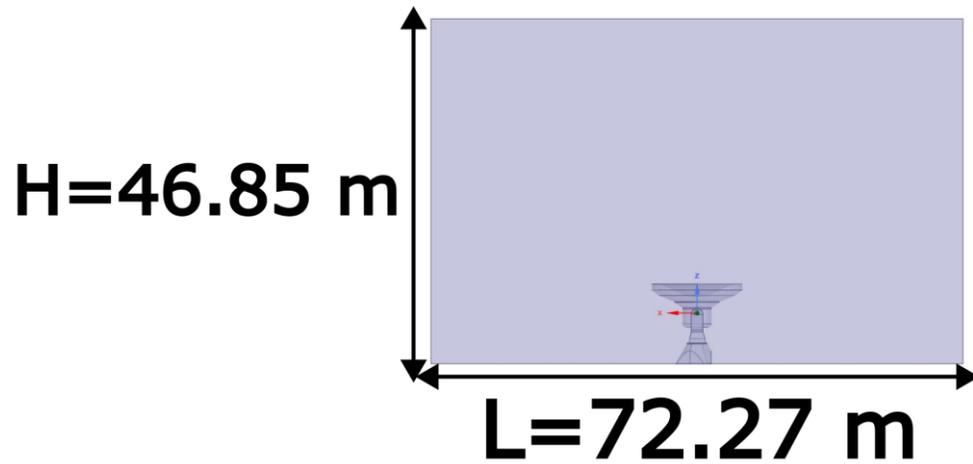


Figura 19: Vista lateral (Plano ZX) del volumen de control

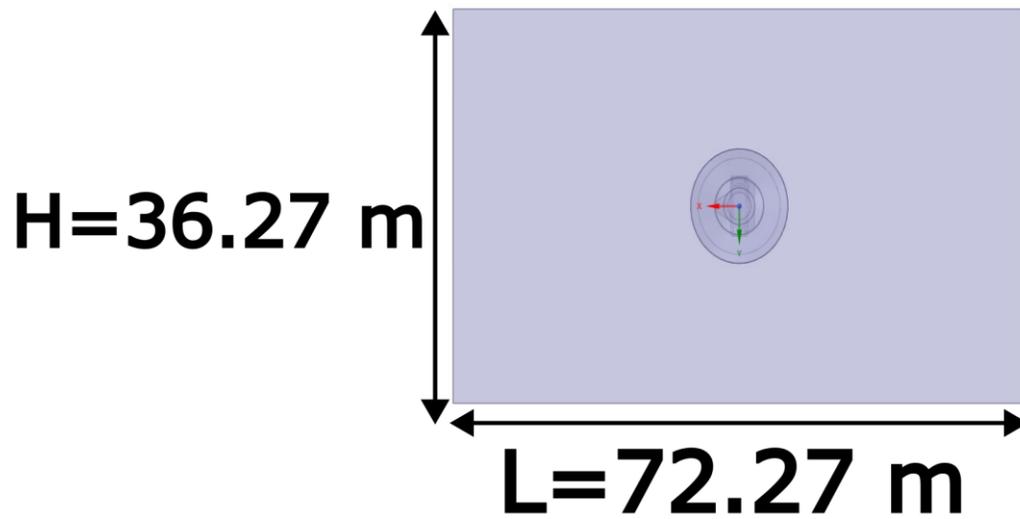


Figura 20: Vista en planta (Plano X-Y) del volumen de control

5.3 Modelo CFD

La simulación se lleva a cabo utilizando el software *ANSYS 2022 R2*, en particular el programa *ANSYS FLUENT* de esta versión específica. Este programa utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales permiten determinar el campo de presiones que actúa sobre la estructura en cuestión. Como se indica en el capítulo 3.3.1, se utiliza el modelo de turbulencia *Realizable $k - \epsilon$* , o *$k - \epsilon^*$* , por su relación precisión/costo computacional, y por su capacidad de representar fenómenos esperables en este caso de estudio, tales como la recirculación, lo cual es soportado por trabajos como los de (Upnere & Jekabsons, 2011). A su vez, la representación del sistema físico mencionado previamente se simula empleando el algoritmo SIMPLE (ANSYS, 2013). En cuanto a los enfoques de cálculo, se utiliza *First-Order-Upwind (FOU)* para las primeras 100 iteraciones de cada modelo, finalizando con enfoque *Second-Order-Upwind (SOU)* hasta asegurar la convergencia de los parámetros físicos estudiados. Se elige esta estrategia para asegurar una buena combinación entre la estabilidad y precisión de los resultados (Ahmed & Elmekawy, 2018).

Igualmente, se asegura la convergencia observando como primer indicador una reducción de los valores residuales normalizados a 10^{-4} como mínimo para todas las variables. Sin embargo, se analiza en paralelo que los valores promedio de los parámetros de interés (presión dinámica, presión absoluta, fuerzas resultantes, entre otros) converjan al final de las iteraciones, como a su vez la velocidad en el *outlet* del volumen de control. Estos criterios se logran para cada simulación CFD presentada en este trabajo.

5.3.1 Material

El material seleccionado para llevar a cabo la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) es el aire. En particular, en la ubicación del llano de Chajnantor, se presentan condiciones atmosféricas distintas a las que se encuentran a nivel del mar. Con base en los datos recopilados por APEX, es posible determinar las propiedades del aire en el llano de Chajnantor. Para este propósito, se extraen los datos correspondientes al período comprendido entre el 01/01/2018 y el 03/11/2019 previamente estudiado, los cuales son obtenidos del centro meteorológico APEX a través de su formulario de consulta climática (European Southern Observatory (ESO), 2019). El promedio de las propiedades físicas de la atmósfera en el valle de Chajnantor es indicado en la Tabla 4.

Tabla 4: Promedio de las propiedades físicas de la atmósfera según el centro meteorológico APEX

Densidad ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	Presión atmosférica [Pa]	Viscosidad dinámica μ [$\frac{N \cdot s}{m^2}$]
0.715	53659.9	0.000017

5.3.2 Discretización

La discretización empleada en el presente estudio es del tipo conforme, lo que implica que los nodos de los elementos adyacentes siempre coinciden. Este enfoque de discretización proporciona ventajas en términos de permitir llegar a la convergencia de la simulación con menor dificultad, a cambio de tener una cantidad de elementos elevada con respecto a una discretización no conforme en donde los nodos no coincidan. La cantidad de elementos utilizados es variable, debido a que el comportamiento del fluido experimenta cambios drásticos en diferentes ángulos acimutales y de elevación, como consecuencia de las variaciones en la posición del telescopio, por lo que serán indicadas en cada caso.

Para asegurar resultados con sentido físico, de acuerdo con el modelo de turbulencia seleccionado y de las recomendaciones entregadas en sitios especializados en CFD como (Sijal, 2019) para las funciones de pared estándar, el valor del parámetro y^+ en la superficie de la antena debe mantenerse mayor a 30 y menor a 300, en especial en las zonas donde se pueda producir recirculación, pues el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ realizable está desarrollado para representar flujos turbulentos dentro de este rango, correspondientes a los valores de y^+ de la subcapa logarítmica. Este parámetro corresponde a una medida adimensional utilizada para evaluar la resolución de la capa límite cerca de una superficie sólida, definido como:

$$y^+ = \frac{\rho y_p u_\tau}{\mu}$$

Figura 21: Fórmula del parámetro y^+

Siendo ρ la densidad del fluido alrededor del objeto de estudio, y_p la altura de la primera capa límite, u_τ la velocidad de fricción, que es igual a la raíz cuadrada de la razón entre los esfuerzos de corte τ en la superficie del objeto y ρ , y μ la viscosidad cinemática del fluido.

Esto es particularmente relevante teniendo en cuenta que los modelos de turbulencia del tipo $k - \epsilon$ son solo válidos donde el área de turbulencia está completamente desarrollada, y para altos números de Reynolds es recomendable utilizar funciones de pared, derivadas empíricamente para satisfacer los fenómenos físicos cercanos a las paredes del objeto de estudio, siempre y cuando las celdas en esta zona estén dentro del rango de y^+ (Jousef, 2020). Una representación gráfica de una función de pared basada en la subcapa logarítmica para la resolución de la capa límite del flujo alrededor de una superficie es detallado en la Figura 22.

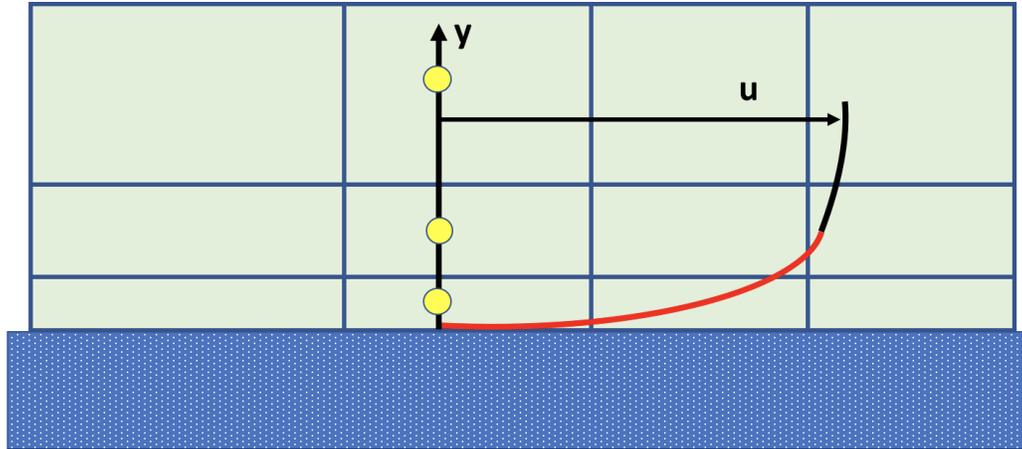


Figura 22: Representación de una función de pared basada en la subcapa logarítmica para la resolución de la capa límite alrededor de una superficie

Por lo tanto, la discretización se realiza a través de una monitorización continua del espesor de la capa límite (y^+), garantizando que permanezca cercana a los valores indicados, utilizando herramientas de mallado adaptativo disponibles en *Fluent Meshing*. Se reconoce la posibilidad de que algunas celdas en la superficie de la antena puedan estar fuera del rango óptimo para el modelo de turbulencia y función de pared seleccionados, pero se busca que estos valores se encuentren dentro de márgenes aceptables del rango previamente señalado.

El tipo de discretización alrededor del radiotelescopio se ilustra de forma representativa en las Figuras 23 y 24, teniendo en cuenta que el mallado será diferente dependiendo del caso de operación simulado.

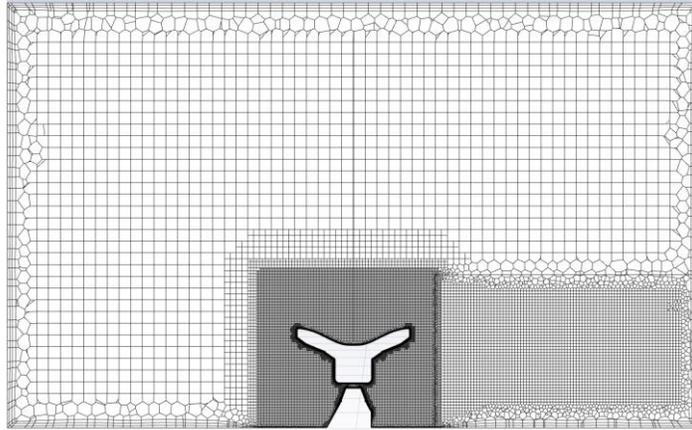


Figura 23: Representación de la discretización del fluido alrededor del telescopio VERTEX RSI en el plano ZX del volumen de control

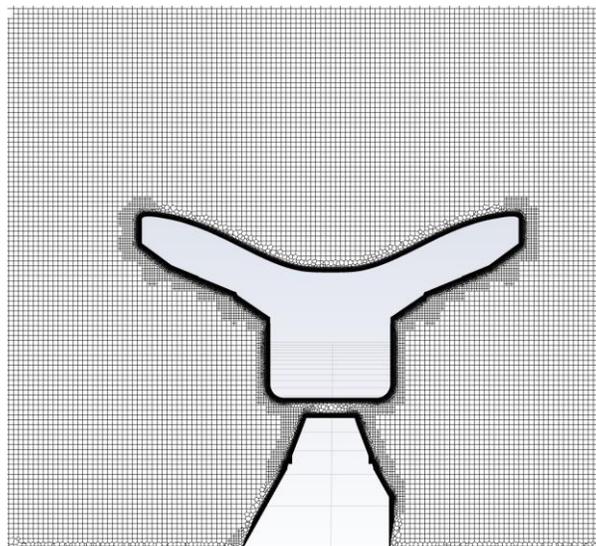


Figura 24: Acercamiento de la discretización del fluido alrededor del telescopio VERTEX RSI en el plano ZX del volumen de control

La discretización del dominio se realiza utilizando elementos poliédricos y tetraédricos de primer orden, seleccionando la opción "*Poly-hexcore*" en *Fluent Meshing*. Esta elección se realiza con el propósito de asegurar la convergencia de los resultados sin aumentar de manera innecesaria la cantidad de elementos, ahorrando costos computacionales, y para asegurar la calidad del mallado alrededor de las secciones curvadas de la geometría.

Se realiza un refinamiento alrededor de la superficie de la antena con capas de inflación, a fin de asegurar una buena representación de los fenómenos físicos ocurridos en esta zona. Se utiliza la herramienta "*Uniform Ratio*" en *Fluent Meshing* para su generación, pues permite controlar la altura de la primera capa límite de forma más intuitiva, aspirando a lograr un valor de y^+ dentro del rango previamente descrito, según la fórmula en la Figura 21. En las Figuras 25 y 26 se presenta esta discretización en la superficie de la antena respecto al plano ZX del flujo.

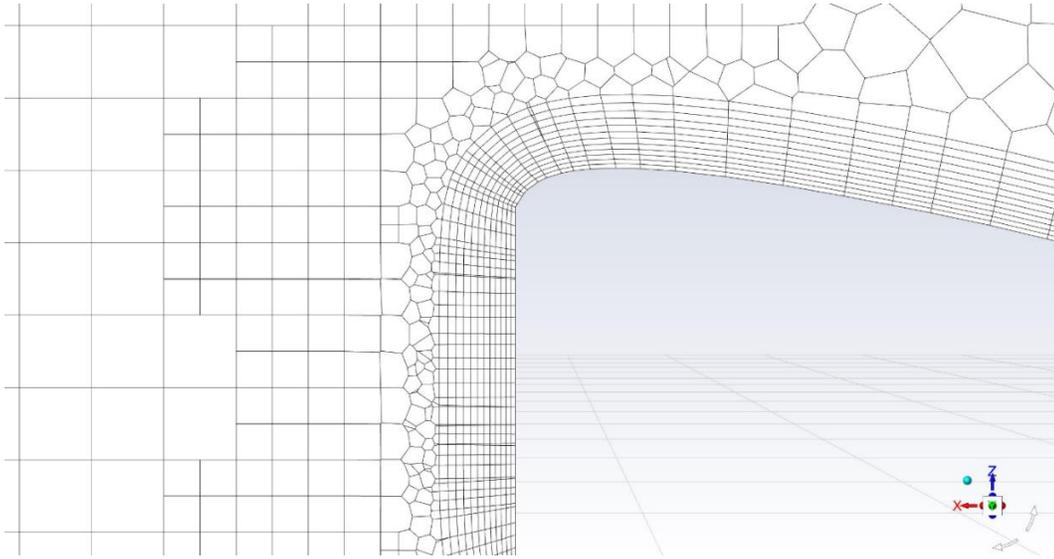


Figura 25: Discretización en el borde superior del reflector, según el plano ZX del flujo

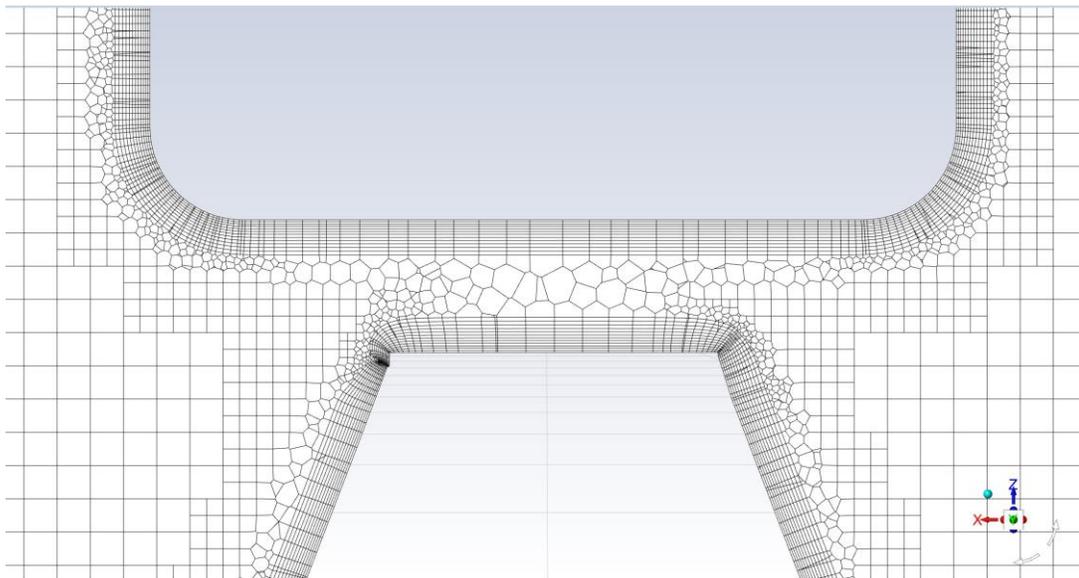


Figura 26: Discretización entre el contrapeso y la base del radiotelescopio, según el plano ZX del flujo

Para asegurar que la discretización de los elementos que representan el flujo de aire alrededor del radiotelescopio es de una calidad aceptable, se tienen en cuenta parámetros como la razón de aspecto, oblicuidad y ortogonalidad de los elementos. Las recomendaciones de los valores promedio, máximos y mínimos de estos parámetros son seguidos para asegurar la calidad del mallado, utilizando como referencia las sugerencias de (Adam et al., 2020).

5.3.3 Condiciones de borde

De acuerdo con las recomendaciones entregadas en estudios de flujos alrededor de radiotelescopios de dimensiones similares a la antena VERTEX ((Navarro, 2020), (Upnere et al., 2012)), y a las condiciones atmosféricas en el llano de Chajnantor (Pablo Pérez-Beaupuits et al., 2004), se establecen las siguientes condiciones de borde:

- Inlet o entrada de flujo:
 - Velocidad de flujo constante de $20 \left[\frac{m}{s} \right]$, dirección -X
 - Intensidad turbulenta: 25 [%]
 - Razón de viscosidad turbulenta: 288463.48493549 [-]
 - Corresponde a la razón entre la viscosidad turbulenta μ_t y la viscosidad cinemática μ , función de los valores de k y ε .
- Outlet o salida de flujo:
 - Presión atmosférica de magnitud 53659.9 [Pa]
 - Intensidad turbulenta: 5 [%] (Predeterminado por *Fluent*)
 - Razón de viscosidad turbulenta: 10 [-] (Predeterminado por *Fluent*)
- Condición *Free Slip* en las paredes restantes del volumen de control.
- Condición *No-Slip* para toda la superficie del telescopio y para el *Named Selection* “Suelo”.

Las condiciones de borde y su formulación están resumidas en la Tabla 5, siendo el sufijo “t” correspondiente a tangente al flujo, y “n” normal al flujo.

Tabla 5: Condiciones de borde del modelo CFD

<i>Named Selection</i>	Condición de borde	Presión (p)	Velocidad (u)
Superficie Antena	No-Slip	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$u = (0, 0, 0)$
Paredes	Free-Slip	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$ $u_n = 0$
Techo	Free-Slip	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial u_t}{\partial n} = 0$ $u_n = 0$
Suelo	No-Slip	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$u = (0, 0, 0)$
<i>Inlet</i>	<i>Velocity-Inlet</i>	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$u = \text{constante} = 20 \left(\frac{m}{s} \right)$
<i>Outlet</i>	<i>Pressure-Outlet</i>	$p = \text{constante} = 53659.9 \text{ (Pa)}$	$\frac{\partial u}{\partial n} = (0, 0, 0)$

Imágenes de las diferentes condiciones de borde resaltadas en el volumen de control del caso de operación “Cénit” se encuentran en el anexo A para su contextualización.

CAPÍTULO 6: Resultados

6.1 Caso “Cénit”

A continuación, se presentan los contornos de distribución de presión dinámica (izquierda) y velocidades (derecha) en el volumen de control del caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) con respecto a los planos ZX, ZY y XY, respectivamente, según sistema de referencia previamente definido. El flujo de viento se dirige de la derecha a la izquierda. Cabe recalcar que los contornos presentados anteriormente corresponden a uno de todos los modelos generados para este caso crítico, específicamente el de 7.53 millones de elementos, por considerarse representativo de todos los otros modelos, como será explicado más adelante. El viento fluye de izquierda a derecha en las figuras del plano ZX, y hacia el fondo de la pantalla en el plano ZY.

