

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO - CHILE



**SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LA CAPA ATMOSFÉRICA DE
SUPERFICIE PARA LA EVALUACIÓN AEROESTRUCTURAL DE
UNA TORRE METEOROLÓGICA TELESCÓPICA MÓVIL**

ANTONIA PAZ FUENZALIDA GODOY

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR A TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: DR. ALEX FLORES MARADIAGA

PROFESOR CO REFERENTE: M.SC. NICOLÁS THIERS MOGGIA

OCTUBRE 2023

Agradecimientos

A las mujeres que abrieron camino en la ingeniería, las que hicieron historia y crearon espacios.

A las profesoras y profesores, por dedicarse a transmitir conocimiento, por enseñarnos y compartir sus pasiones formando profesionales y personas. En particular a mi referente, Alex Flores quien me mostro su pasión, profesionalismo y compromiso con el proceso de aprendizaje.

A mis compañeras, compañeros y futuros colegas, en especial a mis amigas de plan común quienes me acompañaron desde Mate uno hasta el proceso de titulación. A mis amigos de la carrera, de certámenes, laboratorios e informes y a los amigos que encontré en esta universidad.

A las personas maravillosas del Altamira quienes nunca dejaron de acompañarme y recordarme lo brillante y apasionada que soy por el mundo de las matemáticas.

En especial a mi familia, por la paciencia, compañía, sabiduría y apoyo ilimitado en la vida y en el proceso de aprendizaje y crecimiento que viví dentro de esta universidad.

Resumen

El diseño de una torre meteorológica telescópica responde a la falta de precisión en la exploración y evaluación del recurso eólico para la generación de energía. El innovador diseño que permite su traslado y montaje en terreno, es estudiado ante distintos campos de viento presentes en la capa atmosférica para conocer la interacción del mástil con el flujo.

Por lo que se analiza desde la dinámica computacional de fluidos la interacción fluido estructura, realizando un análisis de sensibilidad de la torre telescópica inmersa en viento atmosférico, obteniendo el perfil dinámico de presiones que ejerce el viento sobre el mástil.

En particular se simula con el software Autodesk CFD el fluido en condiciones de estratificación neutra, estable e inestable, utilizando el modelo de turbulencia RANS $k-\omega$ SST y prototipos a escalas, en particular 1:8, 1:4 y 1:1. Con los resultados de las simulaciones se analiza la velocidad instantánea próxima a la torre, en diferentes alturas, con esta variable se hace uso de la norma chilena NCh432 que parametriza las presiones resultantes del viento, en particular para torres de sección cuadrada con viento en dirección perpendicular y oblicuo.

Se determina como caso más desfavorable para la interacción aeroestructural una estratificación estable con el ángulo de ataque perpendicular a la cara de barlovento, junto con ello se establece que no existe gran influencia de intensidad de turbulencia en la interacción fluido estructura.

La interacción fluido estructura no compromete el funcionamiento del mástil ni presenta riesgos para la robustez o estabilidad de este, por otro lado la torre telescópica genera jets de velocidad en el viento y una estela de mezcla de velocidades sin mayores torbellinos.

Con ello se concluye la evaluación numérica del diseño telescópico y por lo tanto se aprueba la ingeniería básica del mástil retráctil, para trabajos futuros se recomienda el uso de un software más complejo para analizar a detalle la torre con sus sistemas de transporte y anclaje, en escenarios más extremos de estratificación estable, en particular con grandes variaciones de temperatura. Además de realizar un estudio específico para vibraciones mecánicas, con el objetivo de determinar la frecuencia de destrucción y analizar en base a los modos de vibraciones y frecuencia natural las circunstancias para evitar que ocurra. Posterior a ello se sugiere la construcción del prototipo a escala.

Abstract

The design of a telescopic meteorological tower addresses the issue of precision in exploring and assessing wind resources for energy generation. The innovative design, which allows for its transportation and assembly on-site, is studied under various atmospheric wind field conditions to understand the mast's interaction with the airflow.

Hence, the fluid-structure interaction is analyzed through computational fluid dynamics (CFD), conducting a sensitivity analysis of the telescopic tower immersed in atmospheric wind. This analysis yields the dynamic pressure profile exerted by the wind on the mast.

In particular, the fluid is simulated using Autodesk CFD software under neutral, stable, and unstable stratification conditions, employing the RANS $k-\omega$ SST turbulence model and scale prototypes, specifically 1:8, 1:4, and 1:1. Using the simulation results, the instantaneous wind speed near the tower at different heights is analyzed, and this variable is applied according to the Chilean standard NCh432, which parameterizes wind-induced pressures, particularly for square-section towers with wind blowing perpendicularly and obliquely.

The most unfavorable case for the aerostructural interaction is determined to be stable stratification with the angle of attack perpendicular to the windward face. It is also established that turbulence intensity does not significantly influence the fluid-structure interaction. The fluid-structure interaction does not compromise the mast's operation or pose risks to its robustness or stability. Additionally, the telescopic tower generates velocity jets in the wind and a wake of velocity mixing without significant eddies.

In conclusion, the numerical evaluation of the telescopic design is completed, and the basic engineering of the retractable mast is approved. For future work, it is recommended to employ more advanced software to conduct detailed analyses of the tower with its transportation and anchoring systems under more extreme stable stratification scenarios, particularly with large temperature variations. Furthermore, a specific study on mechanical vibrations is suggested to determine the destruction frequency and analyze, based on vibration modes and natural frequencies, the circumstances to prevent such occurrences. Subsequently, the construction of a scale prototype is recommended.

Contenido

Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Abstract.....	4
1. Introducción	11
2. Objetivos.....	12
3. Antecedentes.....	13
3.1. Contexto Global.....	13
3.2. Contexto Nacional	14
3.3. Matriz Energética Nacional.....	14
3.4. Energía Eólica.....	15
3.5. Problema de Investigación.....	16
4. Estado del Arte	17
4.1. Herramientas de evaluación numérica	17
4.2. Normas	20
4.3. Investigaciones	22
5. Marco Teórico	26
5.1. Conceptos y Fenómenos.....	26
5.1.1 El Viento	26
5.1.2 Estratificación Térmica Atmosférica	27
5.1.3 Análisis Aero Estructural	31
5.2. Ecuaciones Matemáticas	32
5.2.1 Análisis adimensional del viento.....	32
5.2.2 Ecuaciones del flujo	34
5.2.3 Modelos de Turbulencia	36
5.2.4 Método de Solución de las Ecuaciones	38
5.2.5 Ecuaciones de Parametrización	39
6. Metodología de simulación.....	40
6.1. Parámetros y condiciones de contorno	41
6.2. Proceso de diseño y análisis computacional	44
7. Simulaciones y análisis.....	49
7.1. Torre 1 nivel, escala 1:4.....	49
7.2. Torre 2 niveles, escala 1:4	52
7.3. Torre 3 niveles, escala 1:8.....	56
7.4. Torre 5 niveles, escala 1:1	61
7.5. Torre 5 niveles retraída, escala 1:1.....	71
7.6. Torre 1 nivel, escala 1:1.....	73
7.7. Sistema de anclaje	74
8. Conclusiones.....	75
9. Trabajos posteriores.....	77

Referencias	78
Anexos.....	81
A. Resultados torre 1 nivel, escala 1:4.....	81
B. Resultados torre 2 niveles, escala 1:4	83
C. Resultados torre 3 niveles, escala 1:8	87
D. Resultados torre 5 niveles, escala 1:1	93

Lista de Figuras

Figura 3.1-1: Temperaturas globales anuales en comparación con el promedio del siglo XX...	13
Figura 3.1-2: Temperaturas globales anuales en comparación con los niveles preindustriales.	13
Figura 3.3-1: Proyección de la capacidad instalada de generación de energía en el marco de...	14
Figura 4.1-1: Configuraciones del viento según el euro código 1 para el software SAP2000.....	18
Figura 4.1-2: Vectores de velocidad del flujo del viento modelado en la Torre Eiffel.	19
Figura 4.1-3: Aplicación del software Helyx en la energía eólica.	20
Figura 4.2-1: Ejemplo de instrumentos montados según los requisitos.....	20
Figura 4.2-2: Coeficientes de fuerza de viento seccional para estructuras de celosía	21
Figura 4.2-3: Factor de forma de estructuras en forma de torre o mástil, para estructuras de base triangular.	21
Figura 4.3-1: Modelo computacional de la torre modelada en SAP2000.	22
Figura 4.3-2: Campo de velocidad pronosticado por OpenFoam para un ángulo de 270°.....	23
Figura 4.3-3: Vista isométrica de las secciones de la torre analizadas en CFD.....	23
Figura 4.3-4: Modelamiento matemático de elementos finitos en software SAP2000.	24
Figura 4.3-5: Ángulos de ataques estudiados en el mástil de comunicaciones.	24
Figura 4.3-6: Geometría de la torre de 110m, visión global, detalle parte inferior, detalle parte superior.....	25
Figura 5.1.1-1: Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana.....	26
Figura 5.1.2-1: Perfil de temperatura y potencial de temperatura para la determinación de la estabilidad del aire.....	28
Figura 5.1.2-2: Evolución típica de la velocidad del viento (M) en la capa límite atmosférica a diferentes alturas.....	29
Figura 5.1.2-3: Perfiles de velocidad en los diferentes tipos de capa límite atmosférica.	29
Figura 5.1.3-1: Componentes de una torre.....	31
Figura 5.2.1-1: Flujo no viscoso sin superficie libre a baja velocidad.	34
Figura 5.2.4-1: Cuadrícula tridimensional para un nodo.....	38
Figura 5.2.5-1: Factor de forma de estructuras en forma de torre o mástil, para estructuras de base cuadrada.....	39
Figura 6.1-1: Características túnel de viento para simulaciones.	41
Figura 6.1-2: Gráfico perfiles de velocidad según estratificación atmosférica	42
Figura 6.1-3: Parámetros del modelo de turbulencia en el software.	43
Figura 6.2-1: Diseño torre 50 metros, 1 nivel.....	44
Figura 6.2-2: Diseño torre 50 metros, 2 niveles con dificultosa pieza de unión.....	45
Figura 6.2-3: Diseño torre 50 metros, 2 niveles.	46
Figura 6.2-4: Diseño torre 3 niveles.....	47

Figura 6.2-5: Diseño final torre 50 metros, 5 niveles.....	48
Figura 7.1-1: Gráfico de velocidad del viento a utilizar en las simulaciones de atmosfera ideal.	49
Figura 7.1-2: Simulación transitoria torre escalda 1:4, estratificación neutra con 20% intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.	50
Figura 7.1-3: Simulación transitoria torre escalada 1:4, estratificación neutra con 30% intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.	50
Figura 7.1-4: Simulación transitoria torre escalda 1:4, estratificación neutra con 20% intensidad de Turbulencia, Viento oblicuo.....	51
Figura 7.1-5: Simulación transitoria torre escalda 1:4, estratificación neutra con 30% intensidad de Turbulencia, Viento oblicuo.....	51
Figura 7.2-1: Gráfico de velocidad escalado del viento, para utilizar en las simulaciones estable e inestable.....	52
Figura 7.2-2: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación inestable 5% Intensidad de Turbulencia, viento normal.	53
Figura 7.2-3: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación estable 5% Intensidad de Turbulencia, viento normal.	54
Figura 7.2-4: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación inestable 20% Intensidad de Turbulencia, viento normal.	54
Figura 7.2-5: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación estable 20% Intensidad de Turbulencia, viento normal.	55
Figura 7.3-1: Gráfico de velocidad del viento a utilizar en las simulaciones inestable, neutra y estable.....	56
Figura 7.3-2: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación estable 5% Intensidad de Turbulencia, viento normal.	57
Figura 7.3-3: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación estable 5% Intensidad de Turbulencia, viento oblicuo.....	58
Figura 7.3-4: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación neutra con 5% de intensidad de Turbulencia, viento normal	58
Figura 7.3-5: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación neutra con 5% de intensidad de Turbulencia, viento oblicuo.....	59
Figura 7.3-6: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación inestable con 5% de intensidad de Turbulencia, viento normal.....	59
Figura 7.3-7: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación inestable con 5% de intensidad de Turbulencia, viento oblicuo.	60
Figura 7.4-1: Simulación estatificación estable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento normal.	61
Figura 7.4-2: Refinamiento de la malla alrededor del mástil con viento perpendicular a una cara.....	62
Figura 7.4-3: Zoom de la malla y sus elementos más pequeños, con viento perpendicular a una cara.....	62
Figura 7.4-4: Simulación estatificación estable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento oblicuo.	63
Figura 7.4-5: Refinamiento de la malla alrededor del nivel 50 con viento oblicuo al mástil.	63
Figura 7.4-6: Zoom de la malla y sus elementos más pequeños, con viento oblicuo.....	64

Figura 7.4-7: Simulación estratificación neutra, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento normal.	64
Figura 7.4-8: Simulación estratificación neutra, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento oblicuo.	65
Figura 7.4-9: Simulación estratificación inestable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento normal.	65
Figura 7.4-10: Simulación estratificación inestable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento oblicuo.	66
Figura 7.4-11: Gráfico de presiones parametrizadas viento perpendicular.	67
Figura 7.4-12: Gráfico de presiones parametrizadas viento oblicuo.	68
Figura 7.4-13: Análisis de sensibilidad variación de intensidad de turbulencia atmosfera estable, ángulo de ataque normal.	69
Figura 7.4-14: Análisis de sensibilidad variación de intensidad de turbulencia atmosfera estable, ángulo de ataque oblicuo.	70
Figura 7.5-1: Diseño torre 50 metros 5 niveles retráctil.	71
Figura 7.5-2: Simulación estratificación estable torre de 5 niveles retráctil.	72
Figura 7.5-3: Simulación estratificación estable torre de 5 niveles retráctil.	72
Figura 7.5-4: Simulación estratificación estable torre de 5 niveles retráctil.	73
Figura 7.6-1: Simulación torre 50 metros, 1 nivel estratificación estable.	73
Figura A-1: Plano lateral de velocidades, estratificación neutra 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.	81
Figura A-2: Plano superior de velocidades, a 10 metros de altura, estratificación neutra 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.	81
Figura A-3: Plano lateral de velocidades, estratificación neutra 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	82
Figura A-4: Plano superior de velocidades, a 10 metros de altura, estratificación estable 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	82
Figura B-1: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	83
Figura B-2: Detalle unión 2 niveles, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	83
Figura B-3: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	83
Figura B-4: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación inestable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.	84
Figura B-5: Detalle unión 2 niveles, estratificación inestable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.	84
Figura B-6: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación inestable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.	84
Figura B-7: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	85
Figura B-8: Detalle unión 2 niveles, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	85
Figura B-9: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	85

Figura B-10: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación estable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.	86
Figura B-11: Detalle unión 2 niveles, estratificación estable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.....	86
Figura B-12: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación estable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.	86
Figura C-1: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	87
Figura C-2: Detalle piezas de unión entre niveles, izquierda 1-2, derecha 2-3 estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	87
Figura C-3: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	87
Figura C-4: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	88
Figura C-5: Detalle pieza de unión, a la izquierda nivel 1-2 a la derecha nivel 2-3, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	88
Figura C-6: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	88
Figura C-7: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	89
Figura C-8: Detalle piezas de unión entre niveles, izquierda 1-2, derecha 2-3 estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	89
Figura C-9: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	89
Figura C-10: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	90
Figura C-11: Detalle pieza de unión, a la izquierda nivel 1-2 a la derecha nivel 2-3, estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	90
Figura C-12: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	90
Figura C-13: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	91
Figura C-14: Detalle piezas de unión entre niveles, izquierda 1-2, derecha 2-3 estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	91
Figura C-15: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.	91
Figura C-16: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	92
Figura C-17: Detalle pieza de unión, a la izquierda nivel 1-2 a la derecha nivel 2-3, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.....	92
Figura C-18: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.	92
Figura D-1: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento normal a una cara del mástil, estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.....	93

Figura D-2: Zoom nivel 1 a 5 de izquierda a derecha, viento normal a una cara del mástil, estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.	93
Figura D-3: Vista superior de la trayectoria del viento normal a una cara del mástil estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.	93
Figura D-4: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento oblicuo al mástil estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.	94
Figura D-5: Vista superior de la trayectoria del viento oblicuo mástil estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.	94
Figura D-6: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento normal a una cara del mástil, estratificación neutra, 5% intensidad de turbulencia.	95
Figura D-7: Vista superior de la trayectoria del viento normal a una cara del mástil estratificación neutra 5% intensidad de turbulencia.	95
Figura D-8: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento oblicuo al mástil estratificación neutra, 5% intensidad de turbulencia.	96
Figura D-9: Vista superior de la trayectoria del viento oblicuo mástil estratificación neutra, 5% intensidad de turbulencia.	96
Figura D-10: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento normal a una cara del mástil, estratificación inestable 5% intensidad de turbulencia.	97
Figura D-11: Vista superior de la trayectoria del viento normal a una cara del mástil estratificación inestable 5% intensidad de turbulencia.	97
Figura D-12: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento oblicuo al mástil estratificación inestable, 5% intensidad de turbulencia.	98
Figura D-13: Vista superior de la trayectoria del viento oblicuo mástil estratificación inestable, 5% intensidad de turbulencia.	98

1. Introducción

El uso de recursos naturales limpios e inagotables para la generación de energía eléctrica da cabida a la carbono neutralidad que comprometieron los países en el acuerdo de París en 2016, como medida ante el cambio climático.

Por lo que la precisión de estimación del recurso y su potencial generación son de vital importancia para lograr suplir y eliminar las distintas fuentes de generación de energía contaminantes.

En la actualidad se utilizan estaciones meteorológicas para extrapolar los datos del viento y estimar la generación de potenciales parques eólicos, por lo que existe una necesidad para evaluar el recurso de forma local y precisa. Ante la problemática, se diseña una torre meteorológica telescópica móvil.

En consecuencia, se debe estudiar la interacción fluido estructura para analizar el comportamiento del mástil ante las presiones dinámicas que ejerce el viento y los efectos que genera la torre en la trayectoria del flujo, con el objetivo de establecer la ingeniería básica del sistema, un diseño optimo y asegurar su funcionamiento.

A continuación, se presentan los objetivos del trabajo de investigación, seguido de los antecedentes a nivel global de generación de energía y en particular para la energía eólica. En el capítulo 4 se expone el estado del arte orientado a investigaciones, softwares y normas existentes respecto a mástiles y simulaciones computacionales de fluidos, en el siguiente capítulo se encuentra el marco teórico referido al flujo, su comportamiento y maneras de modelarlo. En el capítulo 6 se adjunta la metodología de simulación, donde se encuentran las consideraciones para el flujo y la transición de diseños de torres reticuladas, mientras que en el capítulo 7 se presentan las simulaciones y sus principales resultados, posterior a ello se encuentran las conclusiones y finalmente las recomendaciones para trabajos futuros.

2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo de investigación es simular computacionalmente la interacción fluido estructura de una torre meteorológica telescópica de 50 metros de alto con la capa atmosférica de la tierra, para estudiar la influencia de la turbulencia y estratificación térmica del viento.

Los objetivos específicos corresponden a:

- Estudiar la fenomenología de la interacción del viento con torres meteorológicas convencionales.
- Simular numéricamente el flujo de la capa atmosférica de la tierra en torno a una torre meteorológica de 50 metros, sensibilizando la velocidad media, turbulencia y estratificación térmica.
- Comparar los resultados numéricos con observaciones en una torre meteorológica real de 50 metros.
- Evaluar numéricamente la interacción del viento turbulento con estratificación térmica variable sobre una torre meteorológica telescópica.
- Recomendar la forma de instalación y anclaje de la torre meteorológica telescópica.

3. Antecedentes

3.1. Contexto Global

A partir de las evidentes manifestaciones que se viven, acerca del cambio climático, como el aumento de la temperatura media y la alteración del clima a escala mundial, lo que se ve reflejado en que el año 2020 se considera el segundo año más cálido desde 1880, como se puede observar en la Figura 3.1-1, y que la temperatura superficial promedio mundial ha aumentado 0,18°C por década desde 1880 [1], se ha estimado que de continuar con el proceder actual, se llegará a un calentamiento de 1,5°C aproximadamente en 2040 [2], como se aprecia en la Figura 3.1-2.

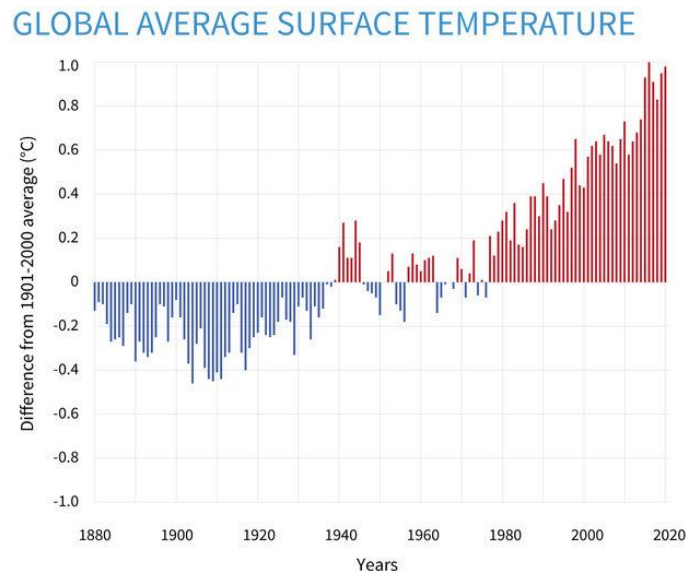


Figura 3.1-1: Temperaturas globales anuales en comparación con el promedio del siglo XX.
Fuente: NOAA Climate.gov [3].

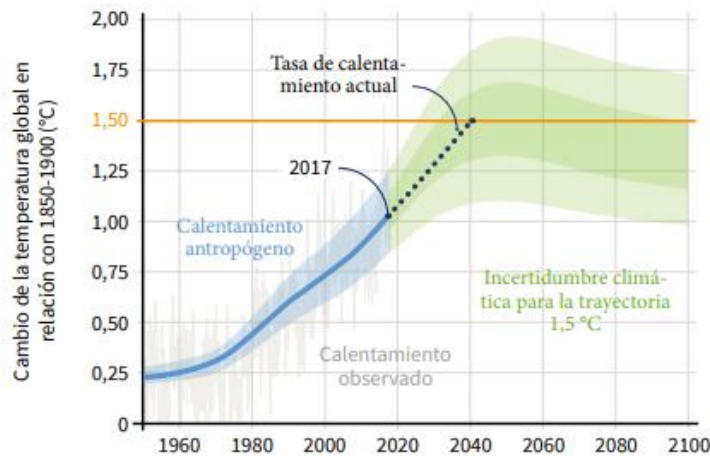


Figura 3.1-2: Temperaturas globales anuales en comparación con los niveles preindustriales.
Fuente: IPCC [2].

Los países parte de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 2016, firmaron el tratado internacional llamado Acuerdo de París, el cual tiene como objetivo reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, manteniendo el aumento de la temperatura por debajo de 2°C, por encima de los niveles preindustriales, con el esfuerzo de limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C [4].

3.2. Contexto Nacional

Chile presentó su Contribución Nacional Determinada (NDC), con última actualización el 2020, para reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y así alcanzar las metas del Acuerdo de París. Por esto en la NDC Chile establece que buscará una trayectoria que le permita alcanzar la neutralidad de GEI al 2050.

Como indica el Ministerio del Medio Ambiente, en el último informe bienal de actualización de Chile sobre el Cambio Climático, en 2018 el sector de Energía fue el responsable de un 77% de las emisiones de los GEI, en particular un 39% proveniente de las industrias de generación de energía, un 33% resultante del transporte, un 18% efecto de industrias manufactureras y construcción y un 9% procedente de otros sectores [5].

3.3. Matriz Energética Nacional

Por lo indicado anteriormente, en 2019 se acordó el plan de descarbonización energética, Energía Zero Carbón, en el que se establece el retiro de ocho generadoras de carbón al año 2024 y el término de la generación eléctrica a carbón al 2040. A partir de esto se proyecta una expansión de las plantas eólicas y solares, como se observa en la Figura 3.3-1 [6].

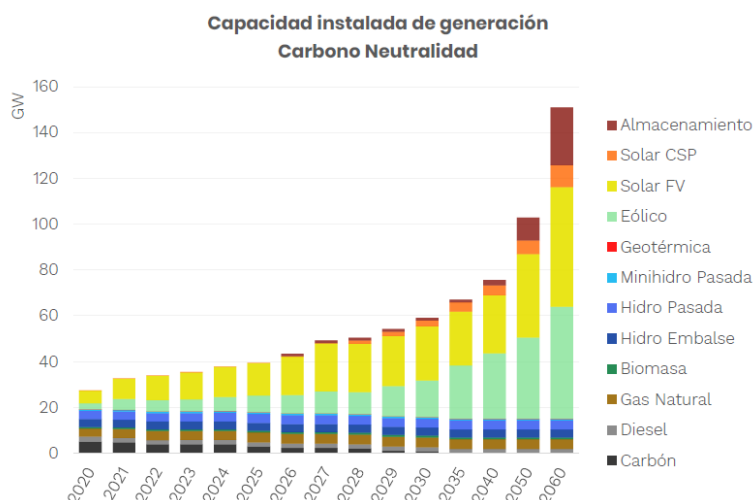


Figura 3.3-1: Proyección de la capacidad instalada de generación de energía en el marco de la carbono neutralidad.

Fuente: PELP Ministerio de Energía [7].

De modo que las energías renovables permitirán alcanzar una matriz cero emisiones GEI en 2040 [7], en particular se puede observar en la figura anterior el importante crecimiento de la energía eólica con un potencial mayor a 40 GW para el año 2060. Por lo que enfocarse en el desarrollo de proyectos eólicos es primordial para desarrollar sin inconvenientes, la carbono neutralidad y dar respuesta a la demanda energética del país.

3.4. Energía Eólica

Para establecer proyectos eólicos, el primer paso corresponde a la evaluación del recurso energético, de forma preliminar se suelen utilizar estaciones meteorológicas y mapas eólicos como el Explorador Eólico [8].

Para determinar el potencial de energía eólica del proyecto o la Producción Anual de Energía (PAE) se consideran las condiciones externas y las condiciones de los aerogeneradores. Junto con ello el cálculo de la PAE involucra un análisis de incertidumbre.

Una de las condiciones que se analiza para el cálculo de la PAE, es el recurso eólico en la zona del proyecto, esto mediante la instalación de una torre con los instrumentos requeridos para la caracterización del viento, determinando su dirección, humedad, presión, temperatura y velocidad, entre otras características.

Algunas de las incertidumbres en la medición del recurso que considera la PAE, provienen de los instrumentos de medición, otras se producen debido a interferencias o ubicación de la torre y también se generan debido al período de medición, producto de la variabilidad interanual que posee el viento [9].

Otro factor relevante a la hora de realizar proyectos eólicos es la participación de la banca para lograr el financiamiento. Para las entidades bancarias es primordial la rentabilidad del proyecto, asociada a la generación de energía, por lo cual estudian las pérdidas e incertidumbres de los proyectos y así determinan el desarrollo de estos [9]. Por ende, disminuir la incertidumbre y asegurar el retorno de la inversión generará confiabilidad para la entidad bancaria y permitirá el desarrollo de proyectos eólicos económicamente factibles. En consecuencia, esto permitirá cumplir con la proyección en generación de energía mencionada anteriormente.

Es por esto que se plantea una evaluación exhaustiva del recurso eólico en las zonas de proyectos, con la finalidad de disminuir la incertidumbre en la medición. Esto a partir del diseño de una torre meteorológica telescópica, con el objetivo de ser trasladada y medir de forma multisensorial en distintos puntos del terreno, para lograr una caracterización tridimensional precisa del recurso eólico.

A la hora de diseñar una torre meteorológica es primordial asegurar el buen funcionamiento y resistencia de la estructura ante las fuerzas y escenarios sometidos, por ello en general se analizan de forma estática y dinámica su reacción e interacción con el viento, para determinar

principalmente, puntos de tensión, deformaciones y vibraciones y así, de ser necesario, rediseñar o reforzar la estructura.

El análisis dinámico se puede realizar mediante la simulación numérica, en la que es importante analizar cómo interactúa la torre ante distintas estratificaciones atmosféricas y ráfagas de viento [10] y estudiar la ubicación de los elementos de medición, ya que la estructura de la torre genera un efecto de distorsión en el viento, por lo que es necesario asegurar la distancia entre los elementos de medición y el mástil [11].

3.5. Problema de Investigación

Para no comprometer los datos de medición que obtiene una torre meteorológica y asegurar su estabilidad frente a las condiciones climáticas que enfrentará, es necesario predecir el comportamiento de la estructura, en particular de un nuevo diseño innovador telescópico.

Por lo que el problema de investigación se enfocará en resolver: ¿Cómo interactúa una torre telescópica meteorológica con distintos campos de vientos?, considerando un análisis de sensibilidad de las variaciones de viento en su ciclo diurno y nocturno.

A partir del análisis computacional se experimentará la estructura con distintos campos de vientos presentes en la capa límite de la tierra, analizando la influencia de la intensidad de turbulencia y estratificación térmica a la hora de determinar la magnitud de fuerza o presión variable del viento sobre la torre.

Es imprescindible analizar los distintos escenarios de vientos, para determinar los perfiles de fuerzas que genera el flujo con distintas características, para hacer un correcto y completo análisis estructural y así asegurar su estabilidad y funcionamiento.

4. Estado del Arte

4.1. Herramientas de evaluación numérica

Para el análisis de flujo del viento existen distintas técnicas como experimentación en el campo, túneles de viento con elementos a escala o Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), que corresponde a una rama interdisciplinaria de la mecánica de fluidos, matemática e informática.

La simulación numérica a partir del CFD posee varias etapas, la primera es obtener las ecuaciones diferenciales que se resolverán, para ello se deben determinar las ecuaciones de Navier-Stokes, definir aproximaciones del flujo y escoger el modelo de turbulencia. Luego se deben discretizar las ecuaciones, para lo que se debe escoger un método como diferencias finitas, volúmenes o elementos finitos, entre otros. Después se realiza la simulación y finalmente se analizan los resultados [12].

Dentro de los códigos de CFD, existen códigos abiertos como lo son OPEN FOAM y Nek5000, mientras que dentro de los códigos cerrados se encuentran ANSYS-Fluent y SAP2000, entre otros. Los distintos tipos de códigos se desarrollan con diferentes lenguajes como Python, Matlab, Fortran, C++. [12].

Open FOAM es uno de los softwares más utilizados al momento de realizar una interacción fluido estructura, el cual utiliza el código C++, cuenta con una etapa de preprocesamiento y generación de la malla, condiciones de contorno y modelos de turbulencia RANS y LES, luego una etapa de resolver el problema y finalmente un post-procesamiento. Este software está disponible para los sistemas operativos Linux, MacOS y Windows [13].

ANSYS Fluent es otro software CFD en el que se puede modelar y simular interacciones multifísicas como la Interacción Fluido-Estructura (FSI), en donde se importa la geometría, se define la malla, condiciones de contorno, tipo de turbulencia RANS o LES y luego se analizan los resultados. Este software cuenta con una versión gratuita para estudiantes [14] [15].

Autodesk CFD corresponde a otro software de dinámica de fluidos computacional que cuenta con etapa de preprocesamiento, indicando materiales, condiciones de contorno y tipo de turbulencia, luego una etapa de mallado donde se selecciona el método de resolución y tipo de simulación, finalmente una etapa post- procesamiento para analizar los resultados. Este software cuenta con una interfaz intuitiva para el usuario, con visualización y análisis detallado del mallado y los resultados, además de la facilidad de exportar, importar e incorporar diseños de otros softwares de Autodesk, como Inventor, Fusion 360 y otros. Este software está disponible únicamente para Windows y cuenta con licencia para estudiantes.

MatLab Simulink es un cuarto software que sirve para diseñar y simular, con códigos C, C++, PLC, entre otros, permitiendo simular, analizar y verificar [16].

SAP2000, por sus siglas en inglés Structural Analysis Program, es un software comercial basado en el Método de Elementos Finitos (FEM) que permite dimensionar, modelar y analizar estructuras como puentes, edificios y estructuras industriales, este programa admite un

análisis estático y de cargas móviles como olas, sismos, temperatura y viento, como se puede ver en la Figura 4.1-1 el software tiene incorporadas algunas normas como el eurocódigo1. Junto con ello el software puede importar de otros programas como AutoCAD. Este software está disponible para el sistema operativo Windows y cuenta con niveles básico, plus, avanzado e ilimitado. [17].

*Figura 4.1-1:Configuraciones del viento según el euro código 1 para el software SAP2000.
Fuente: SAP2000, CSI spain [17].*

Otra tecnología relevante es Dlubal, un software de análisis y dimensionamiento de estructuras que cuenta con el programa RWIND, que simula numéricamente flujos de vientos, para ello utiliza el paquete Simple FOAM del software Open FOAM. RWIND Simulation, es un programa para simulaciones numéricas de flujo alrededor de objetos, generando las fuerzas y cargas de viento sobre la estructura, utiliza un modelo de CFD, una malla 3D, cuenta con distintos modelos de turbulencia, importa las estructuras desde otros softwares de análisis estructural de Dlubal como RFEM o RSTAB [18].

RWIND se ha diseñado para obtener resultados en un tiempo pequeño a partir de mallas gruesas. El proceso de simulación es utilizando un túnel de viento digital, con el que se logra determinar las cargas de viento específicas en la superficie de la estructura. En la Figura 4.1-2 se puede observar un ejemplo de aplicación del software RWIND 2 sobre la Torre Eiffel [18].