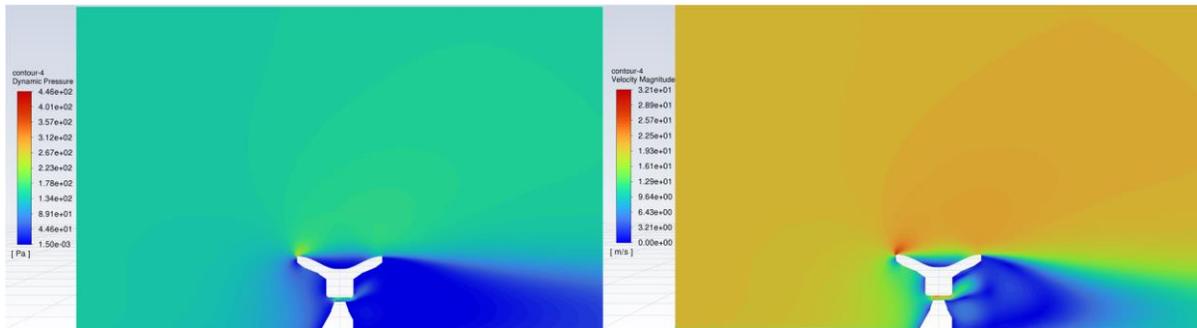


Figura 27: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZX

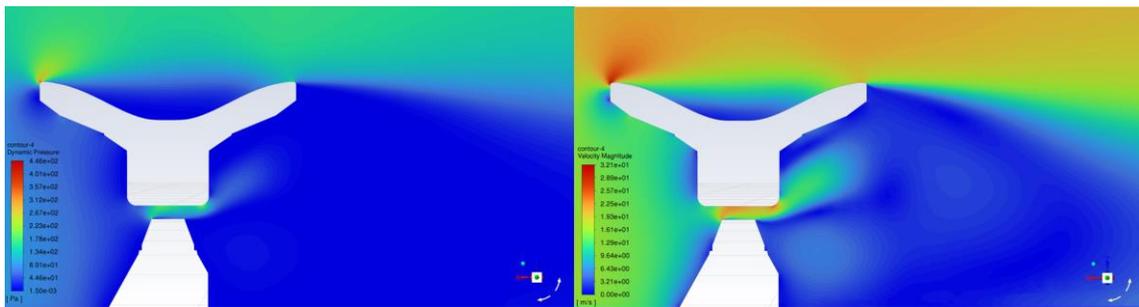


Figura 28: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZX

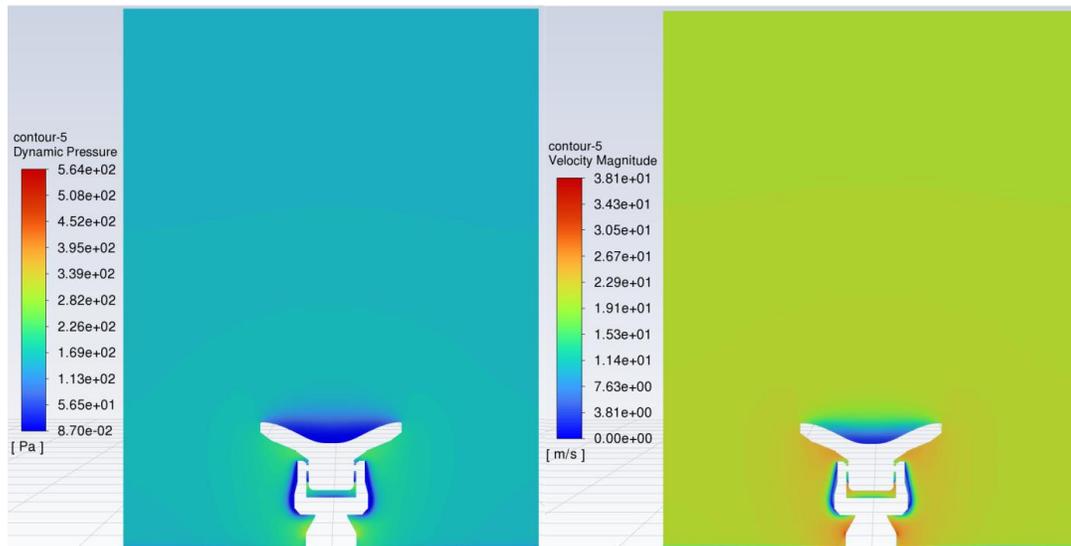


Figura 29: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZY

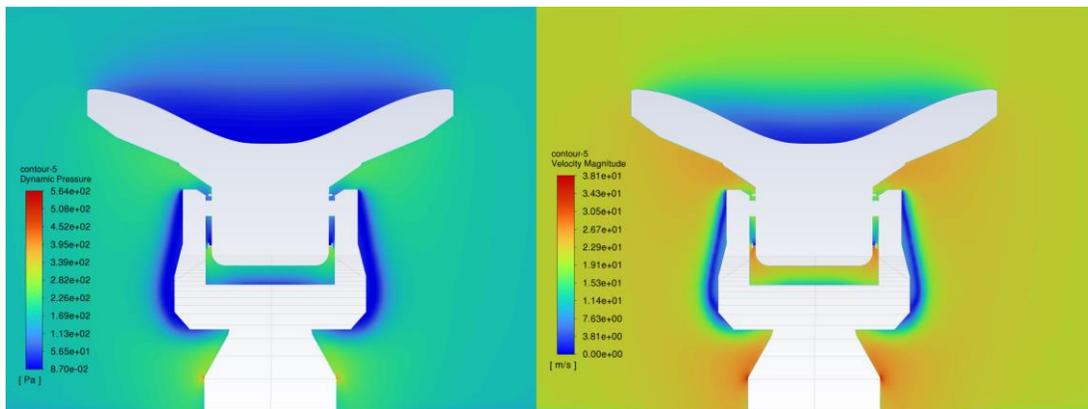


Figura 30: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) en el plano ZY

De acuerdo con la Figura 28, se observa que el flujo de aire presenta su máxima velocidad y presión dinámica cerca del borde del reflector primario. Esto es esperable debido al efecto de "*stagnation point*" o punto de estancamiento, que se produce cuando el flujo de aire, al encontrarse con una superficie frontal como la del reflector, se divide y la velocidad del flujo se reduce drásticamente en ese punto, incrementando la presión dinámica. En la concavidad del reflector, se forma una zona de baja presión dinámica, lo que lleva a la recirculación del flujo. Esta recirculación puede conducir a fluctuaciones en las cargas aerodinámicas, principalmente por las diferencias de presión generadas en los distintos puntos del reflector, lo cual puede tener un efecto significativo en la estabilidad y desempeño del telescopio.

A su vez, se observa un aumento notable en la velocidad y presión dinámica en el espacio o *gap* entre el *yoke* y el reflector primario. El flujo de fluido tiende a seguir una superficie contigua, y en este caso, el flujo de aire se "adhiera" a las superficies del *yoke* y del reflector, intensificando la velocidad y, por ende, la presión dinámica del aire en esa región.

Posteriormente, después de que el flujo de aire impacta con el borde del reflector, en la región posterior se forma una zona de baja velocidad de aire y baja presión dinámica. Esta zona, conocida como la estela, genera diferencias de presión significativas que pueden influir en las cargas aerodinámicas de la estructura. Estas diferencias en la presión pueden contribuir al arrastre total del radiotelescopio, pudiendo afectar su estabilidad cuando se enfrenta a vientos intensos.

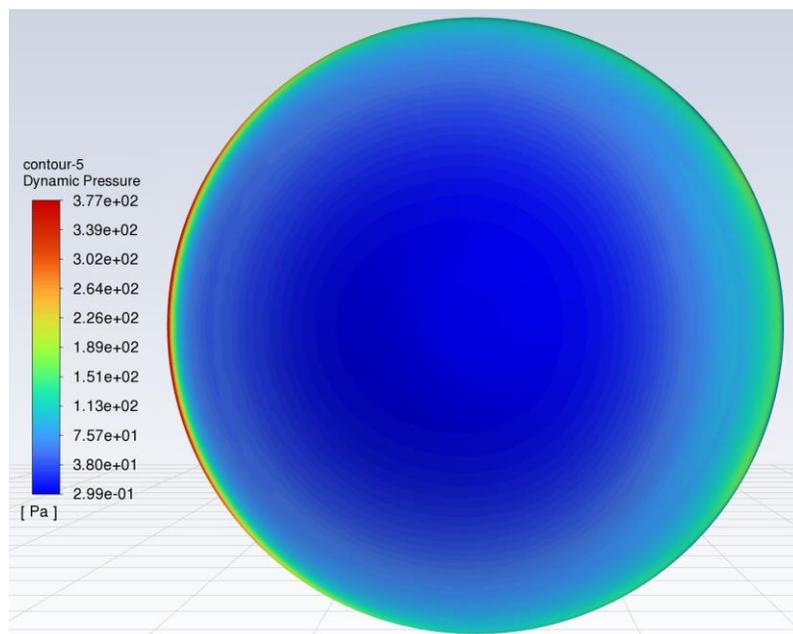


Figura 31: Distribución de presión dinámica en la superficie principal del reflector primario para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))

En el análisis realizado sobre las cargas aerodinámicas del radiotelescopio en este caso de operación, se han identificado fenómenos de interés notables al examinar los contornos de fuerza de arrastre en las partes anterior y posterior de la antena. El flujo de aire se presenta en la dirección $-X$, lo cual significa que se esperaría que las fuerzas de arrastre tuvieran valores negativos en esta dirección. Esta expectativa se ha confirmado con los resultados obtenidos: las máximas magnitudes de arrastre presentan valores negativos y se localizan predominantemente en la sección transversal del radiotelescopio que se sitúa perpendicular a la dirección del flujo de aire, como se puede ver en la Figura 32. Este fenómeno es esperable dada la configuración geométrica del radiotelescopio: la sección transversal, al ser perpendicular al flujo, actúa como una barrera que interrumpe el avance del flujo de aire. A medida que el aire choca con esta sección, se genera una resistencia que se manifiesta como una fuerza de arrastre en dirección opuesta al flujo incidente, de ahí sus valores negativos. En adición a este comportamiento, un fenómeno particular se observa en el borde del reflector

primario. Este borde, siendo la primera parte del radiotelescopio que entra en contacto con el flujo de aire, y lugar donde se detecta un incremento pronunciado en la velocidad y presión dinámica del aire, presenta valores de arrastre positivos. Es decir, estos valores de arrastre se manifiestan en dirección contraria al esperado, opuestos al flujo de aire. Esta anomalía puede explicarse considerando la orientación del reflector hacia el cénit. Al enfrentar directamente el flujo, se da el punto de estancamiento identificado previamente en la Figura 28. A partir de este punto, el flujo se desvía y es redirigido en múltiples direcciones. Dada la geometría curvada del reflector y su orientación, una porción del flujo se desplaza hacia arriba, generando una componente de arrastre en dirección positiva, es decir, opuesta al flujo predominante en $-X$. Sin embargo, es esencial destacar que este aporte de arrastre del reflector es mínimo en comparación con el total de la estructura. La razón de esto radica en el hecho de que, aunque el reflector desvíe parte del flujo, la mayor parte de la estructura del radiotelescopio presenta una resistencia significativa al aire en movimiento, generando cargas aerodinámicas mucho más pronunciadas.

Ahora, al considerar la superficie cóncava del reflector, los aportes de arrastre son también mínimos, y presentan un comportamiento variado. En algunas zonas, el arrastre es mínimamente positivo, mientras que en otras es mínimamente negativo. Esta variabilidad se debe a la naturaleza del flujo sobre superficies cóncavas. El flujo, al chocar con la superficie convexa, tiende a recircular en la cavidad formada por la parte cóncava. Esta recirculación da lugar a pequeños vórtices y flujos secundarios que generan arrastres en diversas direcciones. El fenómeno físico responsable de esto es la separación del flujo, que ocurre cuando el flujo de aire ya no sigue la superficie del objeto y se desprende formando vórtices, común en superficies cóncavas y curvas. Estos vórtices y flujos secundarios, aunque menores, pueden generar fluctuaciones en las cargas aerodinámicas y posiblemente en la respuesta dinámica del telescopio, especialmente si se combinan con otros fenómenos aerodinámicos en la estructura.

En la parte posterior al flujo, específicamente en lo que denominamos como "estela del flujo", los valores de arrastre resultan ser pequeños. Se ha observado que, en la mitad de la mayoría de la sección transversal de este plano, estos valores son ligeramente negativos. Sin embargo, alrededor de estas zonas centrales, los valores de arrastre cambian y se vuelven ligeramente positivos, oponiéndose a la dirección del flujo de aire. Este fenómeno puede atribuirse a la recirculación del flujo de aire que suele producirse en las estelas de objetos grandes. En zonas de recirculación, pequeños vórtices pueden generar arrastres que actúan en direcciones variables, dando como resultado arrastres tanto en la dirección del flujo principal como en sentido opuesto.

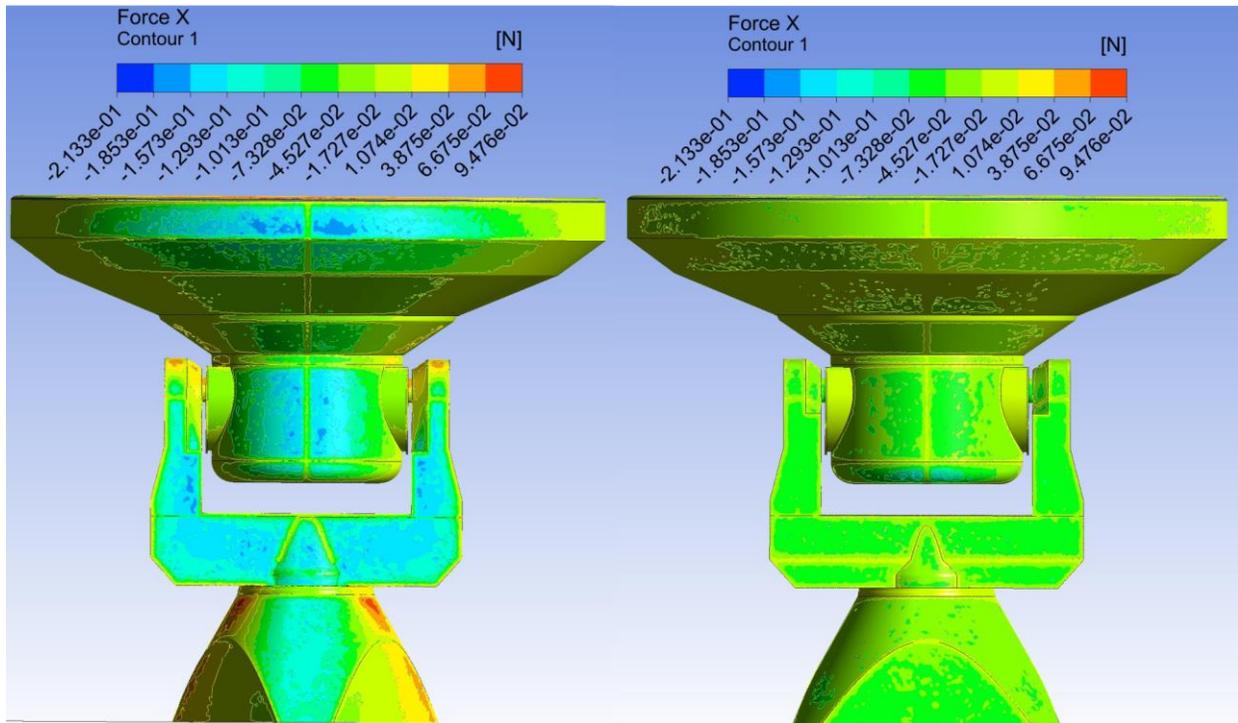


Figura 32: Contorno de fuerza de arrastre en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “Cénit” $((EL, AZ) = (90^\circ, 0^\circ))$

En el *yoke* del radiotelescopio se encontraron altos valores de arrastre en la dirección del flujo de aire, lo cual es coherente con las expectativas. Esta área representa una porción significativa de la superficie que enfrenta directamente al flujo incidente, actuando como una barrera a este y generando una considerable resistencia aerodinámica. Sin embargo, al observar las zonas próximas a los brazos del *yoke*, se aprecia una disminución gradual de los valores de arrastre, tanto hacia los bordes como hacia la parte superior. Esta transición culmina en el borde superior de los brazos del *yoke* y, de manera notable, en las uniones de estos brazos con el reflector primario y el escudo motor. En estas zonas, los valores de arrastre no solo son menores, sino que llegan a ser altamente positivos, es decir, actúan en dirección opuesta al flujo de aire. Estas anomalías en las fuerzas de arrastre pueden atribuirse principalmente a la separación del flujo de aire. Cuando el aire fluye sobre la estructura del radiotelescopio, se adhiere inicialmente a la superficie debido a la viscosidad del aire.

Sin embargo, las curvaturas y cambios abruptos en la geometría, como en los brazos del *yoke* y las uniones, pueden provocar que el flujo se separe de la superficie. Esta separación crea zonas de recirculación en las que el aire circula en un patrón vorticial, moviéndose en dirección contraria al flujo principal. Además, la diferencia de presiones entre la parte frontal (donde el flujo impacta directamente) y estas zonas recirculadas también contribuye a la aparición de estas fuerzas opuestas.

En relación con la base del radiotelescopio, se presenta una dinámica de flujo particularmente compleja. La sección de la base que se enfrenta directamente al flujo de aire, la cual presenta una curvatura pronunciada desde el suelo hasta la unión con el *yoke*, registra valores de arrastre elevados en la dirección del flujo. Sin embargo, estos valores rápidamente se vuelven positivos en el costado

de la base, paralelo a los brazos del *yoke*. En otras palabras, a 90° de la parte frontal de la base que se encuentra alineada con la dirección del flujo de aire, los valores de arrastre se invierten y se oponen al flujo principal. Esta inversión se acentúa en las zonas donde la superficie de la base cambia drásticamente de una forma curva a una forma recta que se extiende hasta el suelo. En uno de los bordes de estas secciones rectas, los valores de arrastre también actúan en dirección opuesta al flujo de aire. Esta variabilidad en los valores de arrastre puede ser resultado de la separación del flujo en la superficie curva, donde el flujo no puede seguir la forma de la estructura y se separa. Este flujo separado puede recircular y crear regiones de baja presión, generando zonas de arrastre positivo. Además, es probable que la parte posterior de la base del radiotelescopio, al estar también en la "estela" del flujo, experimente efectos similares a los descritos para la estela detrás del telescopio, intensificando la recirculación y los patrones de arrastre complejos observados.

Además de la recirculación en la parte posterior del radiotelescopio, la separación del flujo crea una amplia zona de baja presión detrás del cuerpo. Esta baja presión, comparada con la presión más alta en la parte frontal del cuerpo (donde el flujo impacta directamente), genera una fuerza neta que actúa en la misma dirección que el flujo de aire, conocida como fuerza de arrastre. Sin embargo, dentro de la estela turbulenta que se forma detrás del cuerpo, pueden existir pequeñas regiones donde las fuerzas actúan en dirección opuesta debido a la recirculación y a los pequeños vórtices que se forman.

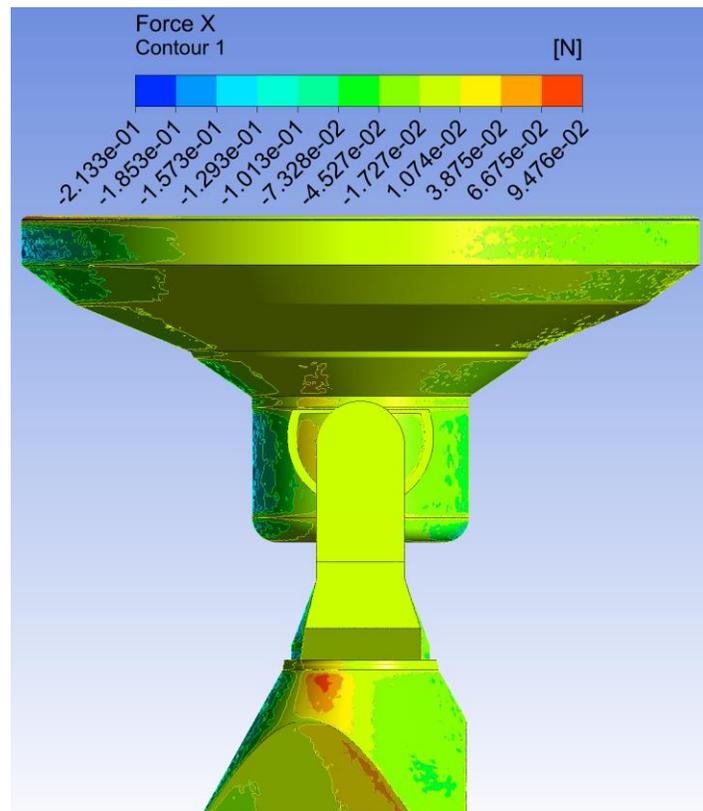


Figura 33: Contorno de fuerza de arrastre en sección lateral para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = $(90^\circ, 0^\circ)$)

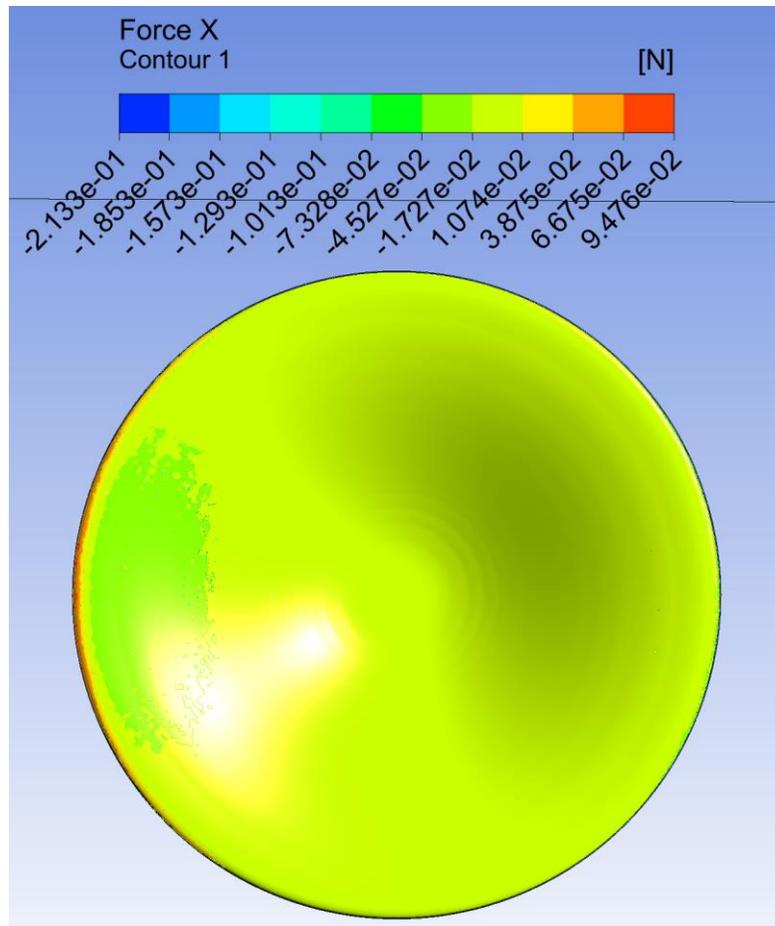


Figura 34: Contorno de fuerza de arrastre en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°, 0°))

En cuanto a las fuerzas laterales, cuando el viento interactúa con radiotelescopio, no lo hace de manera uniforme. La presión dinámica actúa perpendicularmente a la dirección principal del flujo y, en combinación con la complejidad geométrica de la estructura, da origen a vórtices y remolinos. Estas perturbaciones pueden provocar cambios abruptos en la dirección y magnitud de la presión dinámica, siendo la componente lateral la principal responsable de las fuerzas laterales.

Una consideración esencial en el análisis aerodinámico es la simetría de la estructura y del modelo. Si tomamos en cuenta una geometría simétrica del radiotelescopio respecto al plano ZX, esperaríamos que las fuerzas laterales reflejaran esta simetría. Esto se traduce en un comportamiento aerodinámico equilibrado a ambos lados de la estructura, siempre y cuando no existan asimetrías en las condiciones iniciales o en la propia geometría. Si se analiza en detalle la Figura 35, se puede ver en cada hemisferio del telescopio con respecto al plano ZX fuerzas laterales de magnitudes idénticas, pero de signos opuestos, es decir, magnitudes de fuerza simétricas que apuntan hacia las paredes del volumen de control. Esto se corresponde con el supuesto anterior de fuerzas simétricas para este caso de operación.

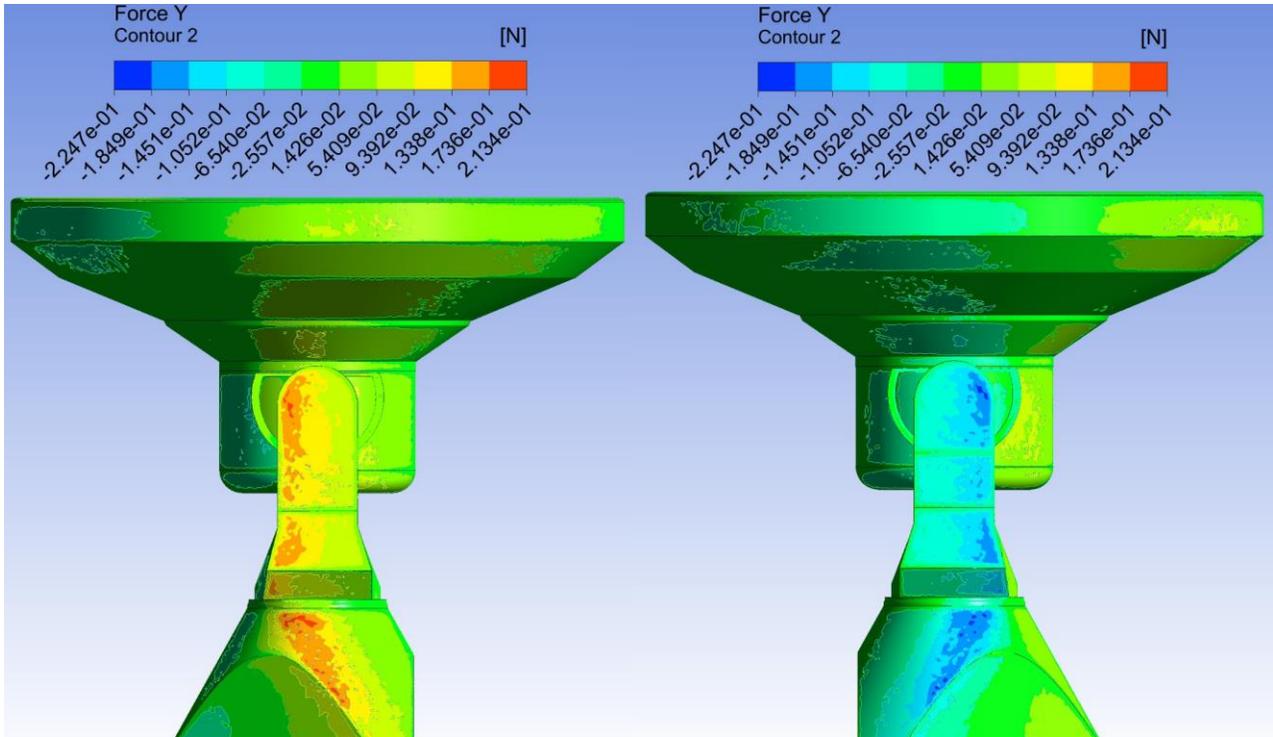


Figura 35: Contorno de fuerza lateral en secciones laterales izquierda y derecha respectivamente para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))

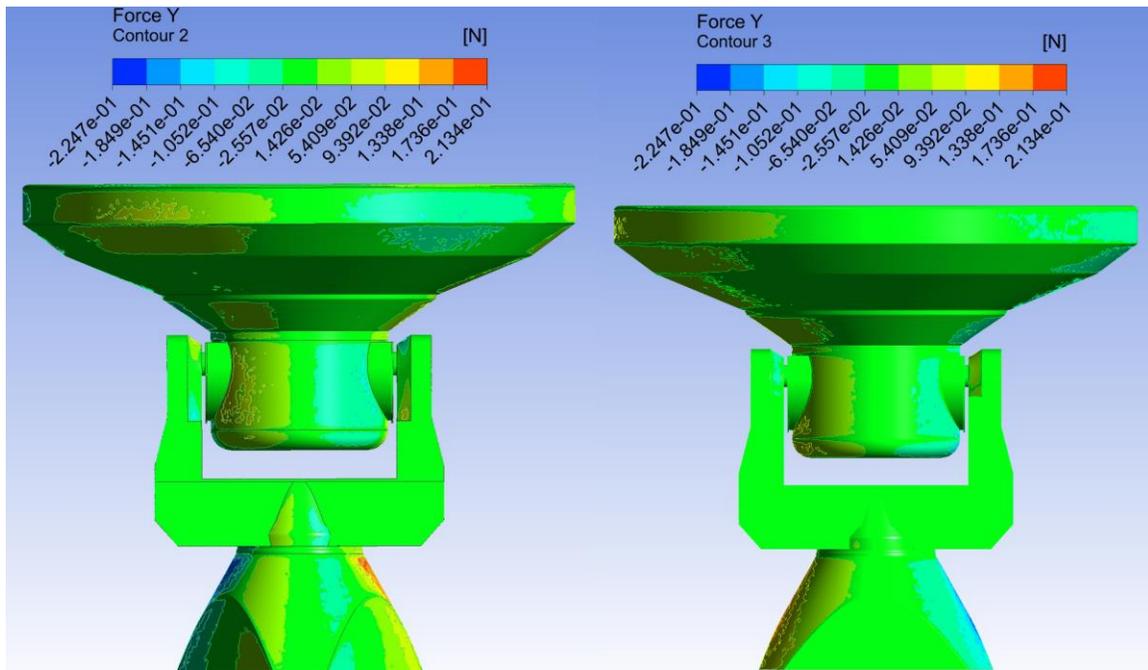


Figura 36: Contorno de fuerza lateral en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))

En cuanto a las fuerzas de sustentación, se registraron fenómenos de interés. Para facilitar la interpretación, los resultados se presentan con valores tanto positivos como negativos. Observando la Figura 37, es evidente que la sustentación en la concavidad del reflector varía significativamente en función de la posición y la topografía del disco. En el borde del reflector donde el flujo de aire incide primero, los valores de sustentación son altamente positivos, es decir, en dirección al cénit. Este fenómeno se debe al principio de Bernoulli: en el punto de estancamiento, donde el flujo impacta directamente el reflector, la velocidad del flujo se reduce a cero, resultando en un aumento de la presión. Esta alta presión en el borde frontal del reflector genera una sustentación positiva. Mientras que, en la mayoría del borde del reflector, aunque los valores de sustentación permanecen positivos, su magnitud es considerablemente menor. La razón principal de esto es que, aunque la forma curva del reflector desvía el flujo, creando cierta sustentación, la velocidad del flujo aumenta a medida que circula sobre la superficie curva, lo que reduce la presión y, por ende, la sustentación.

Por otro lado, en la región más profunda de la concavidad del reflector, pero aún cercana al borde posterior, se presentan valores de sustentación ligeramente negativos. Esta fuerza, que apunta hacia el suelo, puede ser atribuida a la recirculación del flujo en la concavidad del reflector. A medida que el flujo de aire se mueve sobre la superficie curva del reflector, se produce una separación del flujo, especialmente en áreas donde la concavidad es más pronunciada. Esto da lugar a zonas de recirculación o vórtices dentro de la concavidad, que crean una zona de baja presión. Esta baja presión en la concavidad, en comparación con la presión más alta en la parte exterior del reflector, resulta en una sustentación negativa.

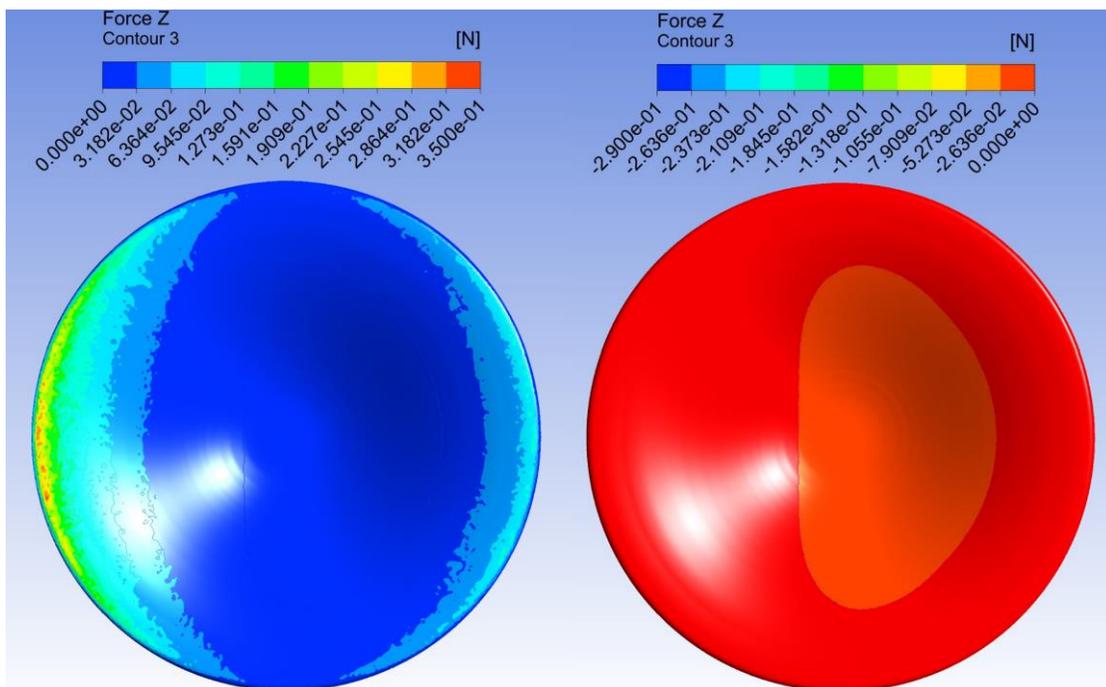


Figura 37: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))

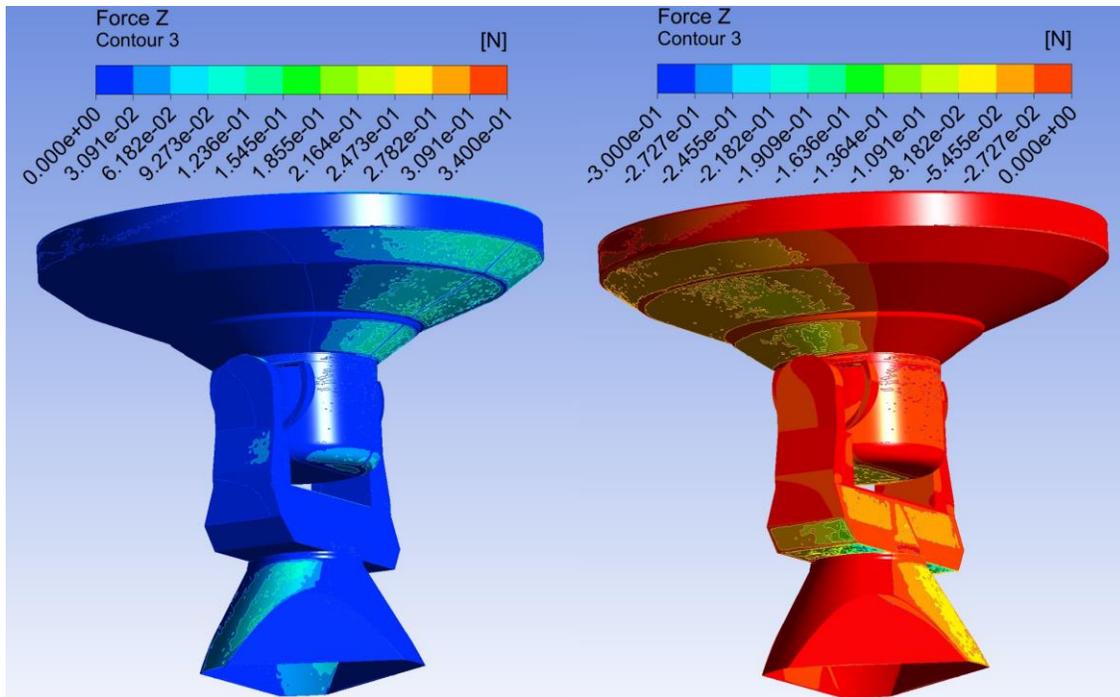


Figura 38: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie anterior al flujo para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) vista en perspectiva

Cercano a los bordes de la base del radiotelescopio, como se ve en la Figura 38, se detecta un significativo aporte de sustentación positiva. Esta observación es coherente con la idea de que el flujo se está separando en esta área. La separación del flujo suele acompañarse de una formación de vórtices, que crea zonas de baja presión en la superficie del objeto, y que junto a la presión más elevada del flujo no perturbado resulta en una sustentación positiva. En este caso, el efecto se acentúa en los bordes de la base debido a la turbulencia generada por la separación del flujo.

Por otro lado, en la zona curva de la base que enfrenta directamente al flujo de aire, encontramos un comportamiento distinto: valores de sustentación negativa, apuntando hacia el suelo. Esta sustentación negativa se intensifica en la región donde la parte inferior del *yoke* se une con la base, particularmente en el borde de la base del *yoke* que rompe el flujo de aire. Esta superficie curva, al enfrentar el flujo de aire, crea un punto de estancamiento donde la velocidad del flujo es prácticamente nula y la presión es máxima, lo cual se evidencia en la Figura 39. A medida que el flujo avanza sobre esta superficie curva, su velocidad aumenta, reduciendo la presión dinámica en la parte superior de esta curva, lo que resulta en una sustentación negativa. Además, la convergencia del flujo hacia la unión con el *yoke* aumenta aún más la velocidad del flujo, intensificando la baja presión.

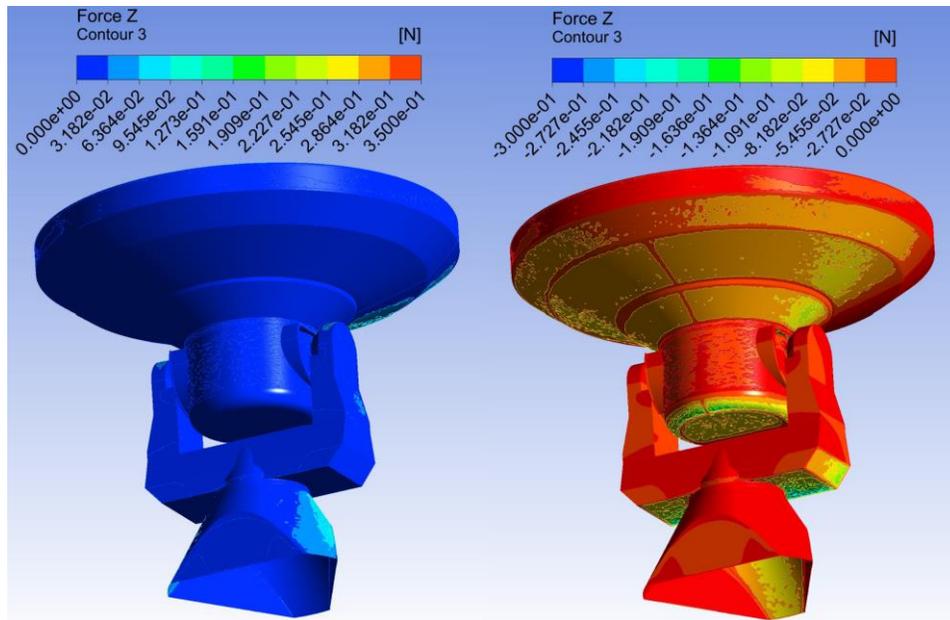


Figura 39: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie posterior al flujo para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)) vista en perspectiva

La parte inferior del *yoke*, dada su orientación, acelera aún más el flujo debido a su perfil de placa plana. Esta aceleración produce un incremento en la velocidad del flujo y, por consiguiente, una disminución en la presión dinámica. La combinación de estas zonas de baja presión en la base curva y la parte inferior del *yoke* contribuyen a la sustentación negativa observada, al igual que en la cara inferior de esta estructura. Sin embargo, este comportamiento no se mantiene a medida que avanzamos hacia los brazos del *yoke*, pues a medida que el flujo se mueve hacia ellos el área se ensancha, y el flujo se desacelera, disminuyendo tanto la velocidad como la presión dinámica. Al acercarnos al tope del *yoke* y a la superficie inferior del reflector, el flujo vuelve a acelerarse a medida que se encuentra con la parte inferior del reflector por la restricción geométrica.

Finalmente, es posible presentar contornos de la fuerza total sobre toda la superficie del aparato. De manera destacada en la Figura 40, el borde superior del reflector, siendo el primero en contactar el flujo de aire, exhibe el valor más elevado de fuerza. Esta región es propensa a una considerable separación del flujo, contraponiéndose a la sección cóncava del reflector donde la fuerza es 4 órdenes de magnitud menor. En general, las máximas fuerzas se localizan en las superficies directamente enfrentadas al flujo de aire y en los bordes de los brazos del *yoke* más próximos al flujo. La frontalidad de estas superficies ante el flujo significa que actúan como rompe-flujos, soportando una gran presión directa. A medida que nos movemos hacia la parte posterior del *yoke*, las fuerzas aerodinámicas disminuyen debido a la menor interacción con el flujo de aire y la protección geométrica del radiotelescopio. El espacio entre la parte superior del *yoke* y la inferior del bus intensifica las fuerzas en la sección trasera del contrapeso, ya que este "gap" acelera el flujo en esta zona.