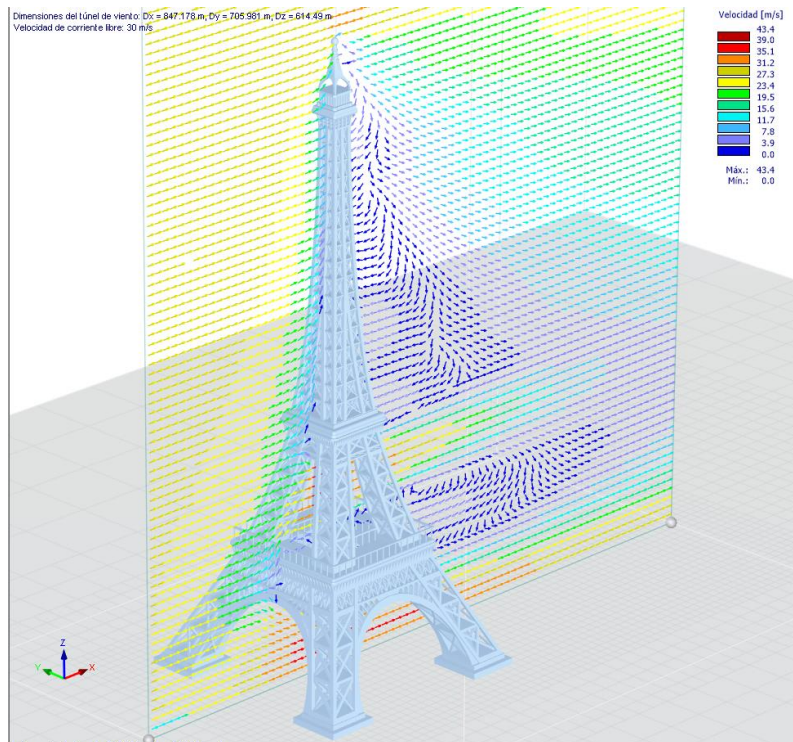


*Figura 4.1-2: Vectores de velocidad del flujo del viento modelado en la Torre Eiffel.
Fuente: RWIND, Dlubal [18].*

Este software cuenta con una versión básica para el cálculo de flujos de viento turbulentos, incompresible y estacionario mediante el software Open FOAM, con los modelos de turbulencia RANS $k-\varepsilon$ y $k-\omega$. También tiene una versión pro para flujos de vientos turbulentos incompresibles transitorios, esta versión además cuenta con el modelo de turbulencia LES. Para ambas versiones se debe comprar la licencia, y el programa no cuenta con una versión para estudiantes [18].

Por último, Helyx corresponde a un software de simulación CFD de código abierto para la ingeniería, cuenta con un algoritmo de malla automático y resuelve a partir del método de volúmenes finitos, tiene distintos modelos de turbulencia como RANS, URANS, DES y LES. Ha sido utilizado para el análisis de proyectos eólicos, en particular para caracterizar el rendimiento de las palas de los aerogeneradores, como se puede observar en la Figura 4.1-3. Helyx se basa en el código de Open FOAM, por lo que cuenta con mayores modelos de turbulencia y condiciones de contornos, además de optimizar el mallado. El software es compatible con los sistemas Linux y Windows, para obtener el software hay que comprar su licencia a través de Engys [19] [20].

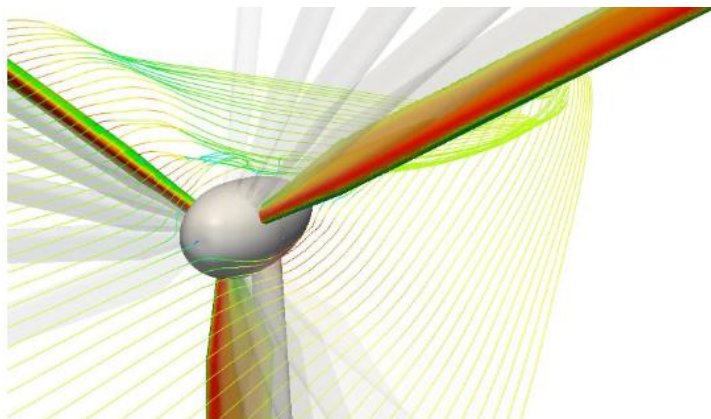


Figura 4.1-3: Aplicación del software Helyx en la energía eólica.
Fuente: HELYX [20].

4.2. Normas

El estándar internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 61400-12-1 sobre mediciones del rendimiento energético de turbinas eólicas productoras de electricidad proporciona una metodología para el análisis energético de las turbinas. También detalla la ubicación del mástil en el terreno y el montaje de los instrumentos de medición para las torres meteorológicas, como se puede apreciar en la imagen adjunta [21].

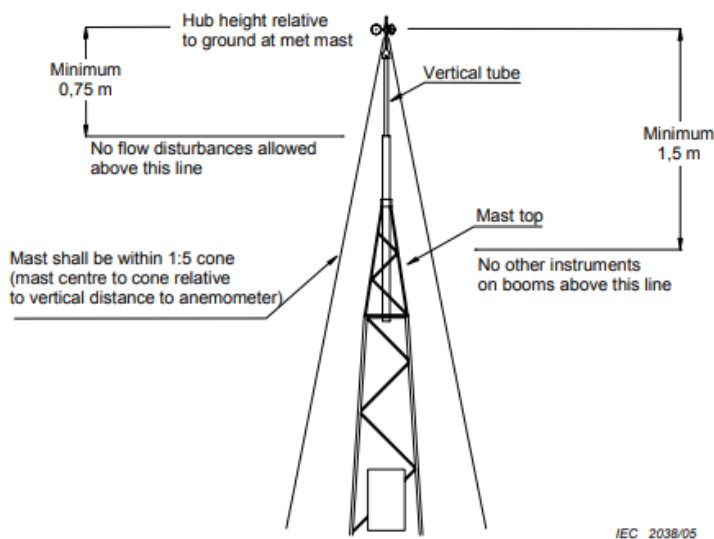


Figura 4.2-1: Ejemplo de instrumentos montados según los requisitos.
Fuente: Anexo G IEC 61400-12-1 [21].

La norma internacional ISO 4354 sobre las acciones del viento en estructuras, especifica los métodos para calcular las cargas de viento en el diseño de estructuras como edificios, torres, chimeneas y puentes, en particular establece dos métodos básicos para determinar analíticamente la carga del viento, el método de las cargas de viento máxima y velocidad media,

dentro de su anexo D presenta el método de cálculo y valores ilustrativos del coeficiente de fuerza de viento para estructuras de celosía, como se puede apreciar en la Figura 4.2-2 [22].

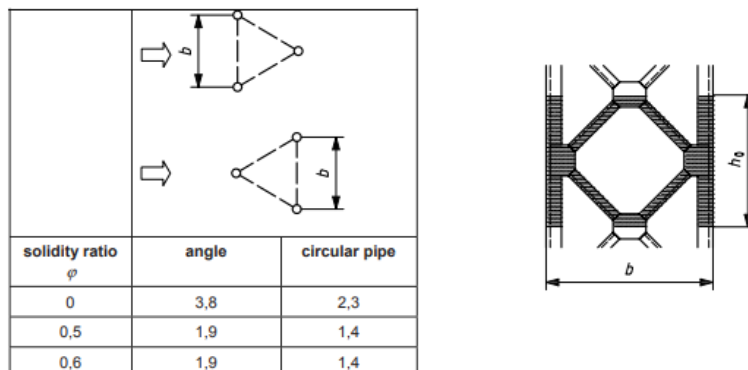


Figura 4.2-2: Coeficientes de fuerza de viento seccional para estructuras de celosía.
Fuente: Anexo D ISO4354 [22].

La norma Chilena NCh 432 : Cálculo de la acción del viento sobre construcciones , establece la forma para considerar la acción del viento en construcciones, en específico considera el efecto del viento en los ejes principales de la construcción de forma perpendicular a la superficie, en sus tablas presenta la presión básica para estructuras de 0 a 300 metros sobre el suelo, en particular para enrejados compuestos de barras perfiladas o tubulares, el área a considerar es la superficie de la barra proyectada en un plano vertical. Para el cálculo de la fuerza se considera un factor de forma que es distinto para torres de base cuadrada y triangular, el que se puede determinar a partir de las tablas presentes en la norma, como se presenta en la Figura 4.2-3 [23].

		Caras		
		I	II	III
Viento normal 	Repartición normal a la cara	1,6	0,3	0,3
	Repartición en dirección de la cara	0	0,52	0,52
Viento oblicuo *) 	Repartición normal a la cara	0,4	0,4	1,2
	Repartición en sentido de la cara	0,7	0,7	0

*) Para torres de tres patas K es siempre 1, de modo que estos valores sirven para torres de fierro y madera.

Figura 4.2-3: Factor de forma de estructuras en forma de torre o mástil, para estructuras de base triangular.
Fuente: NCh432 [23].

4.3. Investigaciones

Respecto a investigaciones y publicaciones, en 2011 en Cuba se analizó la vulnerabilidad de las torres atirantadas de telecomunicaciones ya que frecuentemente presentan fallas debido a cargas de viento y hielo. Para la modelación de la estructura de sección triangular se utilizó el programa de elementos finitos SAP2000, como se puede observar en la Figura 4.3-1, se consideraron como cargas permanentes el peso de la estructura y accesorios como antenas, para la carga del viento se utilizó la norma cubana NC-285. Se determinó que para fallos estructurales los elementos más críticos son las diagonales y la asimetría en los anclajes, además que los cables no son determinantes en este caso [24].

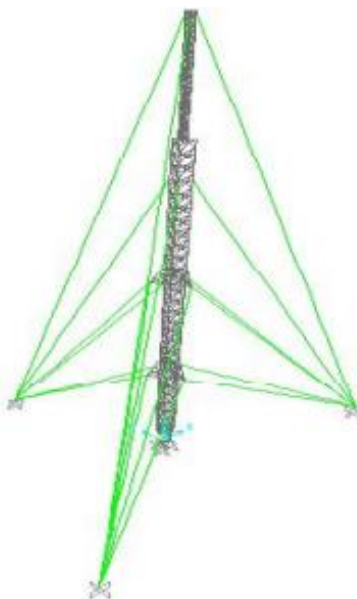


*Figura 4.3-1: Modelo computacional de la torre modelada en SAP2000.
Fuente: Estudio de torres atirantadas de telecomunicaciones [24].*

En 2014 se publicó un artículo de medición y simulación de campo de flujo alrededor de un mástil meteorológico triangular de celosía, en el cual se estudia la distorsión del flujo en un instrumento de medición. En el estudio se realizó un análisis numérico a través de la simulación CFD, en particular con el código de OpenFOAM, lo que se puede observar en la Figura 4.3-2. Junto con ello se hicieron mediciones en un túnel de viento con un modelo a escala de 1:20, los datos de ambos métodos concordaron en términos generales, determinando que se sobreestima la distorsión del flujo alrededor del mástil, según lo indicado en el anexo sobre los instrumentos de medición en la norma internacional IEC 61400-12-1 [11].

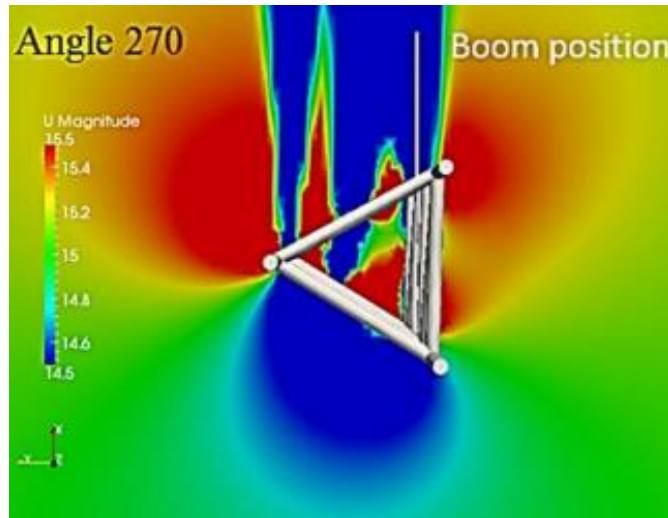


*Figura 4.3-2: Campo de velocidad pronosticado por OpenFoam para un ángulo de 270°.
Fuente: Informe de medición y simulación del campo de flujo alrededor de un mástil de celosía triangular [11].*

El año 2016 se analizó en México el impacto de las presiones dinámicas del viento en una torre de transmisión de electricidad, con el uso de CFD en particular con el programa Ansys Fluent, además de un análisis estático mediante el programa SAP2000. Con el objetivo de verificar las medidas en el diseño de las torres de transmisión, en particular se modeló una torre para líneas de transmisión de 400kV, con una altura de 52 metros y cuerpo piramidal cuadrado, el que se puede observar en la Figura 4.3-3. Se analizaron vientos en tres ángulos distintos; 0°, 45° y 90°. Se concluyó que los vientos a 45° son los que más daño presentan para la estructura [25].

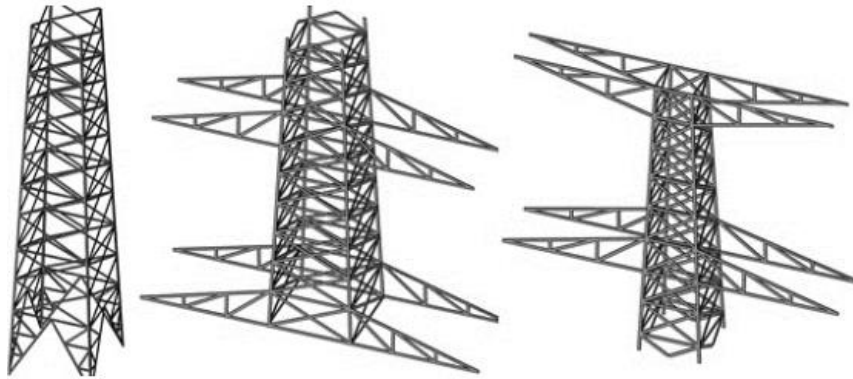


*Figura 4.3-3: Vista isométrica de las secciones de la torre analizadas en CFD.
Fuente: Trabajo de grado Universidad Autónoma de México [25].*

En 2019 en Colombia se realizó un estudio de diseño estructural de torres de telecomunicaciones autosoportadas, con el objetivo de elaborar una guía de diseño estructural para las torres de 20, 30 y 40 metros, las que se pueden observar en la Figura 4.3-4. Para ello se utilizan los softwares AutoCAD y SAP2000 donde se evalúan los esfuerzos del viento en la

estructura y el efecto de los sismos. Se deduce que la fuerza del viento afecta considerablemente las estructuras y que priman en el diseño [26].

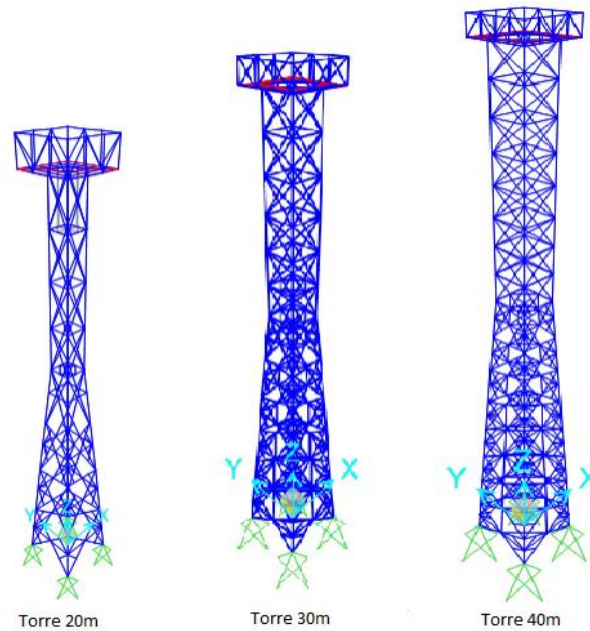


*Figura 4.3-4: Modelamiento matemático de elementos finitos en software SAP2000.
Fuente: Trabajo de grado Universidad Católica de Colombia [26].*

El año 2019 se publicó un estudio de métodos de dinámica de fluidos computacional para la evaluación de recursos eólicos, analizando el impacto de un mástil de telecomunicaciones en el campo de flujo donde se encuentra, a partir del software OpenFOAM. En particular el mástil tiene una altura de 92 metros y se analizaron 12 ángulos de ataque diferentes para la estructura, como se puede observar en la Figura 4.3-5. Se determina que la principal desventaja de los mástiles de comunicaciones en comparación a los meteorológicos es la presencia de líneas de cable dentro del mástil de celosía que ralentiza la velocidad del viento en más de un 1,5%. Pero que es suficiente con utilizar dos anemómetros distanciados al menos por 120° [27].

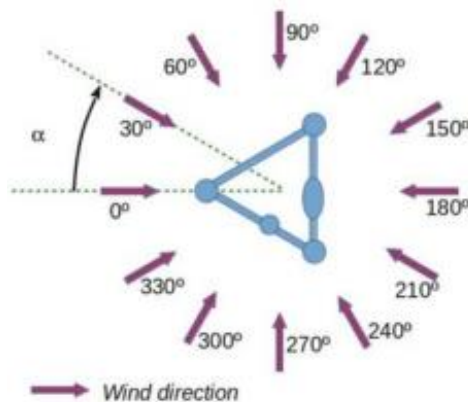


*Figura 4.3-5: Ángulos de ataques estudiados en el mástil de comunicaciones.
Fuente: Informe de métodos de CFD para la evaluación de recursos eólicos [27].*

En 2020 se realizó un análisis sobre 50 publicaciones y estudios realizados de los efectos de distorsión a un mástil meteorológico, desde 1941 hasta 2019, en un principio dominaba la experimentación en campo y túneles de viento, luego del 2005 con la implementación de la norma IEC domina el estudio por CFD y en los últimos años aumentó el uso de la tecnología LiDAR. A partir de esto se concluye que la norma IEC no evalúa el impacto de turbulencia que produce la torre y dentro de los documentos revisados algunos indican que el impacto de turbulencia es insignificante, mientras que otro lo reconocen como un problema de flujo atmosférico. Por lo que mencionan que IEC sirve como una guía, pero no como una descripción precisa para el flujo local alrededor y a través de una torre meteorológica [28].

El año 2021 se publicó un documento técnico del análisis de vientos para una torre de celosía triangular de 110 metros de alto, la que se puede ver en la Figura 4.3-6. Se analiza la carga del propio peso de la estructura y la acción del viento utilizando un modelo estático y dinámico mediante FEM, en el estudio se concluye que el análisis estático no es satisfactorio para las acciones del viento, la cual corresponde a la carga más crítica [10].

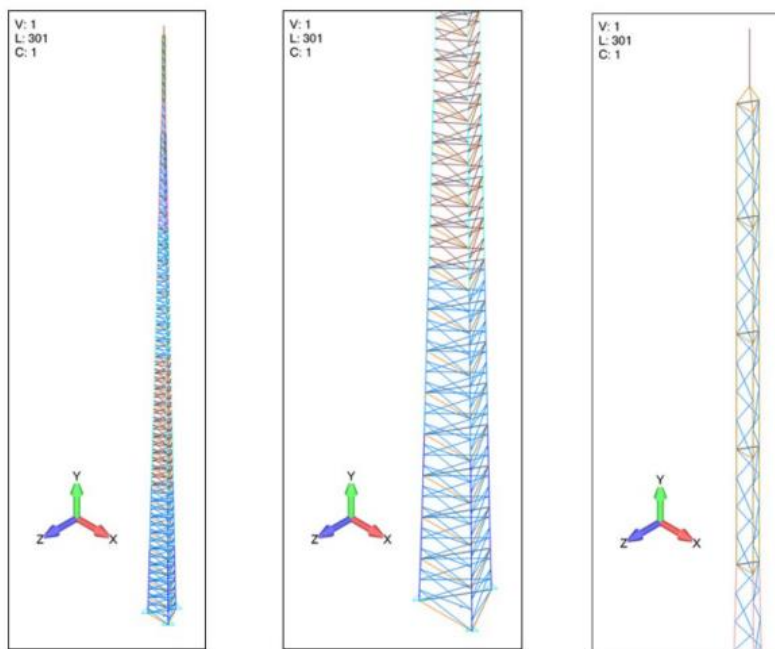


*Figura 4.3-6: Geometría de la torre de 110m, visión global, detalle parte inferior, detalle parte superior.
Fuente: Estudio de enfoque estático y dinámico para análisis de ráfagas de viento [10].*

5. Marco Teórico

5.1. Conceptos y Fenómenos

5.1.1 El Viento

El flujo de gases o viento es la corriente de aire que se produce en la atmósfera debido a las diferencias de presión o por las diferencias de temperaturas provocadas por la radiación solar sobre la tierra.

El viento es caracterizado por un vector y magnitud; dirección y velocidad. Esta última mide el desplazamiento de aire en un lugar y momento determinado, mientras que la dirección mide la componente horizontal de la velocidad del viento y se define como la orientación o trayectoria desde donde sopla o proviene la corriente de aire [29].

En la mecánica de fluidos, los flujos se clasifican según su tipo de movimiento en laminar o turbulento, un flujo laminar corresponde a un fluido con un movimiento suave y ordenado, mientras que un flujo es turbulento cuando el movimiento del fluido es fluctuante y agitado.

La turbulencia en el viento es una variación o agitación atmosférica, lo que altera abruptamente la dirección del viento y genera fluctuaciones en la velocidad. Existen dos causas principales por las que se genera la turbulencia en el viento, una de ellas es la fricción, que se crea debido al movimiento horizontal del aire y el roce con perturbaciones de característica geográfica u obstáculos como edificios y otras infraestructuras. Mientras que la otra causa corresponde a los efectos térmicos, asociado a los movimientos verticales del aire, su origen proviene de la transferencia de calor de forma convectiva y el calentamiento desigual en la tierra y las capas que la rodean.

La capa límite es la zona en que el flujo varía y ajusta su velocidad debido al contacto con un cuerpo o superficie y donde se aprecian los efectos viscosos, esta puede ser laminar o turbulenta como se aprecia en la Figura 5.1.1-1.

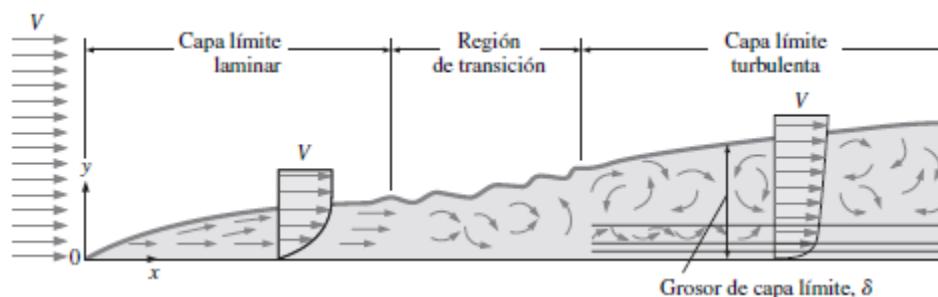


Figura 5.1.1-1: Desarrollo de la capa límite sobre una placa plana.
Fuente: Libro Mecánica de Fluidos, Cengel & Cimbala [30].

La capa límite de la atmósfera o capa límite planetaria, es la zona más baja de la tropósfera, con una altura aproximadamente de un kilómetro, en donde las características de la atmósfera

están fuertemente influenciadas por el contacto con la superficie terrestre, en particular la rugosidad del terreno, y ciertas propiedades físicas como la velocidad y humedad relativa pueden cambiar rápidamente en el espacio y en la escala de tiempo, por ello la capa límite se caracteriza por grandes variaciones diurnas y movimientos turbulentos [31] - [32].

5.1.2 Estratificación Térmica Atmosférica

Una característica importante de la atmósfera es su estabilidad, que se define como la tendencia a resistir un movimiento vertical o a suprimir las turbulencias existentes debido a la flotabilidad de una celda de aire seco que se supone adiabática. La suposición de celda adiabática se puede considerar ya que el proceso de convección de calor es tan rápido o pequeño que se desprecia el traspaso de calor y energía.

La estabilidad atmosférica se puede clasificar en estable, inestable y neutra, estas ocurren debido al calentamiento y enfriamiento de la superficie por presencia o ausencia del sol y su radiación, lo que genera variaciones de temperatura, condicionando movimientos verticales.

La estratificación es estable cuando el aire caliente comienza a ascender y enfriarse, siendo más frío que el aire circundante, generando el descenso de la celda debido a la flotabilidad, es decir se suprime el movimiento ascendente volviendo a su posición inicial.

El fenómeno de estratificación inestable ocurre cuando el calentamiento de la superficie asciende y se expande, enfriándose adiabáticamente sin llegar al equilibrio térmico, por lo que la masa de aire caliente sigue subiendo, creando movimientos verticales que generan mezcla en la atmósfera, resultando una capa límite gruesa con remolinos turbulentos de gran escala.

La estratificación neutra, corresponde a la situación idealizada del enfriamiento ya que a medida que la masa de aire asciende permanece en equilibrio térmico con su entorno.

En particular se puede clasificar el tipo de estratificación para una celda de aire seco que se desplaza de una altura z_1 , a una altura z_2 , con una variación del potencial de temperatura, como se aprecia en la Figura 5.1.2-1, por lo que los criterios de estratificación corresponden a;

$$\frac{\delta\theta}{\delta z} < 0, \text{ inestable}$$

$$\frac{\delta\theta}{\delta z} = 0, \text{ neutra}$$

$$\frac{\delta\theta}{\delta z} > 0, \text{ estable}$$

El potencial de temperatura θ se define como la temperatura que tendría un volumen de aire al ser expandido o comprimido de forma adiabática a una presión de referencia, generalmente de 100 kPa.

El gradiente de temperatura $\Delta T / \Delta z$ varia para cada tipo de estratificación térmica, en particular T_d corresponde al gradiente adiabático de aire seco y tiene un valor de $-10^\circ\text{C}/\text{Km}$ mientras que el gradiente de aire saturado T_s tiene un valor de $-5,5^\circ\text{C}/\text{Km}$ [33] - [34], para cada tipo de estratificación térmica se tiene;

$$T_s < \frac{\Delta T}{\Delta z} < T_d, \text{ para una atmosfera inestable}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = T_d, \text{ para una atmosfera de estabilidad neutral}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} \leq T_s, \text{ para una atmosfera absolutamente estable o inversión térmica}$$

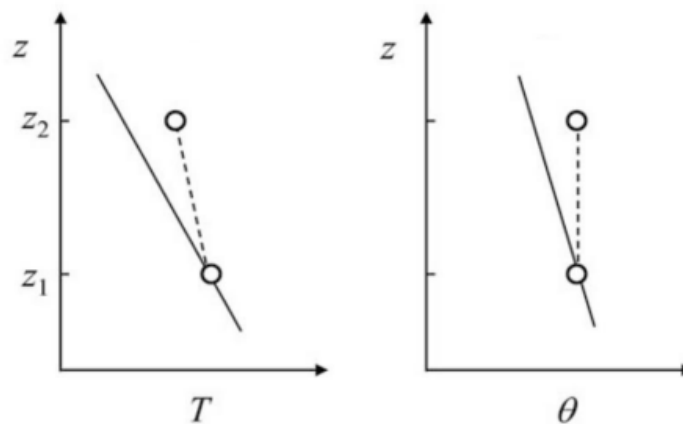


Figura 5.1.2-1: Perfil de temperatura y potencial de temperatura para la determinación de la estabilidad del aire.

Fuente: Libro Fundamentos de la capa límite meteorológica [31].

La variación en el tiempo del viento se puede clasificar en interanual, anual, diurna y variación a corto plazo. La variación interanual es una variación de la velocidad del viento que logra apreciarse en escalas superiores a un año, se recomiendan cinco años de datos para obtener una velocidad promedio anual confiable; la variación anual está representada en los cambios estacionales; la variación diurna se logra apreciar en la Figura 5.1.2-2 en las distintas horas del día y se debe al calentamiento no uniforme de la superficie terrestre debido a la radiación; por último en las variaciones a corto plazo, en un intervalo de 10 minutos aproximadamente, se logra identificar la turbulencia y ráfagas de viento [35].

Debido a la rotación de la tierra y presencia del sol se genera un ciclo diario de calentamiento a causa a la radiación solar generando flujos de calor sensible y latente en la capa límite atmosférica, en general durante el día se genera una capa de mezclado estáticamente inestable debido a una temperatura superficial más cálida que el aire adyacente, caracterizándose con vientos ligeros y presencia de turbulencia, mientras que durante la noche se presencia una capa límite estáticamente estable que corresponde a una superficie más fría que las parcelas de aire

con turbulencia débil o inexistente, además en los periodos de transición existe de forma breve y difícil de apreciar una atmosfera neutra [36].

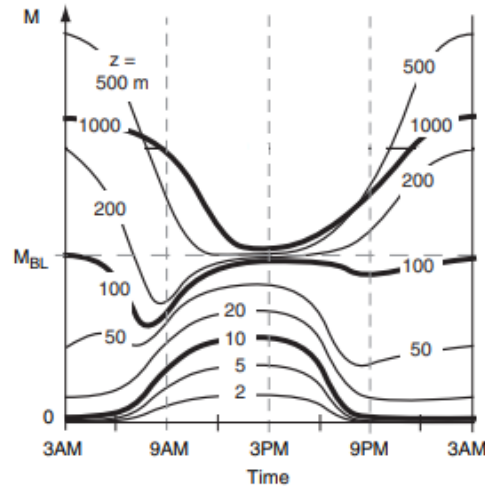


Figura 5.1.2-2: Evolución típica de la velocidad del viento (M) en la capa límite atmosférica a diferentes alturas.

Fuente: Libro *Practical Meteorology An algebra- based suvey of atmospheric science* [34].

Por lo que la velocidad del viento en la capa límite atmosférica se puede aproximar para las distintas estratificaciones, como se observa en la Figura 5.1.2-3, siendo la estratificación inestable un perfil logarítmico con menores velocidades, el perfil estable con mayores velocidades y la estratificación neutra entre medio de ambas.

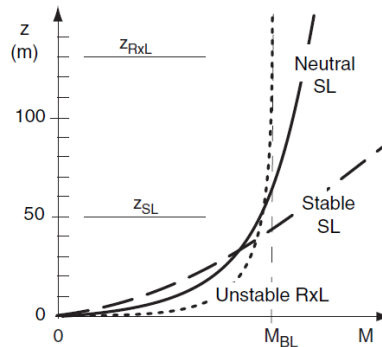


Figura 5.1.2-3: Perfiles de velocidad en los diferentes tipos de capa límite atmosférica.

Fuente: Libro *Practical Meteorology An algebra- based suvey of atmospheric science* [34].

La velocidad para una atmosfera neutra aumenta de forma aproximada logarítmicamente, dependiendo de la rugosidad de la superficie, lo que se calcula mediante las ecuaciones

$$M(z) = \frac{u_*}{k_v} \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$u_* = \frac{k_v \cdot M_{10}}{\ln \frac{z_{10}}{z_0}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde

u_* : velocidad de fricción.

k_v : Constante de Von Karman = 0,4.

z_o : longitud de rugosidad aerodinámica.

z_{10} : altura de referencia para la medición de vientos superficiales; 10 m.

M_{10} : velocidad del viento a 10m.

Para la atmosfera estable el perfil de velocidad se puede definir a partir de la ecuación 3

$$M(z) = \frac{u_*}{k_v} \ln \frac{z}{z_o} + 6 \frac{z}{L} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$L = \frac{-u_*^3}{k_v \cdot (g/T_v) \cdot F_{Hsfc}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde

L: Longitud de Obukhov.

F_{Hsfc} : Flujo de calor cinemático superficial.

T_v : Temperatura absoluta.

Mientras la velocidad para la atmosfera inestable se determina mediante la ecuación 5

$$M(z) = M_{BL} \cdot \zeta_*^{1/6} \cdot e^{1/4(1-\zeta_*^{1/2})} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\zeta_* = 2 \cdot \frac{z}{z_i} \cdot \left(\frac{w_*}{u_*} \right)^{3/4} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$w_* = \left[\frac{g}{T_v} \cdot z_i \cdot F_{Hsfc} \right]^{1/3} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

M_{BL} : Velocidad promedio en el medio de la capa mixta.

z_i : Profundidad de la capa de mezcla.

ζ_* : Altura adimensional de la capa inestable de mezclado.

w_* : Velocidad de Deardorff.

5.1.3 Análisis Aero Estructural

Una torre meteorológica es una estructura vertical compuesta de cerchas, como se aprecia en la Figura 5.1.3-1, que soportan instrumentos de medición para caracterizar el viento, estos mástiles se pueden encontrar en estaciones meteorológicas y también son utilizadas en proyectos eólicos.

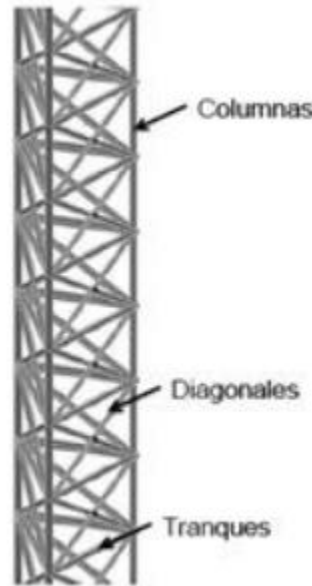


Figura 5.1.3-1: Componentes de una torre.
Fuente: Estudio de torres atirantadas de telecomunicaciones [24].

La interacción fluido estructura es un estudio multifísico enfocado al comportamiento de un cuerpo sólido rodeado o sumergido en un flujo de fluido, por ello combina disciplinas como la dinámica de fluidos y la mecánica estructural, para poder determinar las consecuencias de las cargas como presiones o campos térmicos del flujo en la estructura.