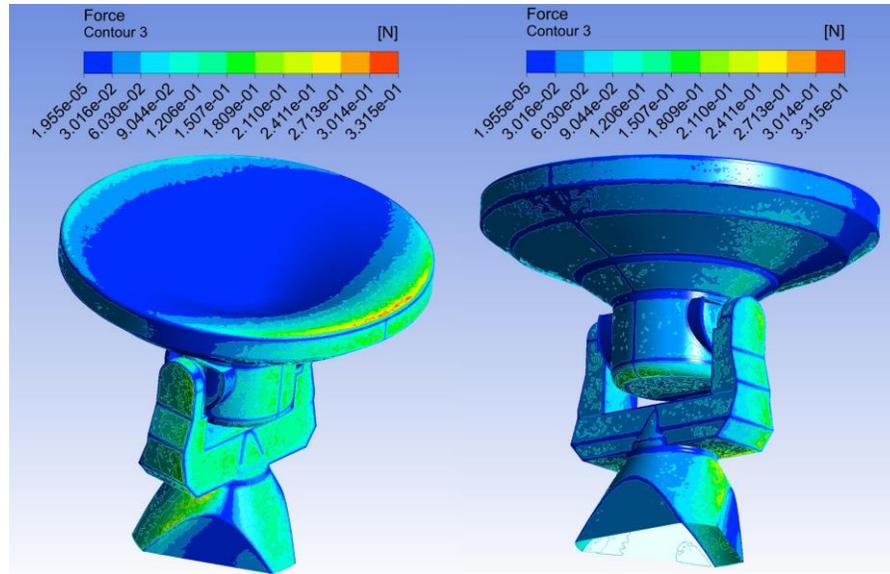


Figura 40: Contorno de fuerza total de la sección anterior (izquierda) y posterior (derecha) al flujo para el caso “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))

6.1.1 Análisis de independencia del mallado

A fin de asegurar que el modelo CFD planteado es lo suficientemente robusto como para representar las fuerzas aerodinámicas sobre la antena, se hace un análisis de independencia de grilla, en el cual se realizan simulaciones sobre mallados semejantes con distintas cantidades de elementos, a fin de comparar los resultados que estos entregan. Como los fenómenos de interés corresponden a las fuerzas aerodinámicas sobre la estructura, se consideran el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación como los parámetros a comparar entre modelos, específicamente los correspondientes al reflector del radiotelescopio, definido como:

$$CF_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho u_{\text{ref}}^2 A}$$

Figura 41: Fórmula del coeficiente de arrastre del radiotelescopio

$$CF_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho u_{\text{ref}}^2 A}$$

Figura 42: Fórmula del coeficiente de sustentación del radiotelescopio

Siendo F_D la fuerza de arrastre sobre el reflector, F_L la fuerza de sustentación, ρ la densidad del fluido, u_{ref} la velocidad de flujo de referencia, que en este caso corresponden a los $20 \left[\frac{m}{s} \right]$ en el *inlet*, y A al área de la sección transversal del reflector, definida por su diámetro.

Así, se crean modelos CFD con distintas cantidades de elementos, oscilando entre los 4.42 y 7.53 millones de elementos, variando exclusivamente los valores de tamaño en la herramienta “*Face Size*” de *Fluent Meshing*. Los resultados de este análisis corresponden a las Figuras 43 y 44.

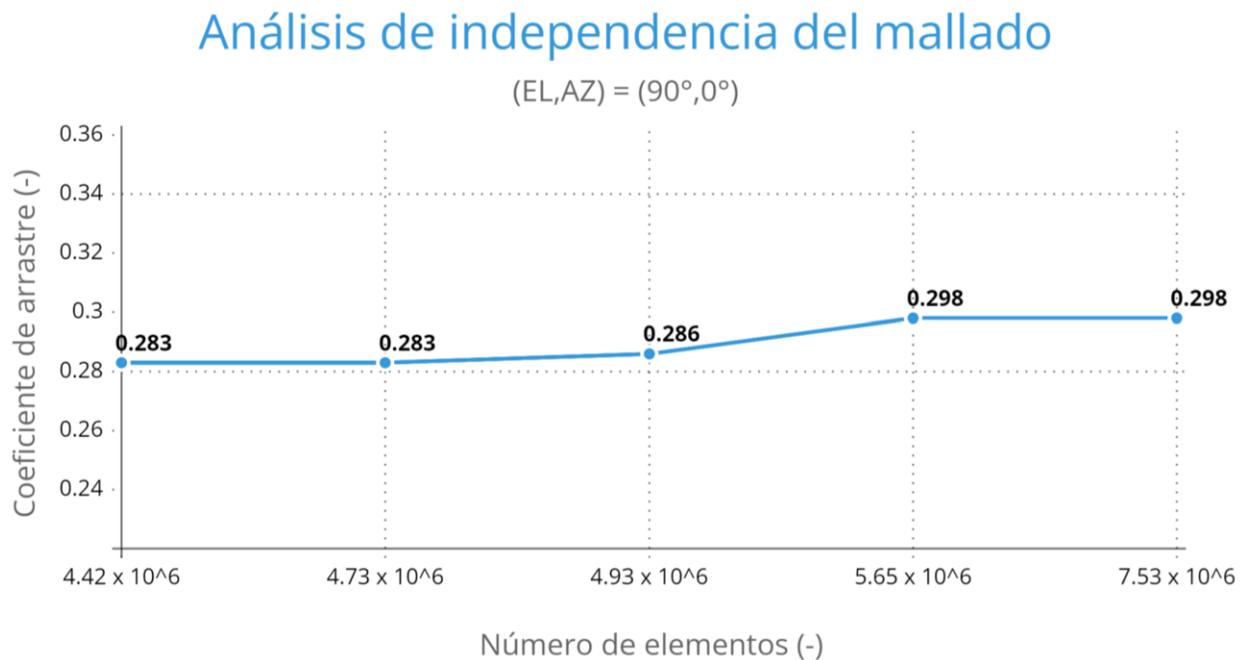


Figura 43: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°)), con respecto al coeficiente de arrastre del reflector

Se puede apreciar en la figura anterior que la variación en el coeficiente de arrastre es como mucho del orden de las centésimas, y no varía en los últimos dos casos, por lo que se puede considerar que los modelos convergen a un valor constante de arrastre a partir de, al menos, los 5.65 millones de elementos. Para el capítulo 6.1.3, se utiliza el valor convergido con 7.53 millones de elementos, al considerarse representativo de todos los otros modelos del caso crítico “Cénit”.

Análisis de independencia de mallado

(EL,AZ) = (90°,0°)

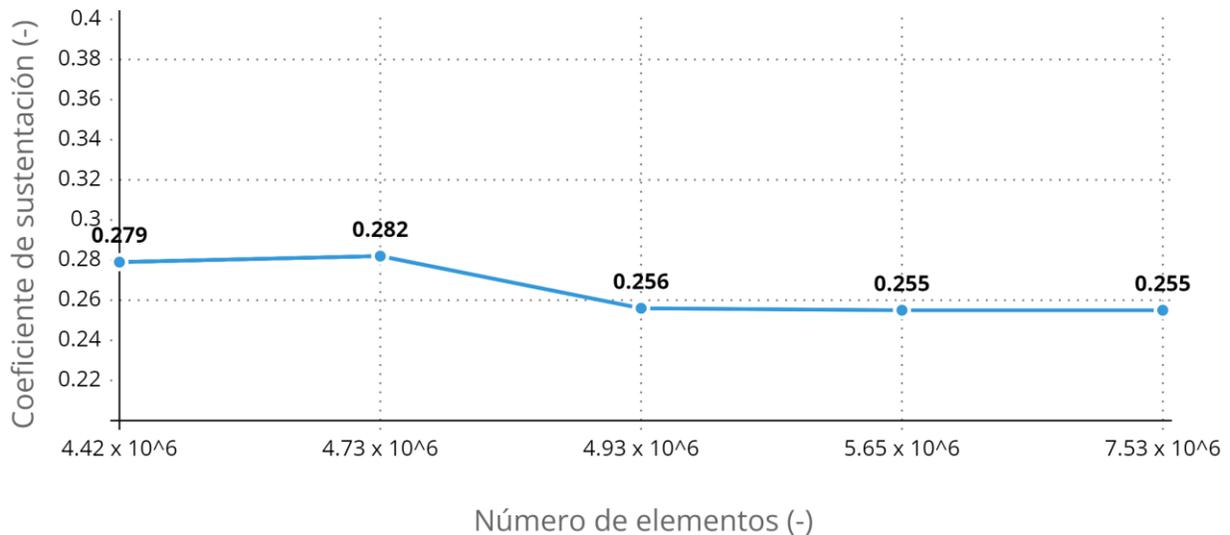


Figura 44: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de "Cénit" ((EL, AZ) = (90°,0°)), con respecto al coeficiente de sustentación del reflector

El análisis de sensibilidad del mallado para el caso de operación de "Cénit" evidencia una correlación notable entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre del reflector. En términos promedio sobre la superficie del reflector, el coeficiente de sustentación es solo un 18.12% menor que el coeficiente de arrastre, según sus valores convergidos. Al apuntar el reflector hacia el cénit, el radiotelescopio enfrenta de lleno el flujo de aire, generando una zona de alta presión en su borde superior, y una recirculación de aire en la sección cóncava. Esta configuración produce fuerzas predominantemente normales a la superficie del reflector (sustentación) y en la dirección del flujo (arrastre). La similitud en magnitud de ambos coeficientes sugiere una interacción equilibrada entre las zonas de alta presión en la parte frontal y las zonas de baja presión en la concavidad, generando un efecto de "succión" en la parte posterior del reflector.

Los valores presentados reflejan magnitudes absolutas. No obstante, es fundamental destacar que los coeficientes de sustentación y arrastre del reflector son negativos. Esta negatividad denota la dirección de las fuerzas. En este contexto, un coeficiente de sustentación negativo sugiere una fuerza dirigida hacia el suelo, lo que tiene sentido dada la orientación del reflector y la recirculación mencionada. De igual manera, el arrastre negativo indica una resistencia en sentido opuesto al flujo, lo que es coherente con la dirección predominante del flujo sobre la estructura cóncava del reflector.

Adicionalmente, el análisis de independencia del mallado muestra una estabilización de los valores de arrastre y sustentación al alcanzar aproximadamente 5.65 millones de elementos. Más allá de este punto, no se observa un cambio significativo en los valores promediados de sustentación y arrastre.

6.1.2 Validación con literatura

Para la validación de los resultados derivados del presente estudio, se compara el coeficiente de arrastre obtenido para el reflector de la antena VERTEX RSI con aquellos de otros modelos CFD relacionados con diversos cuerpos estudiados en contextos donde estos estuvieron sometidos a flujos de aire con números de Reynolds próximos al considerado en nuestra investigación. Es crucial mencionar que, aunque el número de Reynolds actúa como un factor primordial en la elección de estudios comparativos, no es el único criterio utilizado. La geometría de los cuerpos analizados en esas investigaciones, en particular, juega un papel determinante en la precisión y aplicabilidad de cualquier comparación de resultados.

En el escenario "Cénit", donde el radiotelescopio apunta directamente al cielo, se conjetura que la geometría o sección transversal de este equipo se asemeja a la de discos o cilindros dispuestos consecutivamente o montados uno sobre otro. Bajo esta premisa, se orientó la búsqueda hacia aquellos estudios CFD de la industria que se han enfocado en geometrías de este tipo y que presenten números de Reynolds en rangos similares a los de nuestro trabajo.

Tabla 6: Comparación de coeficientes de arrastre de reflectores entre distintos modelos CFD del flujo de aire alrededor de radiotelescopios para el caso "Cénit"

Modelos CFD	Coefficiente de arrastre (-)	Número de Reynolds (-)	Cuerpo de estudio (-)
(Yuan et al., 2017)	0.34	$1 \cdot 10^7$	Edificios cilíndricos con ranuras verticales
(Lotfi & Rad, 2012)	0.32	$1 \cdot 10^7$	Conos tubulares truncados
(Bellei, 2017)	0.33	$1 \cdot 10^7$	Cuerpo elipsoidal
(N. Van He et al., 2020)	0.29	$8.5 \cdot 10^6$	Casco frontal de barco
(Li et al, 2023)	0.11	$8.93 \cdot 10^7$	Radiotelescopio (EL,AZ) = (90°, 0°)
(Li et al, 2023)	0.328	$8.93 \cdot 10^7$	Radiotelescopio (EL,AZ) = (75°, 0°)
Autor, 2023	0.298	$1.03 \cdot 10^7$	Radiotelescopio VERTEX (EL,AZ) = (90°, 0°)

La revisión bibliográfica, presentada en la Tabla 6, revela que el coeficiente de arrastre del radiotelescopio VERTEX RSI, en el escenario "Cénit", concuerda estrechamente con los valores obtenidos en otros estudios que analizan geometrías similares. Esta alineación refuerza la credibilidad y robustez de los resultados obtenidos. Es esencial señalar que, a pesar de las diferencias geométricas de cada caso comparado y sus diversas aplicaciones industriales, el valor del coeficiente de arrastre del presente caso estudiado cabe dentro del rango encontrado en la literatura, lo que recalca la validez del modelo presentado. Sin embargo, cabe recalcar que el caso de (Li et al, 2023) corresponde a un estudio paramétrico de las fuerzas aerodinámicas de un radiotelescopio de 110 [m] de diámetro, y se aprecia que, si bien el coeficiente de arrastre para su caso "Cénit" ((EL, AZ) = (90°, 0°)) es mucho menor que el de la presente investigación, sí presenta un coeficiente de arrastre más cercano al obtenidos para un ángulo de elevación de 75 [°].

6.1.3 Análisis comparativo de modelos de turbulencia

En el estudio de dinámica de fluidos computacional sobre un radiotelescopio apuntando al cénit, se compararon los valores de arrastre y sustentación usando diversos modelos de turbulencia $k - \epsilon$. Los modelos de turbulencia, como los $k - \epsilon$, son aproximaciones matemáticas que buscan describir el comportamiento de la turbulencia; resultados similares para distintos modelos de turbulencia $k - \epsilon$ son un buen indicador de fiabilidad. Si diferentes modelos, que tienen suposiciones y formulaciones matemáticas distintas, proporcionan resultados similares, esto sugiere que esos resultados no son simplemente el producto de las peculiaridades o limitaciones de un modelo específico, sino que probablemente reflejan una representación precisa de la realidad física.

En la Tabla 7, se presentan los valores detallados de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos para cada uno de los modelos de turbulencia considerados en este estudio. Al analizar los resultados, se destaca una consistencia notable entre los valores obtenidos mediante el modelo $k - \epsilon$ realizable y el $k - \epsilon$ estándar. Las diferencias entre estos modelos son mínimas, con variaciones en los coeficientes en el orden de las centésimas. Esta similitud puede atribuirse a la naturaleza de estos dos modelos. Ambos modelos $k - \epsilon$ tienen formulaciones matemáticas que, aunque difieren en ciertos aspectos, comparten suposiciones y aproximaciones fundamentales que los hacen conceptualmente similares. Dicha semejanza suele traducirse en predicciones muy cercanas, especialmente en flujos que no desafían extremadamente las suposiciones inherentes de estos modelos.

No obstante, al contrastar estos resultados con los proporcionados por el modelo $k - \epsilon$ RNG, se evidencia una variación más pronunciada. Específicamente, el coeficiente de arrastre resulta ser un 14.76% menor en comparación con el modelo realizable, mientras que el coeficiente de sustentación es un 3.04% mayor. Estas discrepancias se deben, en gran parte, a las diferencias fundamentales en las formulaciones matemáticas y las suposiciones entre el modelo RNG y los otros modelos $k - \epsilon$. El modelo $k - \epsilon$ RNG incorpora términos adicionales derivados de la teoría de renormalización para capturar ciertos efectos de la turbulencia, lo que puede resultar en predicciones distintas, especialmente en flujos complejos o en regiones con características turbulentas específicas.

Independientemente de estas variaciones entre los modelos, es esencial subrayar que todos los valores obtenidos se alinean adecuadamente con el rango esperado, establecido por trabajos previos citados como referencia en nuestro estudio. La concordancia con investigaciones y datos previamente validados es una señal alentadora de la calidad y fiabilidad de nuestros resultados. Esta coincidencia implica que, aunque diferentes modelos de turbulencia puedan ofrecer resultados ligeramente distintos, nuestras simulaciones están capturando adecuadamente el comportamiento físico fundamental del flujo alrededor del radiotelescopio.

Tabla 7: Coeficiente de sustentación y arrastre calculados, y fuerzas de sustentación y arrastre para el caso de “Cénit” ((EL, AZ) = (90°,0°))

Casos	C_D	C_L	Arrastre [N]	Sustentación [N]
$K - \varepsilon$ Realizable	0.298	0.255	5006.3675	4288.3803
$K - \varepsilon$ Estándar	0.307	0.262	5159.5879	4397.0591
$K - \varepsilon$ RNG	0.254	0.263	4278.6777	4423.5742

6.2 Caso “Sideral Tracking”

A continuación, se presentan los contornos de distribución de presión dinámica (izquierda) y velocidades (derecha) en el volumen de control del caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) con respecto a los planos ZX, ZY y XY, respectivamente, según sistema de referencia previamente definido. El flujo de viento se dirige de la derecha a la izquierda. Cabe recalcar que los contornos presentados anteriormente corresponden a uno de todos los modelos generados para este caso crítico, específicamente el de 7.18 millones de elementos, por considerarse representativo de todos los otros modelos, como será explicado más adelante.

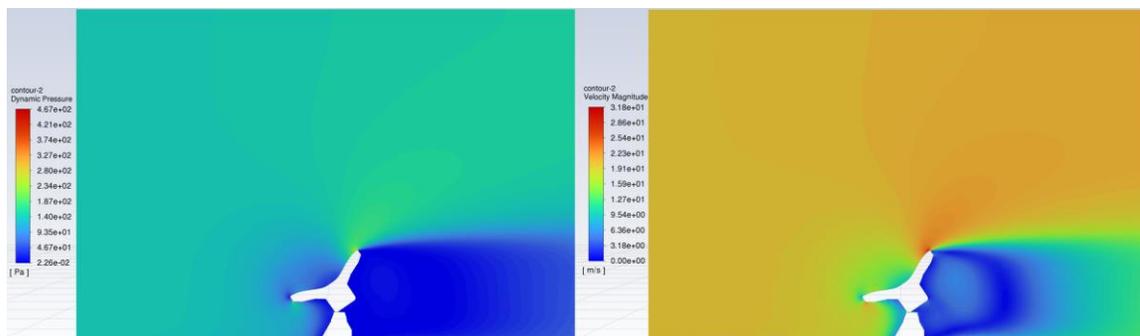


Figura 45: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZX

Al estudiar los contornos de velocidad y presión dinámica en el plano medio del flujo, se identifican tres puntos críticos donde se evidencian cambios significativos en estas variables.

El primer punto se localiza en el borde izquierdo del reflector, que es el más cercano al suelo. Aquí, hay un incremento palpable en la velocidad y en la presión dinámica. Esta aceleración es provocada por la restricción del espacio entre el reflector y el suelo, generando un fenómeno conocido como el "efecto suelo". El aumento en la velocidad y presión dinámica en esta zona sugiere una carga de presión positiva o frontal sobre esta parte del reflector. Esta carga puede resultar en un esfuerzo compresivo adicional en la estructura del radiotelescopio, especialmente en el borde más cercano al suelo. Sin embargo, a medida que nos acercamos a la base del radiotelescopio y al contrapeso, se nota una reducción gradual de ambas magnitudes. Esta desaceleración puede deberse a la expansión del espacio y a las características estructurales del contrapeso y la base del radiotelescopio, y puede indicar una reducción en la carga frontal.

El segundo punto de interés está en el borde izquierdo superior del reflector, que antecede la curvatura de la sección cóncava de este. Aquí, justo antes de la curvatura de la sección cóncava del reflector, se nota una disminución clara en la velocidad y presión dinámica. Este patrón es indicativo de un punto de estancamiento, en donde el flujo se desacelera antes de cambiar de dirección alrededor de la curvatura del reflector.

El tercer punto crítico está en el borde del reflector más distante del flujo y alejado del suelo. Esta región evidencia una clara separación del flujo. La velocidad y la presión dinámica cambian abruptamente, resultando en la formación de una estela. Esta separación del flujo es consecuencia de la combinación de la inclinación del reflector y la rotación del *yoke*, que redirigen el flujo y provocan un desprendimiento, formando una región de baja presión detrás del reflector. Esta baja presión puede generar una carga de succión significativa, que actúa en dirección opuesta al flujo del viento. Esta carga de succión, junto con la carga frontal del primer punto, podría crear un momento de torsión o cizallamiento en la estructura del radiotelescopio.

Uno de los hallazgos más destacados en la Figura 45 es el comportamiento particular del flujo de aire alrededor de la superficie cóncava del reflector. En concreto, se observa una disminución marcada de la presión dinámica y la velocidad del flujo en el centro de la superficie cóncava. Esta región de disminución toma una forma similar a una "burbuja", la cual es normal a la superficie inclinada y a la dirección de apuntamiento del reflector. Alrededor de esta zona, y conforme el flujo de aire se aproxima al borde superior del reflector, la velocidad del flujo se incrementa ligeramente, así como su presión dinámica. En este caso, la superficie cóncava del reflector provoca que el aire se desacelere y forme esta zona de baja velocidad y presión en el centro. A medida que el flujo se aleja de este punto central y se aproxima a los bordes del reflector el aire acelera nuevamente, y, por ende, la presión dinámica se incrementa.

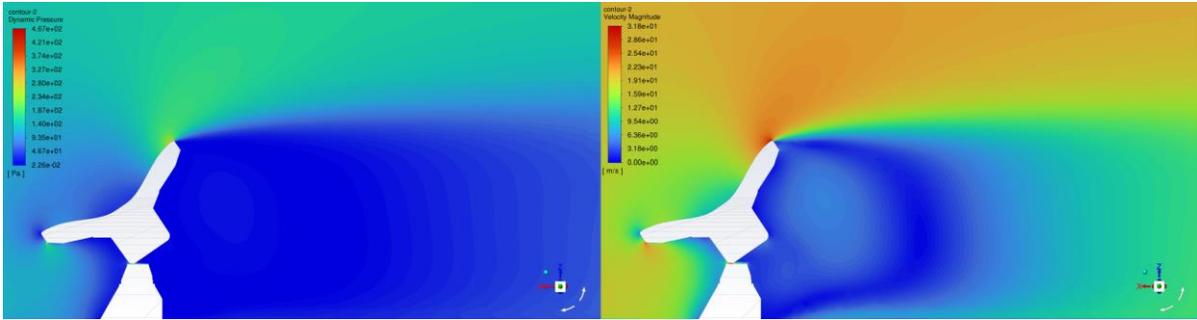


Figura 46: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZX

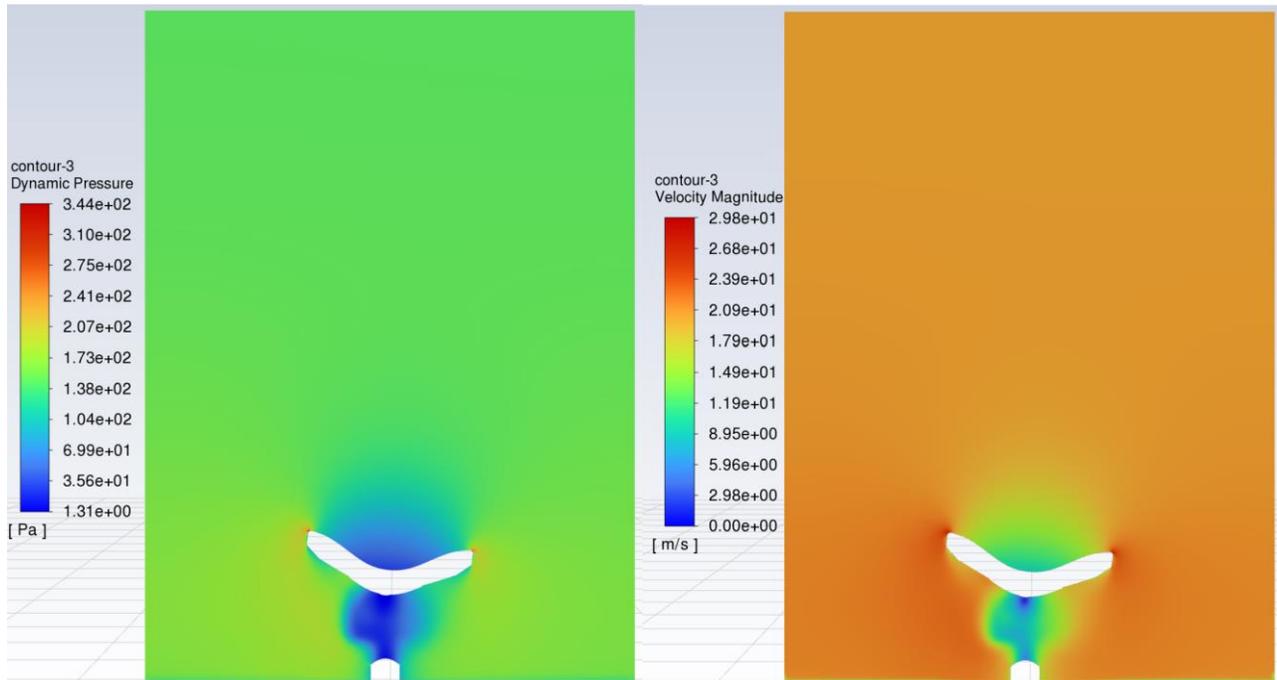


Figura 47: Contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZY

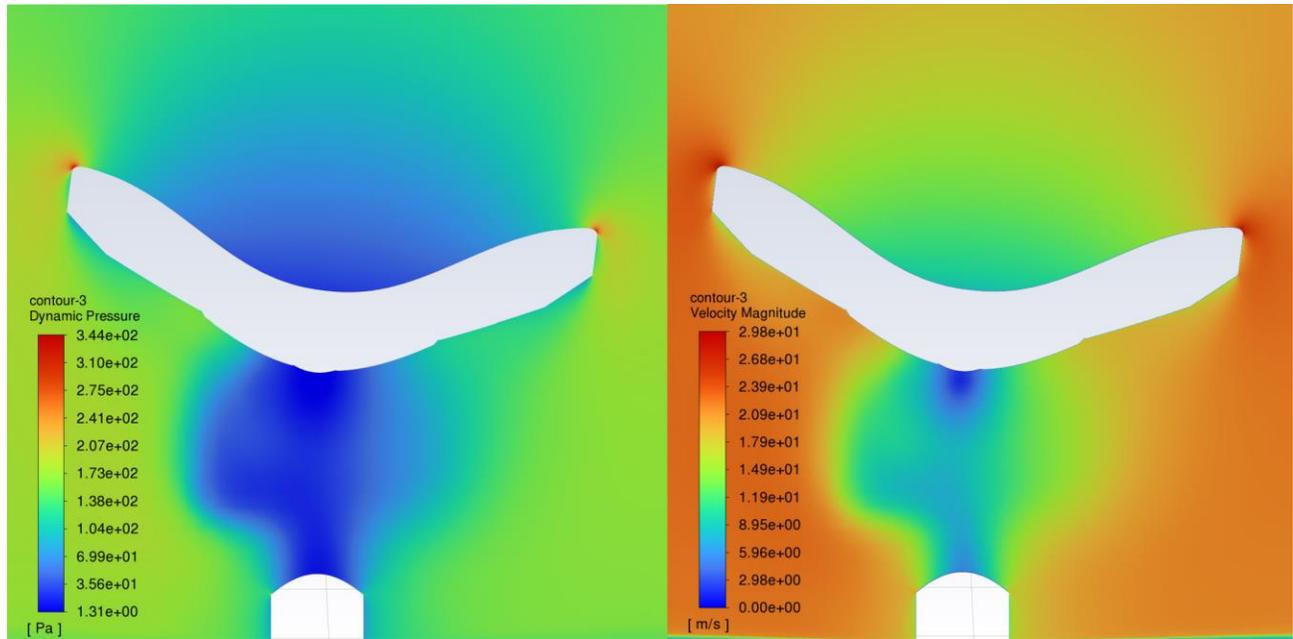


Figura 48: Acercamiento de contornos de presión dinámica y velocidad para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°,10°)) en el plano ZY

Inicialmente, al analizar el contorno de presión dinámica y velocidad en el plano ZY, es evidente un aumento marcado en los bordes superiores del reflector, específicamente en los extremos izquierdo y derecho. Este fenómeno se puede atribuir principalmente a la variación abrupta de la curvatura en estos puntos de la estructura. Las áreas donde la curvatura de una estructura cambia repentinamente suelen generar regiones de separación del flujo y readherencia. Estos cambios abruptos en la dirección del flujo, causados por la variación de curvatura, conducen a una intensificación de la velocidad y, por ende, a un incremento de la presión dinámica. En términos simples, el aire, al encontrarse con un cambio brusco en la superficie sobre la que está fluyendo, acelera para adaptarse al nuevo perfil.

Se observó una disminución notoria de la presión dinámica y velocidad entre la base del radiotelescopio y el reflector, especialmente en el tope de la base y la parte inferior del reflector. Este efecto se debe a la "interferencia aerodinámica" causada por el espacio estrecho entre estas dos estructuras. A medida que el aire pasa por este canal, se desacelera debido al aumento de resistencia y a un efecto Venturi inverso. La inclinación del reflector también podría ser un factor en este fenómeno, desviando parte del flujo de aire.

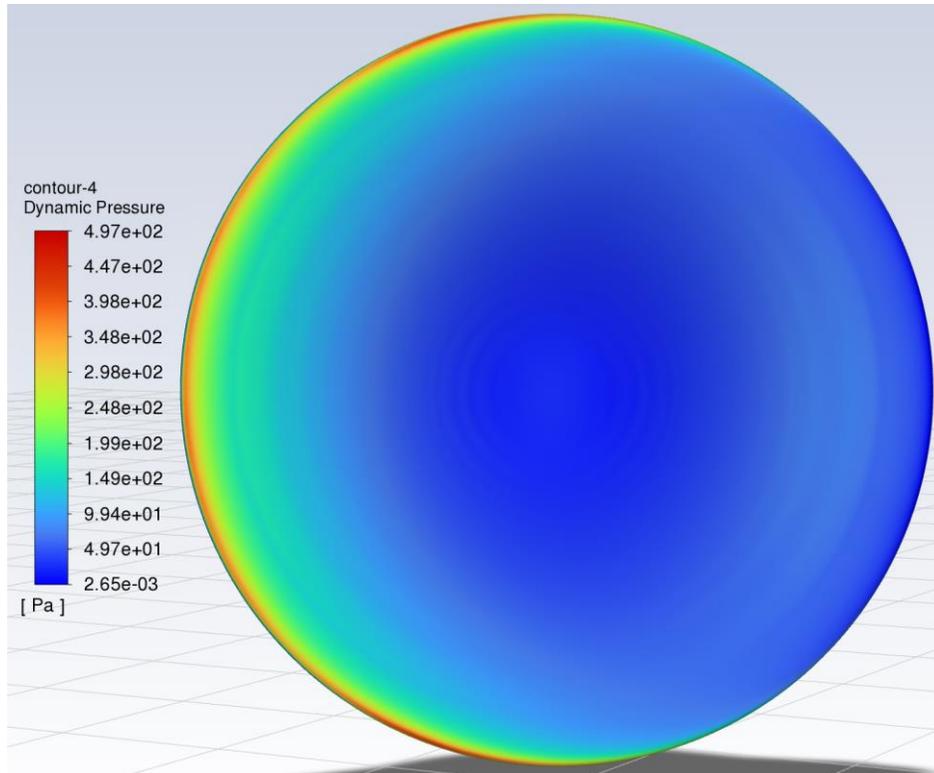


Figura 49: Distribución de presión dinámica en la superficie principal del reflector primario para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

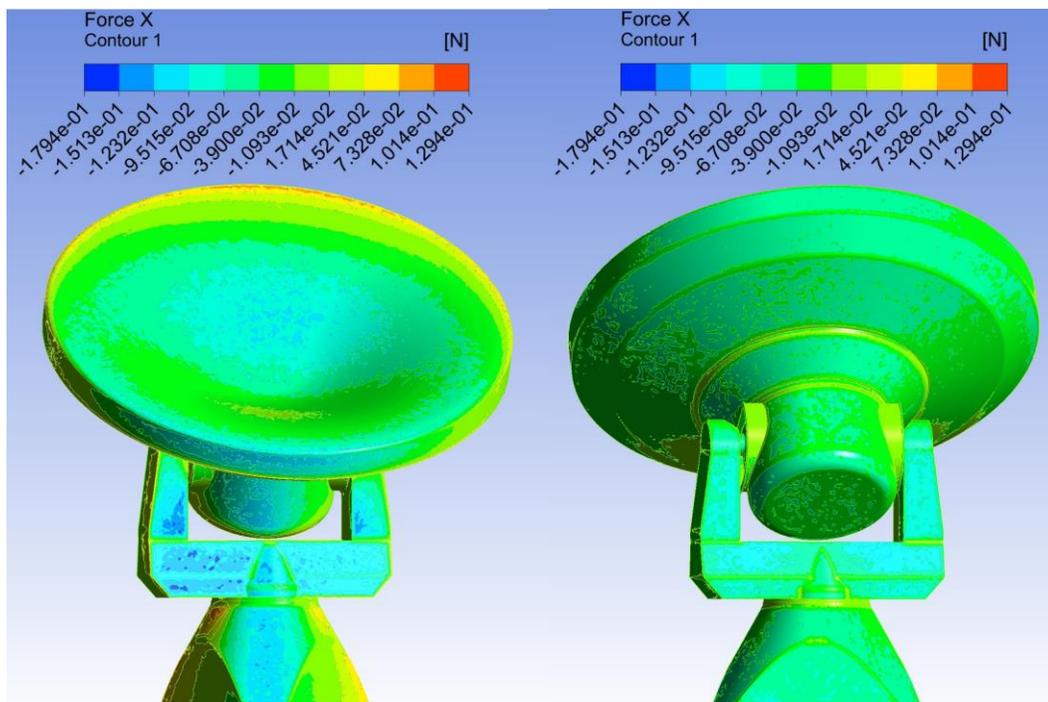


Figura 50: Contorno de fuerza de arrastre en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

Se detecta que, de manera similar al caso "Cénit", la fuerza de arrastre principal actúa en la sección transversal que enfrenta directamente el flujo de aire. Sin embargo, dada la inclinación del *yoke*, una porción de la antena se expone al flujo de aire antes que el resto. Como consecuencia, esta área experimenta fuerzas de arrastre ligeramente superiores a su contraparte opuesta, como se puede ver en el lado izquierdo de la Figura 50. La inclinación y rotación del *yoke* genera una distribución asimétrica de las cargas aerodinámicas. Al cambiar el ángulo de ataque del flujo de aire respecto a la estructura, se incrementan las zonas de alta presión en el *yoke* frontal, y zonas de baja presión en el área posterior, resultando en un mayor arrastre en la sección frontal.

Contrariamente al caso "Cénit", el reflector, debido a su inclinación de 55° , contribuye de manera significativa al arrastre total, en particular en el borde más próximo al suelo y en su sección cóncava. Esta inclinación altera la manera en que el aire interactúa con el reflector. El ángulo de inclinación produce un flujo más turbulento en la sección cóncava, con vórtices que generan una mayor resistencia aerodinámica.

En relación con la distribución de arrastre en el reflector, se observó que el arrastre es predominantemente en dirección contraria al flujo de aire, es decir, en dirección X. En el borde frontal del reflector, donde "rompe" el viento, el arrastre es de signo negativo, indicando una fuerza de arrastre en dirección al flujo. Al avanzar hacia la concavidad del reflector, hay una zona donde el arrastre se torna positivo, antes de entrar en una sección con un aporte negativo significativo. Esta transición se debe a la formación de zonas de baja presión detrás del borde frontal y altas presiones en la concavidad, intensificadas por la inclinación del reflector. Finalmente, al llegar al borde posterior del reflector, el arrastre es positivo y contrario al flujo de aire, con una magnitud notable. Esto sugiere la formación de vórtices y zonas de recirculación en este borde, que generan una resistencia adicional al movimiento del radiotelescopio.

A su vez, se encontró que en lo que respecta a la base del radiotelescopio, la dinámica es esencialmente coherente con lo observado en el caso "Cénit". Las fuerzas de arrastre que actúan sobre esta sección se manifiestan en regiones similares. No obstante, se registró una variación en la magnitud de dichas fuerzas entre los lados del equipo, siendo estas ligeramente diferentes en comparación con el análisis previo, posiblemente atribuida a la posición inclinada del reflector primario. Al encontrarse en una inclinación de 55° , el reflector está más próximo al suelo que en el caso "Cénit". Esta proximidad y orientación alteran el flujo de aire alrededor de la base. El reflector, al estar inclinado, genera un flujo turbulento modificado en su parte inferior, que a su vez afecta la dinámica del aire en la proximidad de la base del telescopio. Esta turbulencia adicional, causada por la posición girada del reflector por el acimut de 10° , actúa como una interferencia aerodinámica, que influye directamente en las fuerzas de arrastre sobre la base.

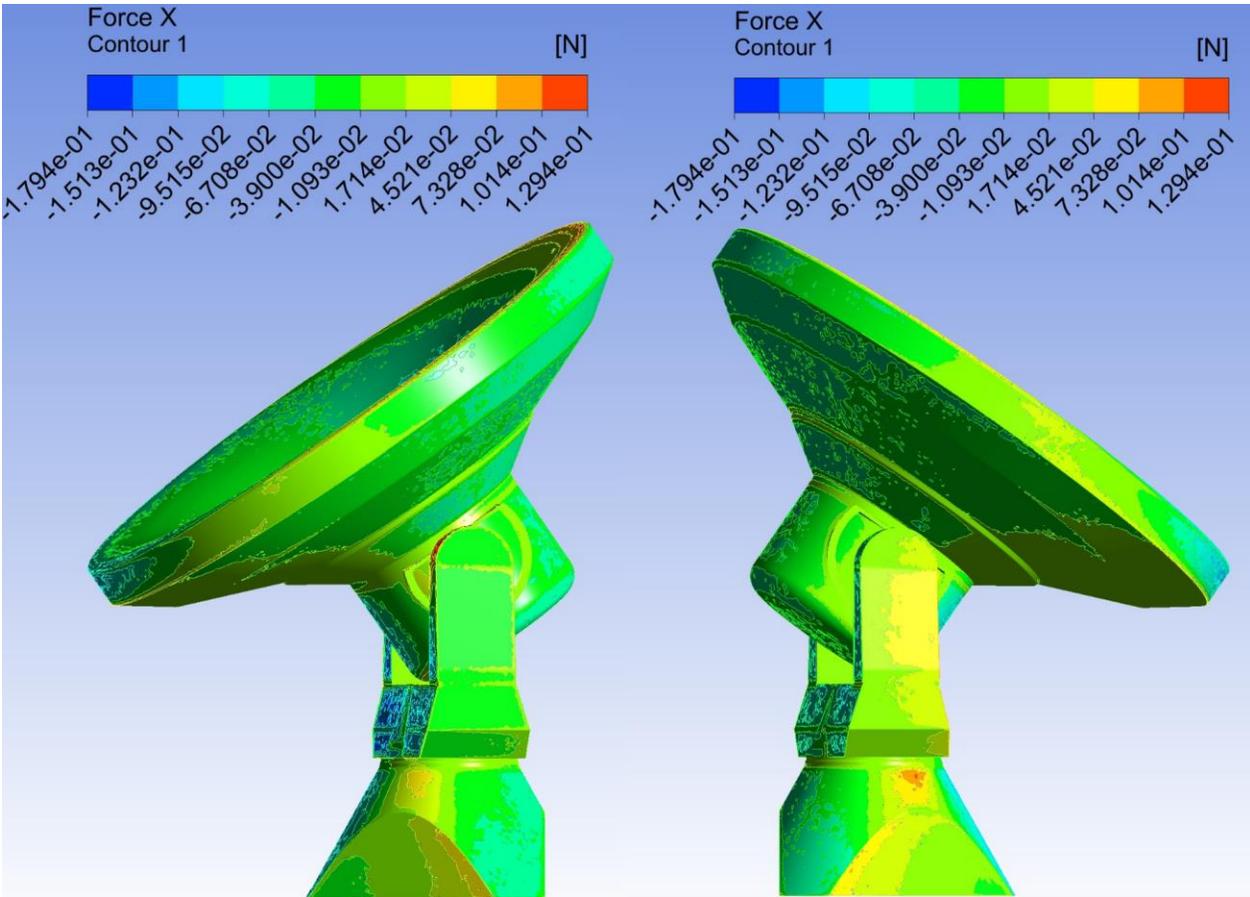


Figura 51: Contorno de fuerza de arrastre en secciones laterales izquierda y derecha respectivamente para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

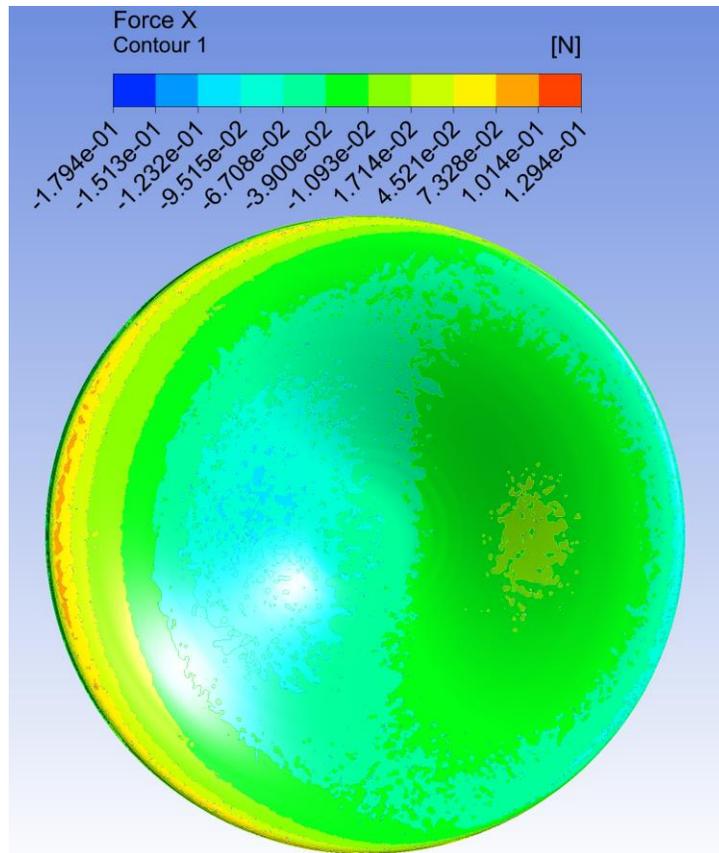


Figura 52: Contorno de fuerza de arrastre en superficie cóncava del reflector primario para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

Al estudiar las fuerzas laterales en el radiotelescopio durante la operación “*Sideral Tracking*”, se observaron similitudes con el caso “*Cénit*”. Sin embargo, debido a los cambios en los ángulos de elevación y acimut, la mayor fuerza lateral se localizó en el lado del radiotelescopio más cercano al viento incidente, como se puede apreciar en las Figuras 53, 54 y 55, tanto en la base como en el reflector primario del radiotelescopio. Esta mayor exposición se debe a la rotación de 10° del *yoke* y a la inclinación de 55° del reflector, generando una superficie que intercepta más flujo de aire y, por ende, experimenta una carga aerodinámica superior. La turbulencia en este lado, exacerbada por cambios bruscos en la curvatura, también potencia esta carga lateral. A pesar de estas diferencias, las zonas de mayores fuerzas laterales son las mismas que en el anterior caso de operación, con la salvedad de que las magnitudes en la región cóncava del reflector primario son más significativas, como evidencia la Figura 55.