Cuando un fluido es obstaculizado se desvía y rodea o atraviesa el cuerpo que estorba su trayectoria, lo que produce presiones sobre el cuerpo sólido. La cara expuesta directamente al flujo es denominada cara de barlovento, mientras que la cara de sotavento es la opuesta donde las estelas de flujo se separan generando succiones, estos efectos generan una fuerza de arrastre sobre el objeto. Además, la perturbación que ocasiona el cuerpo al flujo puede formar vórtices, produciendo vibraciones transversales o perpendiculares a la dirección de flujo de viento [37].

La presión dinámica del viento sobre un obstáculo depende de la dirección, velocidad y densidad del viento, además de las dimensiones y ubicación del objeto o estructura.

5.2. Ecuaciones Matemáticas

5.2.1 Análisis adimensional del viento

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas de fricción, con el cual se caracterizan los flujos y clasifican en laminares, turbulentos o en transición.

$$Re = \frac{VL_c}{\nu} \quad (\text{Ec. 8})$$

V : Velocidad del flujo.

L_c : Largo característico.

ν : Viscosidad cinemática del fluido.

El número de Richardson (R_i), también es un número adimensional, este parámetro cuantitativo de estabilidad expresa la relación entre el término de flotabilidad y corte de flujo.

$$R_i = \frac{\frac{g}{\theta} \frac{\delta \bar{\theta}}{\delta z}}{\left(\frac{\delta \bar{u}}{\delta z}\right)^2 + \left(\frac{\delta \bar{v}}{\delta z}\right)^2} \quad (\text{Ec. 9})$$

g : Constante de aceleración gravitacional.

θ : Potencial medio de temperatura.

$\frac{\delta \bar{u}}{\delta z}$: Diferencia de velocidad media en el eje x en relación con la diferencia de altura.

$\frac{\delta \bar{v}}{\delta z}$: Diferencia de velocidad media en el eje y en relación con la diferencia de altura.

Con el valor del número de Richardson se logra determinar la importancia de la flotabilidad, ya que para el caso de estabilidad la flotabilidad es dominante, por sobre el corte de flujo.

$$R_i < 0, \text{ inestable}$$

$$R_i = 0, \text{ neutral}$$

$$R_i > 0, \text{ estable}$$

Para determinar la compresibilidad del flujo se utiliza el número adimensional Mach (Ma), con el cual se pueden clasificar los flujos como incompresibles o compresibles. Si la densidad permanece constante en todo el flujo, se dice que el movimiento del fluido es incompresible, para ello el número de Mach debe ser menor a 0.3.

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (\text{Ec. 10})$$

c : Velocidad del sonido en las condiciones del flujo.

En particular para condiciones estándares la velocidad del viento debe ser mayor a 100 [m/s] para que se considere la compresibilidad del flujo, por lo que a pesar de que el fluido es compresible, para esta investigación dado las velocidades, se considerará incompresible.

Un parámetro importante es el número adimensional de Courant Friedrichs-Lewy (CFL), el cual es utilizado en las simulaciones CFD para determinar estabilidad de simulación, controlando la resolución temporal, asegurando el paso de tiempo requerido para resolver y analizar en cada nodo el desarrollo o paso del flujo.

Es recomendable un número de Courant igual a uno, ya que números muy grandes tienden a inestabilidad, mientras que números muy pequeños tienden a tiempos excesivos de solución.

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 11})$$

La fuerza de arrastre (F_D) se presenta cuando un cuerpo sólido se enfrenta a un fluido en movimiento, la fuerza actúa sobre el sólido en la dirección del flujo y depende de la geometría del cuerpo.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot C_D \quad (\text{Ec. 12})$$

ρ : Densidad del fluido.

A: Área de referencia del sólido.

C_D : Coeficiente de arrastre.

La fuerza de sustentación (F_L) corresponde a la componente de la presión y de las fuerzas de corte que actúan sobre el cuerpo en dirección normal al flujo, cuando un cuerpo sólido se enfrenta a un flujo.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot C_L \quad (\text{Ec. 13})$$

C_L : Coeficiente de sustentación.

El análisis dimensional proporciona leyes de escala útiles para el diseño, estudio y creación de modelos y prototipos, con el propósito de variar la escala del ejemplar.

Un ejemplar y su representación son geoméricamente semejantes cuando todas sus dimensiones en las coordenadas cartesianas tienen la misma relación de escala lineal.

La semejanza cinemática ocurre cuando existe una relación lineal de longitudes y además una relación entre tiempos homólogos, es decir una relación de escala de tiempos, en particular la relación de velocidades puede ser obtenidas mediante la igualdad de Reynolds;

$$Re_p = \frac{v_p L_{cp}}{v_p} = \frac{v_m L_{cm}}{v_m} = Re_m \quad (\text{Ec. 14})$$

Un caso particular es para flujo sin fricción y sin superficie libre de fluido incompresible, como el caso de la Figura 5.2.1-1, de flujo no viscoso externo alrededor de un objeto

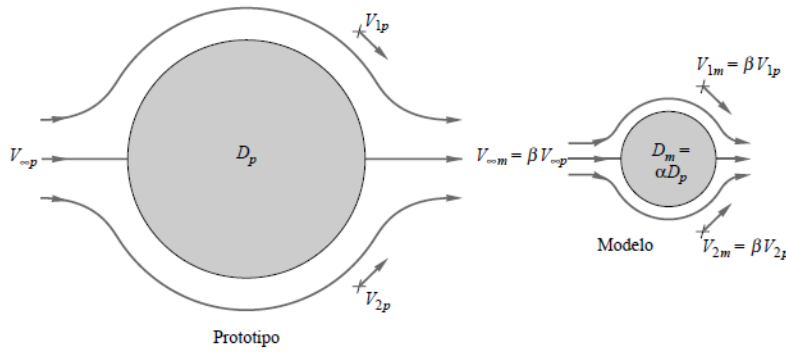


Figura 5.2.1-1: Flujo no viscoso sin superficie libre a baja velocidad.
Fuente: Libro Mecánica de Fluidos [38].

Por último, existe la semejanza dinámica en la que existe escala longitudinal, de tiempo y de fuerzas o masa, para cumplir la semejanza en flujos compresibles se debe cumplir igualdad entre el número de Reynolds y Mach, mientras que en flujo incompresible sin superficie libre solo se debe cumplir que el número de Reynolds del modelo y prototipo deben ser igual [38].

5.2.2 Ecuaciones del flujo

La intensidad de turbulencia corresponde a la medida de fuerzas o magnitud de fluctuaciones turbulentas y se define con la ecuación 15, como la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad media del viento, por lo que indica la desviación de las propiedades medias del flujo.

$$IT = \frac{\sigma_u}{U} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$U = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} u_i \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N_s-1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - U)^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

U : Velocidad media del viento.

σ_u : Desviación estándar de la velocidad del viento.

N_s : Número de muestra para cada intervalo de tiempo.

A continuación, se presentan las ecuaciones de Navier Stokes, conformadas por la conservación de masa, conservación de movimiento de flujo y conservación de energía. La conservación de masa para un flujo incompresible de forma diferencial en coordenadas cartesianas está descrita por la ecuación 18, también llamada ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde

u : componente de velocidad en el eje x.

v : componente de velocidad en el eje y.

w : componente de velocidad en el eje z.

La conservación de cantidad de movimiento para un flujo incompresible, en sus tres coordenadas cartesianas corresponden a:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde

∂P : Variación de presión.

μ : Viscosidad dinámica del fluido.

La ecuación de energía, ecuación 22, establece que la tasa de cambio de energía de una partícula de fluido es igual a la tasa de adición de calor, más la tasa de trabajo realizado sobre la misma partícula. La energía E de un fluido se define como la suma de la energía térmica interna, la energía cinética y la de una fuente de energía externa S_E .

$$\rho \frac{DE}{Dt} = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k \frac{\delta T}{\delta z} \right) \right] + S_E \quad (\text{Ec. 22})$$

$$\begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\delta u}{\delta x} & \mu \left(\frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right) & \mu \left(\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right) \\ \mu \left(\frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right) & 2\mu \frac{\delta v}{\delta y} & \mu \left(\frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \right) \\ \mu \left(\frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right) & \mu \left(\frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \right) & 2\mu \frac{\delta w}{\delta z} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde

k : Conductividad térmica

5.2.3 Modelos de Turbulencia

Se presentan los modelos de turbulencia RANS $k-\varepsilon$ estándar, $k-\omega$ y Shear Stress Transport $k-\omega$, cada uno de ellos incorpora dos ecuaciones de transporte para la resolución de las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), enfocándose en la energía cinética turbulenta.

En particular relaciona el modelo $k-\varepsilon$ estándar relaciona la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de esta energía (ε) con la viscosidad dinámica.

$$\mu_t = 0.09 \cdot \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 24})$$

En las ecuaciones de transporte del modelo $k-\varepsilon$ estándar, se consideran propiedades de turbulencia por convección y difusión como se presenta a continuación:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \cdot \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{yx} & S_{zx} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{zy} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta U}{\delta x} + \frac{\delta u'}{\delta x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta V}{\delta x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u'}{\delta y} + \frac{\delta v'}{\delta x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\delta U}{\delta z} + \frac{\delta W}{\delta x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u'}{\delta z} + \frac{\delta w'}{\delta x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta V}{\delta x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u'}{\delta y} + \frac{\delta v'}{\delta x} \right) & \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{\delta v'}{\delta x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\delta V}{\delta z} + \frac{\delta W}{\delta y} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v'}{\delta z} + \frac{\delta w'}{\delta y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\delta U}{\delta z} + \frac{\delta W}{\delta x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u'}{\delta z} + \frac{\delta w'}{\delta x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\delta V}{\delta z} + \frac{\delta W}{\delta y} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v'}{\delta z} + \frac{\delta w'}{\delta y} \right) & \frac{\delta W}{\delta x} + \frac{\delta w'}{\delta x} \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde

$$\sigma_k = 1.00$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.30$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92$$

u' : Velocidad fluctuante en el eje x.

v' : Velocidad fluctuante en el eje y.

w' : Velocidad fluctuante en el eje z.

En la ecuación 25 se presenta la relación de la energía cinética, en particular su tasa de cambio, más el transporte por convección, es igual a la difusión más tasa de producción y menos la destrucción, los mismos términos son correspondientes para la ecuación 26 para la tasa de disipación.

Este modelo es el más utilizado en la industria por su simplicidad y estabilidad numérica, para flujos con grandes números de Reynolds y para regiones lejos de superficies.

En el modelo k- ω , propuesto por Wilcox, ω corresponde a la frecuencia de turbulencia definida por la ecuación 28.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\beta^* \cdot k} \quad (\text{Ec. 28})$$

Donde β^* es una constante con un valor de 0,09.

Este modelo modifica la ecuación 26 de tasa de disipación de energía, reemplazándola por un balance de vorticidad turbulenta generando las ecuaciones de transporte 29 y 30.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (\text{Ec. 29})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad } \omega \right] + \gamma_1 \cdot \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\delta U_i}{\delta x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \cdot \rho \omega^2 \quad (\text{Ec.30})$$

$$P_k = 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\delta U_i}{\delta x_j} \delta_{ij} \quad (\text{Ec.31})$$

Donde

$$\begin{aligned} \sigma_k &= 2.0 \\ \sigma_\omega &= 2.0 \\ \gamma_1 &= 0.553 \\ \beta_1 &= 0.075 \end{aligned}$$

Este modelo no posee la dificultad del anterior en regiones cercanas a superficies, por lo que tiene mejores resultados para flujos alrededor de obstáculos complejos.

El modelo híbrido entre el modelo k- ε y el modelo k- ω , corresponde al modelo Shear Stress Transport (SST) k- ω , utilizando el primer modelo en regiones lejanas a la pared, donde la turbulencia ya está desarrollada, y el segundo método en regiones cercanas de la pared. Para este modelo se mantienen las ecuaciones 29 y 30, incorporando la siguiente ecuación de transporte.

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \text{grad } \omega \right] + \gamma_2 \cdot \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\delta U_i}{\delta x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \cdot \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\delta k}{\delta x_k} \frac{\delta \omega}{\delta x_k} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\omega,1} &= 2.0 \\ \sigma_{\omega,2} &= 1.17 \\ \gamma_2 &= 0.44 \\ \beta_2 &= 0.083 \end{aligned}$$

5.2.4 Método de Solución de las Ecuaciones

El método de diferencias finitas es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales en donde se aproximan las derivadas a partir de diferencias discretas, para ello se discretiza el problema, generando la malla, se aproximan las condiciones de contorno y se transforma el problema en una ecuación matricial, para luego ser resuelto.

Método de elementos finitos es un método numérico para resolver de forma aproximada, ecuaciones diferenciales parciales en donde se divide la zona de solución por una malla, en distintos pequeños elementos de distintas geometrías llamados elementos finitos.

El método de volúmenes finitos es una técnica numérica que transforma las ecuaciones diferenciales parciales sobre volúmenes diferenciales, en ecuaciones algebraicas discretas sobre volúmenes finitos.

El primer paso del método de volúmenes finitos es dividir el dominio en volúmenes de control discretos, rodeando cada nodo por una celda o poliedro, apreciarse en la Figura 5.2.4-1 el nodo P contenido en una celda cúbica, tiene 6 nodos adyacentes correspondiente a los nodos del este, oeste, norte, sur, arriba y abajo (E,W,N,S,T,B).

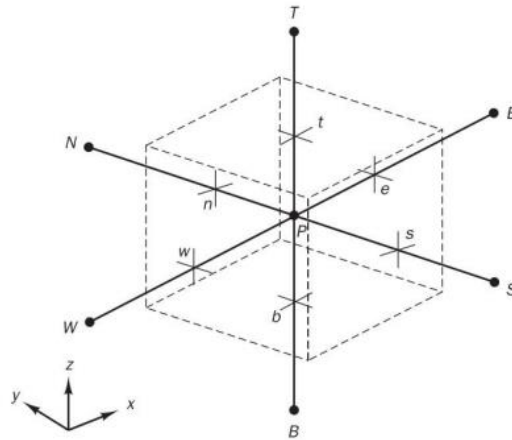


Figura 5.2.4-1: Cuadrícula tridimensional para un nodo.

Fuente: Libro Introducción a la Dinámica computacional de fluidos método de volúmenes finitos [39].

El método de volúmenes finitos, o por sus siglas en inglés FVM, no resuelve directamente las ecuaciones diferenciales parciales, si no que las integra sobre cada volumen de control, las aproxima y resuelve. Este método es el preferido para el CFD ya que se aplica la ecuación de conservación a cada volumen de control, además que la aplicación de las condiciones de contorno no son invasivas ya que la variable incógnita se encuentra en el nodo central de celda y no en sus caras.

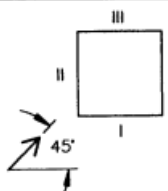
5.2.5 Ecuaciones de Parametrización

Según la norma chilena NCh432, la fuerza por unidad de superficie para estructuras enrejadas en forma de torre o mástil se calcula como:

$$P_{estructura} = \frac{u_{resultante}^2}{16} \cdot C \quad [\text{kgf/m}^2] \quad (\text{Ec. 33})$$

$u_{resultante}$: es la velocidad máxima instantánea del viento medida en m/s

C: corresponde al factor de forma para las distintas torres que varían según la forma de base de la torre, el material y el ángulo de ataque del viento. Para definir su valor se adjunta la Figura 5.2.5-1 para torres de bases cuadradas y anteriormente ya se presentó la Figura 4.2-3 para torres de bases triangulares.

		I	II	III	IV
Viento normal 	Componente normal a la cara	1,6	0	1,2	0
	Componente paralela a la cara	0,0	0	0,0	0
Viento oblicuo 	Componente normal a la cara	0,56 K *)		0,42 K *)	
	Componente paralela a la cara				

*) K = 1,1 en torres de acero;
K = 1,2 en torres de madera.

Figura 5.2.5-1: Factor de forma de estructuras en forma de torre o mástil, para estructuras de base cuadrada.

Fuente: NCh432 [23].

6. Metodología de simulación

Con la finalidad de evaluar aeroestructuralmente el diseño de la torre meteorológica telescópica móvil, se estudiará desde la dinámica computacional de fluidos la interacción fluido estructura del mástil de 50 metros con la capa atmosférica de la tierra. Para ello se realizará un estudio del estado del arte, en específico de simulaciones computacionales de torres de estructura reticular, junto con analizar teóricamente la fenomenología del viento y sus consideraciones para el análisis.

Luego de definir el modelo de turbulencia a utilizar, se procede a simular numéricamente un mástil de 50 metros convencional con condiciones de incompresibilidad y flujo seco, inicialmente para la condición idealizada de capa límite neutra y luego sensibilizando la estratificación térmica e intensidad de turbulencia.

Posterior al análisis de resultados e incorporar mejoras en el proceso de simulación se procederá a simular el diseño de torre meteorológica telescópica, analizando la interacción fluido estructura y examinando la totalidad del mástil, en forma extendida y retraída.

Finalmente se espera determinar la magnitud de presión variable que ejerce el viento sobre la torre, en distintas alturas, para completar el análisis estático del diseño del mástil telescópico.

Para llevar a cabo este trabajo se requiere la licencia de estudiante del Software Autodesk y un computador competente para realizar las distintas simulaciones, el que contará con más de 12 escenarios considerando los diferentes ángulos de ataque del viento, la variación de turbulencia y las distintas estratificaciones atmosféricas.

De forma general se presenta el plan de trabajo en 5 actividades globales, desglosadas en subtarefas necesarias para cumplir con los objetivos.

1. Estudiar la fenomenología de la interacción del viento con torre meteorológicas.
 - 1.1. Investigar estudios realizados en los últimos años sobre el impacto del flujo en mástiles.
 - 1.2. Conocer los distintos softwares utilizados para simulación computacional.
 - 1.3. Estudiar los fenómenos y condiciones del viento.
 - 1.4. Capacitarse para la utilización del software.
2. Simular numéricamente el flujo de la capa atmosférica de superficie en torno a una torre meteorológica de 50 metros, sensibilizando la velocidad media a través de la estratificación térmica, junto con la intensidad de turbulencia.
 - 2.1. Realizar un modelo simple de 50 metros.
 - 2.2. Generar simulación para el mástil en una capa límite idealizada.
 - 2.3. Crear simulaciones variando la turbulencia y estratificación térmica.
3. Comparar los resultados numéricos con observaciones en una torre meteorológica real de 50 metros.
 - 3.1. Analizar los resultados obtenidos en el software para las simulaciones realizadas.
 - 3.2. Comparar los resultados.

- 3.3. Modificar parámetros o elementos de la simulación.
4. Evaluar numéricamente la interacción del viento turbulento con estratificación térmica variable sobre una torre meteorológica telescópica.
 - 4.1. Simular numéricamente el mástil telescópico en condiciones idealizadas.
 - 4.2. Variar en las simulaciones a la estratificación térmica.
 - 4.3. Analizar los resultados, analizando la reacción de la estructura.
5. Recomendar la forma de instalación y anclaje de la torre meteorológica telescópica
 - 5.1. Analizar la mejor alternativa de anclaje e instalación.

6.1. Parámetros y condiciones de contorno

Se simulará una torre reticulada de sección cuadrada con barras circulares de acero al carbono y sin rugosidad, situada en una superficie horizontal con una longitud de rugosidad aerodinámica de 0,1 metros en representación de una zona agrícola con cultivos bajos y escasos obstáculos [34]. Para ello se creará un túnel de viento, considerando el alto característico (A_c) de la torre, con dimensiones de referencia;

- Ancho: 0,1 veces el alto característico
- Alto: 2 veces el alto característico
- Profundidad: 3 veces el alto característico

Las condiciones de contorno a utilizar en el túnel de viento son,

- Entrada: Perfil de viento atmosférico (Cara azul)
- Salida: Presión relativa cero (Cara negra)
- Laterales: Simetría (Caras lila)
- Superior: Simetría (Cara lila)
- Inferior: Velocidad cero (Cara blanca)

Por lo que el túnel de viento con sus dimensiones y condiciones de contorno se pueden apreciar en la siguiente figura.

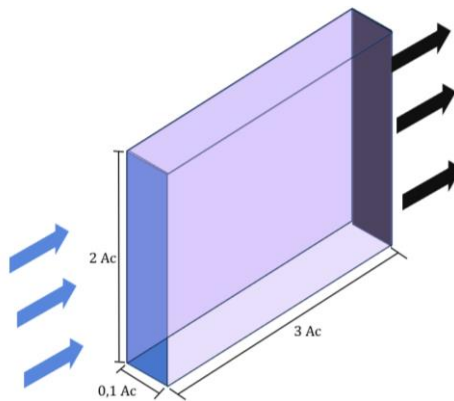


*Figura 6.1-1: Características túnel de viento para simulaciones.
Fuente: Creación propia.*

En particular los tres distintos perfiles de velocidad como condición de entrada, corresponden a las estratificaciones inestable, neutra y estable.

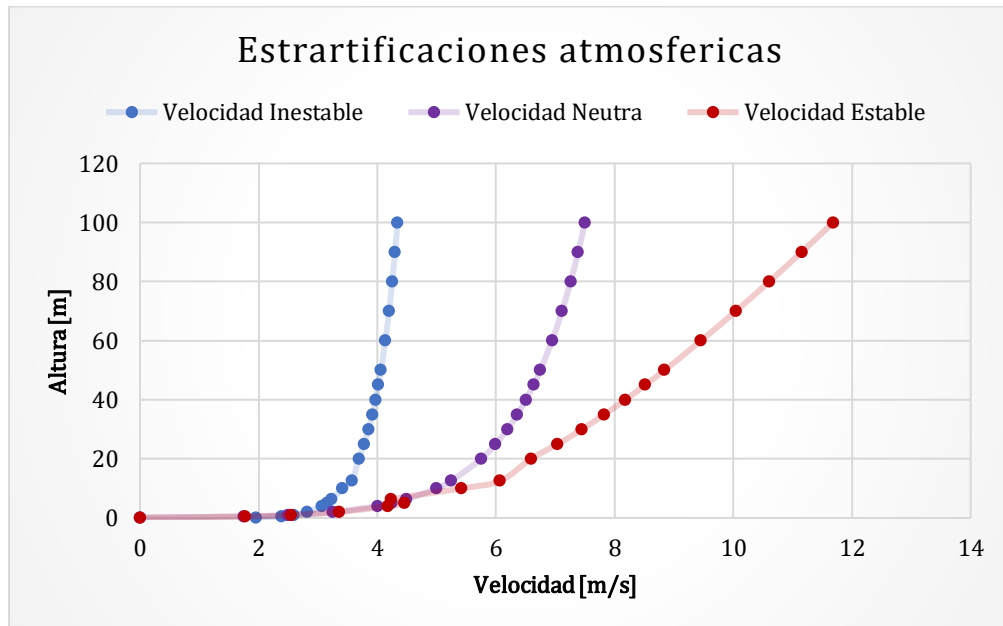


*Figura 6.1-2: Gráfico perfiles de velocidad según estratificación atmosférica.
Fuente: Creación propia.*

El método de advección o mecanismo numérico para transportar propiedades del fluido como difusión, convección, masa, temperatura y velocidad, entre otros. Se puede escoger en el software a partir de los modelos:

- ADV 1: Monótono aerodinámico contra el viento
Numéricamente estable, en particular buen funcionamiento en flujos internos con obstáculos.
- ADV 2: Petrov - Galerkin
Estabilidad moderada, recomendable para flujos compresibles.
- ADV 3: Esquema basado en flujo
Numéricamente inestable, únicamente para flujos incompresibles, especialmente para flujos externos con arrastre.
- ADV 4: Esquema Min-Mod- variante Petrov- Galerkin
Estabilidad moderada, ajustado a flujos en conductos largos y estrechos.
- ADV 5: Petrov – Galerkin modificado
Variación de ADV 2 con mayor estabilidad y resultados conservadores, especial para convección natural y flujo compresible.

Las simulaciones se realizarán en un estado transitorio seleccionando el intervalo de tiempo, cantidad total de pasos e iteraciones internas para discretizar y calcular las ecuaciones. El intervalo de tiempo por la cantidad total de pasos debe ser mayor a la velocidad del viento por la profundidad del túnel, para asegurar el tránsito y desarrollo del flujo en la totalidad del dominio. En particular para el caso más desfavorable correspondiente a estratificación inestable y una profundidad de 150 metros, el tiempo de simulación debe ser al menos de 40 segundos.

Es importante mencionar que la torre se compone de columnas y diagonales de geometría constante y simple, pero el mástil en su totalidad es una estructura permeable por el fluido, por ello se considera de geometría compleja. Es por esto que se utilizará el modelo de turbulencia RANS $k-\omega$ SST debido a que posee mejores resultados en flujos alrededor de obstáculos complejos y no se especifica en flujos simples y cizallados como es el caso del modelo RANS $k-\epsilon$ estándar [12], por lo que el software resolverá las ecuaciones 29, 30 y 32 y se generará el análisis de sensibilidad al variar la intensidad de turbulencia.

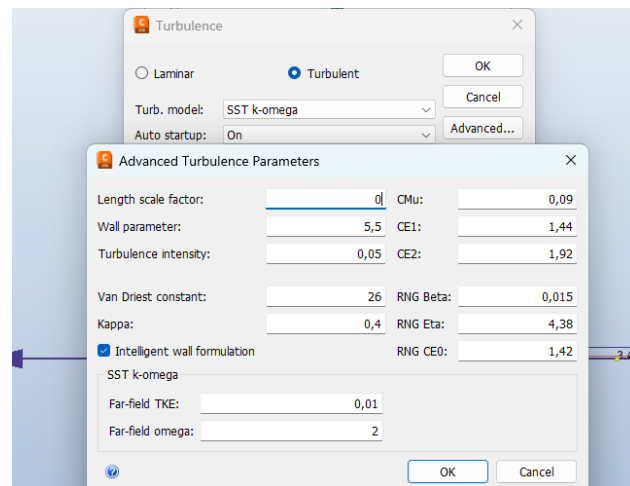


*Figura 6.1-3: Parámetros del modelo de turbulencia en el software.
Fuente: Creación propia en Autodesk CFD.*

6.2. Proceso de diseño y análisis computacional

Con la finalidad de adentrarse en el conocimiento y manejo del software, se comienza el estudio con un prototipo de mástil de sección cuadrada de 0,1 metros y 50 metros de alto.

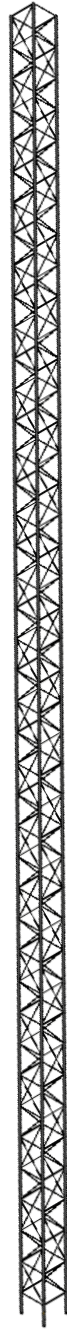


*Figura 6.2-1: Diseño torre 50 metros, 1 nivel.
Fuente: Creación propia en software Autodesk Inventor.*

Con resultados positivos se modificó el diseño, generando un prototipo con 2 niveles, con una pieza de unión poco aerodinámica ya que posee una barra central vertical y con problemas en el aspecto estructural, como se aprecia en la siguiente figura.



*Figura 6.2-2: Diseño torre 50 metros, 2 niveles con dificultosa pieza de unión.
Fuente: Creación propia en software Autodesk Inventor.*

El siguiente diseño busco modificar la pieza de unión, generando un prototipo con una nueva pieza de unión entre niveles, con mayor competencia desde el aspecto estructural y aerodinámico.



*Figura 6.2-3: Diseño torre 50 metros, 2 niveles.
Fuente: Creación propia en software Autodesk Inventor.*

Con la pieza de unión funcional se procede a transformar la cantidad de niveles generando una torre de 3 niveles.



*Figura 6.2-4: Diseño torre 3 niveles.
Fuente: Creación propia en software Autodesk Inventor.*

Con el objetivo de lograr una torre de 50 metros retráctil, sin dificultades estructurales, aero estructurales y logísticas, se afinan los últimos detalles y se determina una torre de 5 niveles no equidistantes y con reforzamiento de diagonales en el primer nivel.

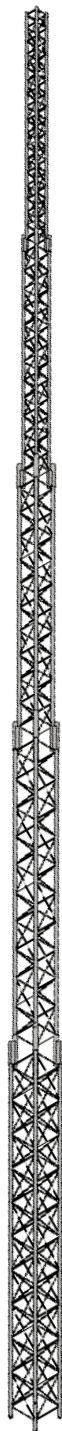


*Figura 6.2-5: Diseño final torre 50 metros, 5 niveles.
Fuente: Creación propia en software Inventor Autodesk.*

7. Simulaciones y análisis

7.1. Torre 1 nivel, escala 1:4

Para realizar el estudio del prototipo de torre de la Figura 6.2-1 es necesario escalar el perfil de velocidades de ingreso, para ello se analiza la Figura 6.1-2 en la que se puede apreciar que para la estratificación neutra a una altura de 50 metros la velocidad alcanza 6,75 m/s, considerando una viscosidad cinemática del aire a 20°C de $1,817 \cdot 10^{-5}$ [Pa s] y teniendo en cuenta el largo característico de la torre, de 1 metro, el número adimensional de Reynolds corresponde a 371.000, lo que se considera como flujo turbulento desarrollado, ya que el valor de Reynolds crítico corresponde a 330.000 aproximadamente.

Para escalar la velocidad a simular se considera la semejanza cinemática o dinámica de flujos incompresibles sin superficie libre, con la ecuación 14, igualando el valor de Reynolds, manteniendo la viscosidad y variando la longitud característica, ahora cuatro veces más pequeña, se obtiene el perfil de velocidades a utilizar en las simulaciones, para la estratificación neutra.

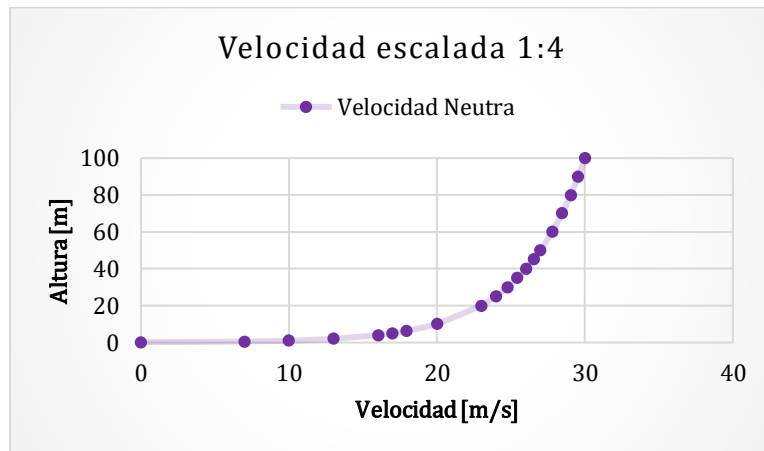


*Figura 7.1-1: Gráfico de velocidad del viento a utilizar en las simulaciones de atmosfera ideal.
Fuente: Creación propia.*

A continuación, se presentan cuatro escenarios de simulaciones para la torre escalada en proporción 1:4, lo que genera un prototipo de 12,5 metros de altura y sección 0,25 metros, en una atmosfera neutra en un túnel de viento de 3 x 38 x 50 metros.

Se realizaron dos simulaciones para la torre con el viento perpendicular a la cara de barlovento, variando la intensidad de turbulencia de un 20% a 30% y otras dos simulaciones para el viento oblicuo variando la intensidad de turbulencia en los mismos porcentajes anteriores.

Las simulaciones se resolvieron con el modelo de advección 5, en estado transitorio con un paso de tiempo de 1 segundo, 10 iteraciones por cada paso y 60 pasos de iteraciones, resultando en 600 iteraciones totales, de la Figura 7.1-2 a Figura 7.1-5 se pueden observar los túneles de viento, mallas y gráficos de convergencia del error, para la simulación de estratificación neutra con el viento en cara normal y oblicua, con su respectiva intensidad de turbulencia.