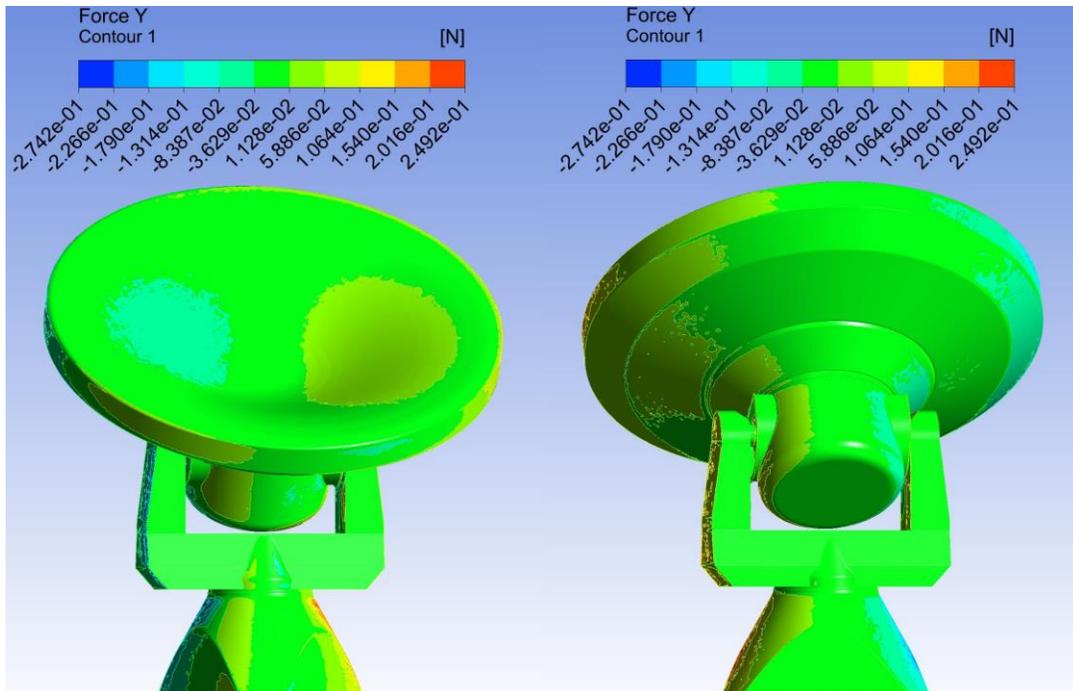


Figura 53: Contorno de fuerza lateral en cara anterior al flujo (izquierda) y posterior al flujo (derecha) para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

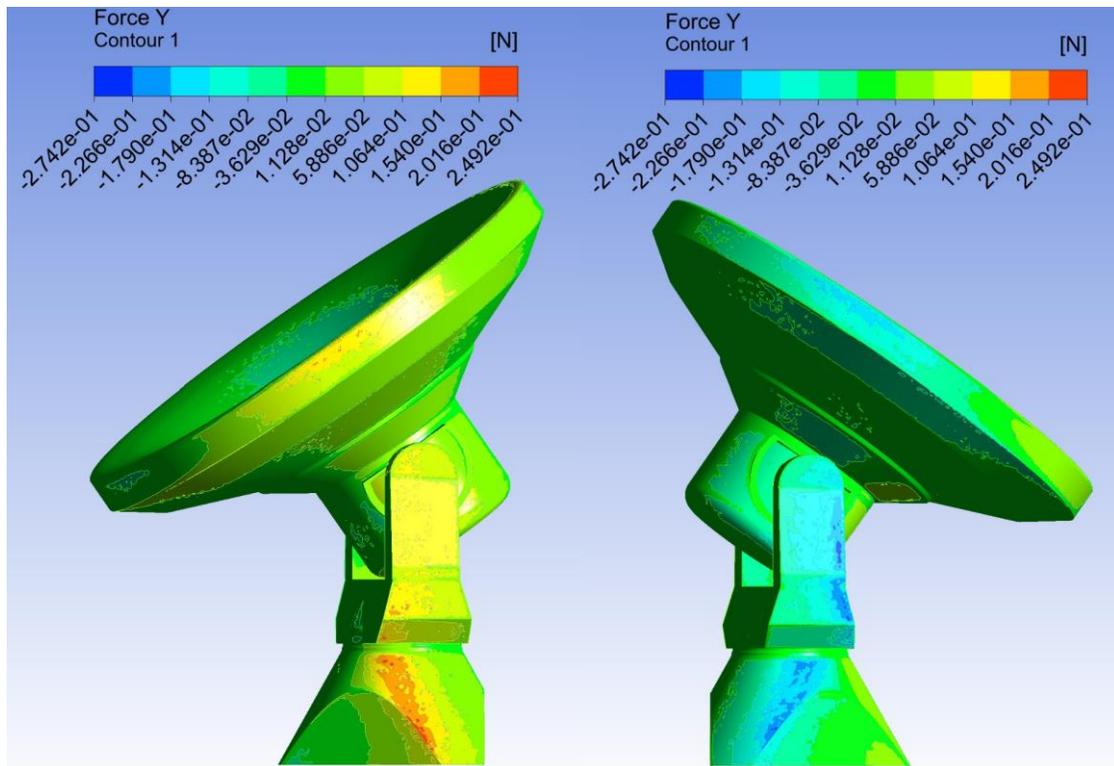


Figura 54: Contorno de fuerza lateral en secciones laterales izquierda y derecha respectivamente para el caso “*Cénit*” ((EL, AZ) = (90°, 0°))

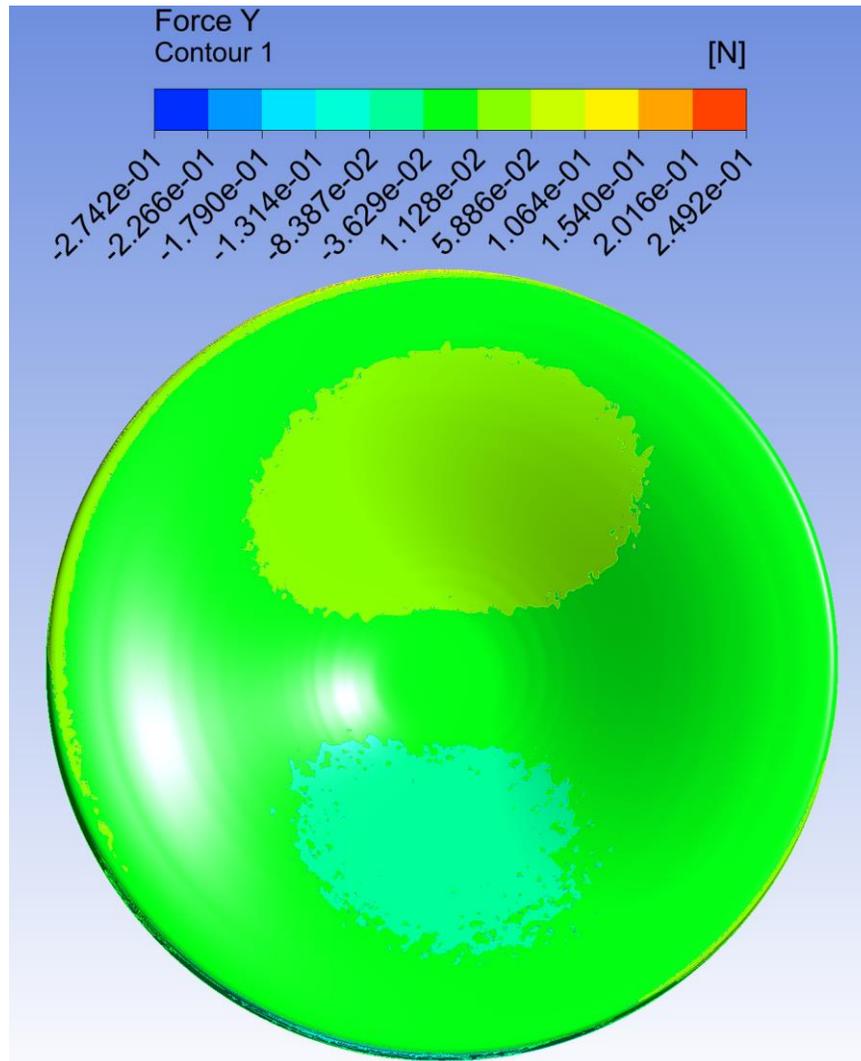


Figura 55: Contorno de fuerza lateral en superficie cóncava del reflector primario para el caso “Sideral Tracking” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

En cuanto a las fuerzas de sustentación, se pudo observar que las zonas de sustentación positiva y negativa guardan similitud con lo evidenciado en el caso "Cénit". No obstante, existe una particularidad distintiva: la sección del radiotelescopio que entra en contacto primero con el flujo de aire presenta mayores valores de sustentación, tanto en los sectores de sustentación positiva como negativa, mostrado por la Figura 56. Debido a la nueva orientación del radiotelescopio, el reflector primario enfrenta directamente gran parte del flujo incidente, y junto con el giro del *yoke*, provoca interacciones aerodinámicas más intensas en comparación con el caso crítico anterior. Las zonas que reciben primero el flujo posiblemente experimentan remolinos y turbulencias que intensifican las fuerzas de sustentación, y la curvatura del reflector causa separación y readherencia del flujo.

Pasando a un análisis más detallado en términos de magnitud, se observan diferencias significativas en comparación con el caso "Cénit". Se puede ver comparando las Figuras 57, 58 y 59 con las Figuras 50, 51 y 52, que los valores de sustentación son prácticamente idénticos a los de arrastre, siendo ambos superiores al caso "Cénit", pero destacando que la sustentación sobre el reflector es mayor que el arrastre, una diferencia notable respecto al caso anterior. Estas distinciones pueden explicarse al considerar la geometría del radiotelescopio y su interacción con el flujo de aire, pues al inclinar y rotar el reflector, se expone una mayor área de su superficie cóncava directamente al flujo, permitiendo que el flujo de aire se "adhiera" al reflector y genere una presión diferencial más pronunciada entre la parte superior e inferior del mismo. Esta diferencia en presión resulta en una mayor fuerza de sustentación.

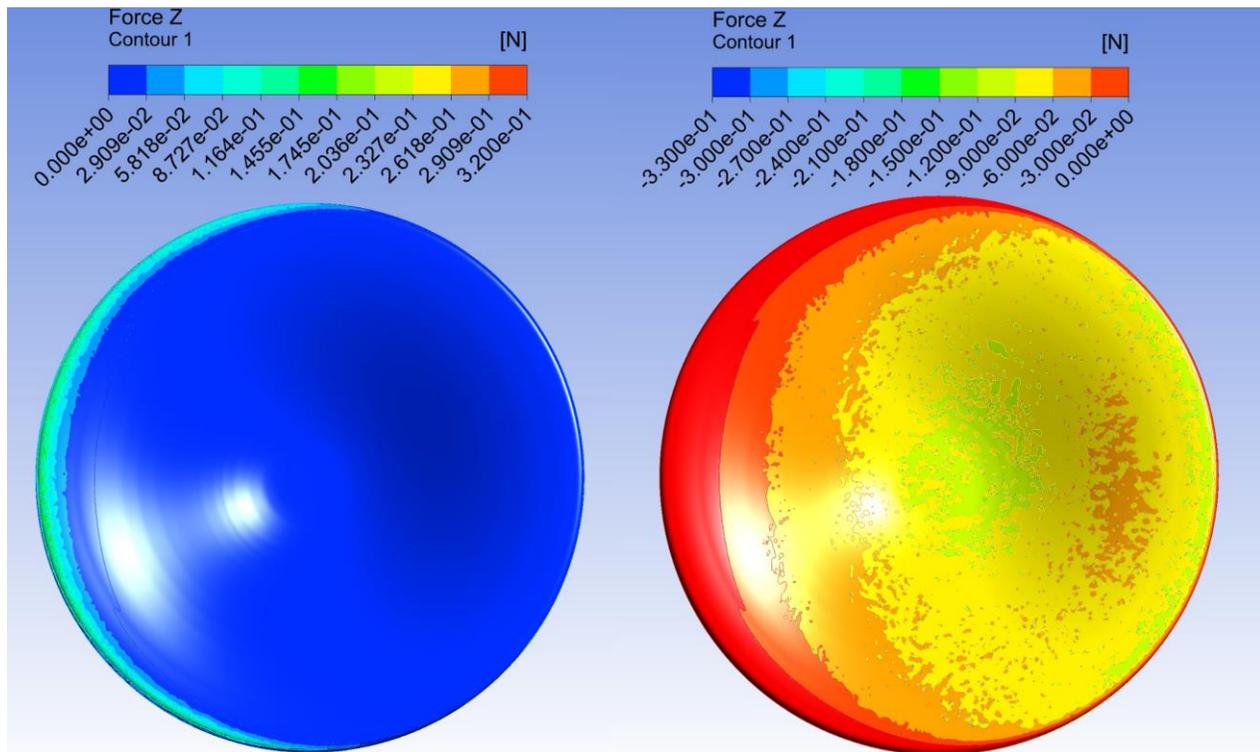


Figura 56: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en superficie cóncava del reflector primario para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

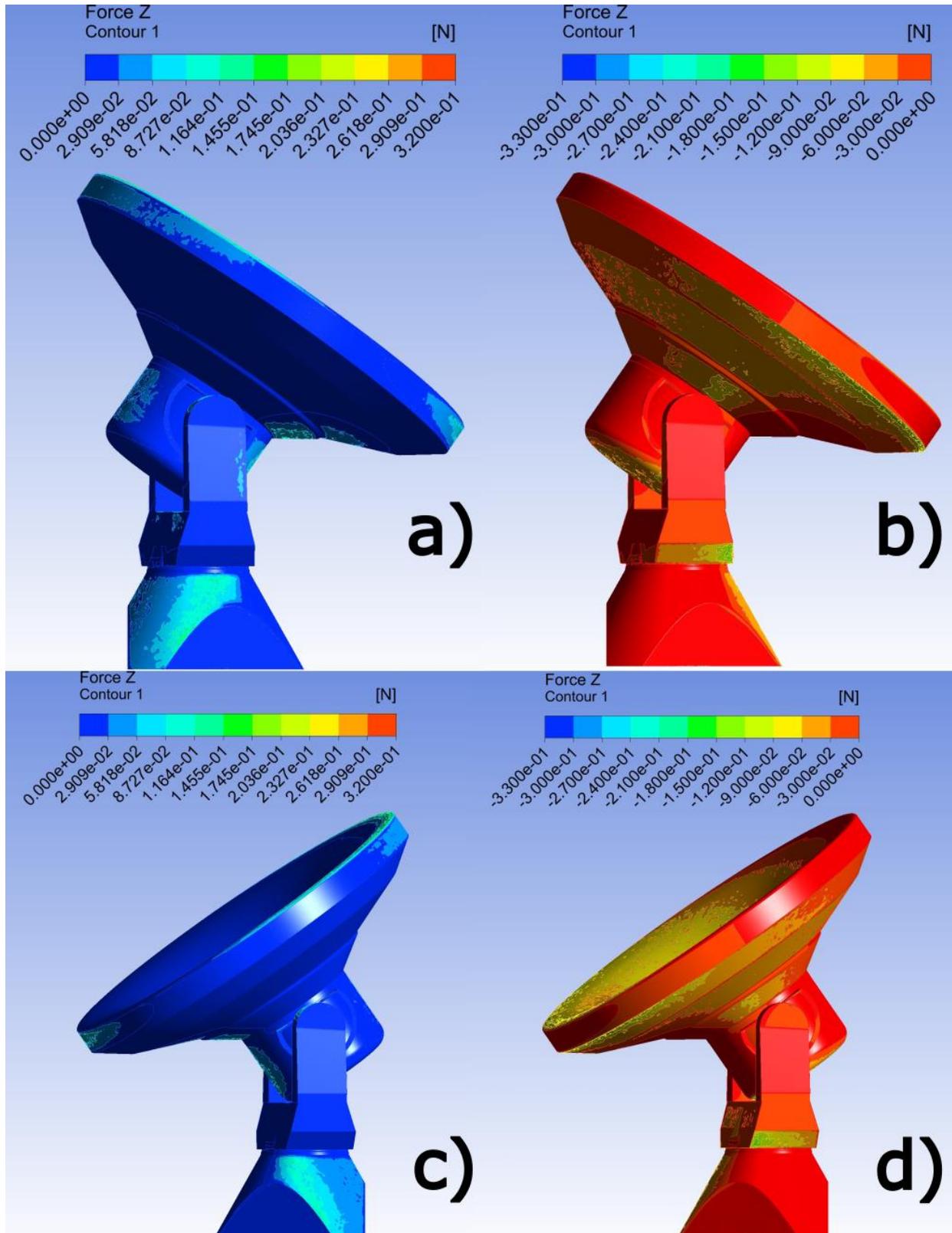


Figura 57: Contorno de fuerza de sustentación en secciones laterales derecha (arriba) e izquierda (abajo) para el caso “Sideral Tracking” $((EL, AZ) = (55^\circ, 10^\circ))$, con sustentación positiva en **a)** y **c)**, y sustentación negativa en **b)** y **d)**

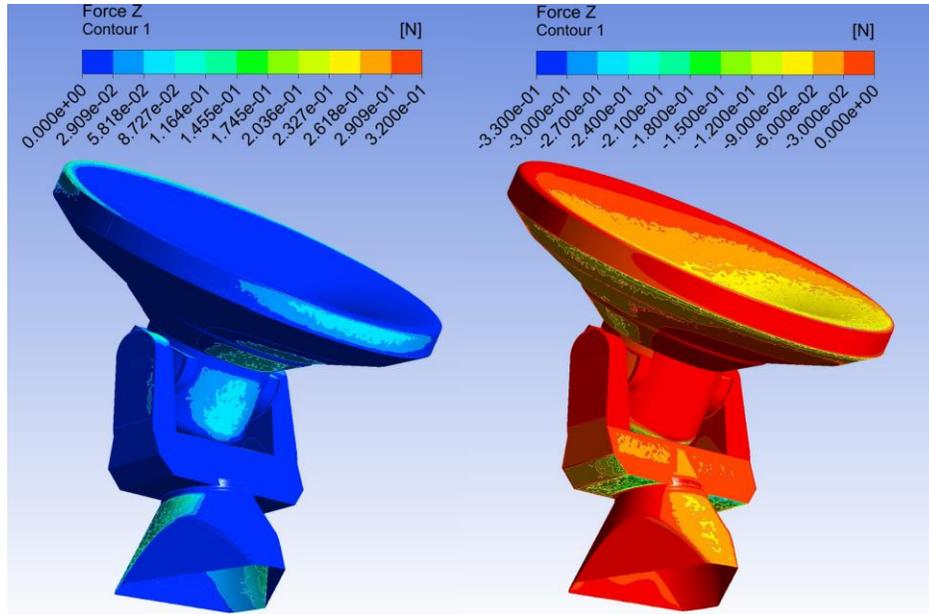


Figura 58: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie anterior al flujo para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°)) vista en perspectiva

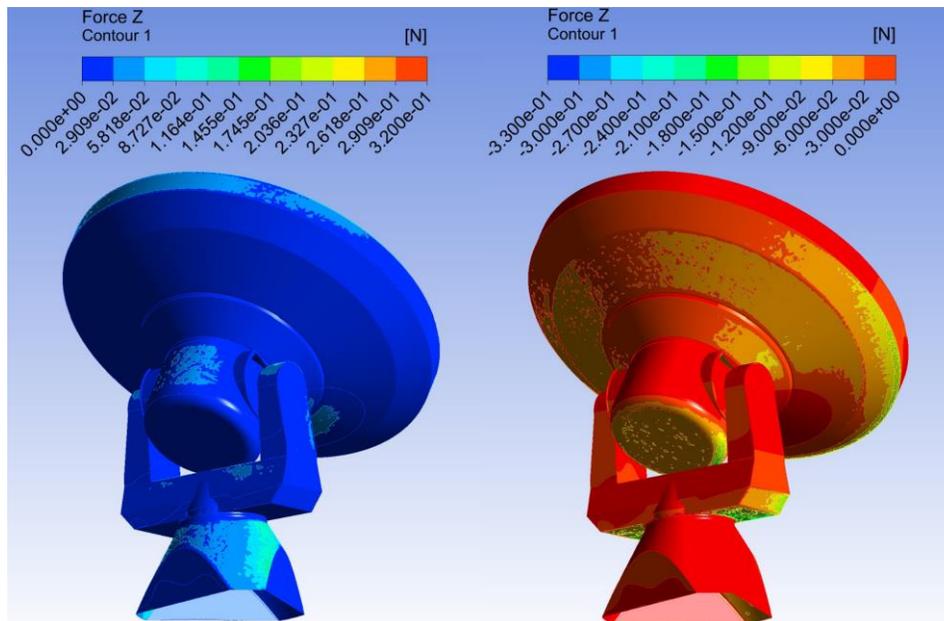


Figura 59: Contorno de fuerza de sustentación positiva (izquierda) y negativa (derecha) en la superficie posterior al flujo para el caso “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°)) vista en perspectiva

Finalmente, uno de los hallazgos más significativos se refiere a la distribución de las fuerzas totales sobre el radiotelescopio. En particular, las magnitudes más elevadas se localizan de manera diferenciada en los costados de la base del radiotelescopio, en particular con el lado que entra primero en contacto con el flujo de aire, como deja en evidencia la Figura 60. Esta acumulación de carga aerodinámica, alineada con los brazos del *yoke*, no es fortuita, pues la naturaleza de esta sección curvada, en conjunción con la rotación del *yoke*, crea un efecto de canalización del viento que intensifica las fuerzas en esa área. En paralelo, se identifica otra región de interés en el borde del brazo del *yoke* mencionado previamente. Esta área actúa como una especie de "frontera aerodinámica", siendo el primer punto de interrupción del flujo incidente de aire. Al presentarse como un obstáculo directo al flujo, el borde experimenta una presión aerodinámica incrementada y turbulencias localizadas. Esta situación se traduce en mayores cargas aerodinámicas en esa sección.

Al comparar estos resultados con el caso "Cénit", se destaca un aumento general en la magnitud de la fuerza total en toda la estructura. Es notable que la sustentación se erige como la fuerza predominante en este escenario. Aunque otras partes de la estructura contribuyen al arrastre total, es el reflector el que presenta los valores más elevados en este aspecto. Sin embargo, lo más revelador es que, a diferencia del caso "Cénit", el reflector es también el principal contribuyente a la fuerza lateral. Esta centralidad del reflector en la dinámica aerodinámica está relacionada a su inclinación, que presenta una superficie considerablemente amplia al flujo del viento.

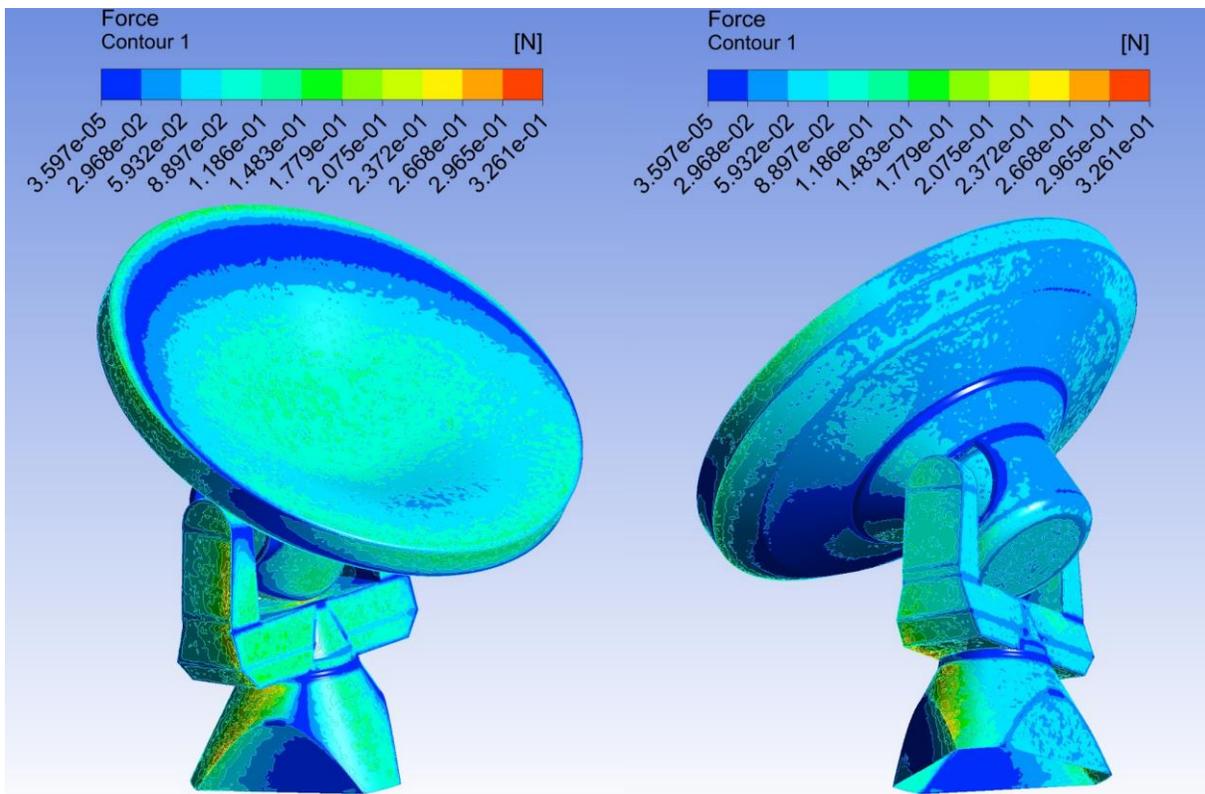


Figura 60: Contorno de fuerza total de la sección anterior (izquierda) y posterior (derecha) al flujo para el caso "Sideral Tracking" ((EL, AZ) = (55°, 10°))

6.2.1 Análisis de independencia de grilla

De forma equivalente al capítulo 6.1.1, se utiliza la fórmula de la Figura 41 para determinar el coeficiente de arrastre en este caso crítico, para distintos números de elementos. Así, se crean modelos CFD con distintas cantidades de elementos, oscilando entre los 3.06 y 7.18 millones de elementos, utilizando la herramienta “Face Size” de *Fluent Meshing*. Los resultados de este análisis corresponden a la Figura 61.

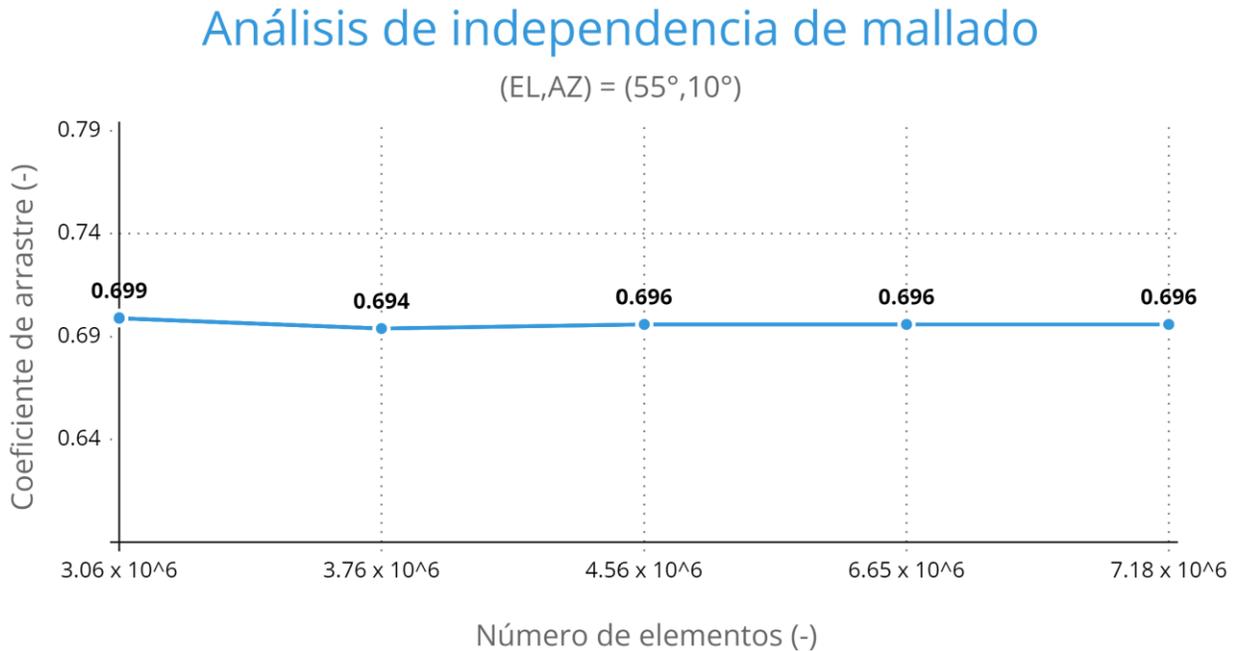


Figura 61: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°,10°)), con respecto al coeficiente de arrastre del reflector

Tal como en el caso crítico previo, se observa en la Figura 61 que la variación en el coeficiente de arrastre del orden de las centésimas, y manifiesta una única variación de una milésima en las últimas tres iteraciones, a pesar del considerable aumento de cantidad de elementos. En consecuencia, se puede afirmar que los valores de arrastre obtenidos se estabilizan a partir de los 4.56 millones de elementos. En el siguiente capítulo, se empleará el coeficiente de arrastre del modelo CFD con 7.18 millones de elementos como representativo del caso crítico “*Sideral Tracking*”.

Análisis de independencia de mallado

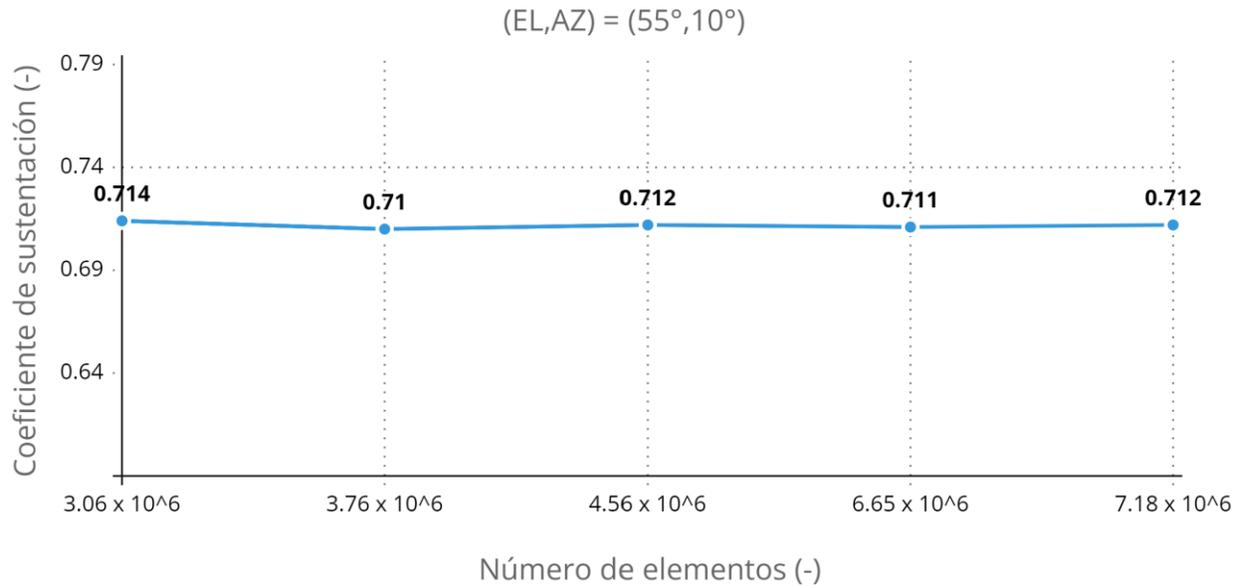


Figura 62: Análisis de sensibilidad del mallado para el caso de “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°,10°)), con respecto al coeficiente de sustentación del reflector

En el análisis de las Figuras 61 y 62, se observa que el coeficiente de sustentación es un 2.247% mayor que el coeficiente de arrastre en sus valores estabilizados. Esta observación revela dos aspectos fundamentales. Primero, a diferencia de la posición "Cénit", en el caso "*Sideral Tracking*" los valores de sustentación y arrastre son notablemente más cercanos. Esto sugiere una interacción más compleja del flujo de aire con la estructura del radiotelescopio en esta orientación. Cuando el telescopio está en posición "Cénit", enfrenta al flujo de aire de una manera que genera un arrastre más prominente debido a la orientación más directa del reflector. Pero en "*Sideral Tracking*", la inclinación de 55° junto con la rotación del *yoke* podría estar alterando esta dinámica, haciendo que la estructura interactúe con el flujo de aire de una manera que genera fuerzas tanto verticales como horizontales.

Segundo, es relevante destacar que en la operación "*Sideral Tracking*", la sustentación en el reflector supera al arrastre. Esto puede deberse a la geometría de la estructura en esta orientación específica. Con el reflector inclinado y el *yoke* rotado, se podría generar una mayor cantidad de vórtices y turbulencias en el lado inferior del reflector, lo que acentúa la sustentación. La turbulencia, junto con la separación y re-adherencia del flujo en el reflector, potencia este efecto. Además, la rotación del *yoke* también cambia cómo el flujo de aire circunda la estructura, lo que contribuye al aumento de la sustentación. Estos fenómenos subrayan que la posición "*Sideral Tracking*" presenta desafíos aerodinámicos diferentes al caso "Cénit", siendo vital comprender estas diferencias para garantizar la operatividad segura del radiotelescopio. A su vez, vale la pena mencionar que los sentidos de las fuerzas de arrastre y sustentación para este caso de operación son equivalentes al caso anterior, variando solo las magnitudes de las fuerzas mencionadas.

6.2.2 Validación con literatura

Siguiendo el principio de validación de los resultados obtenidos presentado previamente, al igual que en el caso crítico “Cénit”, se buscó cotejar el coeficiente de arrastre determinado para el reflector de la antena VERTEX RSI con resultados similares de otros modelos CFD correspondientes a diferentes aplicaciones industriales, poniendo énfasis en la similitud del número de Reynolds de cada flujo comparado y en la geometría del cuerpo de estudio en cuestión. En el escenario actual, donde el radiotelescopio presenta una orientación inclinada en elevación y acimut, su geometría puede equipararse a la de un ala o perfil aerodinámico inclinado. Esta orientación, sumada al área proyectada, la cual se ve ampliada en relación con el caso "Cénit" debido a la contribución predominante del reflector primario inclinado, establece un marco de referencia específico para la comparativa.

Tomando en cuenta los criterios mencionados, se procedió a cotejar el coeficiente de arrastre deducido en esta investigación con aquellos presentes en la literatura, específicamente para configuraciones similares al caso denominado "Sideral Tracking". Una síntesis de estas comparaciones puede apreciarse en la Tabla 8. Cabe mencionar que, en este caso particular, todos los coeficientes presentados corresponden a simulaciones de modelos CFD, a excepción de (Lienhard, 1967), que obtiene sus resultados mediante experimentación en túneles de viento.

Tabla 8: Comparación de coeficientes de arrastre de reflectores entre distintos modelos CFD del flujo de aire alrededor de radiotelescopios para el caso “*Sideral Tracking*”

Modelos CFD	Coefficiente de arrastre (-)	Número de Reynolds (-)	Cuerpo de estudio (-)
(Kološ et al., 2021)	0.81	$1 \cdot 10^7$	Edificio cilíndrico
(Schewe, 2001)	0.6	$7.2 \cdot 10^6$	Cuerpo trapezoidal
(Lienhard, 1967)	0.7	$1 \cdot 10^7$	Cilindro circular horizontal
(N. Van He et al., 2020)	0.62	$8.5 \cdot 10^6$	Proa de barco sin casco
(Li et al, 2023)	1.03	$8.93 \cdot 10^7$	Radiotelescopio (EL,AZ) = (55°, 10°)
(Li et al, 2023)	0.63	$8.93 \cdot 10^7$	Radiotelescopio (EL,AZ) = (65°, 10°)
Autor, 2023	0.696	$1.03 \cdot 10^7$	Radiotelescopio VERTEX (EL,AZ) = (55°, 10°)

Tras la comparativa efectuada, se identificó que el coeficiente de arrastre del caso "Sideral Tracking" en esta investigación concuerda notablemente con los valores documentados en la literatura para condiciones de flujo y geometrías similares. Esta concordancia no solo confirma la validez de los resultados derivados para el citado caso de operación, evidenciando coeficientes dentro del rango que otras investigaciones similares han registrado, sino que también fortalece la confianza en la comparativa realizada para el caso previamente evaluado. A pesar de ello, es importante subrayar que en el estudio paramétrico de (Li et al, 2023) el coeficiente de arrastre para el caso equivalente a "Sideral Tracking" ((EL, AZ) = (55°, 10°)) es significativamente más alto que en la presente investigación, mientras que con 10 ° más de elevación ((EL, AZ) = (65°, 10°)) este parámetro se acerca mucho más a los obtenidos por este trabajo y al resto de valores presentados en la Tabla 8.

6.2.3 Análisis comparativo de modelos de turbulencia

Tal como se expuso en secciones anteriores, las fuerzas de arrastre y sustentación registradas en el caso de "Sideral Tracking" superan significativamente a las del caso "Cénit". Esta tendencia se mantiene uniformemente al comparar los resultados entre los diferentes modelos de turbulencia empleados.

Al analizar específicamente los coeficientes de arrastre y sustentación para el caso "Sideral Tracking", presentados en la Tabla 9, se confirma que los fenómenos previamente observados en el caso "Cénit" continúan manifestándose. Los modelos $k-\epsilon$ realizable y estándar presentan diferencias apenas perceptibles entre sí, siendo de tan solo un 0.43% en el arrastre y de un 0.14% en la sustentación, mostrando una concordancia notable. Por otro lado, el modelo $k-\epsilon$ RNG introduce variaciones del orden de la décima en comparación con los otros dos modelos, que equivalen a una diferencia del 14.08% y un 15.59% en los valores de arrastre y sustentación, respectivamente, con respecto al modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable, siguiendo la misma tendencia observada en el caso "Cénit", donde los modelos Realizable y Estándar guardan más similitud en sus magnitudes con respecto al RNG, siendo este siempre menor a los dos anteriores.

Sin embargo, es crucial enfatizar que, aunque se observen diferencias entre los modelos, la similitud en los resultados es un testimonio alentador de su confiabilidad. Esta uniformidad indica que, independientemente de las variaciones propias de cada modelo, todos están captando adecuadamente el comportamiento fundamental del flujo alrededor del radiotelescopio en la configuración del caso de estudio presentado en este capítulo. Esto sugiere que los hallazgos reflejan una coherencia intrínseca entre los modelos, pudiendo indicar que las diferencias no son tanto una cuestión de la física del flujo, sino más bien una consecuencia directa de las suposiciones y formulaciones propias de cada modelo de turbulencia. Esta cohesión entre los resultados reafirma la solidez del análisis y fortalece los resultados de las simulaciones realizadas.

Tabla 9: Coeficiente de sustentación y arrastre calculados, y fuerzas de sustentación y arrastre para el caso de “*Sideral Tracking*” ((EL, AZ) = (55°, 10°))

Casos	C_D	C_L	Arrastre [N]	Sustentación [N]
$K - \epsilon$ Realizable	0.696	0.712	11683.201	11950.35
$K - \epsilon$ Estándar	0.699	0.713	11738.607	11962.96
$K - \epsilon$ RNG	0.598	0.601	10040.329	10096.038

CAPÍTULO 7: Discusión y propuestas futuras

7.1 Discusión

El análisis realizado en este trabajo ha revelado hallazgos significativos sobre las cargas aerodinámicas que actúan sobre el radiotelescopio VERTEX RSI. La precisión y confiabilidad del mallado implementado se refuerzan no solo por la capacidad de representar cargas y fenómenos aerodinámicos esperables en este tipo de estructuras, como los puntos de estancamiento y zonas de aceleración del flujo de aire, sino también por el análisis de sensibilidad realizado sobre el mismo, que evidencia la convergencia de los resultados de arrastre y sustentación a valores concretos. La comparación de los resultados derivados de distintos modelos de turbulencia $k - \epsilon$ evidencia a su vez la robustez del mallado, indicando que tanto los elementos para formarlo como las condiciones de borde impuestas en los modelos CFD representan los fenómenos físicos que se buscan simular, y que las variaciones entre estos modelos podrían estar más relacionadas con la formulación de estos modelos de turbulencia. Es importante recalcar, a su vez, que se producen grandes separaciones del flujo en el borde superior del reflector, como es indicado por (Yan et al., 2015).