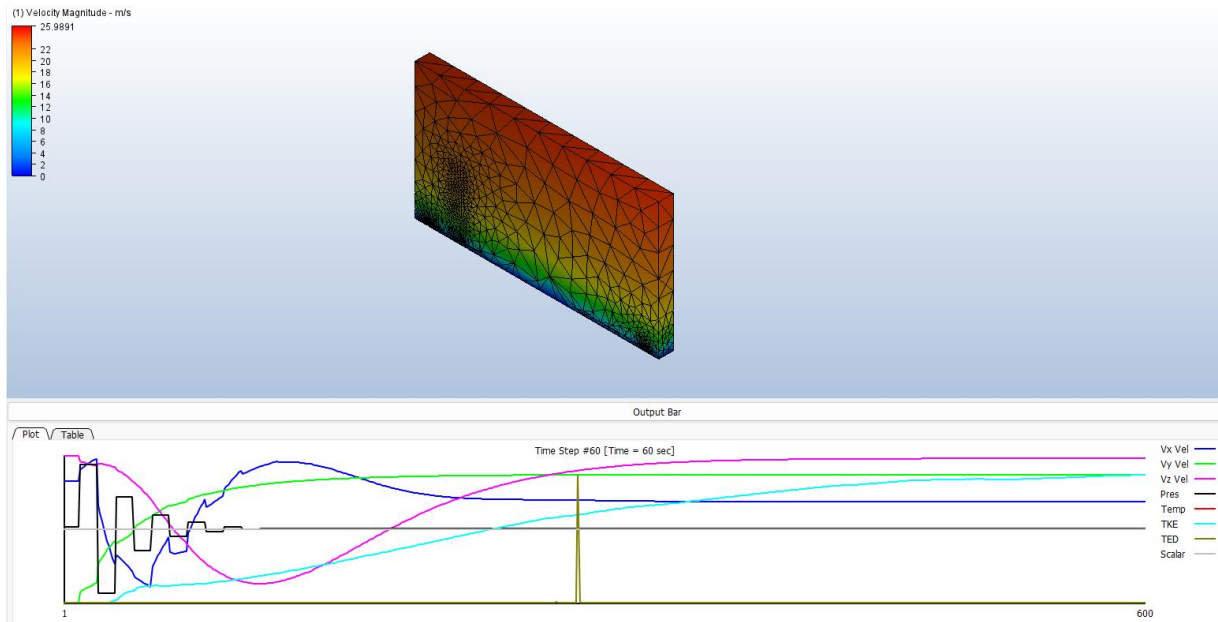


Figura 7.1-2: Simulación transitoria torre escalda 1:4, estratificación neutra con 20% intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

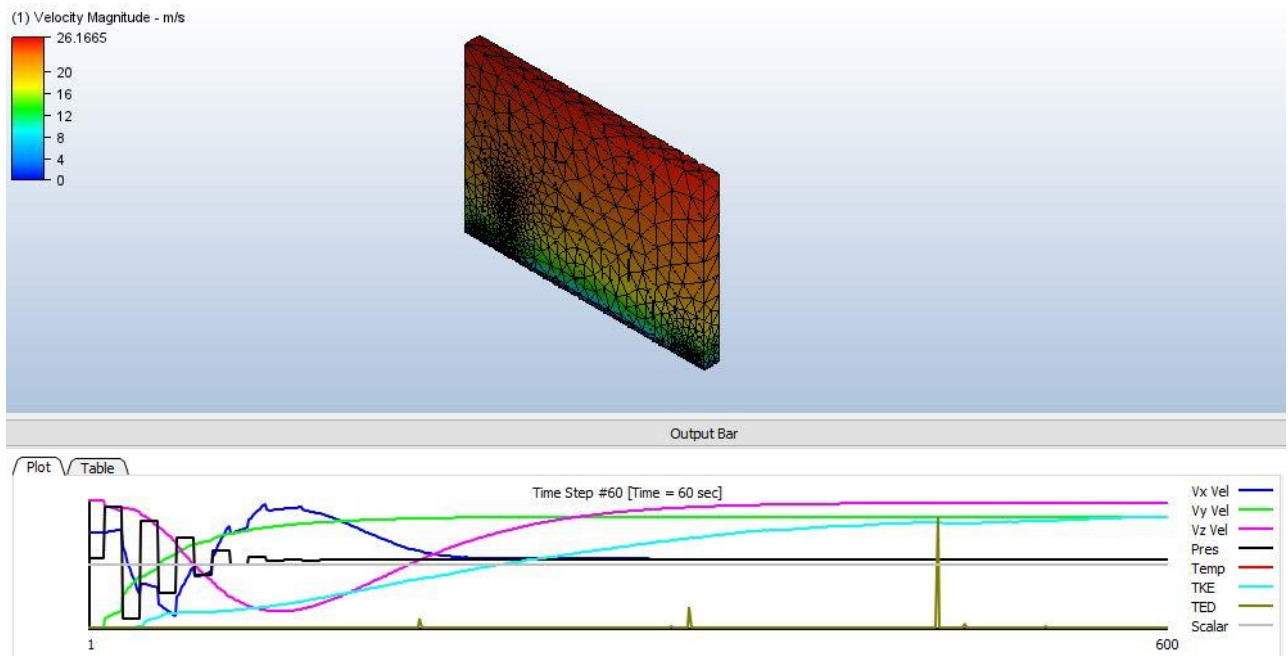


Figura 7.1-3: Simulación transitoria torre escalada 1:4, estratificación neutra con 30% intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

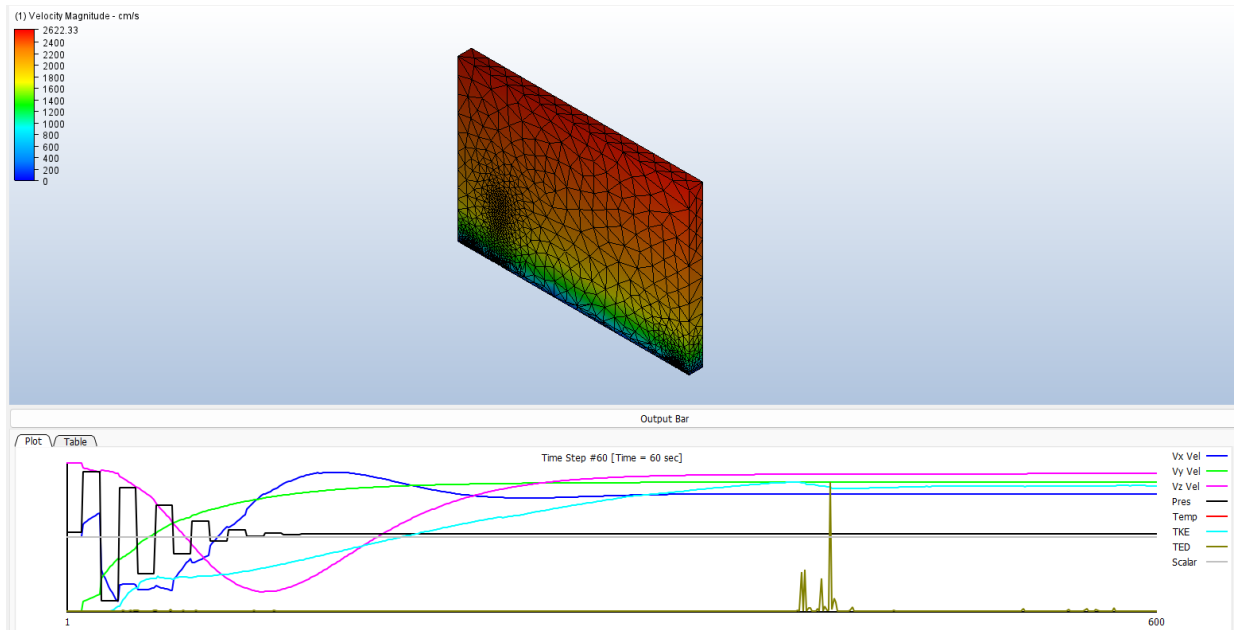


Figura 7.1-4: Simulación transitoria torre escala 1:4, estratificación neutra con 20% intensidad de Turbulencia, Viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

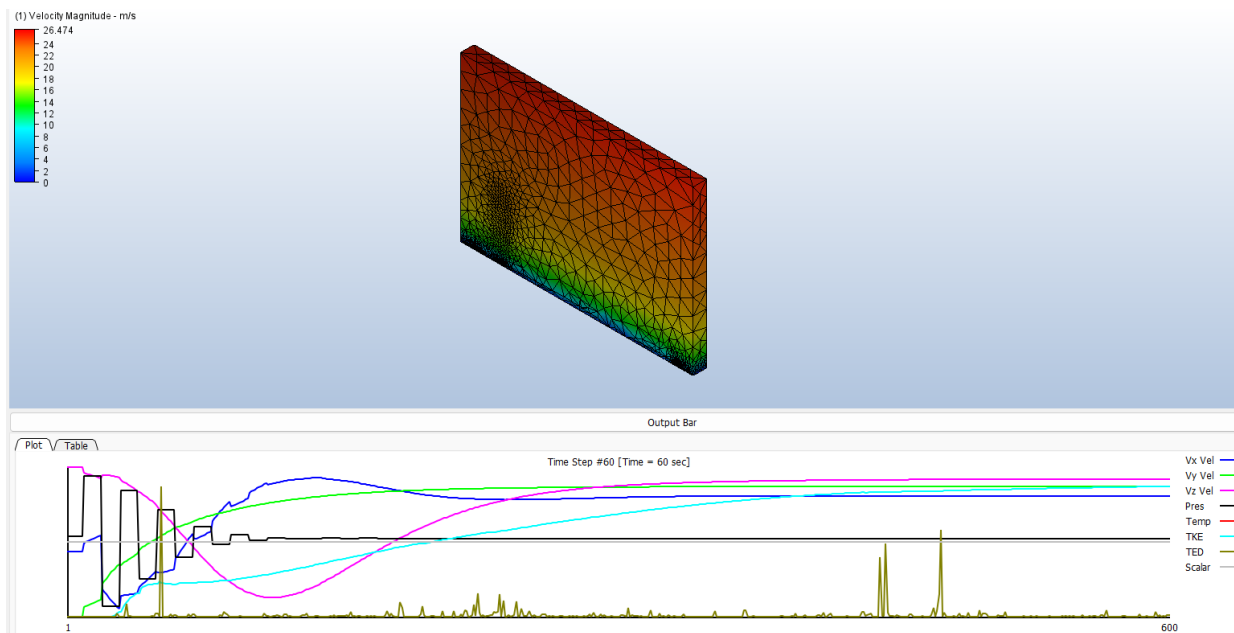


Figura 7.1-5: Simulación transitoria torre escala 1:4, estratificación neutra con 30% intensidad de Turbulencia, Viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

El detalle de las simulaciones se adjunta en Anexo A, en donde se aprecian los planos de velocidad resultante desde distintos ángulos, desde la vista superior se notan las estelas generadas entre el paso del viento y el mástil, junto con ello la gama y mezcla de colores representa la variación de velocidad del viento, lo que ocurre cuando el flujo atraviesa y rodea la torre, en donde es notorio la disminución de velocidad luego de las columnas del mástil, lo que se genera en dos puntos para el caso de viento perpendicular, mientras que se genera en tres puntos para el caso de viento oblicuo a la torre.

Al generar la data de parametrizaciones del perfil dinámico de presiones para una atmosfera ideal, los resultados para las intensidades de turbulencia de un 20% y 30% son coincidentes, con diferencias despreciables. Englobando los resultados se puede mencionar que las presiones obtenidas a partir de la simulación a escala 1:4 para una atmosfera neutra para el viento normal son el doble de magnitud que para el caso de viento oblicuo.

7.2. Torre 2 niveles, escala 1:4

En particular se simulará la torre de 2 niveles de la Figura 6.2-3 en condiciones de estratificación estable e inestable, con una intensidad de turbulencia del 5% y 20%, obteniendo cuatro escenarios distintos a simular.

Para las simulaciones se utilizará un túnel de viento de 3 x 38 x 50 metros. Todas las simulaciones serán transitorias con un paso de tiempo de 1 segundo, 10 iteraciones por cada paso y 50 pasos de iteraciones, resultando en 500 iteraciones totales, resueltas a través del modelo de advección 5.

Al igual que para el caso anterior, se escala el perfil de velocidades que corresponde a la condición de borde de entrada.

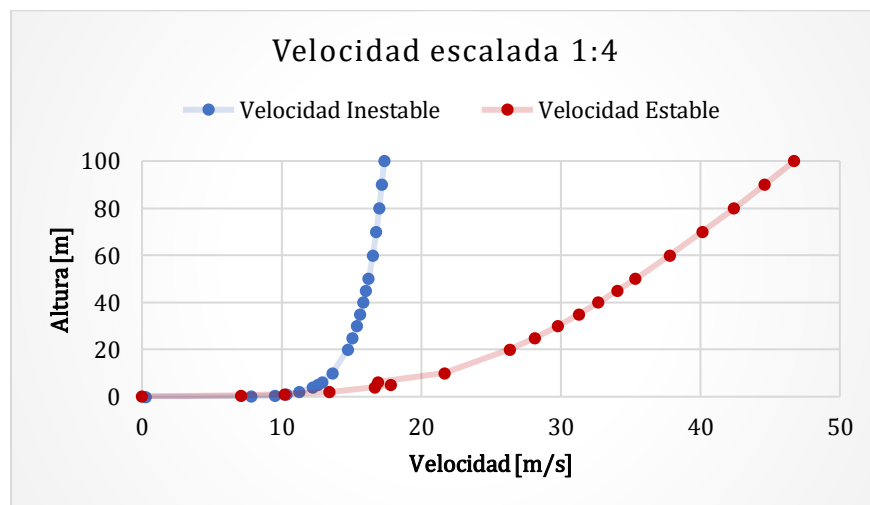


Figura 7.2-1: Gráfico de velocidad escalado del viento, para utilizar en las simulaciones estable e inestable.

Fuente: Creación propia.

Con estos perfiles de velocidad, se calcula el número de Reynolds característico con una sección transversal de 0,9 metros. En el caso de estratificación inestable el número adimensional de

Reynolds corresponde a 183.000 lo que se interpreta como un flujo laminar, ya que el Reynolds crítico corresponde a 570.000.

Mientras que para la estratificación estable se obtiene un número de Reynolds 398.000 aproximadamente, lo que significa un flujo turbulento, con mayor mezcla, disipación de energía y alta energía cinética. Considerando el valor de Reynolds crítico de 212.000.

Los principales resultados de las simulaciones con 5% de intensidad de turbulencia se presentan a continuación;

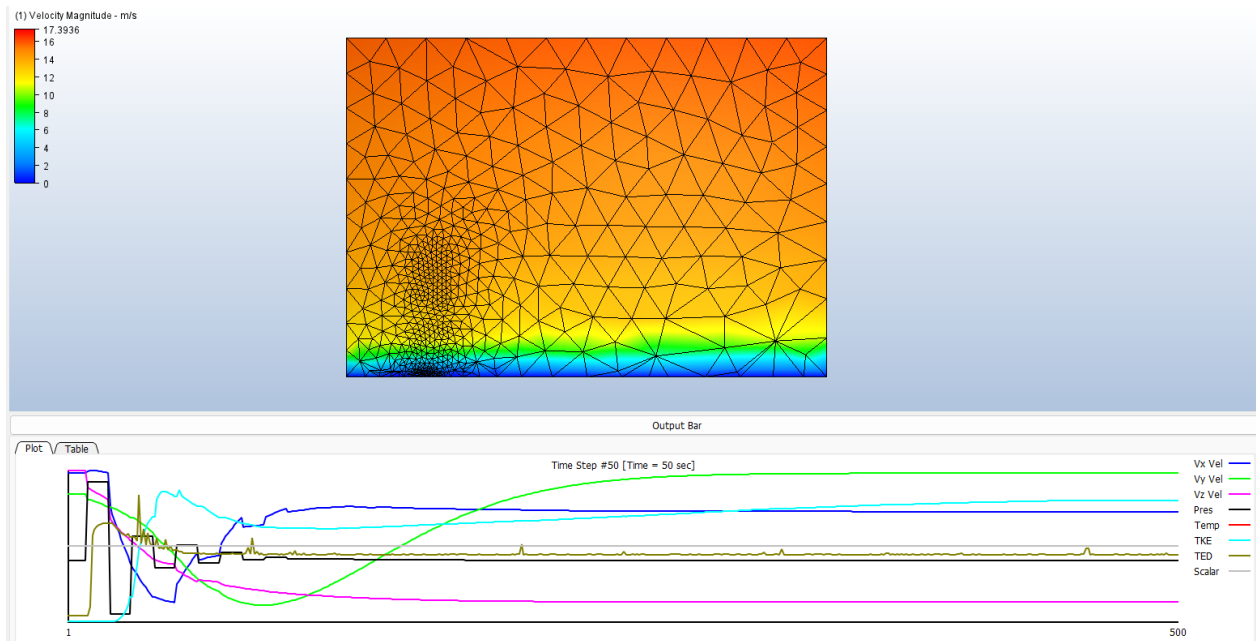


Figura 7.2-2: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación inestable 5% Intensidad de Turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

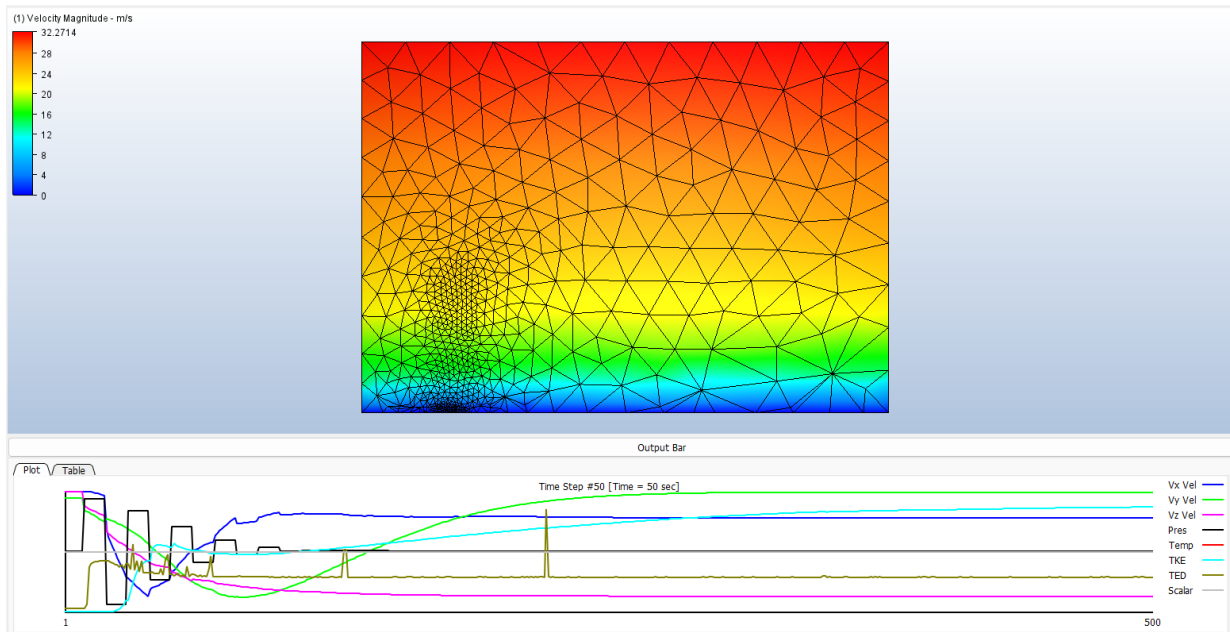


*Figura 7.2-3: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación estable 5% Intensidad de Turbulencia, viento normal.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

Mientras que para una intensidad de turbulencia del 20%, se obtuvo;

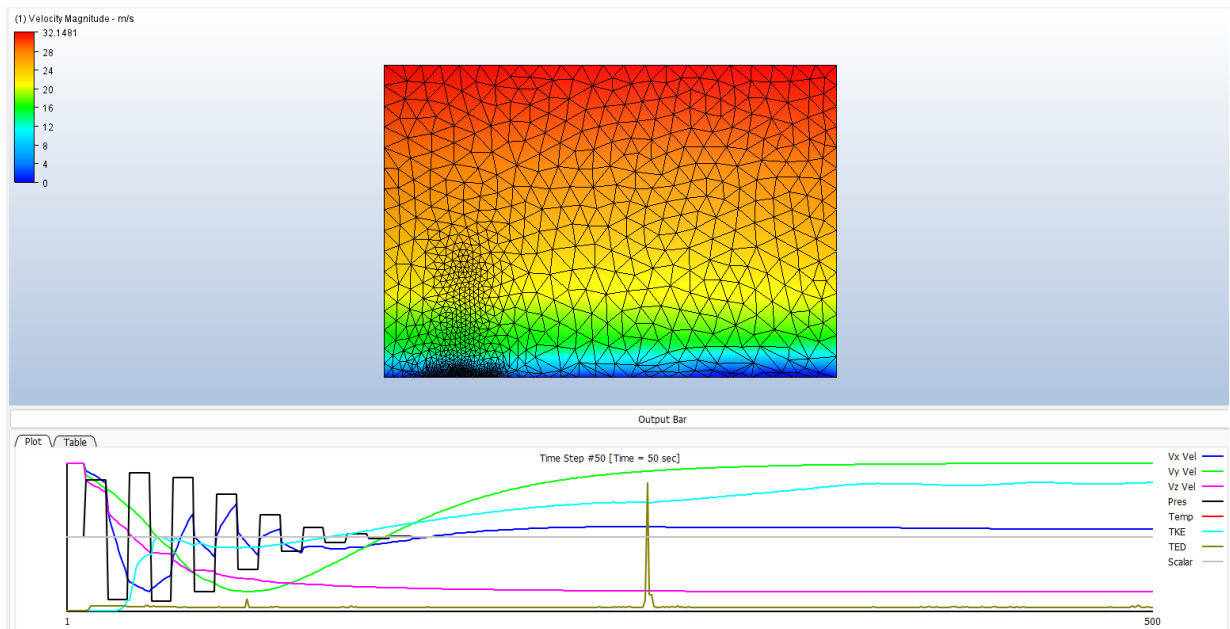


*Figura 7.2-4: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación inestable 20% Intensidad de Turbulencia, viento normal.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

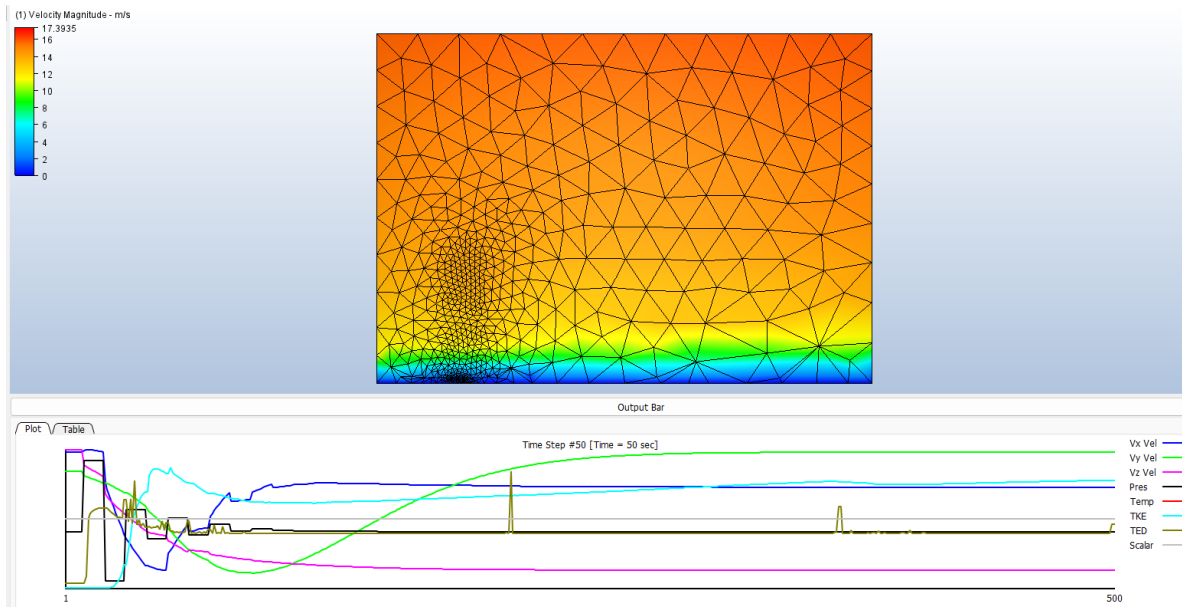


Figura 7.2-5: Simulación transitoria torre 2 niveles escalada 1:4, estratificación estable 20% Intensidad de Turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

A partir de los gráficos de convergencia del error, se puede notar la estabilización, luego del desarrollo del flujo, de las distintas variables; velocidad en los tres ejes, presión, energía cinética y tasa de disipación de energía.

El detalle de los resultados gráficos obtenidos en la simulación se adjunta en Anexos B. Al igual que en la simulación anterior, en las vistas superiores de planos de velocidad se observa la estela generada siguiendo el patrón de las columnas para los distintos ángulos de ataque del viento. Además al observar el plano lateral de velocidades, junto con un zoom y detalle de la pieza de unión se observa desde otra perspectiva la estela generada, la mezcla de velocidades del viento y en particular la presencia de jets que se producen a medida que el viento atraviesa el mástil, esto puede interpretarse como un fenómeno similar al tubo de Venturi ya que el flujo libre debe seccionarse y pasar por entremedio de las diagonales y tranques de la torre, disminuyendo su área transversal y aumentando la velocidad.

Al igual que en las simulaciones anteriores la variación de intensidad de turbulencia de un 5% a 20% no demuestra una relación proporcional en la parametrización de presiones, y aun cuando la variación de intensidad es de un 15% se considera despreciable.

Al comparar las distintas estratificaciones atmosféricas, se puede notar que la interacción fluido estructura sigue siendo la misma, considerando la estratificación estable como caso más crítico, lo que tiene directa relación con la condición de entrada del viento, ya que corresponde al perfil de viento más fuerte y desfavorable que en el caso inestable.

Junto con ello al comparar los resultados de esta simulación con la sección anterior, se analiza el mismo comportamiento para una torre de un único que nivel, que para una torre seccionada en dos niveles. Por lo que desde la interacción fluido estructura la pieza de unión es válida y funcional, sin generar mayor ruido o inestabilidad numérica.

7.3. Torre 3 niveles, escala 1:8

En esta sección se analiza una torre telescópica de 50 metros de alto, reticulada en 3 niveles correspondiente a la Figura 6.2-4, inicialmente se intenta simular con una escala 1:4 lo que generó varias dificultades y a su vez aprendizajes ya que no se logró mallar adecuadamente, debido a la geometría compleja de la estructura y sus piezas de unión, ya que requería un refinamiento excesivo, esto debido a que el mallado estaba afectando a la conservación de masa y momentum. Por ello se modificaron las dimensiones de la pieza de unión, se utilizaron simplificaciones del software Inventor y se modificó la escala a 1:8 con el objetivo de ahorrar tiempo de simulación, junto con ello se varió el modelo de Advección al ADV 2, ya que el modelo ADV 5 contaba con dificultades como inestabilidad numérica o error de discretización, traducidas en oscilaciones espurias, por lo que sus resultados no eran precisos ni confiables.

En particular se simula en un túnel de viento de 1,6 x 12 x 21 metros, con el modelo de estratificación estable, neutra e inestable, los distintos perfiles de velocidades escalados que ingresan como condición de contorno se pueden apreciar en la Figura 7.3-1.

Considerando la sección transversal del mástil de 0,4 metros en el nivel superior, se obtiene un número de Reynolds de 324.000 para la estratificación estable, lo que indica un flujo altamente turbulento y desarrollado, con mezclas y agitaciones como vórtices. En el caso de la estratificación neutra se obtiene un número de Reynolds de 280.000 aproximadamente lo que refleja un flujo laminar cercano a un flujo en transición, pudiendo presenciar fluctuaciones y mezclas. Por último, en la estratificación inestable el número de Reynolds es aproximadamente de 198.000 lo que se interpreta como flujo laminar.

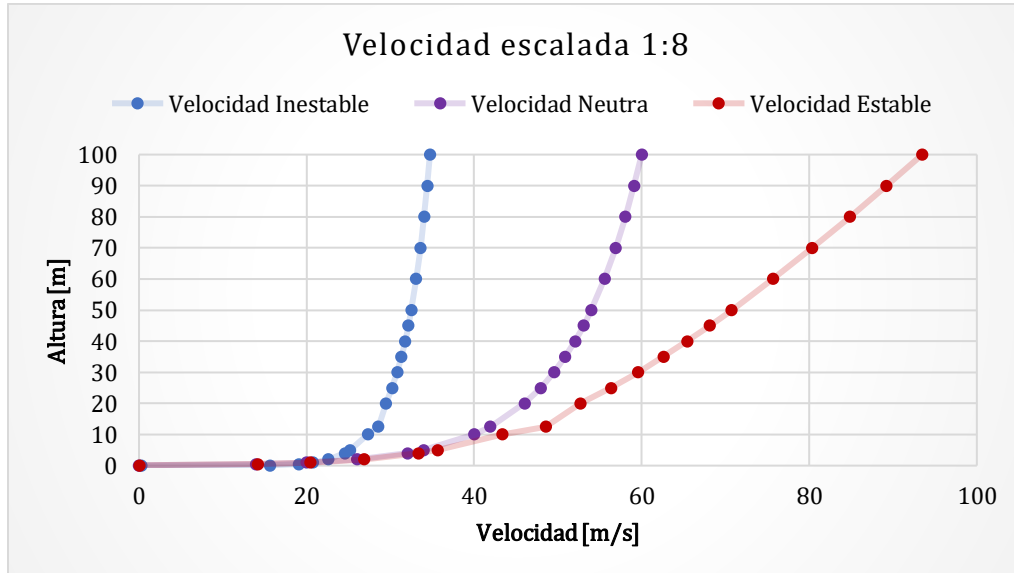


Figura 7.3-1: Gráfico de velocidad del viento a utilizar en las simulaciones inestable, neutra y estable.

Fuente: Creación propia.

Las simulaciones se realizaron para viento perpendicular y oblicuo a la torre, considerando una intensidad de turbulencia del 5%. Se realizaron simulaciones transitorias con un paso de tiempo de 0,8 segundo, 10 iteraciones por cada paso y 50 pasos de iteraciones, resultando en 500 iteraciones totales y 40 segundos, además se considera la superficie de la tierra con una rugosidad de 0,1 metros.

Para los seis escenarios de simulación se presenta el mallado, el túnel de viento con su escala de colores y los gráficos de convergencia del error, en un inicio se presenta para una estratificación estable con ángulo de ataque del viento perpendicular y oblicuo, lo que se replica para una estratificación neutra a inestable, respectivamente. En el Anexo C se presenta el particular de vistas y planos obtenidos.

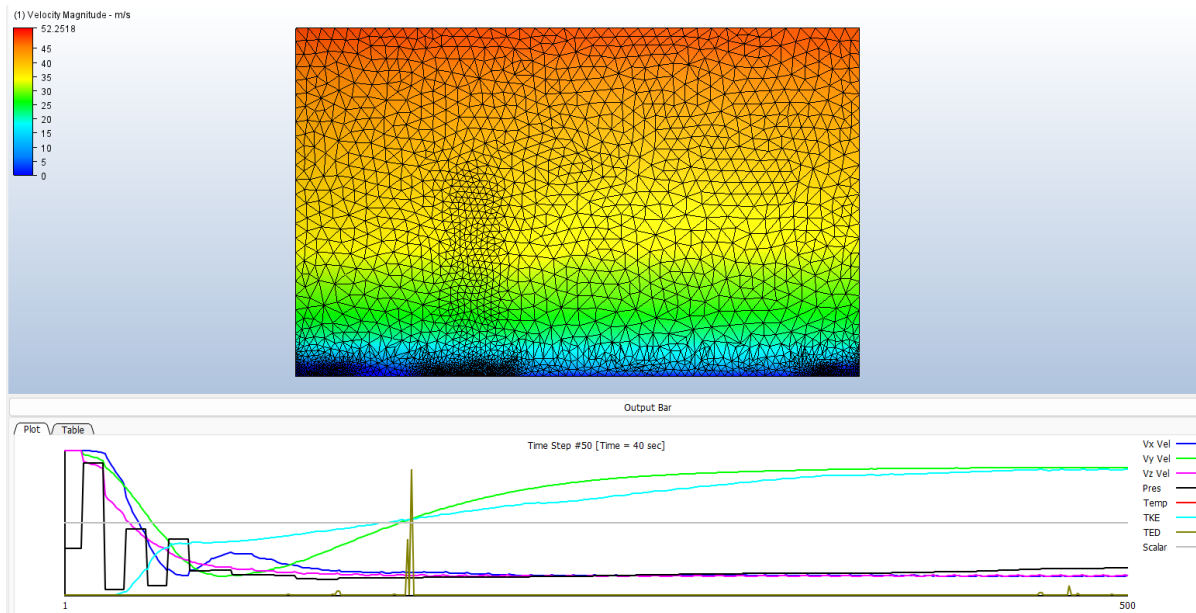


Figura 7.3-2: Simulación transitoria torre 3 niveles escala 1:8, estratificación estable 5% Intensidad de Turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

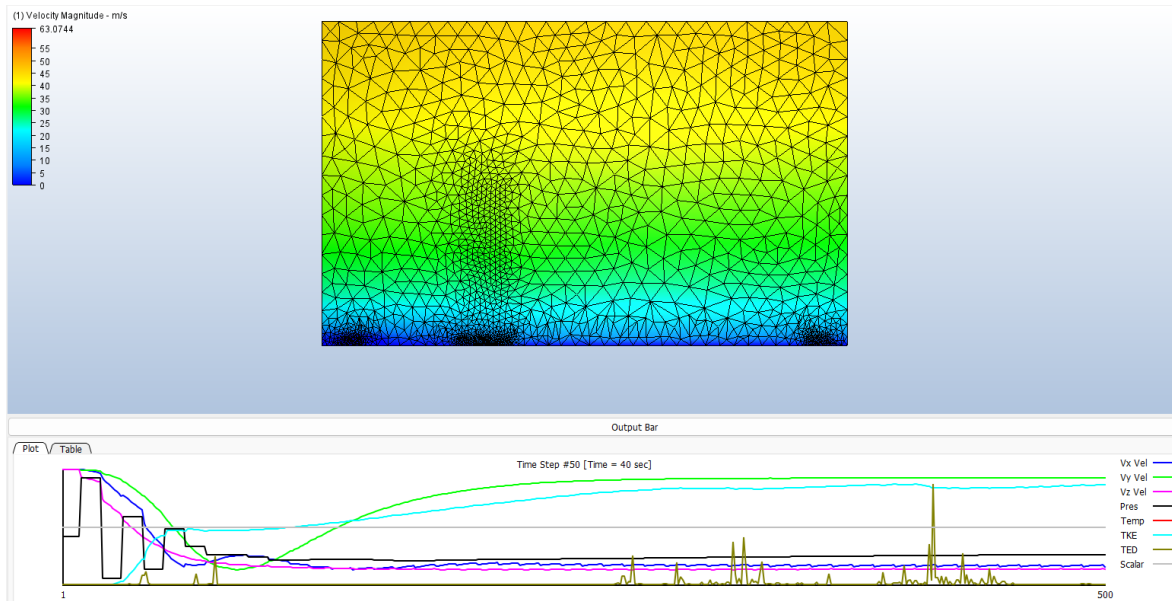


*Figura 7.3-3: Simulación transitoria torre 3 niveles escala 1:8, estratificación estable 5% Intensidad de Turbulencia, viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

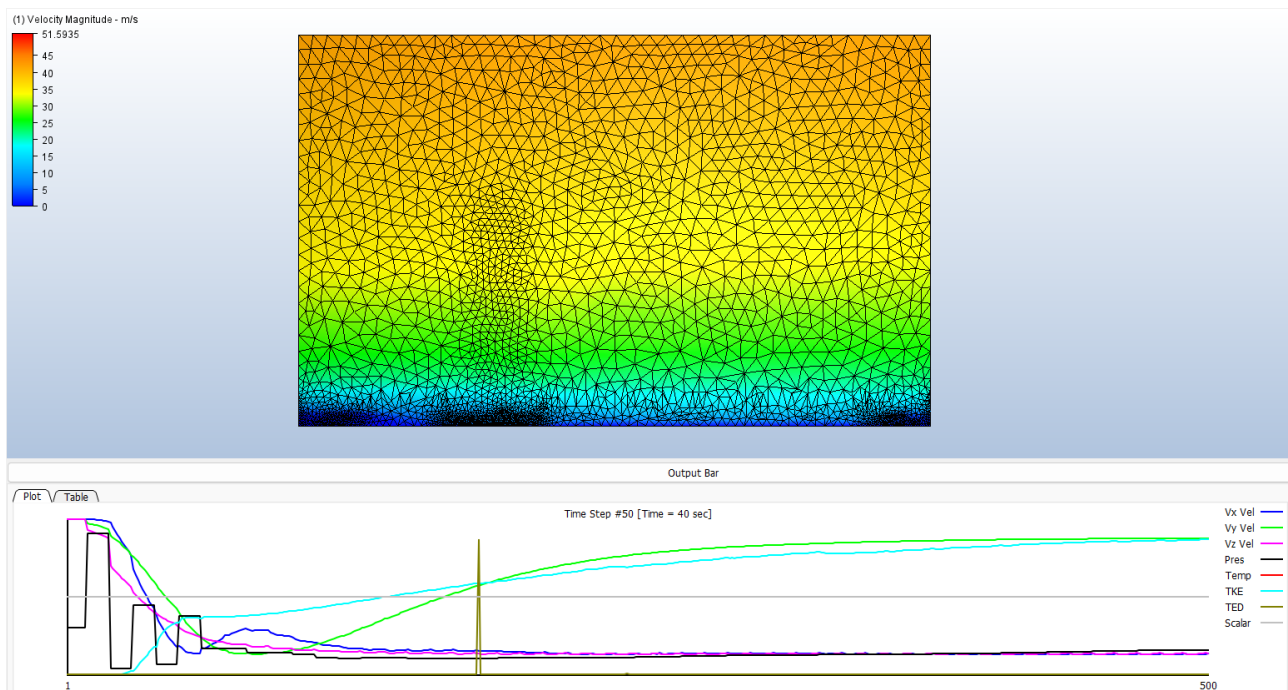


*Figura 7.3-4: Simulación transitoria torre 3 niveles escala 1:8, estratificación neutra con 5% de intensidad de Turbulencia, viento normal
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

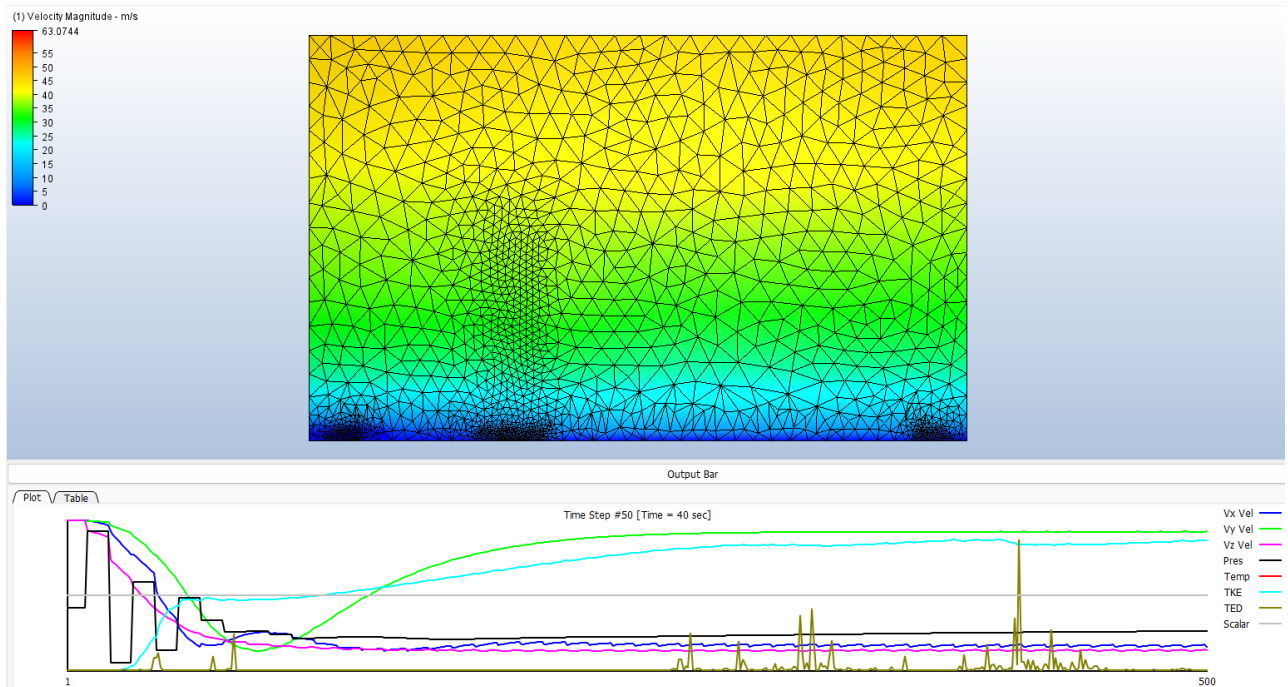


*Figura 7.3-5: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación neutra con 5% de intensidad de Turbulencia, viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

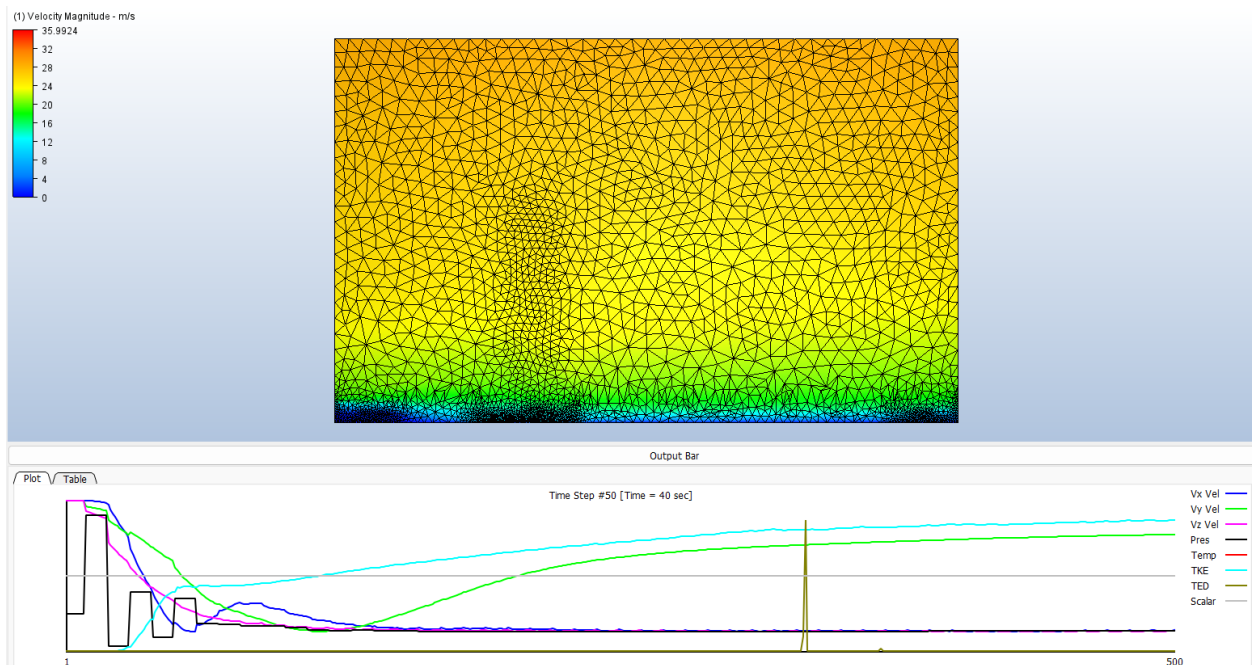


*Figura 7.3-6: Simulación transitoria torre 3 niveles escalda 1:8, estratificación inestable con 5% de intensidad de Turbulencia, viento normal
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

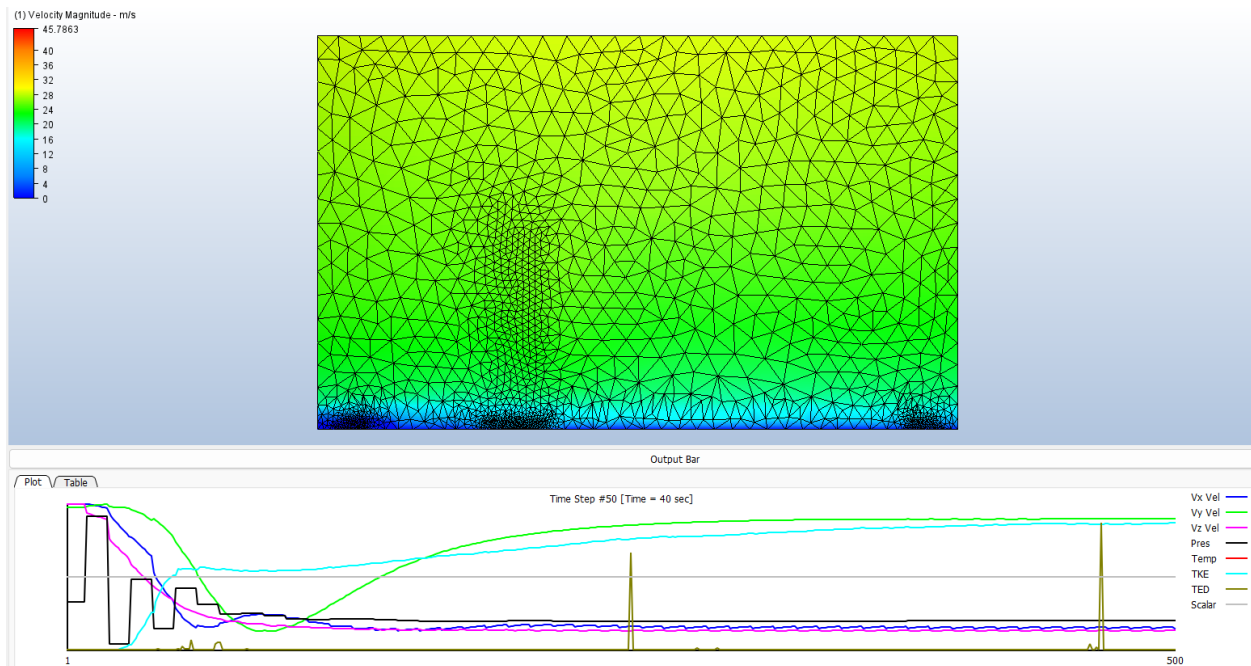


Figura 7.3-7: Simulación transitoria torre 3 niveles escala 1:8, estratificación inestable con 5% de intensidad de Turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

Al analizar las velocidades próximas a la torre para las distintas estratificaciones atmosféricas es notorio que la estratificación inestable comprende las menores velocidades, atribuyendo el perfil de presiones menos crítico, mientras que las velocidades de las estratificaciones neutra y estable son similares, inicialmente idénticos, posterior una altura de 3 metros se diferencian, siendo más extremo el caso estable. Este fenómeno aplica para ambos ángulos de ataque del viento.

Por lo que, al analizar las simulaciones de las distintas secciones, se respeta que el caso más crítico sea la estratificación estable, seguida de una atmosfera neutra y finalmente el caso inestable.

Respecto los planos laterales adjuntos en anexos, se puede observar un patrón de jets a lo largo de la torre, indistintamente para un viento perpendicular y oblicuo. Junto con ello es posible visualizar que la estela y mezcla de velocidades es más significativa en las cercanías de la capa límite de la tierra y se va atenuando con la altura.

Los resultados de estas simulaciones fueron positivos, ya que permitieron corroborar las condiciones atmosféricas y validar una torre telescópica de varios niveles. Al obtener resultados válidos se enfocan los esfuerzos en simular una torre de 50 metros y cumplir los objetivos.

7.4. Torre 5 niveles, escala 1:1

En esta sección se estudia una torre de 5 niveles, no equidistantes, la que se observa en la Figura 6.2-5, en un túnel de viento de 6 x 100 x 140 metros, se realizaron 1000 iteraciones totales considerando 10 iteraciones internas, 100 pasos de iteraciones y un paso de tiempo de 0,8 segundos, lo que implica el tránsito del flujo durante 80 segundos. Lo que se resolvió a partir del modelo de advección 2.

Debido a que la torre a simular de forma extendida tiene 50 metros de altura, el perfil de velocidades corresponde a la Figura 6.1-2 y a partir de la sección transversal del nivel superior de 0,5 metros se obtienen los distintos números de Reynolds, para un viento inestable el número de Reynolds corresponde a 118.000 lo que indica un flujo laminar, sin influencia de las fuerzas inerciales, generando un flujo ordenado, estable y uniforme con poca probabilidad de turbulencia y vórtices. Por otro lado, para un viento de atmosfera neutra el parámetro adimensional de Reynolds es de 206.000 lo que corresponde a un flujo laminar. Por último, para la estratificación estable el número de Reynolds resultante es 307.000 lo que revela que el flujo es turbulento, generando mezclas y un fluido agitado, con fluctuaciones de velocidad, presencia de vórtices y remolinos.

Para la simulación con estratificación estable se presenta la cara lateral del túnel de viento, en donde el flujo ingresó por el lado izquierdo y salió por el derecho, además se ve el mallado y las zonas de refinamiento, como lo son el mástil y su alrededor, junto con ello se aprecia la gama de colores que representan las velocidades del viento, en particular una estratificación estable, con velocidades que van desde 1 m/s, en color azul hasta 13 m/s en color rojo o anaranjado.

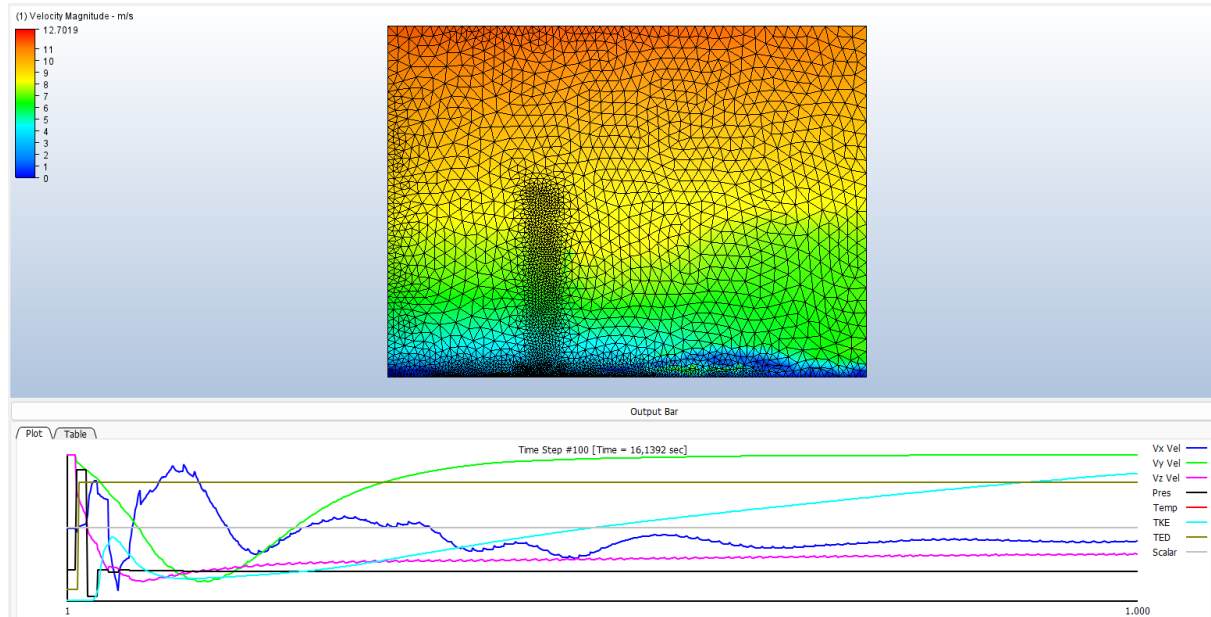


*Figura 7.4-1: Simulación estatificación estable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento normal.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

En el plano transversal a la torre, se aprecia el refinamiento del mallado alrededor del mástil

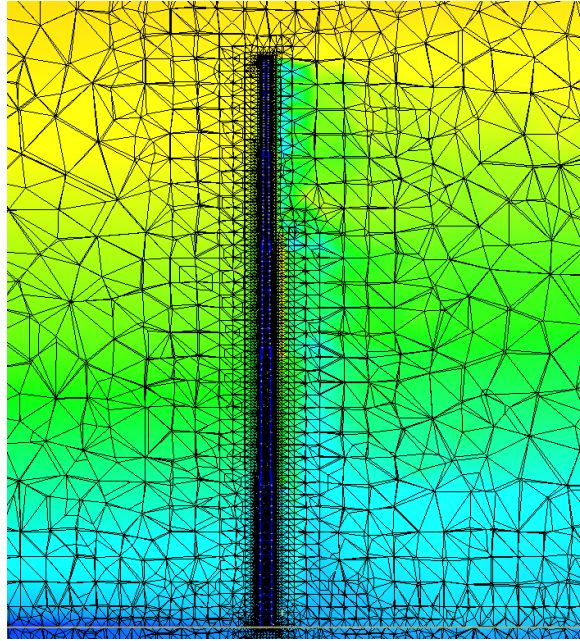


*Figura 7.4-2: Refinamiento de la malla alrededor del mástil con viento perpendicular a una cara.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

En particular se puede observar la estructura del mallado de forma ordenada en las cercanías de la torre.

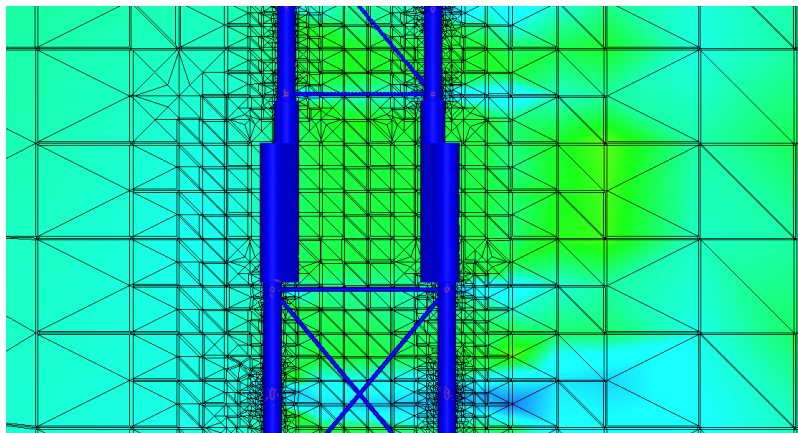


*Figura 7.4-3: Zoom de la malla y sus elementos más pequeños, con viento perpendicular a una cara.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

En detalle se puede apreciar la malla no estructurada, con una red predominantemente de poliedros, con elementos en forma de hexaedro, con ello se forma una malla de 4.724.573 nodos y 21.425.648 elementos, entre el fluido y sólido.

Se realiza el mismo ejercicio para viento estable con ángulo de ataque en 45° , en este caso la malla se generó a partir de 5.261.938 nodos y 21.140.164 elementos

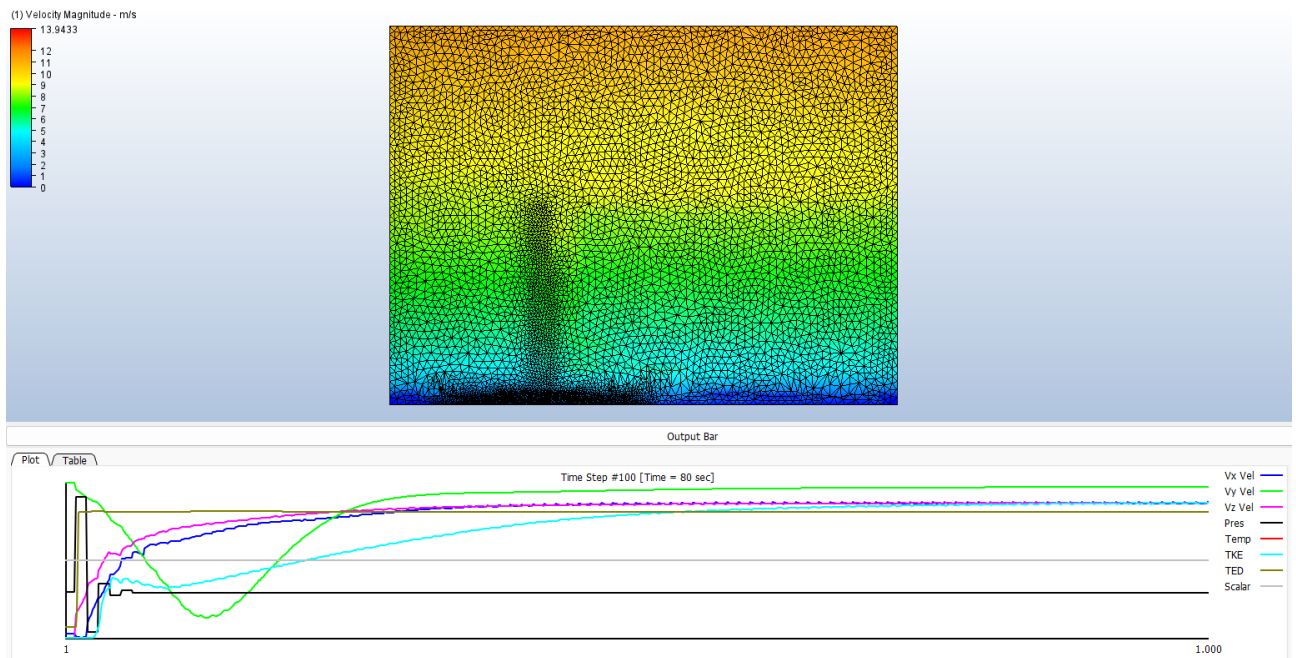


*Figura 7.4-4: Simulación estatificación estable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

Al igual que para el viento perpendicular a una cara, se adjunta el plano de velocidades transversal a la torre para observar el refinamiento de la malla.

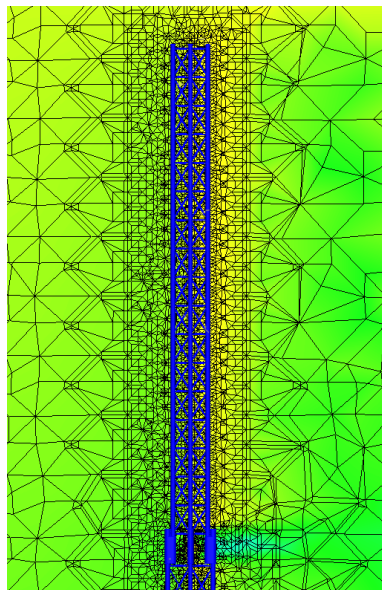


*Figura 7.4-5: Refinamiento de la malla alrededor del nivel 50 con viento oblicuo al mástil.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

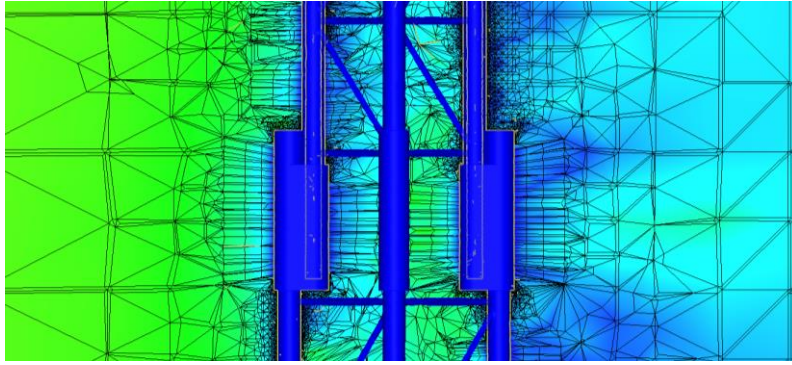


*Figura 7.4-6: Zoom de la malla y sus elementos más pequeños, con viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

En particular se observa un refinamiento menos estructurado, pero a su vez más refinado, por ello la malla cuenta con 285.484 elementos más que la malla para el caso de viento perpendicular.

En el Anexo D se presentan los planos de velocidades lateral y superior, en donde se replican los fenómenos mencionados en secciones anteriores, especialmente el patrón de jets en el plano vertical y las estelas en la vista superior.

Este estudio se repitió para la estratificación inestable y neutra, en los que se obtuvo principalmente

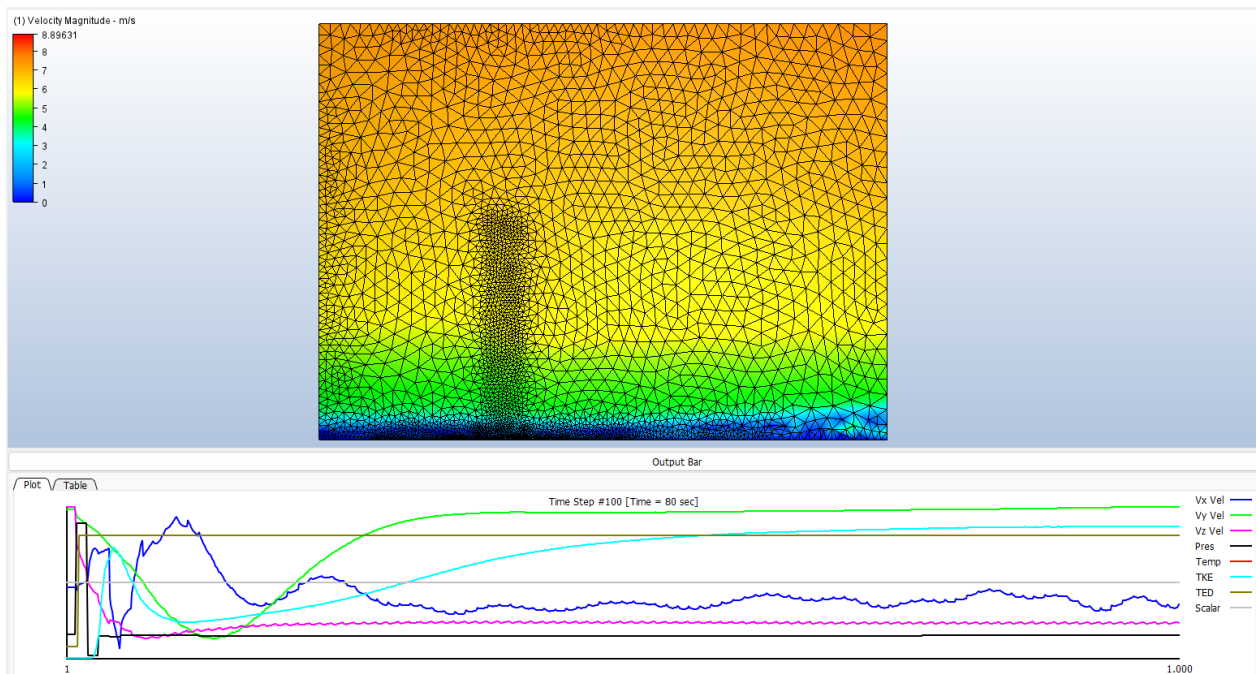


*Figura 7.4-7: Simulación estatificación neutra, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento normal.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

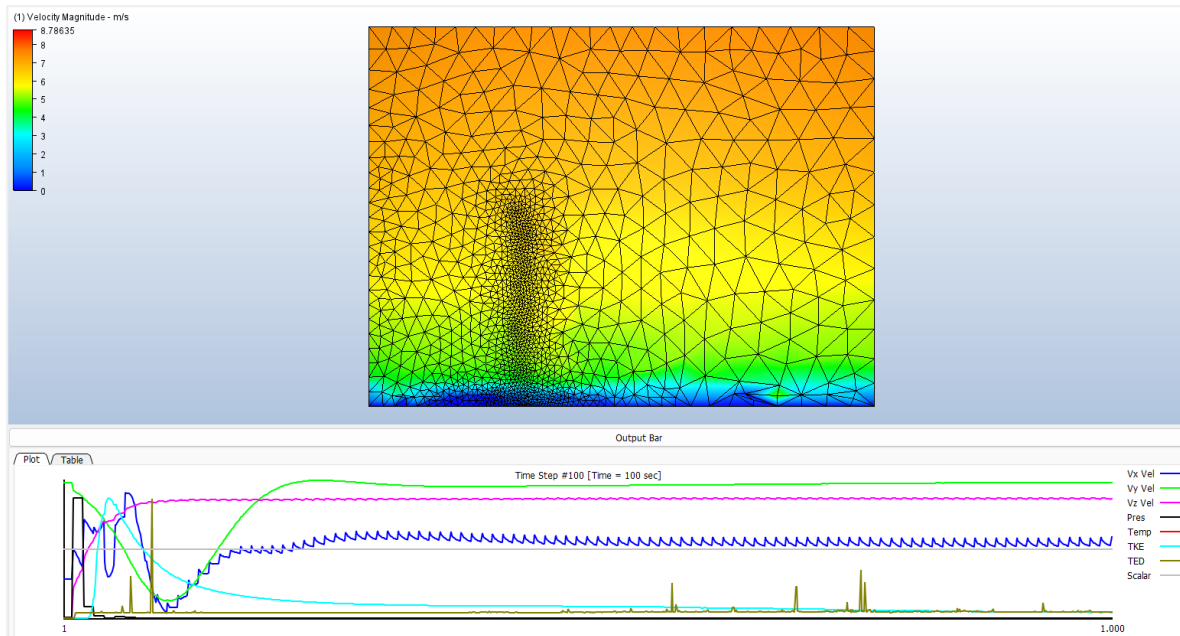


*Figura 7.4-8: Simulación estatificación neutra, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

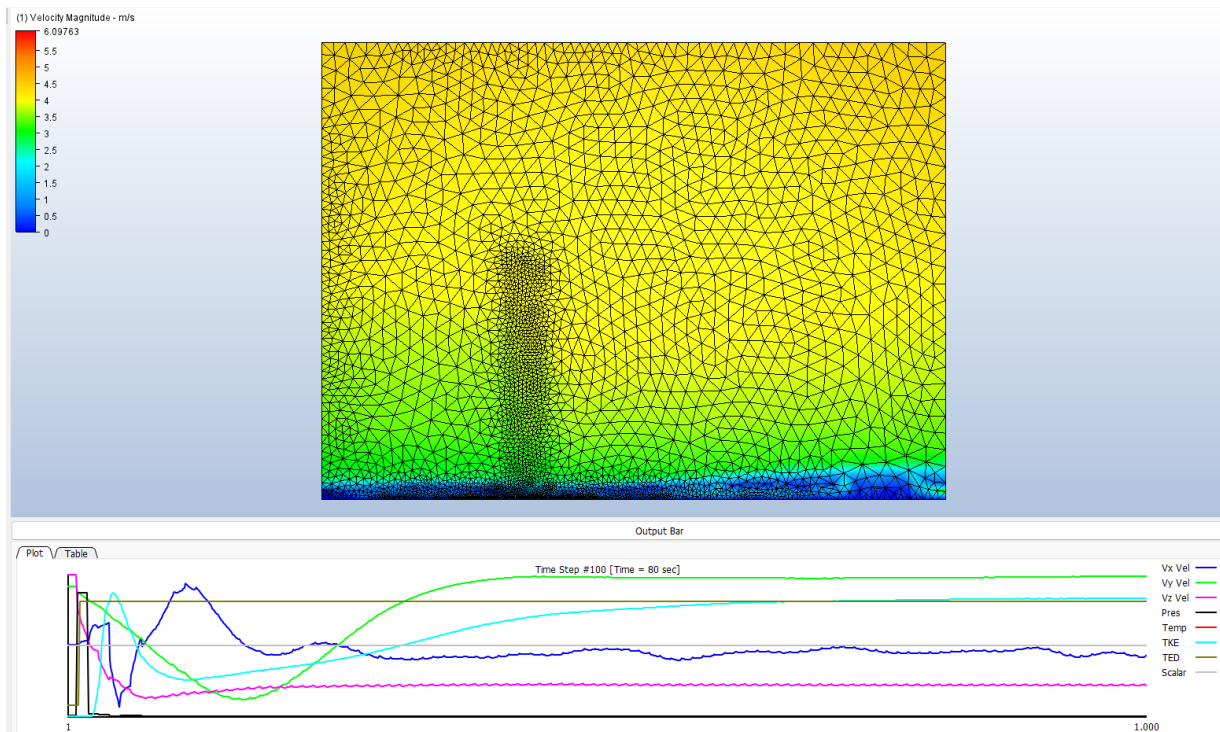


*Figura 7.4-9: Simulación estatificación inestable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento normal.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

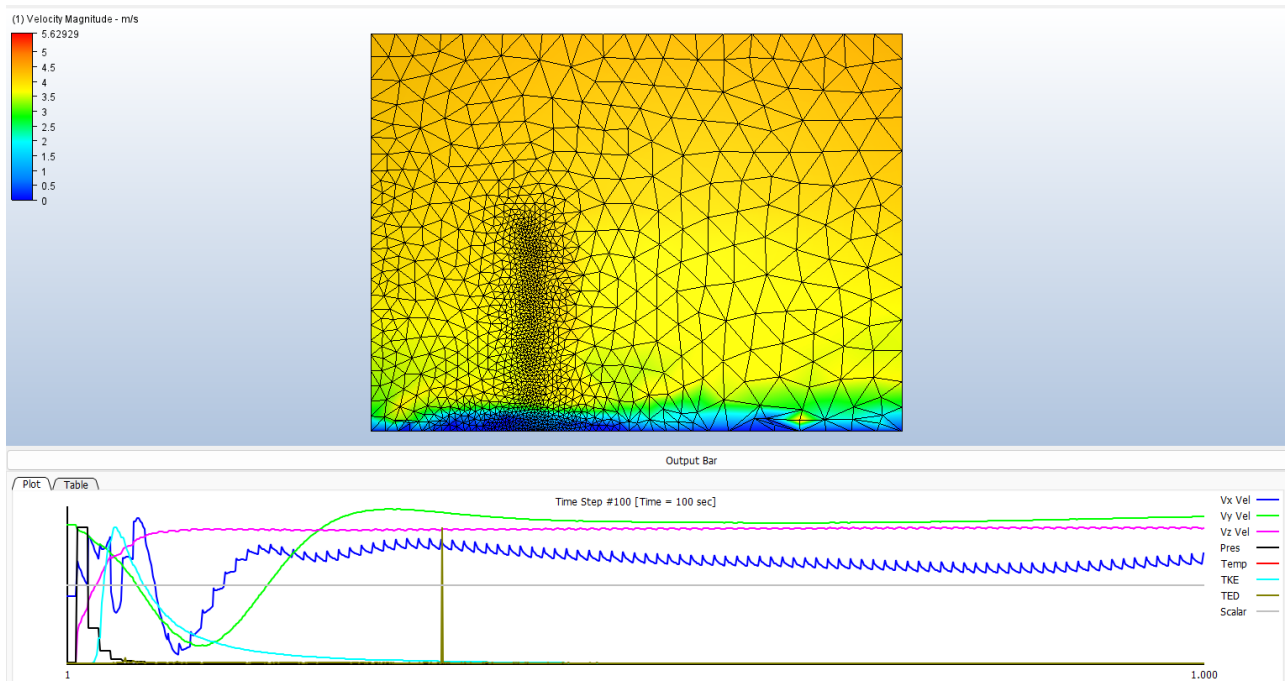


*Figura 7.4-10: Simulación estratificación inestable, torre de 5 niveles, 50 metros, 5% IT Viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

A partir de las simulaciones realizadas para el diseño de 5 niveles se analiza la velocidad con que el viento impacta a la torre con 5% de intensidad de turbulencia y a partir de la ecuación 33 se parametrizan los resultados, para incorporar el perfil de fuerzas dinámicas en el análisis estructural.

Para los distintos perfiles de vientos atmosféricos, con viento perpendicular a la torre, se obtuvieron las siguientes velocidades

Tabla 6-1: Velocidad resultante para vientos perpendiculares a la torre.

Atmosfera	Viento Normal		
	Inestable	Neutra	Estable
Altura	V [m/s]	V [m/s]	V [m/s]
8	2,99	4,12	4,41
15	3,31	4,74	5,39
22	3,43	5,31	6,28
29	3,56	5,63	7,03
36	3,69	5,86	7,52
42	3,80	6,04	7,99
50	3,96	6,39	8,62

Lo que parametrizado con la norma chilena de cálculo de la acción del viento sobre las construcciones - NCh432, se ve gráficamente

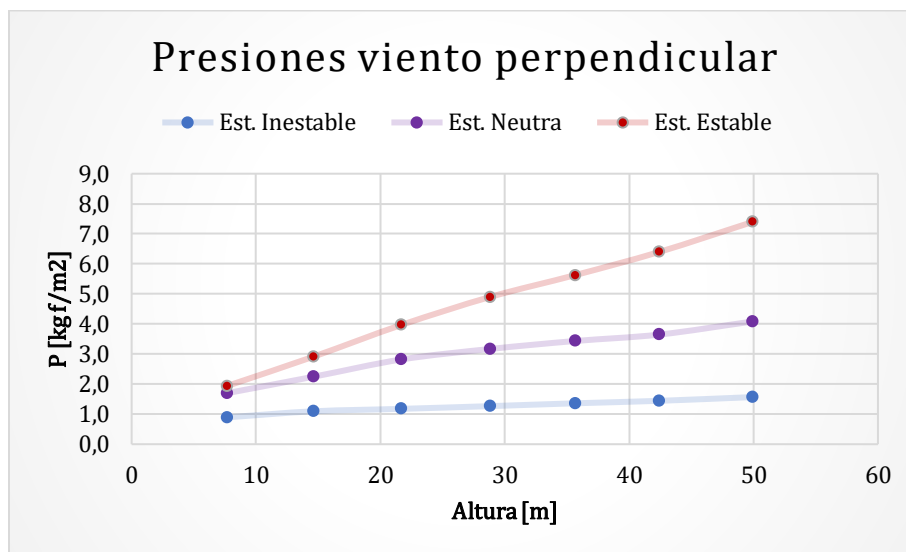


*Figura 7.4-11: Gráfico de presiones parametrizadas viento perpendicular.
Fuente: Creación propia.*

Mientras que, para el caso oblicuo, se tienen las siguientes velocidades y parametrización de presiones

Tabla 6-2: Velocidad resultante para vientos oblicuos a la torre.

Viento Oblicuo			
Atmosfera	Inestable	Neutra	Estable
Altura	V [m/s]	V [m/s]	V [m/s]
8	3,28	4,32	4,63
15	3,54	5,12	5,35
22	3,65	5,45	5,92
29	3,42	5,31	6,53
36	3,50	5,86	7,06
42	3,64	5,72	7,64
50	3,77	6,01	8,37

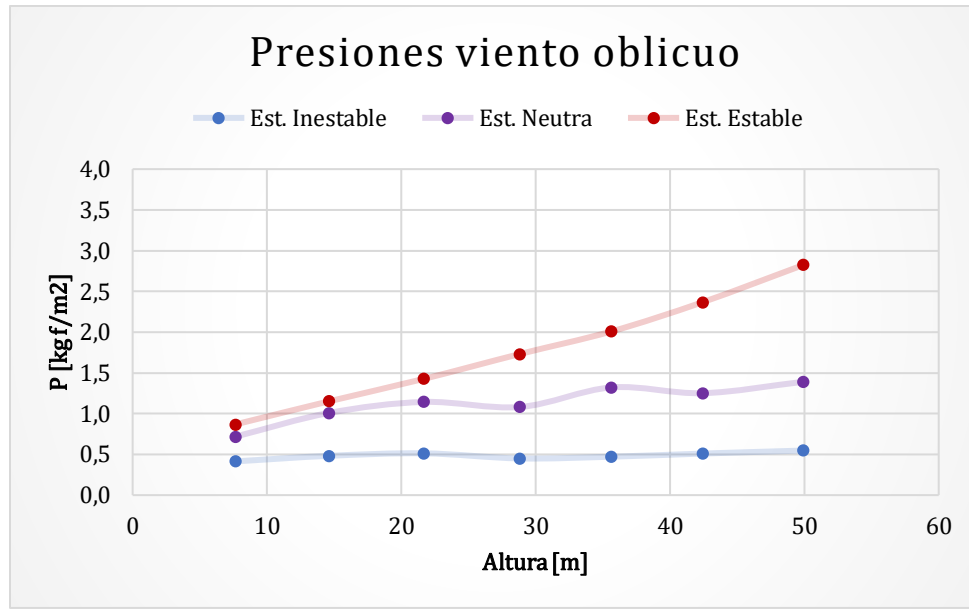


*Figura 7.4-12: Gráfico de presiones parametrizadas viento oblicuo.
Fuente: Creación propia.*

A partir de los modelos matemáticos y simulaciones numéricas realizadas, se puede determinar de forma gráfica y cualitativa que el caso más desfavorable corresponde a la atmosfera en condición estable y en este escenario la presión que ejerce el viento sobre la torre no presenta puntos críticos o zonas de reforzamiento, ni comportamientos indeseados.

Bajo esta determinación se analiza la variación de intensidad de turbulencia únicamente para el escenario de estratificación estable, analizando una intensidad de turbulencia del 30% y 20%, sumado a lo realizado anteriormente con un 5% de intensidad de turbulencia, a partir de ello se obtienen las tablas para ángulo de ataque del viento perpendicular y oblicuo.

Tabla 6-3: Velocidad resultante para atmosfera estable y viento normal.

Atmosfera estable, viento perpendicular			
	5% IT	20% IT	35%IT
Altura	V [m/s]	V [m/s]	V [m/s]
8	4,54	4,56	4,55
15	5,33	5,34	5,34
22	5,95	5,96	5,96
29	6,54	6,54	6,54
36	7,17	7,18	7,18
42	7,65	7,65	7,66
50	8,18	8,20	8,19

Tabla 6-4: Velocidad resultante para atmosfera estable y viento oblicuo.

Atmosfera estable, viento oblicuo			
	5% IT	20% IT	35%IT
Altura	V [m/s]	V [m/s]	V [m/s]
8	4,63	4,68	4,24
15	5,35	5,59	5,56
22	5,92	6,08	6,19
29	6,53	6,32	6,93
36	7,06	7,08	7,02
42	7,64	7,32	7,56
50	8,37	7,49	8,17

De forma gráfica, al parametrizar los resultados se obtiene la Figura 7.4-13 para un viento con ángulo de ataque perpendicular a una de las caras del mástil. Al analizar la variación de intensidad de turbulencia de un 5% a 20% y 30% es complejo distinguir las distintas curvas, ya que se encuentran sobrepuestas, esto es debido a que las velocidades parametrizadas son similares e incluso se repiten en los distintos escenarios. A partir de esto se puede determinar que para el caso de viento perpendicular a la cara de barlovento la variación en la intensidad de turbulencia no tiene un impacto significativo.

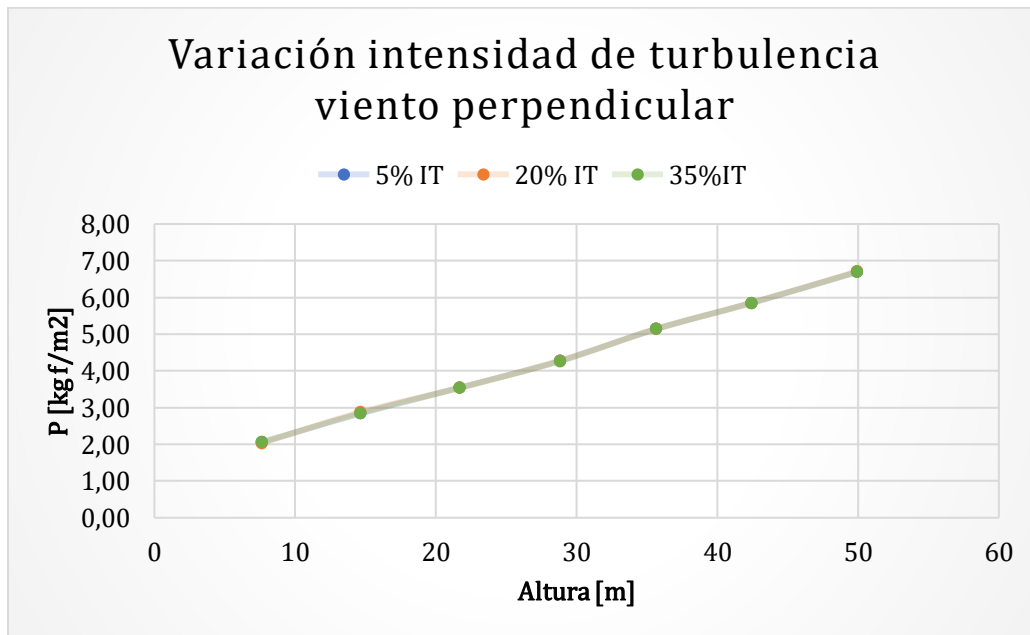


Figura 7.4-13: Análisis de sensibilidad variación de intensidad de turbulencia atmosfera estable, ángulo de ataque normal.

Fuente: Creación propia.

Por otro lado, para un ángulo de ataque del viento oblicuo se realiza el mismo análisis de sensibilidad variando los porcentajes de intensidad de turbulencia, de un 5%, a 20% a 35%, los resultados parametrizados se visualizan en la Figura 7.4-14. En donde se puede apreciar que no existe predominio por parte de alguna de las tres intensidades de turbulencia distintas, en particular se observa la oscilación entre ellas y dependiendo de la altura prima una u otra de forma alternante. Por ello no hay una relación directa o lineal, ni un impacto significativo en la variación de turbulencia.

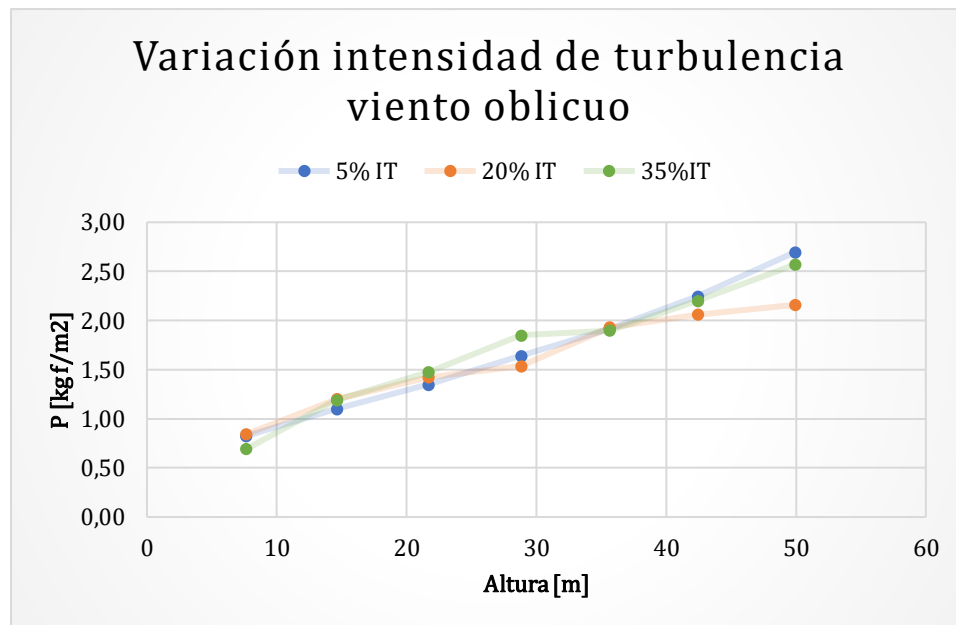


Figura 7.4-14: Análisis de sensibilidad variación de intensidad de turbulencia atmosfera estable, ángulo de ataque oblicuo.
Fuente: Creación propia.

7.5. Torre 5 niveles retraída, escala 1:1

Para realizar un análisis completo del diseño final de la torre, se decide analizar en el túnel de viento la torre de forma retraída en sus 5 niveles, como se observa en la imagen a continuación. Únicamente se estudiará el fenómeno del flujo alrededor del mástil, sin parametrizar presiones ni un análisis cuantitativo.

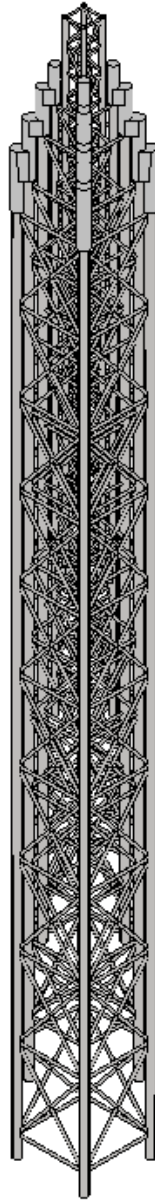


*Figura 7.5-1: Diseño torre 50 metros 5 niveles retráctil.
Fuente: Creación propia en software Autodesk Inventor.*

Para las simulaciones se utilizará un túnel de viento de 3 x 35 x 40 metros, en estado transitorio con un paso de tiempo de 1 segundo, 10 iteraciones por cada paso y 50 pasos de iteraciones, resultando en 500 iteraciones totales, resueltas a través del modelo de advección 2.

La forma de malla, escala de velocidades y gráficos de convergencia del error se pueden apreciar a continuación, en donde las variables se estabilizan luego del desarrollo del flujo.

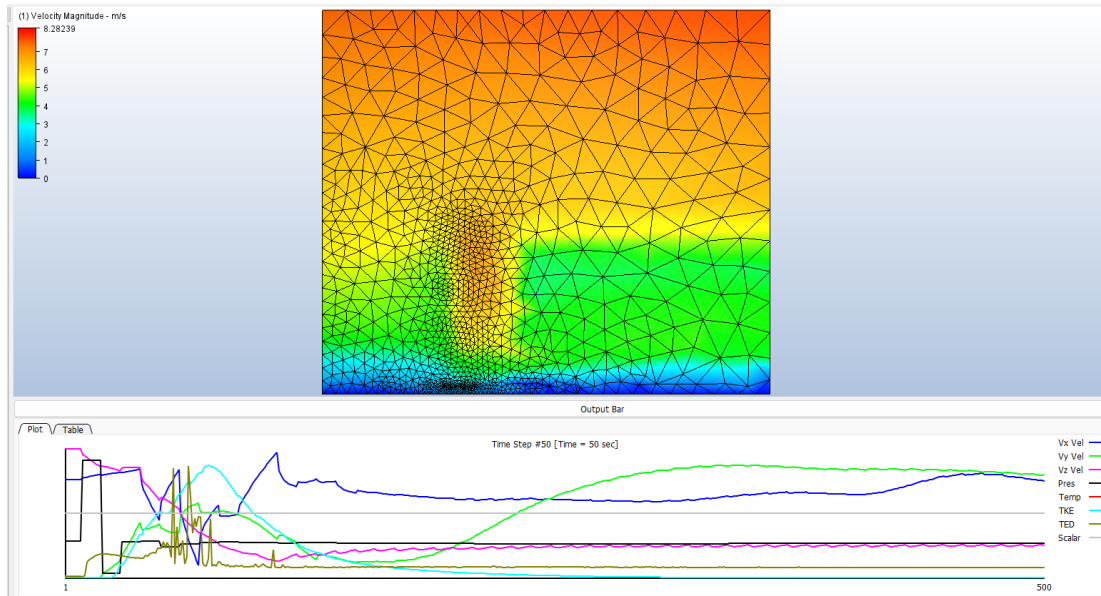


Figura 7.5-2: Simulación estatificación estable torre de 5 niveles retráctil.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

En particular se puede observar el zoom del plano lateral, en donde también es posible analizar la presencia de jets luego de que el viento atraviese o rodee la torre, incluso en esta posición del mástil el comportamiento e interacción fluido estructura, sigue patrones y no tiene convenientes estructurales.

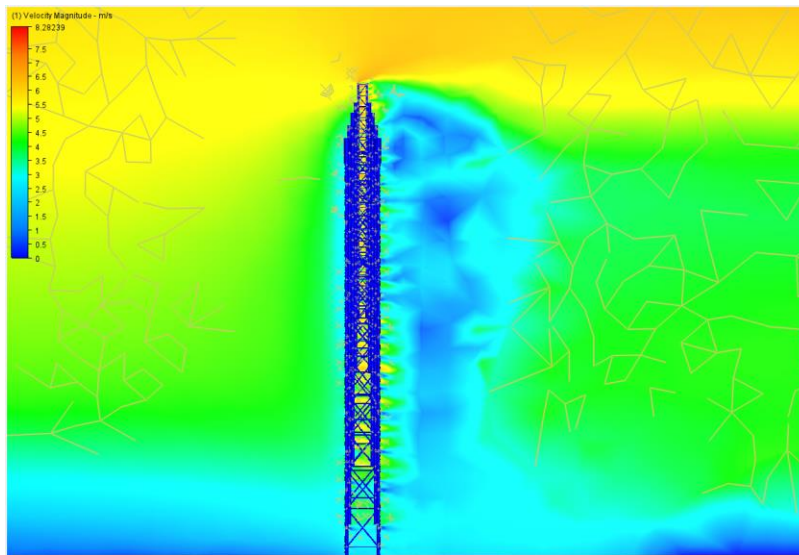


Figura 7.5-3: Simulación estatificación estable torre de 5 niveles retráctil.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

Al igual que para las simulaciones anteriores, se presenta el plano de velocidades en vista superior, en donde se observa una importante estela y mezcla de velocidades producto del contacto del viento con el mástil retraído.

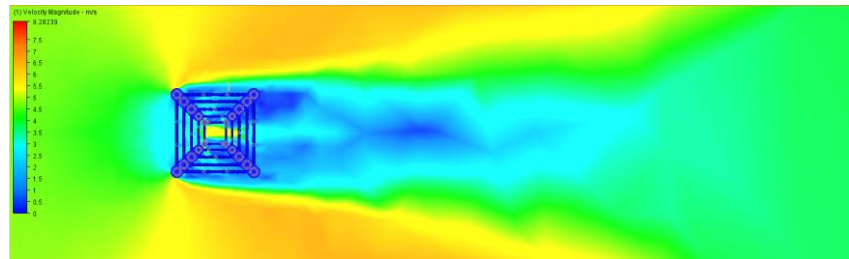


*Figura 7.5-4: Simulación estratificación estable torre de 5 niveles retráctil.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

7.6. Torre 1 nivel, escala 1:1

Con la finalidad de comparar los resultados de simulación con una torre existente, se estudia una torre de sección cuadrada de 50 metros de alto inmersa en una estratificación estable, al igual que el resto de las simulaciones se itera en un tiempo transitorio con un paso de tiempo de 1 segundo, 10 iteraciones por cada paso y 50 pasos de iteraciones, resultando en 500 iteraciones totales y 50 segundos. Mediante el modelo de advección 2 y un túnel de viento de 6 x 100 x 130 metros.

El mallado, escala de colores de velocidades y gráficos de convergencia del error, se pueden apreciar en la siguiente figura.

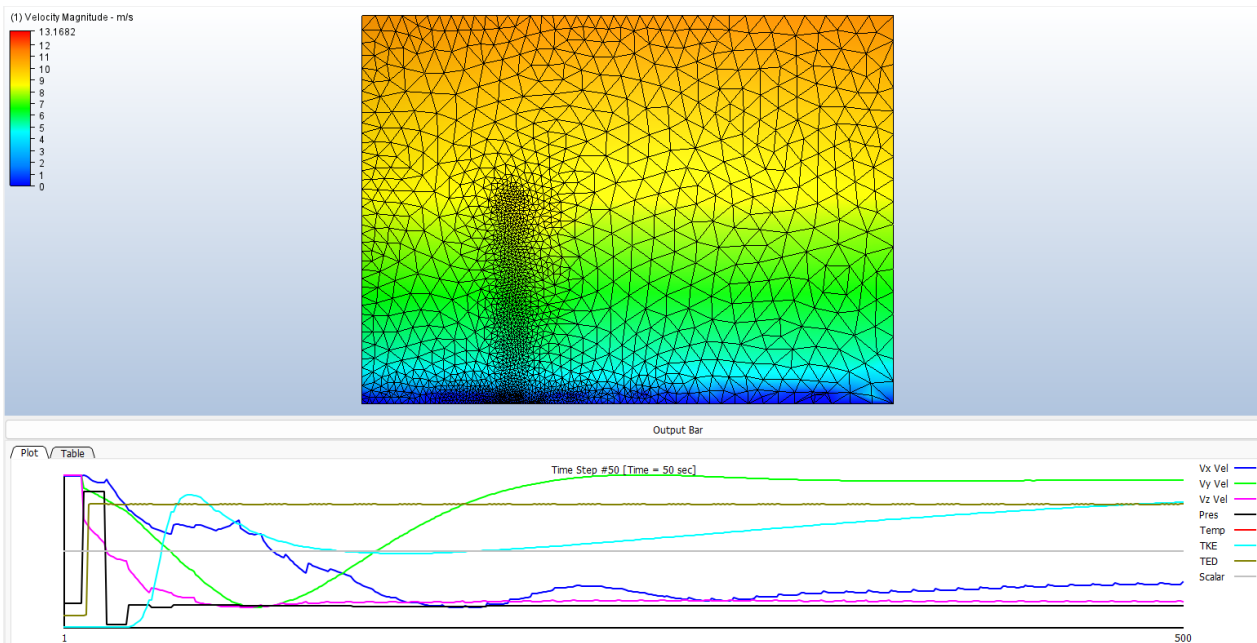


*Figura 7.6-1: Simulación torre 50 metros, 1 nivel estratificación estable.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

7.7. Sistema de anclaje

Para realizar una torre meteorológica telescópica móvil es necesario realizar el anclaje del mástil a un camión o remolque, estilo carro de arrastre, que cuente con las capacidades para transportar de forma horizontal la torre retraída de 15 metros de largo, con un peso de 6,5 toneladas y que permita su elevación por medio de un cabestrante mecánico y cables de acero. Para asegurar la fijación al momento de elevar la torre y realizar mediciones es necesario que el vehículo cuente con zapatas estabilizadoras, las que distribuyen las cargas a una base más estable [40].

Una vez la torre se encuentre izada es recomendable el uso de tensores instalados de forma simétrica, es decir cada 90° , es importante mencionar que estos deben quedar tensados adecuadamente, en general se considera un 10% de su resistencia [41]. Los cuales podrían ser anclados a través de estacas enterradas por medio de un sistema hidráulico con motor, junto con ello deben ubicarse al menos a 25 metros desde el centro de la torre, idealmente a 35 metros de forma radial [42]. Se sugiere considerar cables de acero de alta resistencia galvanizados y compuesto de varias hebras [43].

8. Conclusiones

A partir del estudio y análisis realizado a través de la dinámica computacional de fluidos por medio de simulaciones de flujo externo en el software Autodesk CFD se determina de forma exitosa el diseño de mástil retráctil de 50 metros de altura.

En particular el comportamiento de la torre telescópica de 5 niveles es análogo a una torre de sección única, sin cambios transversales y su comportamiento no difiere ante distintos campos de vientos relacionados a los tres tipos de estratificaciones térmicas estudiadas y la variación de intensidad de turbulencia es despreciable al analizar la interacción fluido estructura.

Respecto al cumplimiento de objetivos se logró adecuadamente analizar y simular la interacción fluido estructura, estudiando la fenomenología del viento, donde se determinaron tres casos característicos presentes en la capa límite de la atmosfera, correspondiente a la estratificación estable e inestable, con una transición ideal de atmosfera neutra. Al simular los distintos casos se establece que la estratificación estable corresponde al caso más drástico, lo que se traduce en el perfil de presiones dinámico más crítico.

Inicialmente se estudió un mástil de un solo nivel situado en el caso ideal de atmosfera neutra, analizando la variación de intensidad de turbulencia de un 20% a 30%, la cual no resulto significativa. Junto con ello se analizó el viento perpendicular a la cara de barlovento y a su vez con un ángulo de ataque en 45° , resultando el perfil dinámico de presiones el doble de significativo para el escenario perpendicular.

El mismo mástil se estudió inmerso en una atmosfera estable, con el propósito de comparar los resultados con los datos de la torre meteorológica ubicada en el laboratorio de energías renovables del campus viña del mar de la universidad Técnica Federico Santa María. Lamentablemente este propósito no pudo llevarse a cabo, debido a que los incendios de diciembre de 2022 afectaron a la estación meteorológica, comprometiendo el estado del mástil. Por lo que lamentablemente no se pudo cumplir con este objetivo. Por esto es recomendable realizar la comparación a futuro, con los datos de una torre meteorológica operativa.

Al desarrollar una torre retráctil, se simuló bajo los escenarios de atmosfera estable e inestable con viento perpendicular a la cara de barlovento, variando la intensidad de turbulencia de un 5% a 20%, con ello no se obtienen diferencias significativas en los resultados. Lo mismo ocurre al analizar la variación de intensidad de turbulencia en atmosfera estable para un viento con ángulo de ataque en 45° y perpendicular, variando la intensidad de turbulencia de un 5%, 20% y 30%, los resultados no predominan en ningún caso, por lo que se establece que la intensidad de turbulencia no es significativa para evaluar la interacción fluido estructura.

Por otro lado, al analizar las simulaciones de las distintas secciones se determina que el perfil de presiones dinámicas más crítico ocurre en una atmosfera estable, con ángulo de ataque perpendicular a la cara de barlovento.

De forma parcial se recomendó una forma de instalación sin mayor profundización en el tema, en particular para generar una torre telescópica móvil es necesario montar el mástil de forma horizontal sobre una grúa o remolque con capacidades mecánicas para soportar 6,5 toneladas y un sistema de cabestrante mecánico para izar los 5 niveles. El remolque debe incorporar

zapatas estabilizadoras para anclarse al piso. Junto con ello se sugiere el uso de tensores de forma simétrica, anclados como estacas mediante un sistema hidráulico.

Al analizar la interacción fluido estructura, respecto a la influencia del viento sobre el mástil se puede notar que los vientos característicos de la capa atmosférica de la tierra no comprometen la estabilidad o robustez del mástil, por lo que no se ve comprometido el funcionamiento y objetivo del mástil meteorológico, por ello se puede determinar que no existen riesgos desde el aspecto aeroestructural. Por otro lado, la torre telescópica impacta en la trayectoria del viento ya que este al atravesarla o rodearla genera jets de velocidad y posterior a la torre se producen estelas y un efecto de arrastre.

A partir de lo mencionado anteriormente, en conjunto al análisis de sensibilidad realizado para el mástil telescópico de 5 niveles se concluye la ingeniería básica del diseño innovador para apoyar en la evaluación del recurso eólico.

9. Trabajos posteriores

A partir del estudio realizado y resultados obtenidos se sugiere proceder con simulaciones computacionales incorporando el sistema de traslado y anclaje, enfocándose en el caso más crítico y extremo, es decir escenarios de vientos más estables, lo que se traduce un perfil de velocidades menos logarítmico, con importantes gradientes de temperatura y extremadamente ventosos.

Junto con ello realizar un análisis completo de vibraciones mecánicas, es decir un análisis modal para determinar modos de vibraciones, frecuencia natural y analizar la frecuencia de destrucción.

Se sugiere realizar el análisis computacional en softwares más complejos, que permitan variar el método de discretización de ecuaciones, el número de courant y otros parámetros significativos para la resolución y análisis numérico.

Luego de realizar exhaustivas simulaciones de los casos más críticos o extremos se debe apuntar a la creación de un prototipo a escala del mástil telescópico para ser ensayado en un túnel de viento.

Además, es necesario revisar la normativa chilena para comprobar que los parámetros de presiones dinámica se encuentren dentro de lo permitido.

Referencias

- [1] Dirección Meteorológica de Chile, «Reporte anual de la evolución del clima en Chile,» 2021.
- [2] Panel Intergubernamental del Cambio Climático, «Calentamiento Global de 1,5°C,» 2019.
- [3] Science & Information for a climate-smart nation, «Climate,» [En línea]. Available: <https://www.climate.gov/>. [Último acceso: 14 Marzo 2022].
- [4] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, «Acuerdo de París,» París, 2015.
- [5] Ministerio del Medio Ambiente, «4to Informe Bienal de actualización de Chile sobre Cambio Climático,» 2020.
- [6] Ministerio de Energía, «Carbono Neutralidad en el Sector Energía Proyección de consumo energético nacional 2020,» 2020.
- [7] Ministerio de Energía, «Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) Periodo 2023-2027,» Santiago de Chile, 2021.
- [8] R. L. Cifuentes, «Guía Eólica Desarrollo de proyectos pequeños y medianos,» Santiago de Chile, 2013.
- [9] F. Tilca y M. Malvasio, «Pérdidas e incertidumbres en las probabilidades de excedencia de producción de energía eléctrica de parques eólicos, ejemplo de un caso en la patagonia,» 2019.
- [10] T. Vacev, S. Brčić, A. Zorić, M. Milić, I. Nešović y S. Ranković, «Static and dynamic approach to the analysis of wind gusts in case of a tower H=110m,» 2021.
- [11] S. Fabre, M. Stickland, T. Scanlon, A. Oldroyd y D. K. F. Quail, «Measurement and simulation of the flow field around the FINO,» 2014.
- [12] D. O. Skurtys, «Dinámica de Fluidos Computacional,» 2021.
- [13] OpenCFD Ltd 2022, «Open Foam,» [En línea]. Available: <https://www.openfoam.com/>. [Último acceso: 01 Mayo 2022].
- [14] Copyright ANSYS, Inc., «ANSYS,» [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent#tab1-2>. [Último acceso: 01 Mayo 2022].
- [15] O. L. Naidiuk y P. T. Jara, Introducción al análisis térmico y de fluidos mediante Ansys, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.

- [16] 1994-2022 The MathWorks, Inc., «MATHWorks,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. [Último acceso: 11 Mayo 2022].
- [17] 2022 IGENMAI, «CSI spain,» [En línea]. Available: <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000#>. [Último acceso: 20 Mayo 2022].
- [18] Dlubal Software GmbH, «Dlubal,» [En línea]. Available: <https://www.dlubal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/caracteristicas-de-los-productos/002214>. [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [19] ENGYS Ltd 2022, «engys,» [En línea]. Available: <https://engys.com/products/helyx>. [Último acceso: 04 Junio 2022].
- [20] «HELYX,» [En línea]. Available: <http://www.helyx.es/#toggle-id-5>. [Último acceso: 04 Junio 2022].
- [21] International Electrotechnical Comision (IEC), «Wind energy generation systems- Part 12-1:Power performance measurements of electricity producing wind turbines,» 2005.
- [22] «ISO 4354 Wind actions on structures,» 2009.
- [23] Instituto Nacional de Normalización , «NCh432. Of71: Cálculo de la acción del viento sobre las contrucciones,» 2010.
- [24] V. E. Parnás y P. M. Rodríguez, «Modelación computacional y análisis cualitativo de fallas en el estudio de la vulnerabilidad de torres atirantadas de telecomunicaciones,» Instituto superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2011.
- [25] J. E. R. Cisnero, «Análisis comparativo del impacto de presiones dinámicas de viento sobre una torre de transmisión mediante el uso de dinámica de fluidos computacional,» Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2016.
- [26] A. A. Cantor y N. G. Romero, «Guía de diseño estructural de torres de telecomunicaciones autosoportadas en Colombia para alturas de 20,30 y 40 metros,» Universidad Católica de Colombia, 2019.
- [27] S. Upnere, V. Bezrukovs, V. Bezrukovs, N. Jekabsons y L. Gulbe, «Computational Fluid Dynamics Methods for Wind Resources Assessment,» 2019.
- [28] M. E. O. F.Inambao, «Towe Wake Distortion Effect: A Comprehensive Review of Method and applications,» 2020.
- [29] Gobierno de Navarra, «navarra,» [En línea]. Available: <http://meteo.navarra.es/definiciones/viento.cfm>. [Último acceso: 6 Septiembre 2022].
- [30] y. Cengel y J. Cimbala, Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2006.

- [31] X. Lee, Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology, New Haven, Connecticut, USA: Springer International Publishing AG, 2018.
- [32] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe y E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [33] 2021 MCN PERU, «Monitoreo Climatológico del Norte,» [En línea]. Available: <https://www.monitoreoclimatologicodelnorte.com/ver-mas/economics/eltiempo/gradiente-adiabatico>. [Último acceso: 09 Octubre 2022].
- [34] R. Stull, Practical Meteorology An algebra- based survey of atmospheric science, Canada: The University of British Columbia , 2016.
- [35] J. Manwell y J. M. A. Rogers, Wind Energy Explains Theory, Design and application, John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [36] M. V. López, Ingeniería de la Energía Eólica, Alfaomega Grupo Editor, 2013.
- [37] E. M. Otero, M. E. Z. D. León, G. M. A. Contreras y A. L. López, Efectos de viento en estructuras, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 2015.
- [38] F. M. White, Mecánica de Fluidos, Madrid: McGraw-Hill, 2004.
- [39] H.K.Versteeg y W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, Pearson Education Limited, 2007.
- [40] Minicranes, «Plataformas,» [En línea]. Available: <https://www.minicranes.cl/zapatas-estabilizadoras>. [Último acceso: 01 09 2023].
- [41] «Luxorion,» [En línea]. Available: <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-tower-assembly5.htm>. [Último acceso: 01 09 2023].
- [42] O. P. L. C., «Antenas Arriostradas y Auto Soportadas,» Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato.
- [43] D. Carreón, «SYSCOM Blog,» [En línea]. Available: <https://www.syscomblog.com/2017/04/torres-arriostradas.html>. [Último acceso: 01 09 2023].

Anexos

A. Resultados torre 1 nivel, escala 1:4

Los planos de velocidad para un ángulo de ataque del viento perpendicular a una cara, con intensidad de turbulencia del 20% y 30%

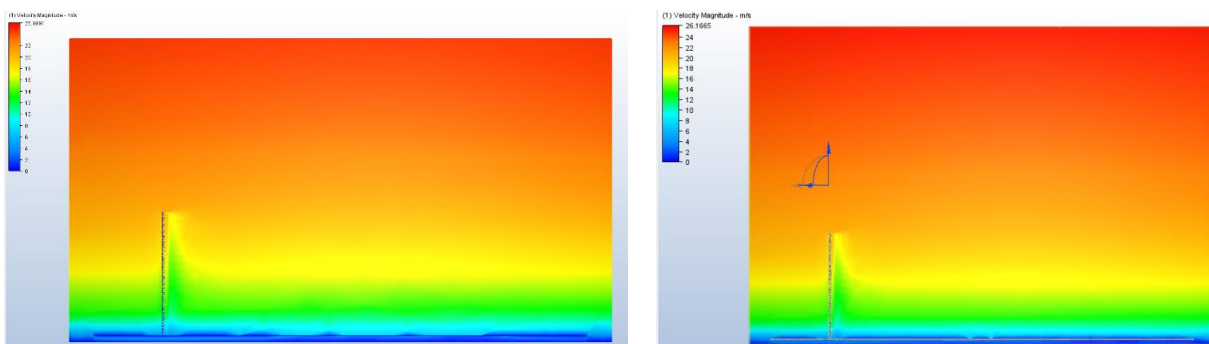


Figura A-1: Plano lateral de velocidades, estratificación neutra 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

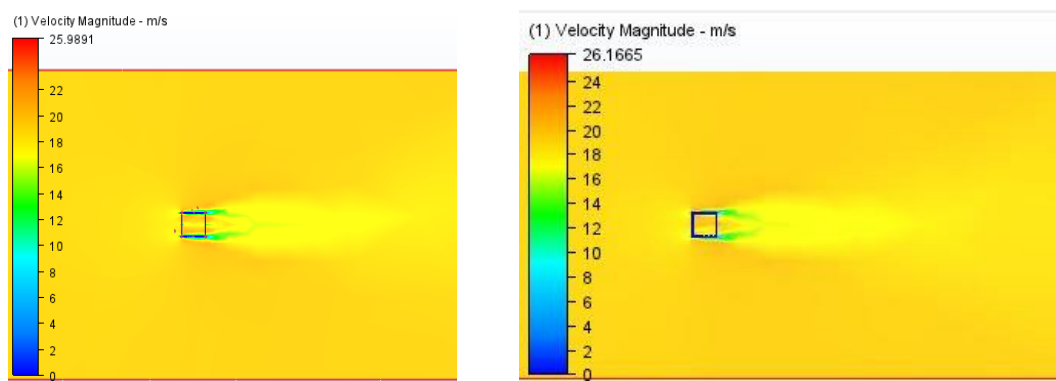


Figura A-2: Plano superior de velocidades, a 10 metros de altura, estratificación neutra 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento normal a una cara.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

A continuación, se presentan los resultados del estudio para la torre rotada en 45° con el viento oblicuo variando la turbulencia de 20 al 30%.

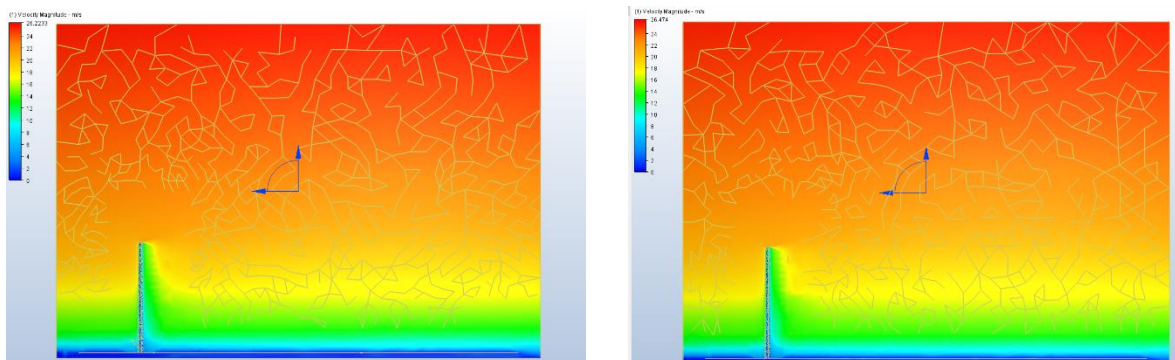


Figura A-3: Plano lateral de velocidades, estratificación neutra 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

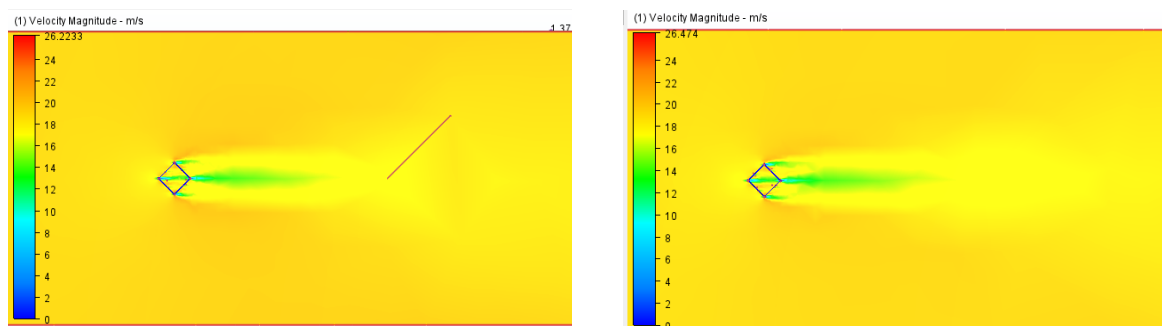


Figura A-4: Plano superior de velocidades, a 10 metros de altura, estratificación estable 20% y 30% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

B. Resultados torre 2 niveles, escala 1:4

Para el caso inestable se presenta primero los resultados para una intensidad de turbulencia del 5%, seguido del escenario para un 20% de intensidad de turbulencia.

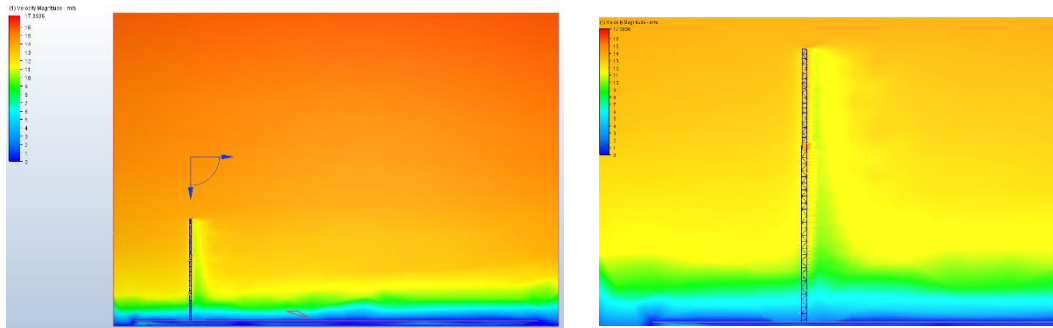


Figura B-1: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

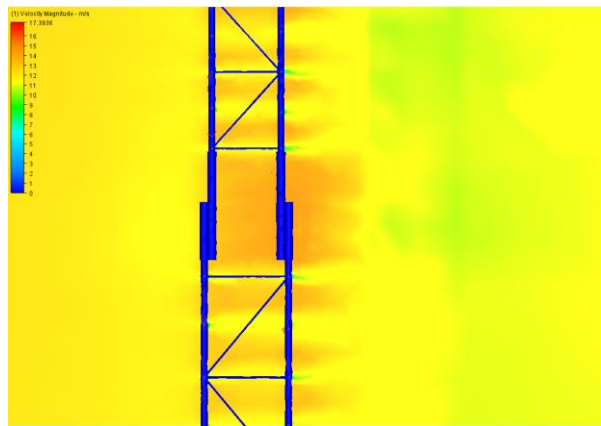


Figura B-2: Detalle unión 2 niveles, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

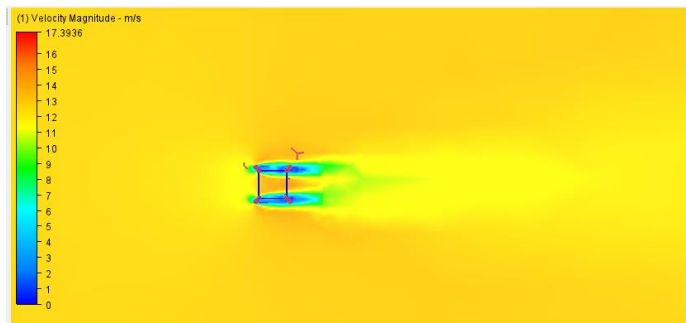


Figura B-3: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

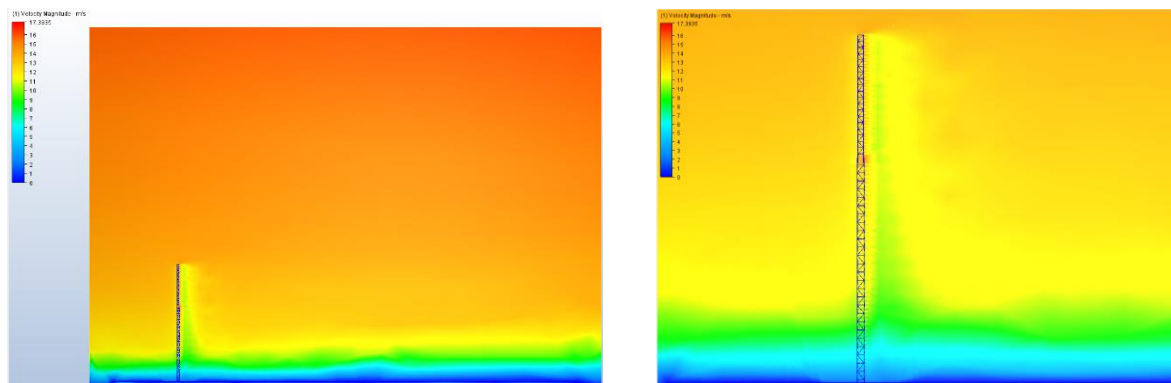


*Figura B-4: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación inestable 20%
Intensidad de turbulencia, viento normal.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

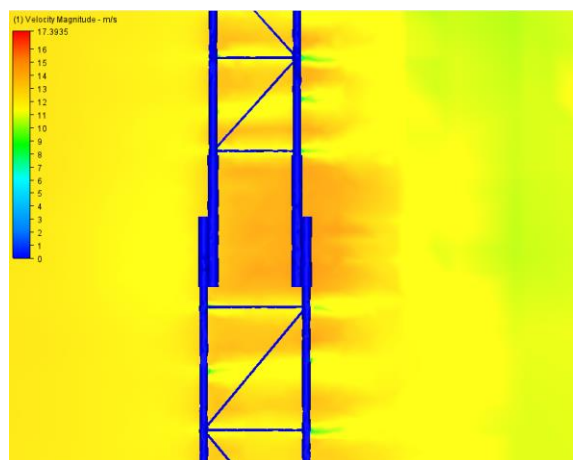


*Figura B-5: Detalle unión 2 niveles, estratificación inestable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

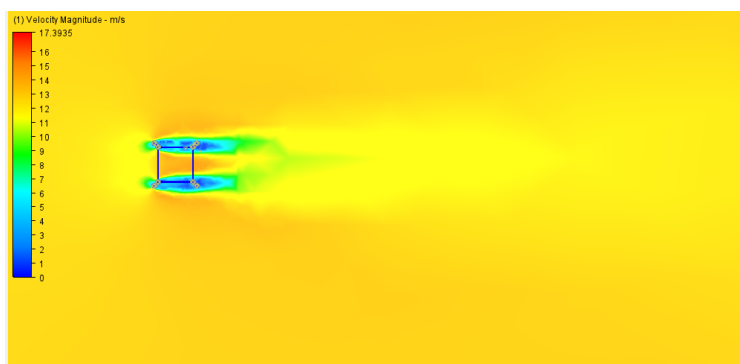


*Figura B-6: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación inestable 20%
Intensidad de turbulencia, viento normal.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

Para el caso estable con una intensidad de turbulencia de 5%

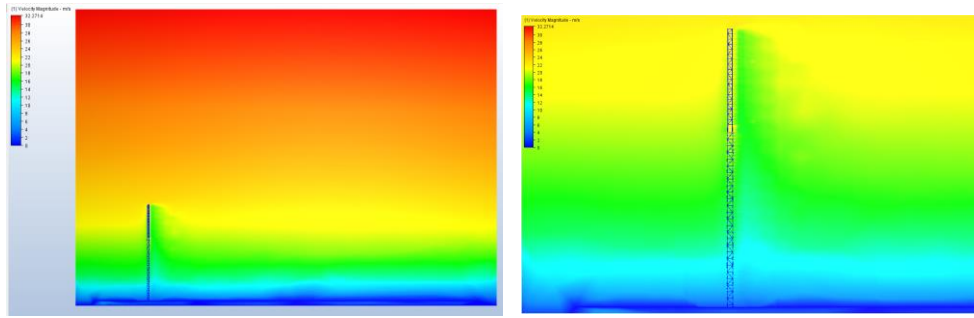


Figura B-7: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

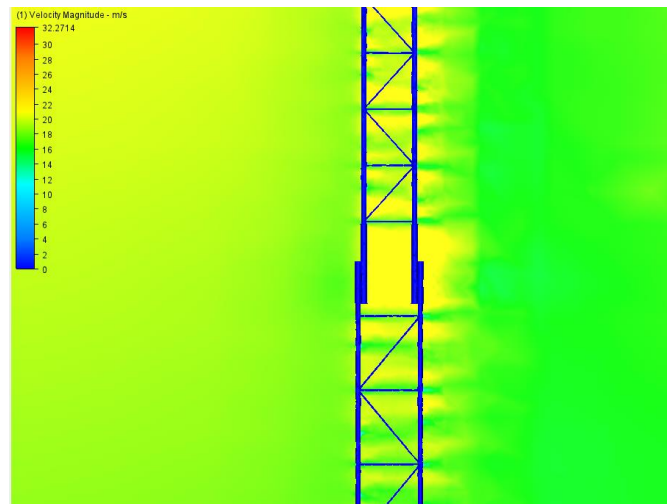


Figura B-8: Detalle unión 2 niveles, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

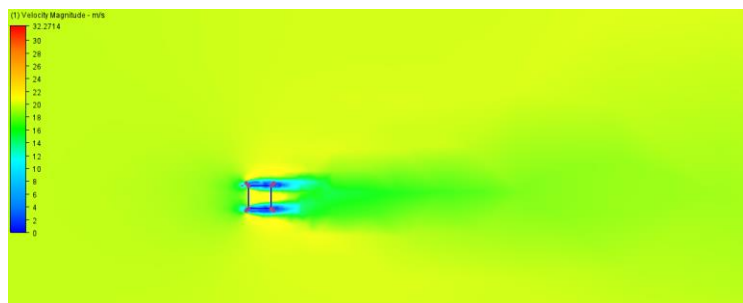


Figura B-9: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

Para el caso estable con una intensidad de turbulencia del 20%

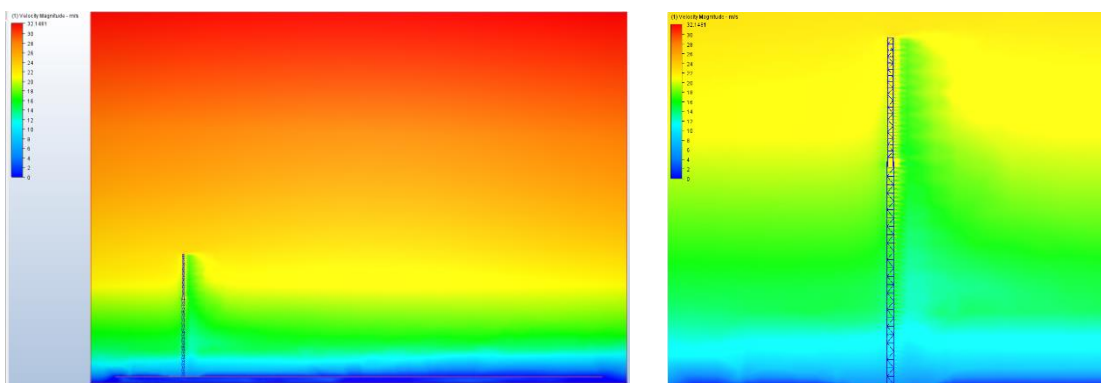


Figura B-10: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 2 niveles estratificación estable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

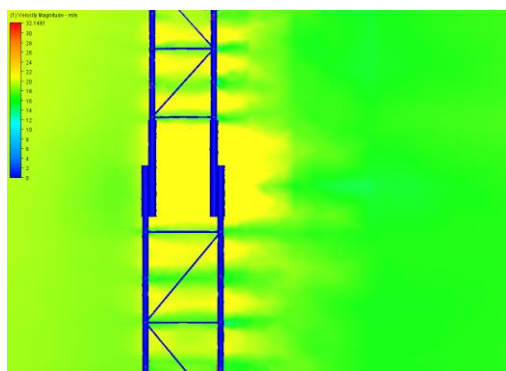


Figura B-11: Detalle unión 2 niveles, estratificación estable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

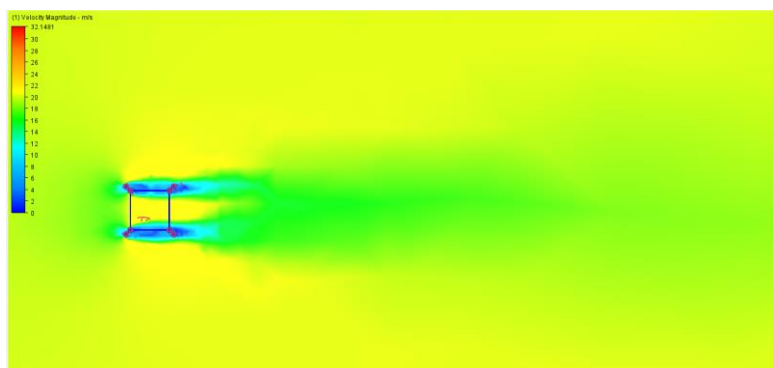


Figura B-12: Plano superior de velocidades, a 8 metros de altura, estratificación estable 20% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

C. Resultados torre 3 niveles, escala 1:8

Los resultados de atmosfera estable para viento perpendicular corresponden a

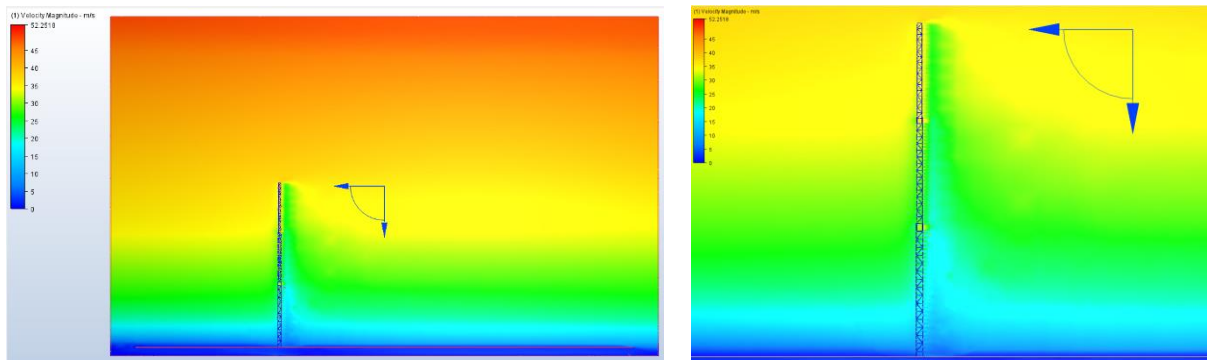


Figura C-1: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

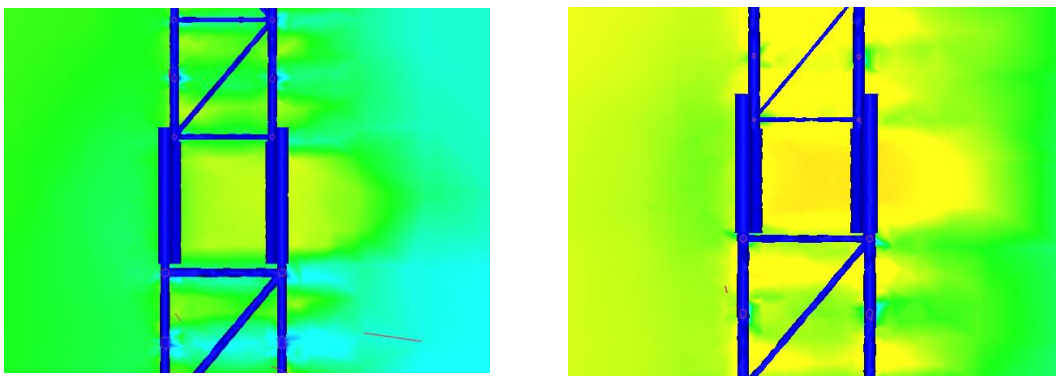


Figura C-2: Detalle piezas de unión entre niveles, izquierda 1-2, derecha 2-3 estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

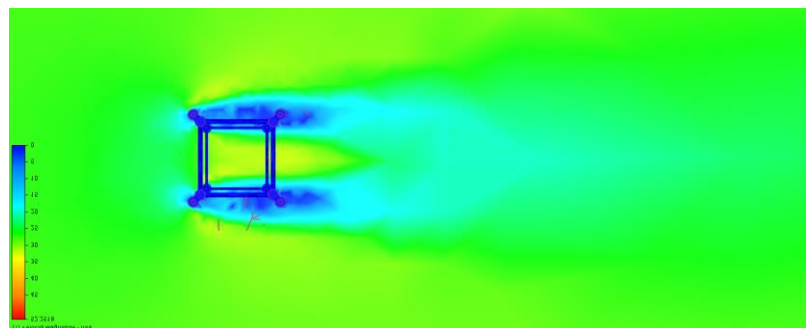


Figura C-3: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

En atmosfera estable para el viento oblicuo se tiene que

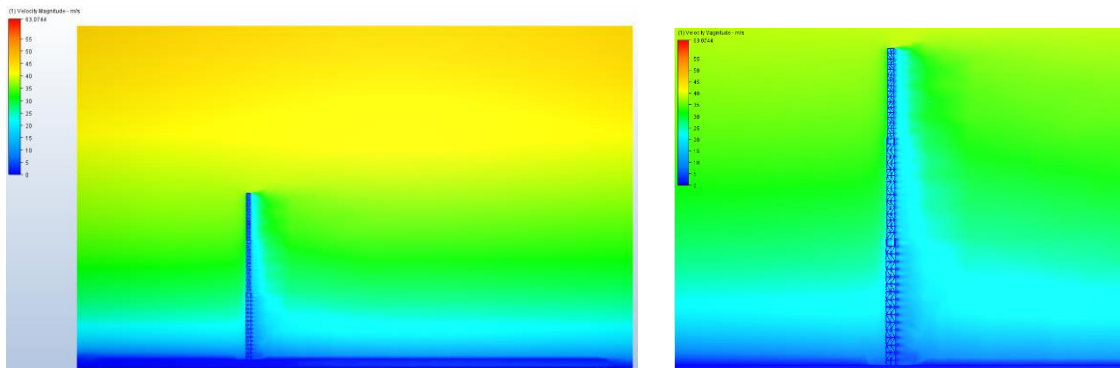


Figura C-4: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

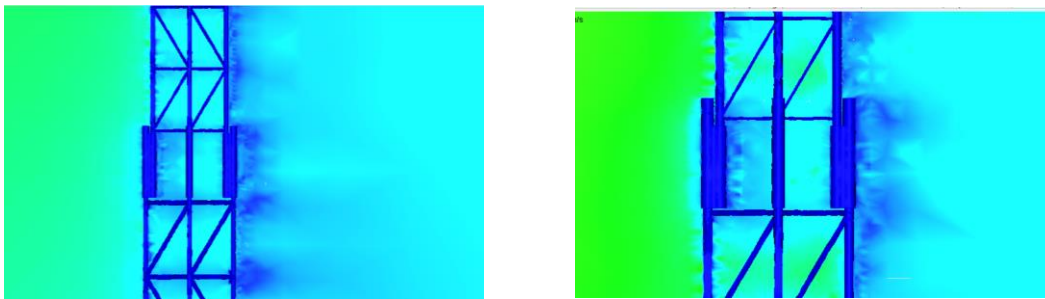


Figura C-5: Detalle pieza de unión, a la izquierda nivel 1-2 a la derecha nivel 2-3, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

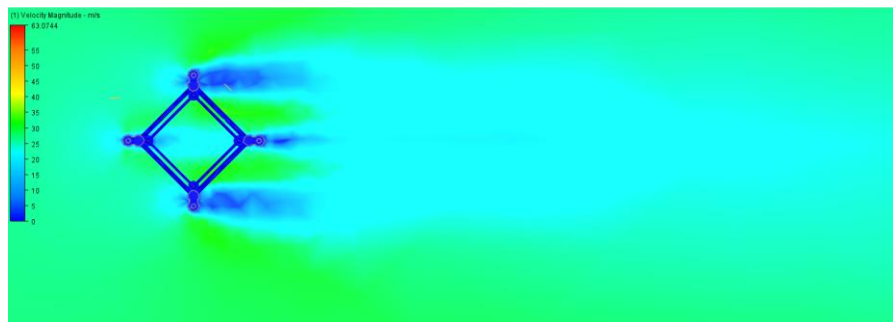


Figura C-6: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación estable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

Por otro lado, para una atmosfera neutra se adjuntan los planos para viento perpendicular a una cara del mástil

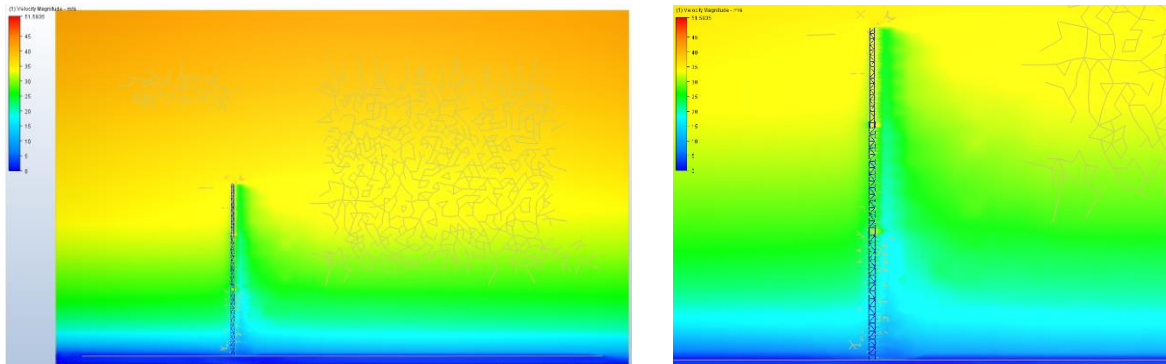


Figura C-7: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

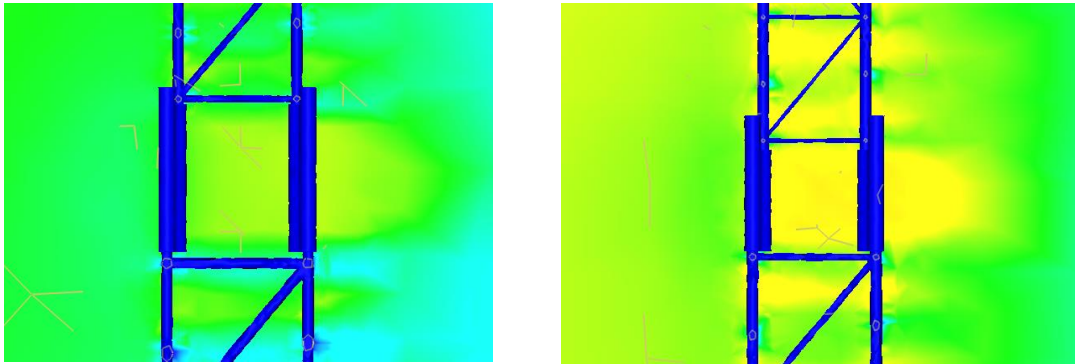


Figura C-8: Detalle piezas de unión entre niveles, izquierda 1-2, derecha 2-3 estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

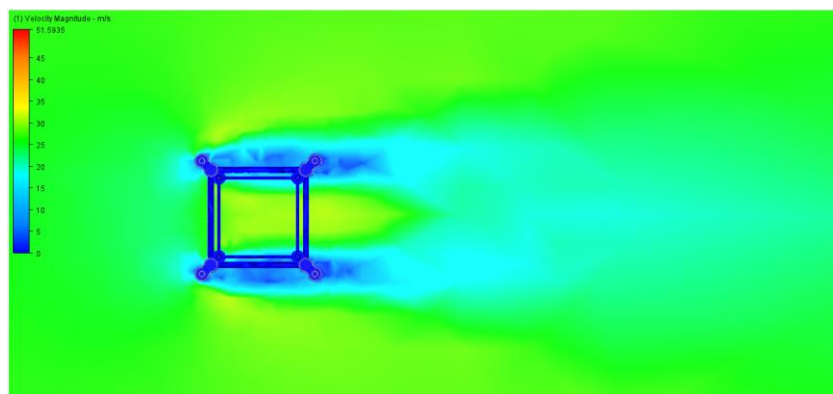


Figura C-9: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

Mientras que para la atmosfera neutra y viento oblicuo se tiene que

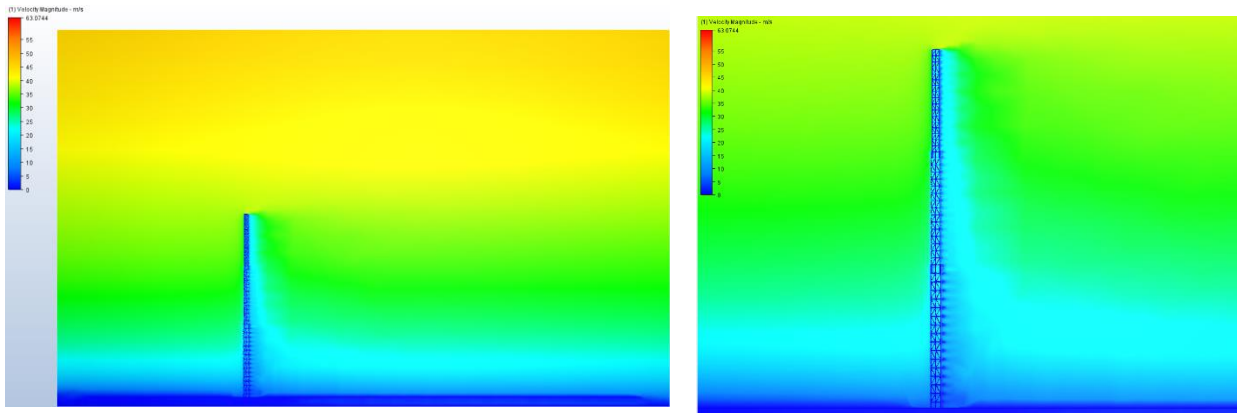


Figura C-10: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

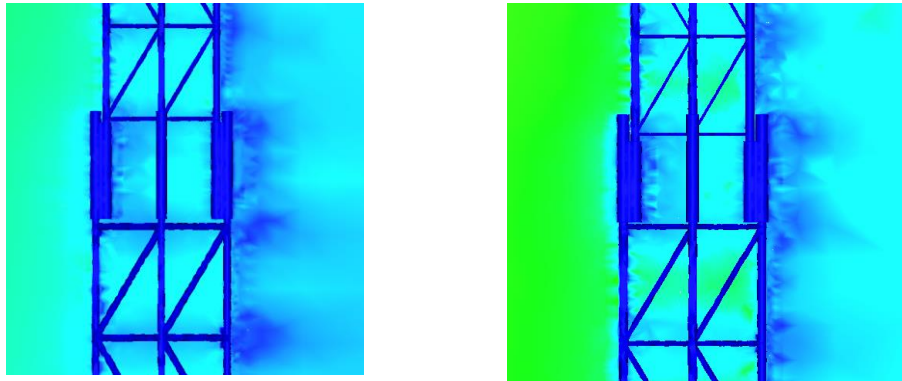


Figura C-11: Detalle pieza de unión, a la izquierda nivel 1-2 a la derecha nivel 2-3, estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

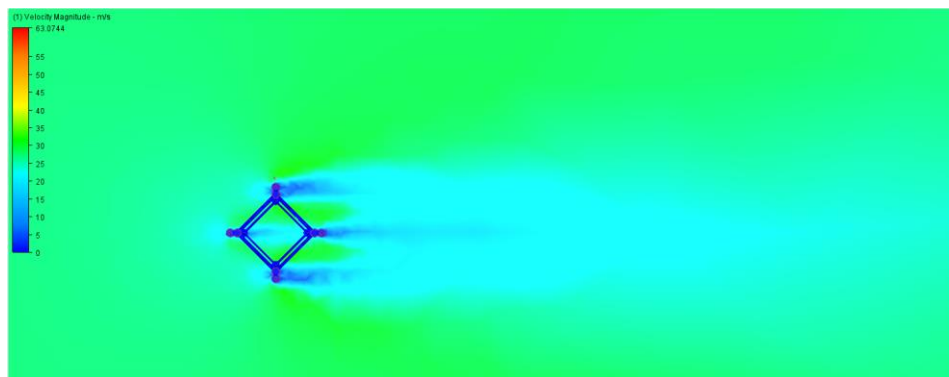


Figura C-12: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación neutra 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

El último caso corresponde a una atmosfera inestable, con ángulo de ataque normal

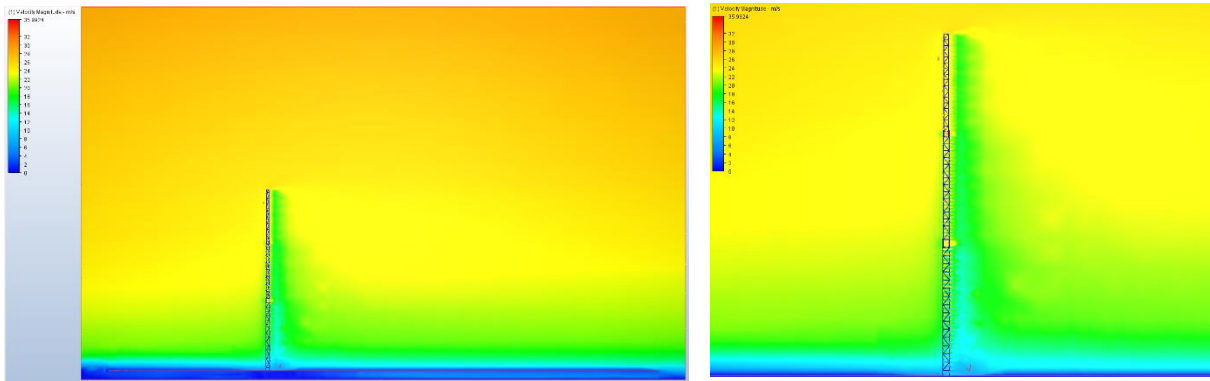


Figura C-13: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

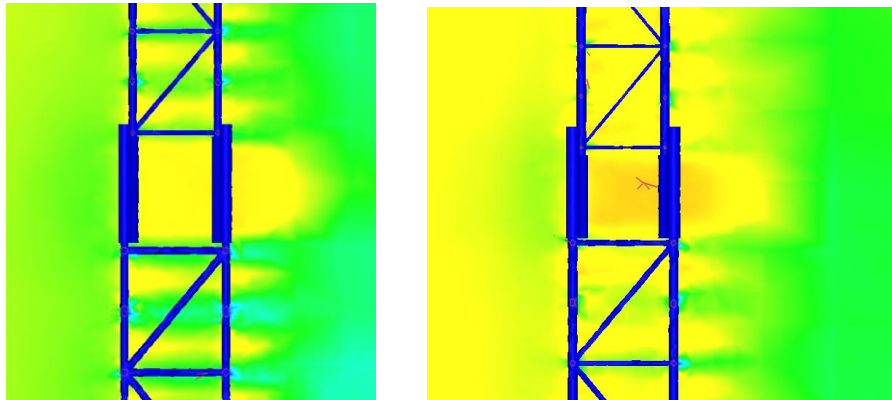


Figura C-14: Detalle piezas de unión entre niveles, izquierda 1-2, derecha 2-3 estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

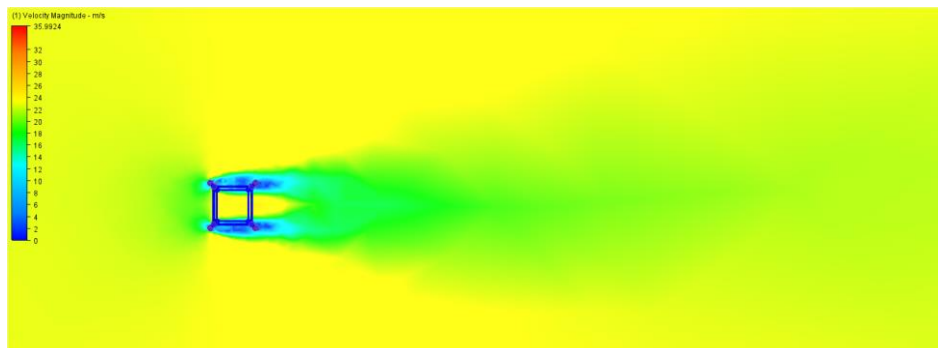


Figura C-15: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento normal.

Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.

Finalmente, para la atmosfera inestable y ángulo de ataque oblicuo, se adjuntan los planos de velocidades

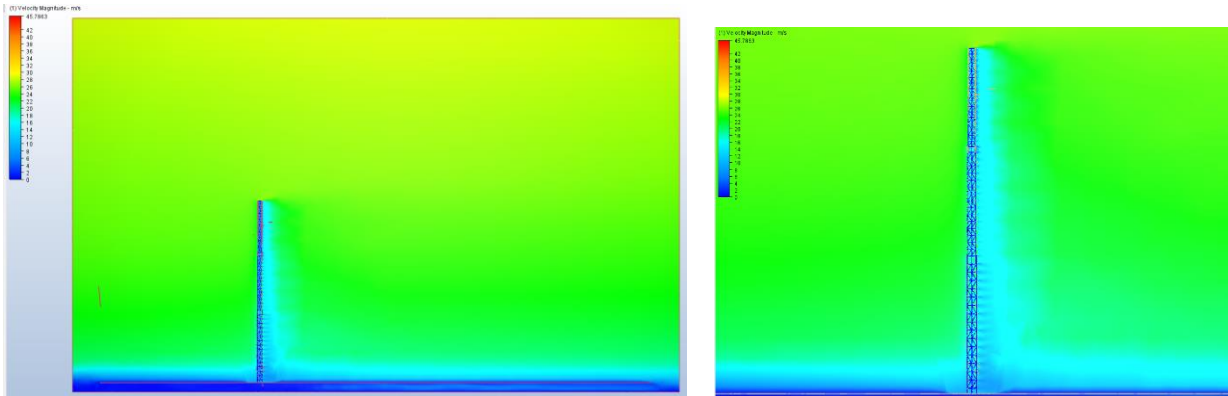


*Figura C-16: Plano y zoom lateral de velocidades, torre 3 niveles estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

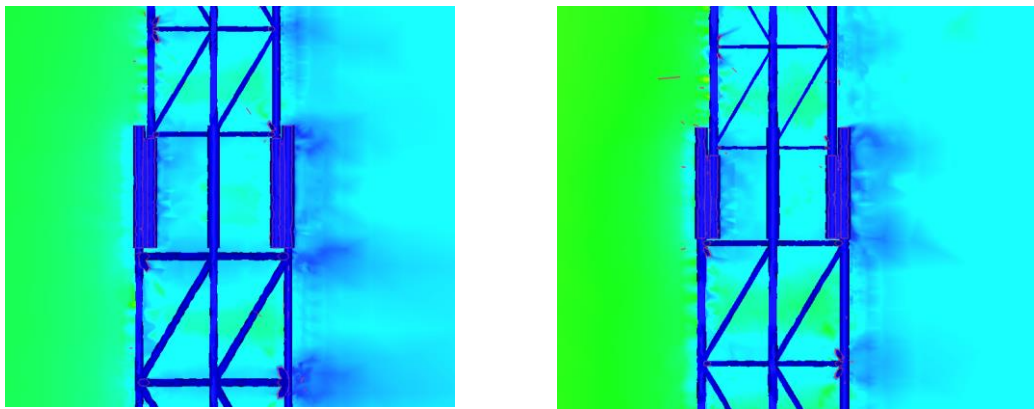


*Figura C-17: Detalle pieza de unión, a la izquierda nivel 1-2 a la derecha nivel 2-3, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

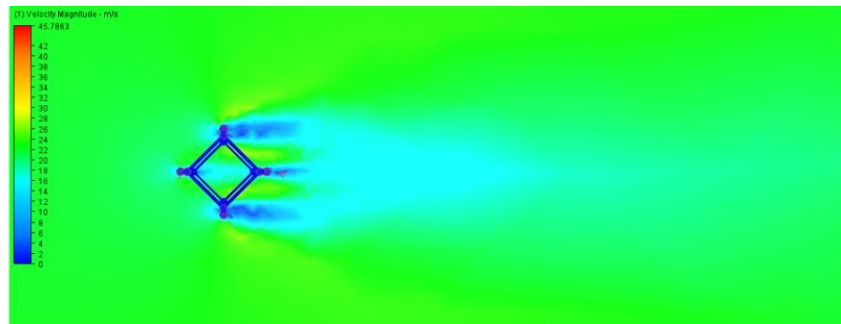


*Figura C-18: Plano superior de velocidades, a 2 metros de altura, estratificación inestable 5% Intensidad de turbulencia, viento oblicuo.
Fuente: Creación propia en CFD Autodesk.*

D. Resultados torre 5 niveles, escala 1:1

Para la estratificación estable, se adjuntan presentan los resultados específicos para un ángulo de ataque perpendicular

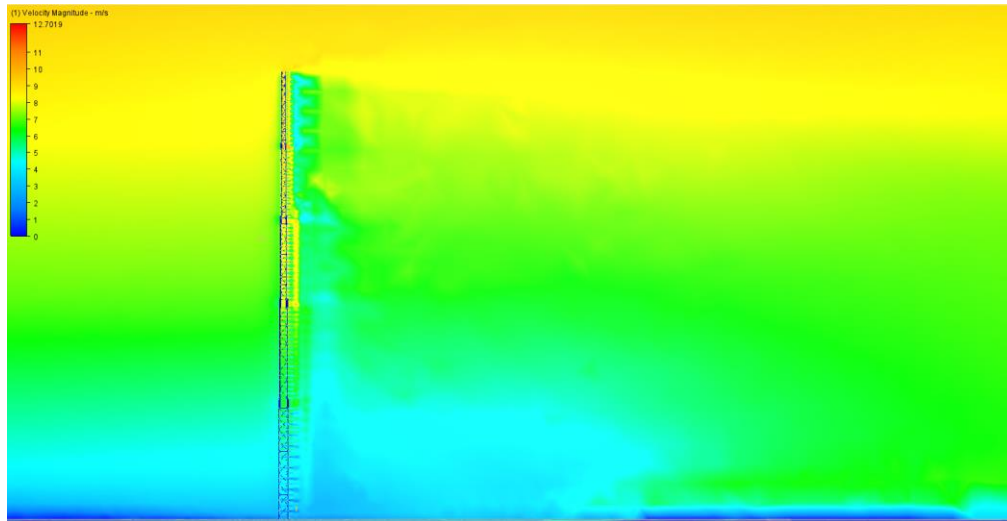


Figura D-1: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento normal a una cara del mástil, estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

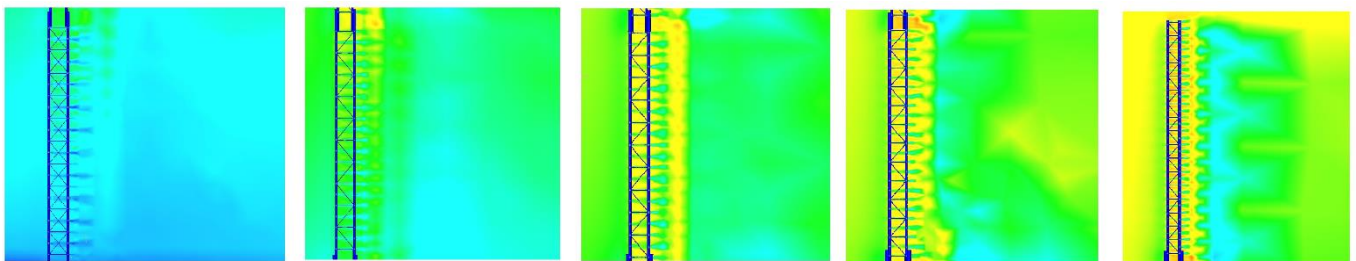


Figura D-2: Zoom nivel 1 a 5 de izquierda a derecha, viento normal a una cara del mástil, estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

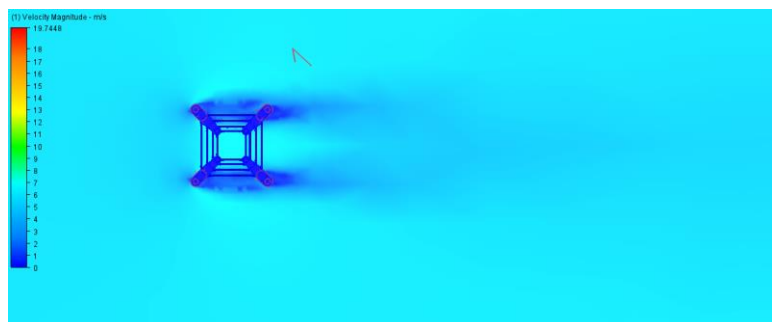


Figura D-3: Vista superior de la trayectoria del viento normal a una cara del mástil estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

Para un ángulo de ataque oblicuo, se presentan dos vistas de planos de velocidad en atmosfera estable

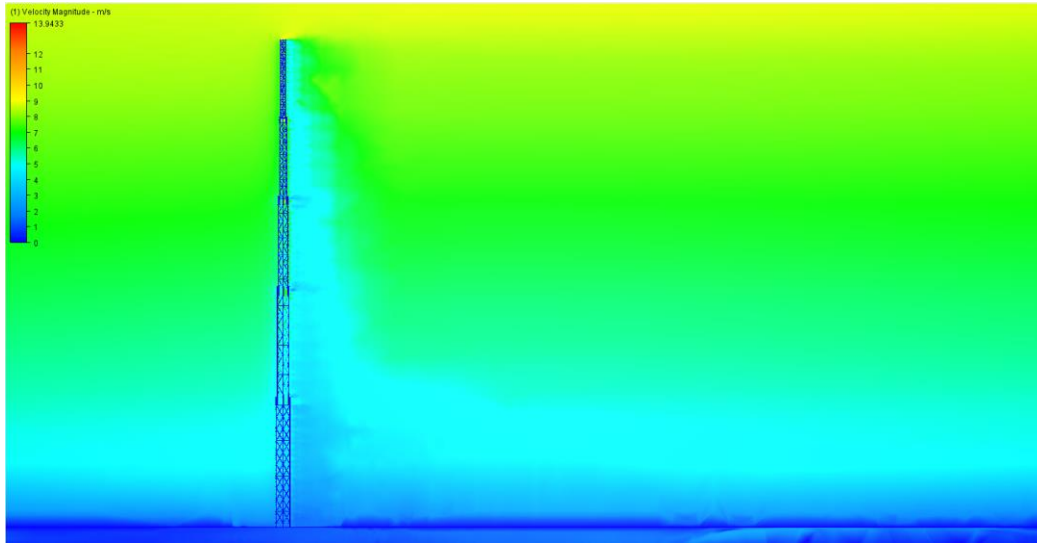


Figura D-4: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento oblicuo al mástil estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

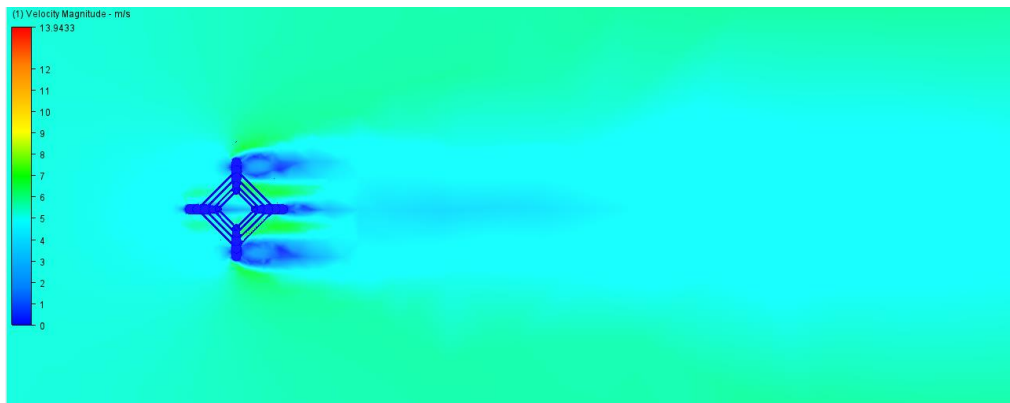


Figura D-5: Vista superior de la trayectoria del viento oblicuo mástil estratificación estable, 5% intensidad de turbulencia.

Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.

De forma análoga se presentan estas vistas para una estratificación neutra con ángulo de ataque perpendicular y oblicuo.

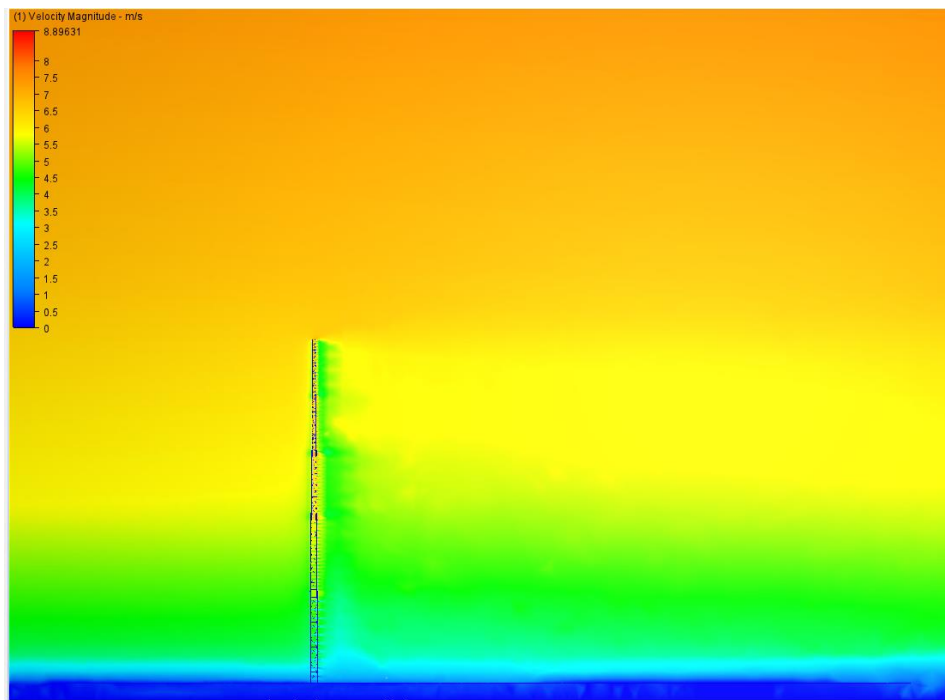


*Figura D-6: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento normal a una cara del mástil, estratificación neutra, 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

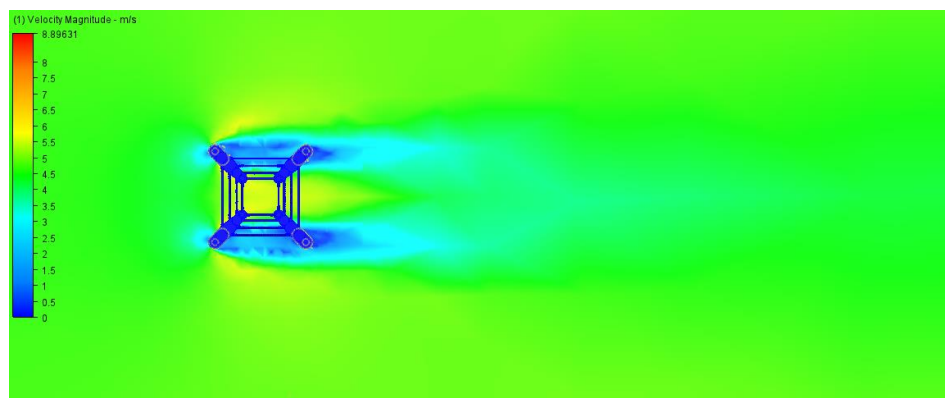


*Figura D-7: Vista superior de la trayectoria del viento normal a una cara del mástil estratificación neutra 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

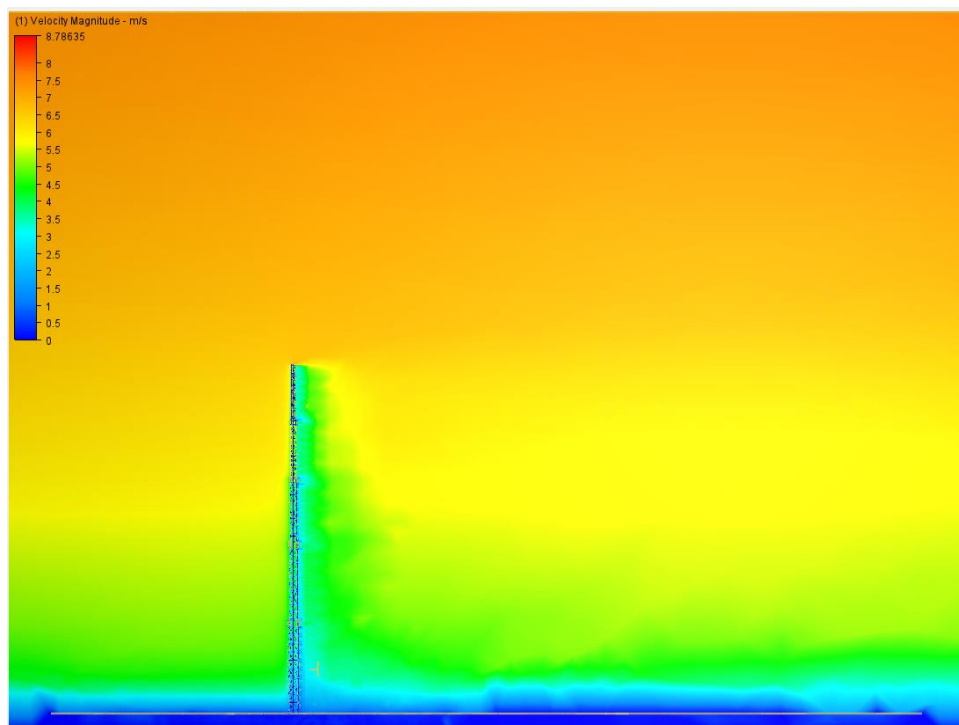


*Figura D-8: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento oblicuo al mástil estratificación neutra, 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

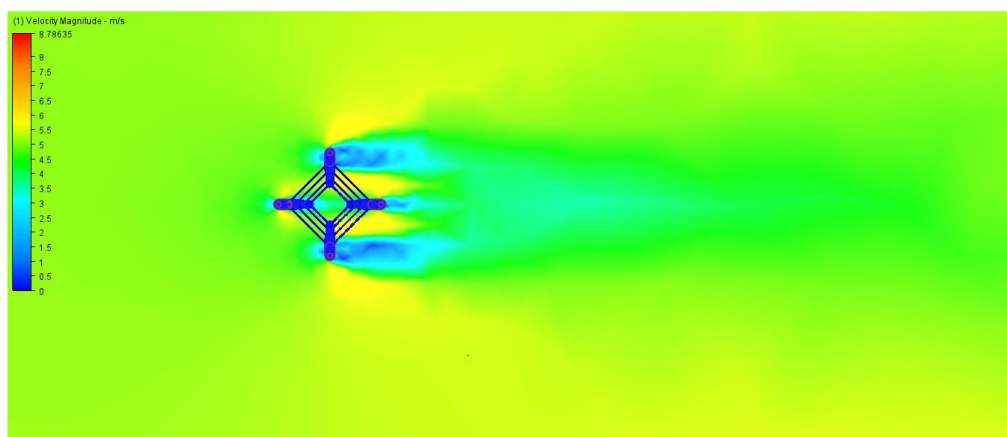


*Figura D-9: Vista superior de la trayectoria del viento oblicuo mástil estratificación neutra, 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

Finalmente, para una atmosfera inestable se presentan los escenarios de viento perpendicular y oblicuo.

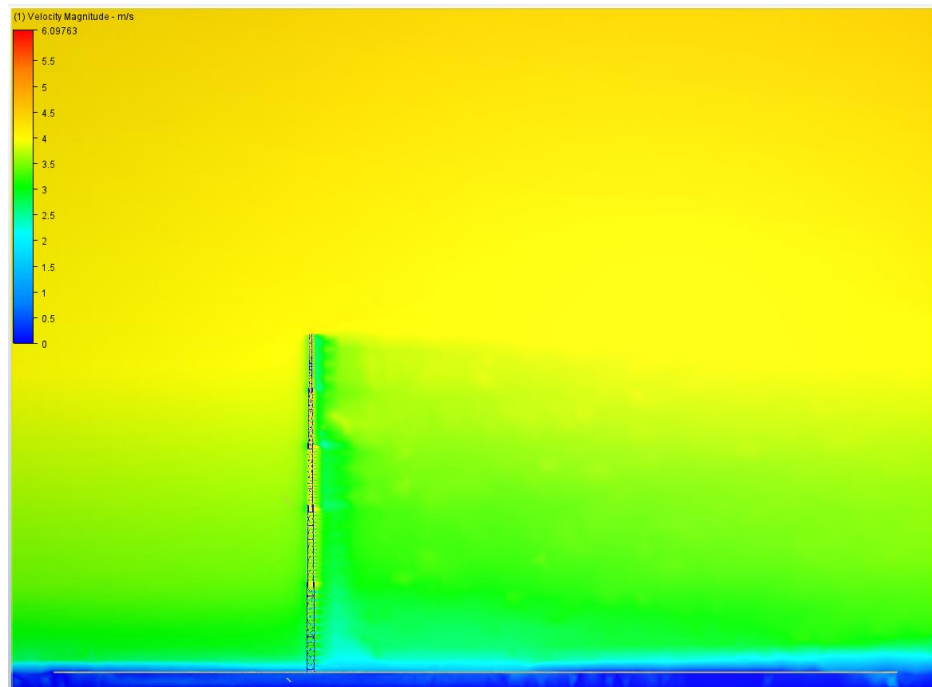


*Figura D-10: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento normal a una cara del mástil, estratificación inestable 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

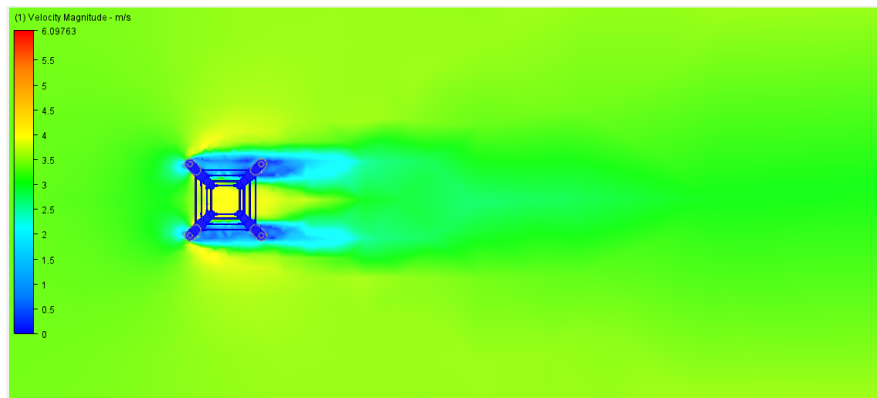


*Figura D-11: Vista superior de la trayectoria del viento normal a una cara del mástil estratificación inestable 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

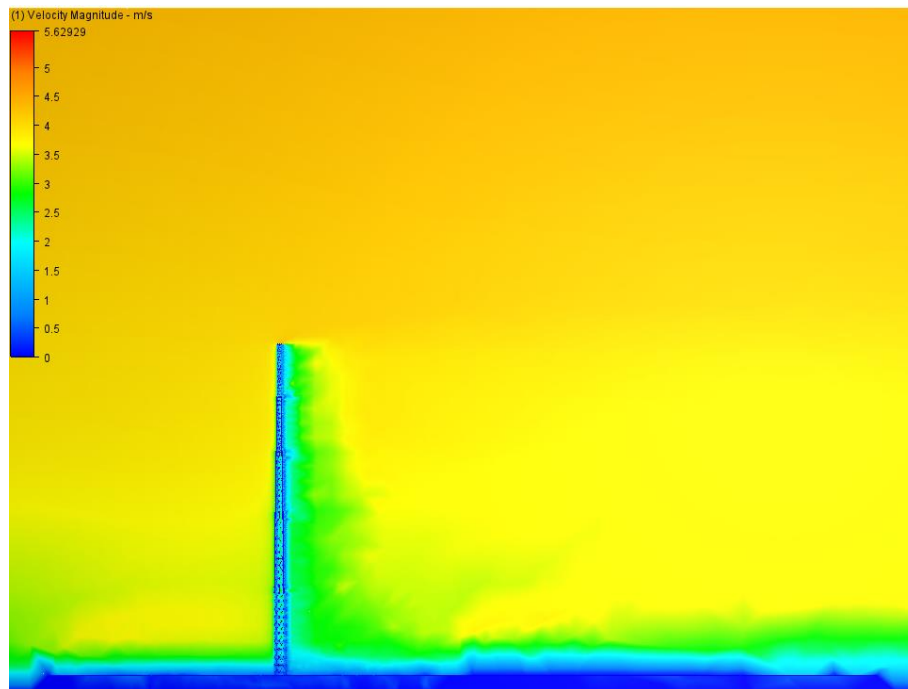


*Figura D-12: Plano lateral de velocidades en la trayectoria del viento oblicuo al mástil estratificación inestable, 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*

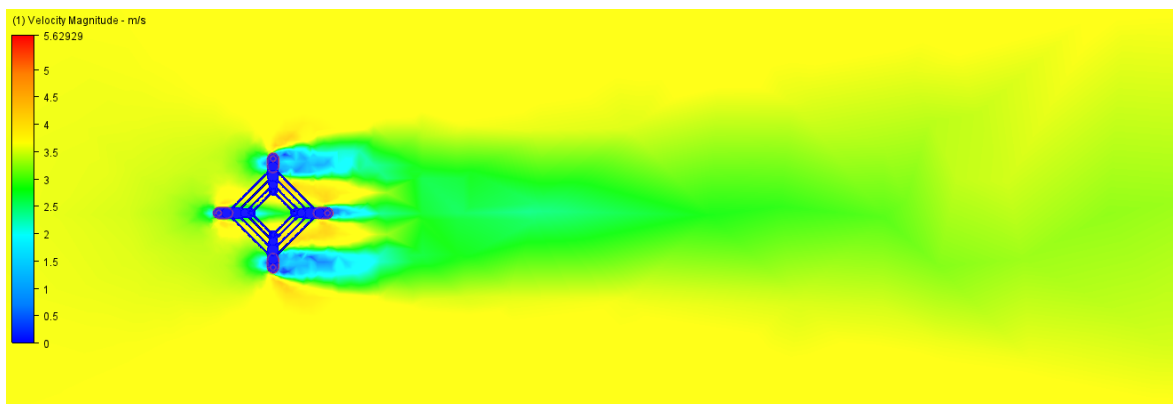


*Figura D-13: Vista superior de la trayectoria del viento oblicuo mástil estratificación inestable, 5% intensidad de turbulencia.
Fuente: Creación propia en software Autodesk CFD.*