Es reseñable que los coeficientes de arrastre encontrados armonizan con investigaciones previas relacionadas con objetos de características similares. Esta coherencia es indicio de la validez de los resultados obtenidos, pues las discrepancias con otros estudios, aunque menores, podrían deberse a diferencias en condiciones de contorno, particularidades geométricas específicas de los cuerpos de estudio comparados o la formulación de modelos de turbulencia empleados. Según los resultados obtenidos, es esperable que las otras fuerzas aerodinámicas también se asemejen entre investigaciones, pero se requiere un estudio más detallado de estas para asegurarlo.

En la comparación de coeficientes de arrastre entre diferentes investigaciones sobre cargas aerodinámicas en radiotelescopios, es crucial considerar el número de Reynolds, ya que este parámetro adimensional describe la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un flujo. Para números de Reynolds similares, es esperable obtener coeficientes de arrastre comparables, ya que este número caracteriza la naturaleza del flujo, es decir, si es laminar o turbulento, y cómo se comporta alrededor de un objeto. Por otro lado, es notable que los casos que se alinean más estrechamente con los resultados de “*sideral tracking*” son aquellos donde el objeto de estudio presenta una mayor área perpendicular al flujo de aire, en muchos casos por carencias de perfiles que

permitan un flujo de aire con cambios de velocidad menos bruscos sobre la superficie del objeto. Este fenómeno es lógico y esperado, pues el área perpendicular implica una mayor resistencia al flujo, lo que da como resultado un incremento en el coeficiente de arrastre. Esta área actúa como una barrera que el flujo tiene que sortear, generando turbulencias y vórtices que incrementan las cargas aerodinámicas sobre la estructura.

En relación con el estudio de (Li et al, 2023), es interesante notar que, para cada caso crítico examinado, el radiotelescopio de dicha investigación exhibe coeficientes de arrastre notoriamente diferentes al presente trabajo cuando se comparan para los mismos ángulos de elevación y acimut. Sin embargo, con variaciones sutiles en el ángulo de elevación, los valores se tornan muy similares. Esto podría deberse a la interacción de características específicas y únicas de la geometría del radiotelescopio con el flujo a esos ángulos particulares. Las diferencias en diseño, detalles constructivos o incluso en la rugosidad superficial pueden tener efectos significativos en el comportamiento del flujo y, por ende, en los coeficientes de arrastre. Estas diferencias subrayan la importancia de tener en cuenta las peculiaridades individuales de cada diseño al comparar resultados entre diferentes investigaciones.

En cuanto a la métrica y^+ , se ha hecho un esfuerzo notable por mantenerla dentro de los rangos ideales específicos para los modelos de turbulencia en uso. A pesar de algunas celdas que no caen dentro de este espectro ideal, es alentador observar que los resultados muestran convergencia entre diferentes modelos de turbulencia y tamaños de malla. Esta congruencia sugiere dos posibilidades: que los valores obtenidos son adecuados para representar el fenómeno aerodinámico en cuestión, o que cualquier error introducido por desviaciones en y^+ se reproduce de manera uniforme en todos los casos. Dado que los hallazgos coinciden estrechamente con investigaciones comparativas, es razonable inclinarse hacia la primera interpretación.

Aunque esta investigación ha aportado perspectivas valiosas, es imperativo reconocer la complejidad y variabilidad de la turbulencia. La turbulencia, en función de su magnitud, escala y naturaleza, puede influir de maneras diversas en la aerodinámica de un objeto. Los datos de viento del valle de Chajnantor evidencian que la intensidad turbulenta del flujo incidente no es constante, variando con factores como la estacionalidad y la hora del día. Tal variabilidad puede modificar los valores de las fuerzas aerodinámicas, subrayando la necesidad de estudiar el efecto de la intensidad turbulenta del flujo sobre estas cargas.

7.2 Propuestas futuras

- Modificar el mallado, específicamente las capas de inflación, con el objetivo de lograr que todos los valores de y^+ de cada modelo CFD se encuentren dentro del rango recomendado por el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ realizable, analizando los efectos de esta modificación en las fuerzas aerodinámicas sobre la antena y compararlas con los resultados obtenidos en el presente trabajo.
- Estudiar la variación de las fuerzas aerodinámicas en el radiotelescopio para una velocidad de viento con un perfil de velocidades formado según la rugosidad del terreno. Este estudio debe tener en consideración la hora del día y la estacionalidad en el Valle de Chajnantor. Además, se pueden incorporar los efectos de la temperatura, y la presencia de nieve en los resultados. Estos factores pueden tener un impacto significativo en las fuerzas aerodinámicas y es importante considerarlos para una evaluación completa de las cargas a las que está sometido el radiotelescopio.
- Realizar un estudio paramétrico del flujo de aire alrededor del radiotelescopio para analizar las fuerzas aerodinámicas en una mayor cantidad de casos de operación. Se aconseja considerar diferentes condiciones de flujo, como velocidades de viento e intensidad turbulenta variables en el *inlet* de velocidad, ángulos de incidencia del viento y configuraciones de la antena. Esto permitirá comprender de forma más detallada cómo las condiciones cambiantes afectan las fuerzas aerodinámicas y cómo optimizar el diseño y la operación del radiotelescopio en diferentes escenarios.
- Transferir los resultados obtenidos a un modelo de elementos finitos para determinar las deflexiones generadas en la estructura a causa del viento. Esto permitirá evaluar el comportamiento estructural del radiotelescopio y comprender cómo las fuerzas aerodinámicas afectan las deformaciones y las cargas sobre la estructura. Este análisis estructural proporcionará información valiosa para garantizar la integridad y la seguridad de la antena en diversas condiciones de operación.
- Analizar las diferencias entre utilizar la discretización espacial de momento de primer orden, seleccionada actualmente, con una de segundo orden, pues podría revelar detalles más finos en la dinámica del flujo, especialmente en áreas con fuertes gradientes de velocidad, permitiendo la comparación de las magnitudes de fuerzas aerodinámicas obtenidas con ambas discretizaciones.

Referencias

- Adam, N. M., Attia, O. H., Al-Sulttani, A. O., Mahmood, H. A., As'array, A., & Rezali, K. A. M. (2020). Numerical analysis for solar panel subjected with an external force to overcome adhesive force in desert areas. *CFD Letters*, 12(9), 60–75. <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.9.6075>
- Ahmed, /, & Elmekawy, N. (2018). *ME-733 Computational Fluid Mechanics Fluent Lecture 4 Fluent Solver Settings*.
- ANSYS. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide 15*.
- ANSYS Inc. (2009). *Realizable K-Epsilon Model*. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>.
- Bellei, A. (2017). *Estudio Experimental de un sistema tipo Wake Galloping para distintas geometrías generadoras de vórtices*.
- El mundo bachiller. (2022). *Hitos de la astronomía 1931. El nacimiento de la Radioastronomía*.
- ESO. (2022). *The Milky Way and the location of its central black hole as viewed from the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*.
- European Southern Observatory (ESO). (2019). *APEX Weather Query Form*. http://archive.eso.org/wdb/wdb/eso/meteo_apex/form.
- Feng, S., Wang, C., Duan, B., & Ban, Y. (2017). Design of tipping structure for 110 m high-precision radio telescope. *Acta Astronautica*, 141, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.09.036>
- Fimin, P. (2017). *Optical Contradictions in TRIZ: A Review*. <https://www.researchgate.net/publication/336306007>
- Hashimoto, I., Chiba, M., Okada, N., Ogawa, H., Kawabe, R., Minamidani, T., Tamura, Y., & Kimura, K. (2020). *Wind-and Operation-Induced Vibration Measurements of the Main Reflector of the Nobeyama 45 m Radio Telescope*.
- He, F. L., Xu, Q., Wang, N., & Zhu, C. H. (2020). A method to obtain the wind field characteristics of super-large aperture radio telescope site based on single-point wind tower and numerical simulation. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 20(12). <https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/12/199>
- He, N. Van, Hien, N. Van, Truong, V. T., & Bui, N. T. (2020). Interaction effect between hull and accommodation on wind drag acting on a container ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/jmse8110930>
- Jousef, M. (2020). *What is y+ (yplus)?* <https://www.simscale.com/forum/t/What-Is-y-Plus/82394>.

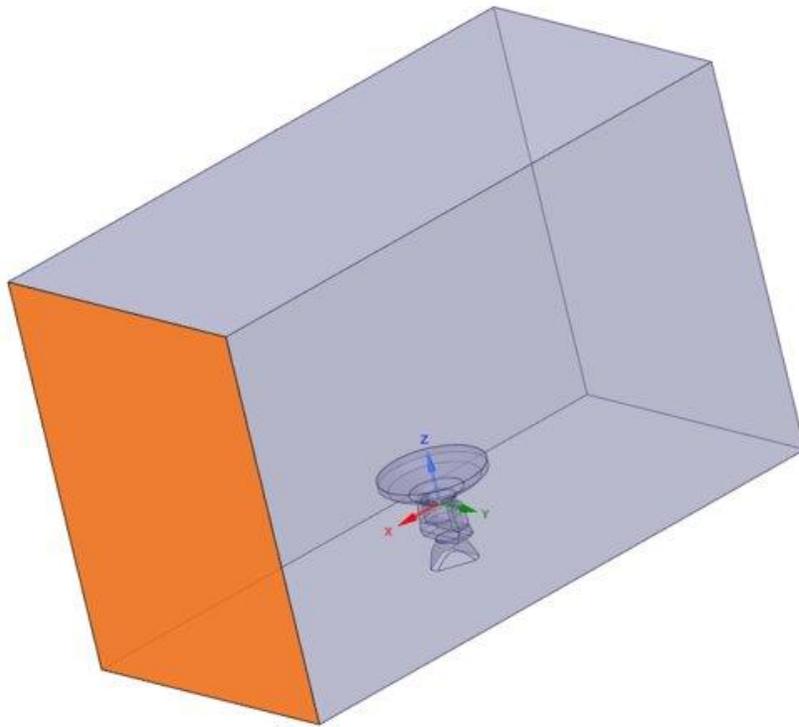
- Kološ, I., Michalcová, V., & Lausová, L. (2021). Numerical analysis of flow around a cylinder in critical and subcritical regime. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(4), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su13042048>
- Li, S., Han, B.-Q., Liu, S.-Y., Wang, W.-J., Wang, B.-B., Zhang, X.-Y., Wang, L.-Y., Xu, Q., Wang, N., Zhao, W.-L., & Wang, C.-S. (2023). Simulation-driven Wind Load Analysis and Prediction for Large Steerable Radio Telescopes. *Research in Astronomy and Astrophysics*, *23*(2), 024001. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/acae6d>
- Lienhard, J. H. (1967). *Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders*.
- Lotfi, A., & Rad, M. (2012). Drag performance of divergent tubular-truncated cones: A shape optimization study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *9*(1), 105–112. <https://doi.org/10.1007/s13762-011-0003-9>
- Mangum, J. G., Baars, J. W. M., Greve, A., Lucas, R., Snel, R. C., Wallace, P., & Holdaway, M. (2006). Evaluation of the ALMA Prototype Antennas 1. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, *118*(847), 1257–1301. <https://doi.org/10.1086/508298>
- Navarro, J. (2020). *Análisis numérico de distorsiones en reflector primario de radiotelescopio Caltech Submillimeter Observatory*.
- Navarro, J. (2022). *ANÁLISIS DE RENDIMIENTO ELECTROMECAÁNICO DEL RADIOTELESCOPIO CALTECH SUBMILLIMETER OBSERVATORY BAJO CONDICIONES EXTERNAS EN EL*.
- Otarola, A., De Breuck, C., & Matsushita, S. (2019). *Precipitable Water Vapor, Temperature, and Wind Statistics At Sites Suitable for mm and Submm Wavelength Astronomy in Northern Chile*. <https://www.eso.org/sci/meetings/2018/AtLAST2018.html>
- Pablo Pérez Beaupuits, J., Otárola, A., Rantakyrö, F. T., Rivera, R. C., Radford, S. J. E., & Nyman, L.-Å. (2004). *ALMA Memo No. 497 ANALYSIS OF WIND DATA GATHERED AT CHAJNANTOR*.
- Pablo Pérez-Beaupuits, J., Pablo Pérez Beaupuits, J., Otárola, A., Rantakyrö, F. T., Rivera, R. C., Radford, S. J. E., & Nyman, L.-Å. (2004). *ALMA Memo No. 497 ANALYSIS OF WIND DATA GATHERED AT CHAJNANTOR Angel Otárola Thirty Meter Telescope ANALYSIS OF WIND DATA GATHERED AT CHAJNANTOR*. <https://www.researchgate.net/publication/237219306>
- Pain, H. J. (Herbert J. (2005). *The physics of vibrations and waves*. John Wiley.
- Radford, S. J. E., & Holdaway, M. A. (1998). *Atmospheric conditions at a site for submillimeter wavelength astronomy* (Vol. 3357). <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/>
- Ryan Po Chao Wang BAsC, by. (2012). *Evaluation of Wind Load on Large Telescope Structure based on Performance-based Design*.

- Schewe, G. (2001). Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies. In *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (Vol. 89).
- Sijal. (2019). *Understanding Y+ for CFD Simulations*. <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-y-cfd-simulation-sijal-ahmed/>.
- Upnere, S., & Jekabsons, N. (2011). Analysis of Wind Influence to Radio Astronomy Observations at Irbene Radio-telescope Complex. *Environmental and Climate Technologies*, 6(1), 118–126. <https://doi.org/10.2478/v10145-011-0017-z>
- Upnere, S., Joffe, R., Upnere, S., & Jekabsons, N. (2012a). *Characterization of Wind Loading of the Large Radio Telescope* “Characterization of Wind Loading of the Large Radio Telescope.” <https://www.researchgate.net/publication/260012465>
- Upnere, S., Joffe, R., Upnere, S., & Jekabsons, N. (2012b). *Characterization of Wind Loading of the Large Radio Telescope* “Characterization of Wind Loading of the Large Radio Telescope.” <https://www.researchgate.net/publication/260012465>
- Vogiatzis, K., Segurson, A., & Angeli, G. Z. (2004). Estimating the effect of wind loading on extremely large telescope performance using computational fluid dynamics. *Modeling and Systems Engineering for Astronomy*, 5497, 311. <https://doi.org/10.1117/12.551477>
- Yan, L., Hongliang, Q., & Feng, F. (2015). *Wind load characteristics of large radio telescope*.
- Yuan, W., Chen, H., & Wang, Z. (2017). *The Wind Characteristics of Tall Cylinder Buildings with Vertical-Grooves*.

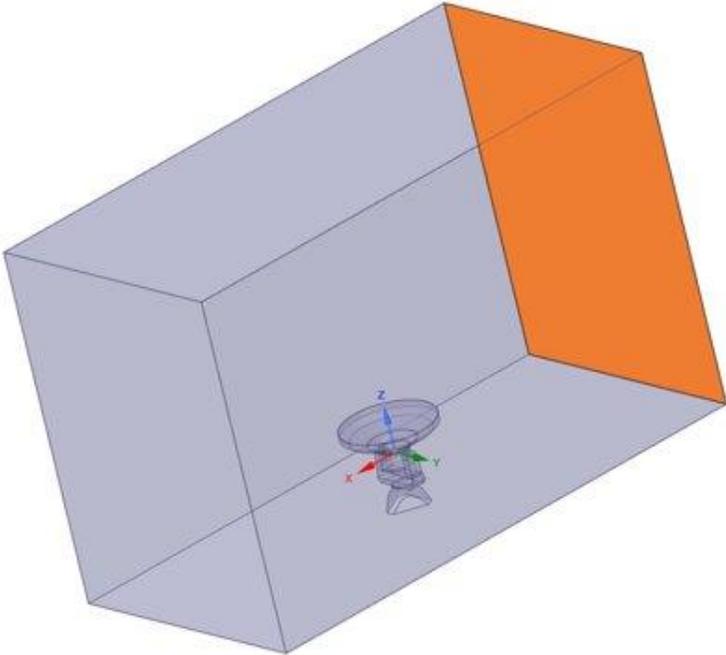
Anexo A: Condiciones de borde en el volumen de control

Se presentan imágenes que ilustran la posición de las condiciones de borde y “*Named Selections*” utilizadas para el generado del mallado en cada modelo CFD, específicamente del caso “Cénit” ((EL,AZ) = (90,0)). Como referencia, el flujo de aire inicia desde el *inlet*, en la dirección -X.

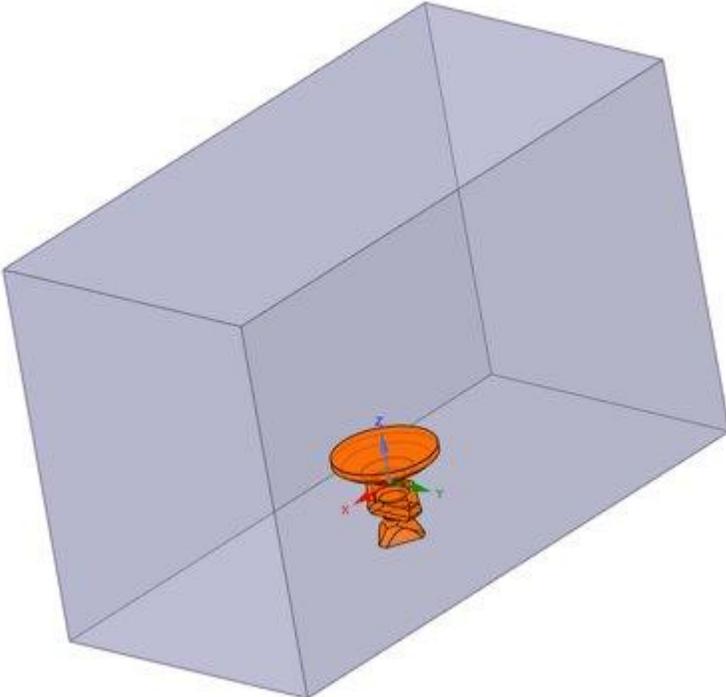
Inlet:



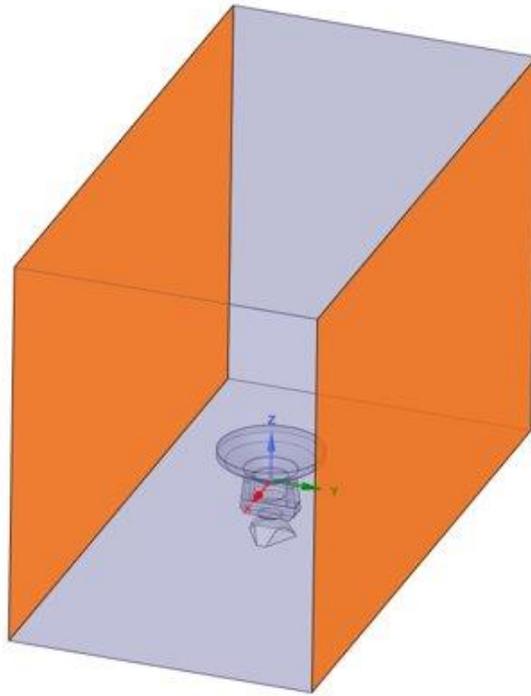
Outlet:



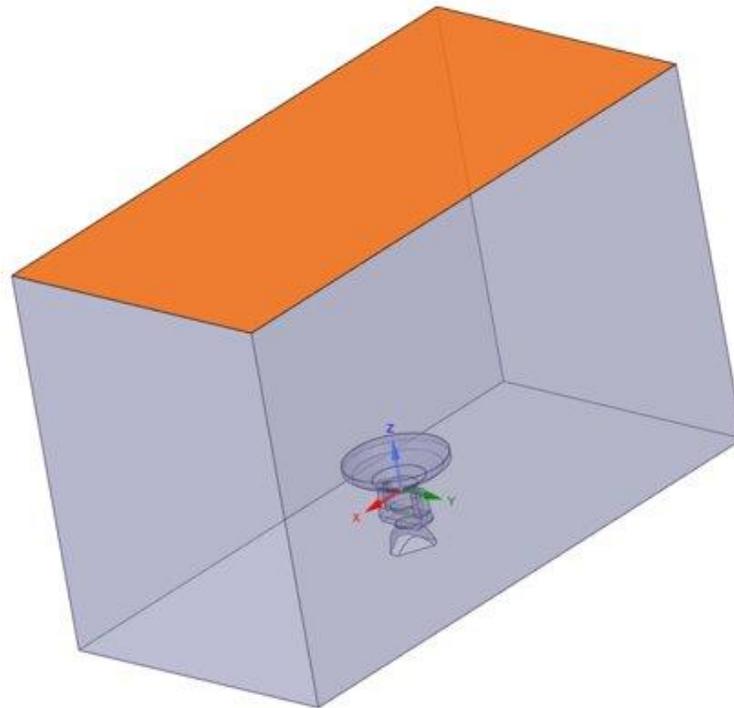
Superficie Antena:



Paredes:



Techo:



Suelo:

